



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

LEONARDO JOSÉ SILVA DO VALE

**AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA (RPA) PARA INSPEÇÃO
DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM PONTES E VIADUTOS**

Recife, PE

2024



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

LEONARDO JOSÉ SILVA DO VALE

**AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA (RPA) PARA INSPEÇÃO
DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM PONTES E VIADUTOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós- graduação em Engenharia Civil, da Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Prof. Livre Docente Alberto Casado
Lordsleem Júnior

Recife, PE

2024

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Universidade de Pernambuco

V149a Vale, Leonardo José Silva do
Aeronave remotamente pilotada (RPA) para inspeção de
manifestações patológicas em pontes e viadutos. / Leonardo
José Silva do Vale. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2024.

135 f. il.

Orientador: Prof. Dr. Alberto Casado Lordsleem Júnior

Dissertação (Mestrado – Construção Civil) Universidade de
Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2024.

1. Inspeção de Pontes e Viadutos. 2. Aeronave
Remotamente Pilotada (RPA). 3. Manifestações Patológicas.
I. Construção Civil – Dissertação. II. Lordsleem Júnior,
Alberto Casado (orient.). III. Universidade de Pernambuco,
Escola Politécnica, Mestrado em Construção Civil. IV. Título.

CDD: 690.028 – 23. ed.
Eliane Leitão – CRB4/827

LEONARDO JOSÉ SILVA DO VALE

**AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA (RPA) PARA
INSPEÇÃO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM PONTES E
VIADUTOS**

BANCA EXAMINADORA:

Orientador

Documento assinado digitalmente
 **ALBERTO CASADO LORDSLEEM JUNIOR**
Data: 15/08/2024 09:15:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alberto Casado Lordsleem Júnior
Universidade de Pernambuco

Examinador(a)

Documento assinado digitalmente
 **ELIANA CRISTINA BARRETO MONTEIRO**
Data: 15/08/2024 09:06:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro
Universidade de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 **TIAGO ANCELMO DE CARVALHO PIRES DE OLIVEIRA**
Data: 15/08/2024 07:57:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de
Oliveira
Universidade Federal de Pernambuco

Recife-PE
2024

RESUMO

A deterioração de importantes obras de artes especiais da engenharia como pontes e viadutos, trata-se de um problema mundial, evidenciando a necessidade por inserção tecnológica nos processos de inspeção, notadamente pela necessidade da otimização do tempo e eficiência no processo. As Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) ou “Drones” estão assumindo crescente relevância como novo mecanismo de obtenção de dados e inspeções visuais, mais ágeis e seguros. Este trabalho teve como objetivo a realização de estudo exploratório sobre o uso da RPA como ferramenta para inspeção de manifestações patológicas em pontes e viadutos. A metodologia contemplou a revisão sistemática da literatura considerando o método PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta Analyses*) e a realização de dois estudos de caso, uma ponte e um viaduto sendo desenvolvido o protocolo de atividades com as etapas de planejamento, coleta de imagens e processamento. Os resultados obtidos demonstraram evidências satisfatórias apresentando diferentes vantagens da utilização da aeronave como ferramenta eficaz para coleta de imagens. A pesquisa experimental evidenciou a viabilidade técnica e eficiência do processo de inspeção, permitindo gerar ativos visuais para a detecção de manifestações patológicas, sendo as fotografias mais efetivas quando comparadas aos modelos obtidos através do *software Agisoft MetaShape*. Dentre as principais contribuições, tem-se a agilidade no processo de inspeção, não necessidade de interdição de vias, eliminação de custos para equipamentos como caminhões de inspeção, acesso da aeronave a locais que não seriam possíveis por parte do inspetor, a exposição da aeronave a riscos e não os inspetores, além disso tem-se a formulação das diretrizes para a inspeção de pontes e viadutos com uso da RPA, estruturando o procedimento por meio de formulários e *checklist* que auxiliam nas etapas do serviço. Complementarmente, o trabalho evidenciou o desempenho dos diferentes ativos visuais produzidos (ortomosaicos, modelos 3D e fotografias digitais).

Palavras-chave: inspeção de pontes e viadutos; Aeronave Remotamente Pilotada - RPA; Manifestações patológicas.

ABSTRACT

The deterioration of important works of special engineering engineering, such as bridges and viaducts, is a worldwide problem, highlighting the need for technological inclusion in inspection processes, notably due to the need to optimize time and efficiency in the process. Remotely Piloted Aircraft (RPA) or “Drones” are assuming increasing relevance as a new mechanism for obtaining data and visual inspections, more agile and safer. This work aimed to carry out an exploratory study on the use of RPA as a tool for inspection of pathological manifestations in bridges and viaducts. The methodology included a systematic review of the literature considering the PRISMA method (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta Analyses) and the carrying out of two case studies, a bridge and a viaduct, developing the protocol of activities with the planning stages , image collection and processing. The results obtained showed satisfactory evidence showing different advantages of using the aircraft as an effective tool for image collection. The experimental research showed the technical viability and efficiency of the inspection process, allowing the generation of visual assets for the detection of pathological manifestations, with photographs being more effective when compared to the models obtained through the Agisoft MetaShape software. Among the main contributions, there is agility in the inspection process, no need to block roads, elimination of costs for equipment such as inspection trucks, aircraft access to places that would not be possible for the inspector, exposure of the aircraft to risks and not the inspectors, in addition, there is the formulation of guidelines for the inspection of bridges and viaducts using RPA, structuring the procedure through forms and checklists that help in the stages of the service. Complementarily, the work showed the performance of the different visual assets produced (orthomosaics, 3D models and digital photographs).

Keywords: Inspection of bridges and viaducts; Remotely Piloted Aircraft – RPA; Pathological manifestation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Partes componentes de uma OAE	8
Figura 2: Categorias de ação em OAE.....	18
Figura 3: Utilização de braço mecânico para vistoria em OAE.....	19
Figura 4: Utilização do alpinismo industrial para vistoria em OAE.....	20
Figura 5: Estações de pilotagem remota (RPS)	22
Figura 6: Tipos de RPA por características aerodinâmicas	22
Figura 7: Classificação de RPA pela ANAC	23
Figura 8: Panorama da Regulamentação da RPA no mundo.....	25
Figura 9: Tipos de operações da RPA	26
Figura 10: Processo de captura de imagens para fotogrametria	31
Figura 11: Fotografia digital em projeção cônica e ortogonal.....	33
Figura 12: Criação de ortomosaico a partir de ortofotos	34
Figura 13: Exemplo de mapa de danos.....	35
Figura 14: Metodologia da pesquisa.....	37
Figura 15: Fluxograma da seleção de artigos	41
Figura 16: Protocolo de atividades.....	43
Figura 17: Número mínimo de fotografias por vista lateral	45
Figura 18: Posição para captura de imagens, vista em planta	48
Figura 19: Posição para captura de imagens para vista superior	48
Figura 20: Sequência para coleta de imagens para cada vista da OAE	49
Figura 21: Sequência para coleta de imagens para vista superior da OAE	50
Figura 22: Posicionamento das tomadas fotográficas para vista lateral.....	50
Figura 23: Posicionamento das tomadas fotográficas para vista superior	51
Figura 24: Relação de distância entre as tomadas fotográficas	52
Figura 25: Fluxo de trabalho Agisoft Metashape	54
Figura 26: Equipamentos RPA utilizados.....	57
Figura 27: Controles das aeronaves utilizadas.....	58
Figura 28: Fotografia aérea do estudo de caso A	60
Figura 29: Imagem de satélite do estudo de caso A	61
Figura 30: Croqui com as vistas analisadas.....	61
Figura 31: Plano de voo Drone Deploy estudo de caso A	62
Figura 32: Fotografia aérea do estudo de caso B	63
Figura 33: Imagem de satélite do estudo de caso B	64
Figura 34: Plano de voo drone Deploy estudo de caso B.....	64
Figura 35: Vantagens e desvantagens da RPA do tipo quadricóptero.....	72
Figura 36: Características mínimas do equipamento para inspeção visual de OEA's	73

Figura 37: Comparativo de procedimentos para inspeção visual de fachadas	74
Figura 38: planejamento para decolagem e pouso estudo de caso A	76
Figura 39: planejamento para decolagem e pouso dos estudos de caso.....	81
Figura 40: Montagem do equipamento RPA Mavic 2 Pro em campo	83
Figura 41: Coleta de imagens com a RPA	84
Figura 42: Sequência de processamento dos estudos de caso	89
Figura 43: Mapa de danos das vista laterais Leste/ Norte.....	93
Figura 44: Mapa de danos das vista laterais Oeste / Sul	94
Figura 45: Mapa de danos vista superior	96
Figura 46: Modelos digitais 3D gerados nos estudos de caso	99
Figura 47: Comparativo do ortomosaico gerado da vista superior estudo de caso A e projeto.....	102
Figura 48: Comparativo do ortomosaico vista Oeste gerado e projeto estudo de caso A	105
Figura 49: Comparativo do ortomosaico gerado da vista superior e projeto estudo de caso A.....	105
Figura 50: Detalhe de patologia detectado através do modelo ortomosaico no estudo de caso A. ...	106
Figura 51: Distorção no modelo 3D no estudo de caso A.....	107
Figura 52: Diretrizes para a inspeção de manifestações patológicas em OEA's.....	108

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Tipos de manifestações patológicas associadas às estruturas em concreto.....	11
Quadro 2: Instruções para atribuição de notas de avaliação.....	15
Quadro 3: Classificação da condição de OAE segundo os parâmetros estrutural, funcional e de durabilidade.....	17
Quadro 4: Características da RPA utilizada nos estudos incluídos.....	27
Quadro 5: Variações de textura Agisoft Metashape.....	55
Quadro 6: Dados gerais sobre os estudos realizados.....	66
Quadro 7: Características da RPA utilizada nos estudos incluídos.....	68
Quadro 8: Resultados dos estudos incluídos.....	70
Quadro 9: Formulário de planejamento estudo de caso A.....	83
Quadro 10: Formulário de planejamento estudo de caso B.....	85
Quadro 11: Formulário de planejamento dos estudos de caso.....	90
Quadro 12: Planilha flight log.....	91
Quadro 13: Quantitativos dos modelos gerados.....	94
Quadro 14: Tempo de processamento no Agisoft Metashape.....	101

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANAC Agência Nacional de Aviação Civil

ANATEL Agência Nacional de Telecomunicações

BVLOS *Beyond Visual Line of Sight*

CAA *Civil Aviation Authority*

CAPES Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CASA *Civil Aviation Safety Authority*

CAVE Certificado de Autorização de Voo Experimental

DECEA Departamento de Controle do Espaço Aéreo

DNER Departamento Nacional de Estradas e Rodagens

DNIT Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DIAM Declaração de Inspeção Anual de Manutenção

DJI *Dà-Jiāng Innovations Science and Technology*

DSM *Dense Stereo Matching*

EASA *European Aviation Safety Agency*

EUA Estados Unidos de América

EVLOS *Extended Visual Line of Sight*

FAA Federal Aviation Administration

HD *High Definition*

IBAPE Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia

ICA Instrução do Comando da Aeronáutica

ISPRS *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*

MDS Modelo Digital da Superfície

OACI Organização de Aviação Civil Internacional

OAE Obra de Arte Especial

PDI Processamento Digital de Imagens

PMD Peso Máximo de Decolagem

PRISMA *Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*

RBAC Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial

RPA *Remotely Piloted Aircraft*

RPAS *Remotely Piloted Aircraft System*

SARPA Sistema para solicitação de acesso espaço aéreo brasileiro por aeronaves não tripuladas

UAV *Unmanned Aerial Vehicle*

VANT Veículo Aéreo Não Tripulado

VLOS *Visual Line of Sight*

VMC *Visual Meteorological Conditions*

3D Tridimensional

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	3
1.1 Justificativa	4
1.2 Objetivos.....	5
1.2.1 Objetivo Geral	5
1.2.2 Objetivos Específicos	5
1.3 Estrutura do trabalho.	6
2 INSPEÇÃO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM PONTES E VIADUTOS COM RPA	8
2.1 Aspectos construtivos de pontes e viadutos.....	8
2.2 Tipos de manifestações patológicas.....	9
2.3. Inspeção de manifestações patológicas	14
3 AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA (RPA).....	21
3.1 Definição e características gerais.....	21
3.2 Classificação da RPA.....	22
3.3 Panorama regulatório para uso da RPA.	24
3.3.1 Internacional.	24
3.3.2 Brasil.....	26
4 FOTOGRAMETRIA	29
4.1 Definição e características gerais	29
4.2 Fases da fotogrametria.....	31
4.3 Técnica <i>Dense Stereo Matching</i>	32
4.4 Ortofotografia e ortomosaíco.	33
4.5 Mapade danos.	34
5 METODOLOGIA.....	36
5.1 Delineamento de pesquisa	36
5.2 Pesquisa exploratória - Revisão sistemática pelo método PRISMA	39
5.3 Pesquisa experimental - campo.	42
5.3.1 Protocolo de atividades a realizar	42
5.3.1.1 Pré-inspeção: Formulário de planejamento	43
5.3.1.2 Inspeção: <i>Checklist</i> para missão com RPA	45
5.3.1.3 Pós-execução: Planilha Flight Log	46
5.3.2 Técnica de captura de imagens	47
5.3.2.1 Posicionamento da câmera	47

5.3.2.2 Sequência de captura	49
5.3.2.3 Sobreposição entre fotografias	50
5.3.2.4 Iluminação e sombras	52
5.3.2.5 Equipe para captura de imagens	52
5.3.3 Software e equipamentos utilizados	53
5.3.3.1 Software de fotogrametria digital	53
5.3.3.2 Aeronave Remotamente Pilotada	56
5.4 Escolha das OAE's para estudos de caso.....	58
5.4.1 Estudo de caso A	59
5.4.2 Estudo de caso B	63
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
6.1 Pesquisa exploratória	65
6.1.1 Resultados da revisão sistemática pelo método PRISMA.....	65
6.2 Pesquisa experimental.....	75
6.2.1 Treinamento do procedimento.....	75
6.2.2 Pré-inspeção.	76
6.2.3 Inspeção.	82
6.2.4 Pós-inspeção.	85
6.2.5 Detecção de manifestações patológicas.....	91
6.3 Análise dos resultados.	98
6.3.1 Análise de captura de imagens.	98
6.3.2 Análise do processamento de imagens.	99
6.3.3 Análise da detecção de manifestações patológicas.....	106
6.4 Diretrizes.	108
7 CONCLUSÕES.....	111
7.1 Considerações finais.	111
7.2 Recomendações para trabalhos futuros.	112
8 REFERÊNCIAS	114

1 INTRODUÇÃO

As estruturas de grande porte em concreto, comuns no país, representam um papel fundamental em vários setores da economia brasileira. A degradação associada ao aumento de riscos ocasionados pela ausência de manutenção dessas estruturas, sobretudo nas obras de arte especiais - OAE's, como pontes e viadutos é um problema devido à ausência de estratégias voltadas a sua conservação (BENTO, 2021; SILVA; MONTEIRO; VITÓRIO, 2018).

A garantia da estabilidade estrutural e segurança pública está diretamente ligada a execução de manutenções oportunas, tornando-se indispensável a realização de inspeção de pontes e viadutos para análise de suas condições (JUNG *et al.*, 2019). A execução da inspeção de OAE é fundamental para verificação do estado de conservação, pois estas estruturas podem ser acometidas por diversos tipos de manifestações patológicas como trincas, corrosão, eflorescência, fragmentação e ferragens expostas ao longo de sua vida útil.

O tipo de inspeção em pontes mais utilizado é o visual sendo também o mais antigo (DORAFSHAN; THOMAS; MAGUIRE, 2018), porém subjetivo (dependente da experiência dos inspetores), demorado, trabalhoso, caro e inseguro para os inspetores levando a resultados inconsistentes (REVEN; FRITSCHER; CHEN, 2019). Este método convencional pode necessitar de aparatos especiais como caminhões de inspeção sob a ponte além de profissionais qualificados.

Mais recentemente existe um elevado interesse na utilização da Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) em muitas áreas, não sendo exceção para inspeção de pontes e viadutos. Essa tecnologia vem obtendo bastante interesse entre os inspetores de estruturas elevadas devido aos custos e as práticas ineficientes de inspeção de pontes utilizadas atualmente (DUQUE; SEO; WACKER, 2018). As RPAs são responsáveis pela geração de recursos exclusivos, dentre eles a capacidade de realização do voo próximo ao local de pontes e viadutos com acessibilidade limitada, transporte de câmeras de alta resolução e a presença de sensores que auxilia nas limitações de acesso as estruturas (SEO *et al.*, 2018b; GUERRERO; BESTAOUI, 2013).

Assim, este equipamento trata-se de uma aeronave pilotada de maneira remota através de coordenadas predefinidas (IRIZARRY; COSTA, 2016). Recentemente esta ferramenta vem sendo potencializada com relação ao seu uso tanto no Brasil quanto em outros países, tornando-se cada vez mais frequente sua utilização em áreas como agricultura, silvicultura, arqueologia, arquitetura e construção civil (ÁLVARES *et al.*, 2016).

A regulamentação brasileira relativa ao uso de drones está sob a responsabilidade da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), a qual publicou em 2017 a norma para o controle das aeronaves não tripuladas de uso civil, Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial – RBAC –E nº 94 (ANAC, 2017). Tal regulamento determina as condições para operação da RPA

em território brasileiro, buscando o seu uso de maneira sustentável e seguro.

Diferentes pesquisadores têm feito esforços significativos para detectar danos usando a RPA (ELLENBERG *et al.*, 2016; HUTCHINSON; CHEN, 2010; KHALOO *et al.*, 2018; KIM *et al.*, 2015). Assim, a Aeronave Remotamente Pilotada torna-se uma ferramenta fundamental como sistema de detecção e avaliação não destrutiva para inspeções de pontes de uma forma mais segura, rápida, barata e confiável sem interrupção do tráfego (JUNG *et al.*, 2019). Devido a essas potenciais vantagens, a inspeção de pontes usando RPA demonstra um elevado potencial sendo objeto de estudo em diversas localidades, incluindo Estados Unidos, Europa, Austrália, Japão, China e Coreia (CHEN *et al.* 2019, DARBY *et al.*, 2019, JUNG *et al.*, 2019).

1.1 Justificativa

São vários os problemas relacionados com o envelhecimento das estruturas, surgindo a necessidade de garantir a segurança e o desempenho adequado ao longo do tempo, por meio de um processo de aplicação dos métodos e técnicas que monitoram periodicamente estas construções com o objetivo de acompanhar suas condições (ZOLLINI *et al.*, 2019). Segundo Hasan e Elwakil (2020) são várias as causas de deterioração da ponte, dentre elas se incluem: projeto ou construção inadequada, ambientes agressivos, sobrecarga, impactos acidentais, falta de manutenção e envelhecimento.

Young *et al.* (2019) tratam dos aparecimentos de manifestações patológicas em pontes e viadutos que podem ser evidenciadas de diversas formas como trincas, corrosão, eflorescência, fragmentação e ferragens expostas ao longo de sua vida útil atreladas às necessidades de um método de inspeção diferente das tradicionais inspeções. A partir dessas considerações, as técnicas e métodos para inspeções e controles periódicos de pontes e viadutos ao longo do tempo, tornam-se fundamentais.

Kirk e Mallett (2013) realizaram um estudo para estimativa do custo necessário para a inspeção de um número crescente de pontes deficientes usando as técnicas de inspeção atual realizada com utilização de equipamentos de acesso caros, percebendo que a tecnologia da RPA tem potencial para reduzir eficientemente o custo e complementar procedimentos de inspeção de pontes. Além disso, autores como Kim *et al.* (2016), Emelianov; Bulgakow; Sayfeddine (2014) enfatizam as vantagens da utilização da RPA, notadamente pelo aumento da velocidade e expansão da cobertura de realização das atividades de captura de imagens, além da diminuição do risco de segurança das pessoas.

Morgenthal *et al.* (2019) propuseram uma estrutura abrangente para inspeção automatizada de pontes baseadas em RPA e avaliação de suas condições. Existe uma atenção crescente focada na extração de informações quantitativas de imagens incluindo a identificação

e quantificação de características (como detecção de trincas e regiões de deterioração) e além de respostas mecânicas (como deslocamentos e deformações).

Publicações recentes de Ruiz (2020), Hung *et al.* (2018), Medeiros, Patriota e Torres (2017), Reagan; Sabato; Niezrecki (2017), Irizarry e Costa (2016), Mader *et al.* (2016), Vera (2016) e Yang *et al.* (2015), demonstraram a eficácia e vasta aplicação do drone para obtenção de informação e captura de imagens em diferentes ambientes. Com isso, objetiva-se a utilização do elevado potencial desta ferramenta para inspeção visual de pontes e viadutos, dentre eles locais de difícil acesso, como as seções mais elevadas das pontes e viadutos que constituem o objeto de estudo deste trabalho.

As aeronaves remotamente pilotadas são capazes de gerar dados e imagens de maneira bastante eficaz, da mesma forma a utilização desta ferramenta permite a eliminação do risco de trabalho em altura, certamente a vistoria com o uso da RPA tende a ser mais segura, haja vista, que em caso de queda do veículo aéreo, ele poderá ser substituído sem grandes transtornos, não ocorrendo o mesmo para a vida humana em serviços de altura (IRIZARRY; COSTA, 2016).

Portanto, são suficientes as evidências que enfatizam as vantagens da utilização da RPA como instrumento eficaz no auxílio dos processos de inspeção, possuindo uma grande aplicação na indústria da construção civil. Tais benefícios permitem uma realização de serviço de forma mais segura, com menores custos e sem a necessidade de interrupção do tráfego nas pontes e viadutos como utilizado no método de inspeção tradicional.

Assim, o desenvolvimento desta tecnologia associada a câmeras e sensores permite o acesso a locais não acessíveis aos inspetores dentre outras ferramentas tecnológicas, visando a sua utilização não só a inspeção de pontes e viadutos mais também em outros ramos da construção civil. Por todos os argumentos anteriormente citados, este trabalho pretende explorar o uso da RPA como ferramenta visual para a inspeção de pontes e viadutos, objetivo que é detalhado adiante.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho apresenta por objetivo geral a realização de uma análise exploratória e desenvolvimento de diretrizes no uso da Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) como ferramenta para inspeção de manifestações patológicas em pontes e viadutos, realizando uma análise de viabilidade do procedimento que vão desde a coleta, processamento e análise de imagens para detecção visual das manifestações patológicas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma pesquisa exploratória com o uso da RPA para detecção das manifestações patológicas nas inspeções visuais de pontes e viadutos;
- Apresentar o estudo experimental do procedimento de inspeção em duas pontes e dois viadutos realizadas através da RPA com processamento de dados incluindo planejamento de voo e *checklist* para missão;
- Indicar diretrizes para desenvolvimento do processo de inspeção de manifestações patológicas com o uso da RPA em pontes e viadutos;
- Identificação das vantagens e desvantagens do uso da RPA através de uma avaliação qualitativa com ferramentas para identificação das manifestações patológicas em pontes e viadutos;

1.3 Estrutura do trabalho

Esta dissertação é composta por 7 capítulos seguidos das Referências e Apêndices. O capítulo 1 de introdução, capítulo 2, 3, 4 de revisão bibliográfica, capítulo 5 de metodologia, capítulo 6 de resultados e discussões e finalmente o capítulo 7 de conclusões.

O capítulo 1 – “INTRODUÇÃO” apresenta a contextualização da temática tratada seguido da justificativa para desenvolvimento do trabalho. Tendo como composição no capítulo, a apresentação dos objetivos da pesquisa e estrutura do trabalho.

O capítulo 2 – “INSPEÇÃO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM PONTES E VIADUTOS COM RPA” trata dos principais conceitos relacionados às manifestações patológicas em pontes e viadutos, bem como o procedimento tradicional para sua inspeção.

O capítulo 3 – “AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA” trata dos conceitos fundamentais da aeronave remotamente pilotada, suas características gerais, classificação e as regulamentações para sua operação, apresentando o panorama internacional tanto como o nacional.

O capítulo 4 – “FOTOGAMETRIA DIGITAL” apresenta os conceitos essenciais da fotogrametria digital, evidenciando as etapas que a compõem, a técnica de produção e os produtos de processamento.

O capítulo 5 – “METODOLOGIA” são apresentadas as etapas definidas para desenvolvimento do trabalho. Apresentando as informações técnicas, estratégias e questionários para a pesquisa exploratória,

bem como o protocolo, técnicas, equipamentos e critérios de seleção dos estudos de caso para a pesquisa experimental.

O capítulo 6 – “RESULTADO E DISCUSSÕES” expõe os resultados e discussões da pesquisa. Este capítulo trata das duas etapas que constituem a pesquisa exploratória e os estudos de caso realizados na pesquisa experimental. Incluindo uma análise geral da experiência de inspeção, abordando a captura de imagens, processamento digital e detecção de manifestações patológicas, para finalmente propor as diretrizes do procedimento de inspeção de manifestações patológicas em pontes e viadutos usando a RPA.

O capítulo 7 - “CONCLUSÕES” apresenta as conclusões do trabalho, explanando as considerações obtidas após a pesquisa realizada.

2 . INSPEÇÃO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM PONTES E VIADUTOS COM RPA

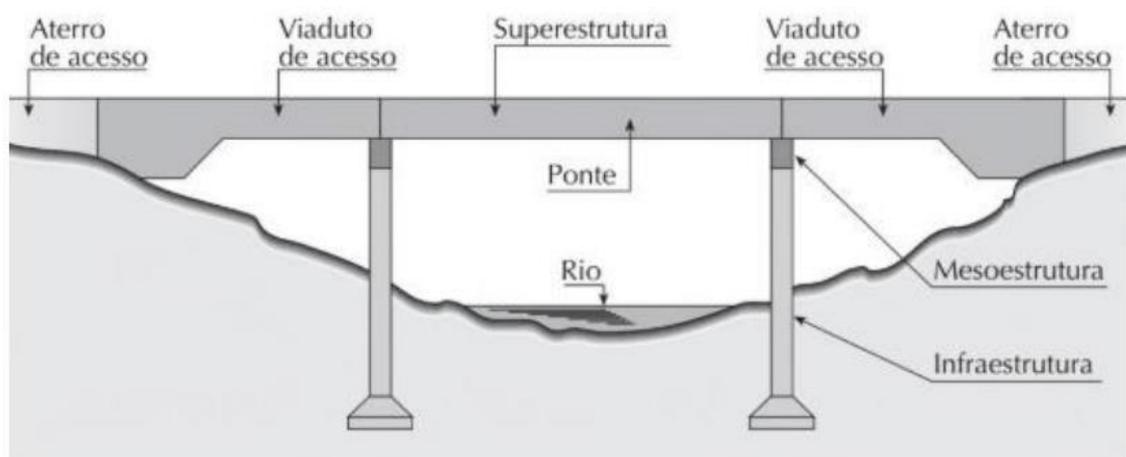
Este capítulo trata da revisão da literatura relativa aos elementos de interesse para o procedimento de inspeção de pontes com RPA. Logo, torna-se fundamental introduzir os mais importantes conceitos, justificativas e características sobre pontes e viadutos assim como as manifestações patológicas mais recorrentes na região em que foram realizados os estudos de caso.

2.1 Aspectos Construtivos de Pontes e Viadutos

Conforme a definição da NBR 9452 (ABNT, 2019), OAE's são as pontes, pontilhões, viadutos ou passarelas; são ponte e viaduto as estruturas destinadas à transposição de acidentes geográficos naturais que impeça a continuidade do leito normal de uma via, onde nas pontes o obstáculo trata-se de um curso d'água, como lagos, rios, enquanto nos viadutos poderá ser outra via, ou até mesmo montanhas, vales e serras.

Para Bento (2021) e Vitória (2002), as OAE's se dividem em três partes funcionais (Figura 1): a superestrutura, tabuleiro ou estrado que é responsável por receber a carga e transmiti-la para a mesoestrutura; a mesoestrutura, composta pelos pilares e travessas, que conduz as cargas até as fundações; e por fim a infraestrutura, composta pelos blocos, sapatas, estacas ou tubulões, que é responsável por transmitir as cargas para o solo. Além disso, segundo Marchetti (2018) as pontes podem ser classificadas de várias formas, porém é fundamental destacar quanto aos materiais que a compõem, podendo ser madeira, alvenaria, concreto simples, concreto armado, concreto protendido, aço ou mais de um (ex.: concreto e aço).

Figura 1:Partes componentes de uma OAE



2.2 Tipos de manifestações patológicas em pontes e viadutos

A palavra patologia é derivada do grego, preceituando o estudo de doenças tanto na medicina quanto em outras áreas, como na engenharia. Segundo Andrade e Silva (2005) a patologia presente nas estruturas deve comprometer algumas das exigências de construção, de capacidade mecânica, funcional ou estética, fazendo com que se crie uma forte relação entre a patologia e o desempenho da edificação. A análise dessa patologia também é função de dois aspectos essenciais, o tempo e as condições de exposição.

Para Bastos e Miranda (2017), Vitória (2006) uma ponte ou viaduto, como qualquer outro tipo de estrutura, começa a apresentar uma deterioração no mesmo instante em que é posta em funcionamento, iniciando assim seu ciclo de vida. Essa duração vai depender de diversos fatores relacionados com as condições de uso e conservação ao longo do tempo, visando garantir segurança, funcionalidade e durabilidade com o menor custo possível.

Conforme Silva (2007) e Verçosa (1991), a análise das manifestações patológicas se resume à detecção das causas e efeitos de problemas identificados nas construções, gerando diagnóstico e solução. Da mesma forma, Helene (1993) apresenta o estudo da patologia como a detecção de sintomas, causas, mecanismos e defeitos das construções civis, ou seja, o estudo dos elementos que fazem parte do diagnóstico do problema. Entender e determinar os diagnósticos das manifestações patológicas, criando ações proativas, através de diagnósticos, prognósticos e prescrições técnicas se conceitua como o papel da Engenharia Diagnóstica, disciplina das investigações técnicas (GOMIDE e FLORA, 2019).

Particularmente, existem muitas causas complexas de deterioração das pontes. As principais razões para a deterioração incluem projeto ou construção inadequada, ambientes agressivos, sobrecarga, impactos acidentais, falta de manutenção e envelhecimento. A ponte está sujeita a impactos agressivos causados pelo tráfego e efeitos ambientais, como ciclos de molhagem e secagem, evidenciando portanto a necessidade de manutenção. Conseqüentemente, o custo para manutenção dos elementos das pontes é considerável (MOOMEN *et al.*, 2016; BOLUKBASI *et al.*, 2004; YUNOVICH e THOMPSON 2003).

Segundo Rocha (2015) grande parte destes problemas poderia ser evitada ainda na fase de projeto diminuindo significativamente os custos de recuperação ao longo do ciclo estrutural. Além disso, a análise da degradação das estruturas não pode se desenvolver sem considerar as características das manifestações patológicas e sua respectiva fase ou etapa de ocorrência, tornando-se condições necessárias para obtenção de mais eficiência no diagnóstico e segurança na execução destas estruturas (BASTOS; MIRANDA, 2017).

Segundo autores como Bento (2021); Bastos e Miranda (2017); Mendes (2009); Milititsky, Consoli e Schnaid (2008); Helene e Pereira (2007); Andrade e Silva (2005); Souza e Ripper (1998); Verçoza (1991), as patologias mais comuns em estruturas de concreto armado, como pontes e viadutos são: fissuras, ataques químicos, ataques físicos, corrosão das armaduras, bolor e mofo.

Estas manifestações patológicas são brevemente descritas no quadro 1, ressaltando que o foco desta pesquisa não são as manifestações patológicas, já apresentadas em outros diversos trabalhos conforme exposto anteriormente.

Quadro 1: Tipos de manifestações patológicas associadas às estruturas em concreto

FISSURAS		
Características	Causas	Exemplos
<p>As fissuras são fendas que afetam a superfície de um dado elemento estrutural, tornando-se caminhos rápidos para penetração de agentes agressivos. Esse processo pode levar a graves ocorrências de falta de estabilidade estrutural, assim como contribuir para acelerar os processos de corrosão das armaduras e carbonatação do concreto (Silva, 2011; Mendes <i>et al.</i>, 2010).</p>	<p>As fissuras podem ser originadas por causas diversas, como tensões oriundas de atuação de sobrecargas ou de movimentações de materiais, dos componentes ou da obra como um todo. Nas pontes de concreto, as fissuras são provocadas, principalmente, por: movimentações por variações térmicas e de umidade; atuação de sobrecargas ou concentração de tensões; deformabilidade excessiva das estruturas; alterações químicas dos materiais constituintes (Tejedor, 2013; Cánovas, 1988).</p>	
EFLORESCÊNCIA		
Características	Causas	Exemplos
<p>A eflorescência é determinada pelo efeito da lixiviação responsável pelo depósito de sais solúveis até a superfície, ficando retidas após a evaporação da água, podendo gerar a degradação do sistema. Na maior parte dos casos as eflorescências não causam problemas maiores que o mau aspecto resultante, mas há circunstâncias em que o sal formado pode levar a lesões tais como o descolamento dos revestimentos ou pinturas, desagregação das paredes e até queda de elementos construtivos. Geralmente evidenciadas através de manchas brancas podendo ser de cor castanhas ou ferrugem que é o tipo de mais comum do concreto armado (Melo, 2016; Andrade e Silva, 2005; Verçosa, 1991)</p>	<p>Sendo um processo natural, onde a água, tendo entrado pelos poros capilares, dissolve o hidróxido de cálcio da pasta de cimento. O hidróxido de cálcio dissolvido pode, em seguida, reagir com o dióxido de carbono do ar para formar carbonato de cálcio insolúvel na superfície do concreto (Helene, 2007).</p>	

Quadro 1: Tipos de manifestações patológicas associados às estruturas de concreto

BOLOR		
Características	Causas	Exemplos
<p>Presença de fungos, sendo o principal agente de degradação, por possuírem boa adaptação a meios estressantes e alimentando-se de materiais orgânicos podendo surgir em qualquer tipo de componentes como o concreto (Gentil, 2011).</p>	<p>O bolor tem por causa primária o surgimento em ambientes úmidos, com ventilação ausente, por condensação e onde não haja água corrente, ambiente ideal para sua proliferação. Os fungos têm preferência por bases orgânicas, frestas e fissuras (Verçosa, 1991).</p>	

Quadro 1: Tipos de manifestações patológicas associados às estruturas de concreto

COROSSÃO DAS ARMADURAS		
Características	Causas	Exemplos
<p>A corrosão é determinada pela interação destrutiva de um material com o ambiente, por reações químicas ou eletroquímicas, aliada ou não a esforços mecânicos. Os parâmetros limitadores da velocidade ou taxa de corrosão são, dentre outros, a temperatura e grau de contaminação do meio ambiente. Quando o metal passa pelo processo de corrosão é convertido a um estado não metálico perdendo as suas propriedades essenciais (resistência mecânica, elasticidade e durabilidade (Gentil, 2012; Liberati, 2014; Cascudo, 1997).</p>	<p>As pontes, por se tratarem obras de arte especiais, alguns fatores assumem um papel especial para a determinação da ocorrência da corrosão e sua intensidade. Eles podem ser o ambiente onde a estrutura se encontra, os agentes agressivos presentes no meio e a capacidade de resistência da estrutura. A integridade das estruturas pode ser afetada por fatores físicos, tais como a variação da temperatura, que pode ocasionar choques térmicos. A variação de temperatura entre os componentes do concreto (pasta de cimento, agregados graúdos e armadura), pode permitir a ação dos agentes corrosivos (GENTIL, 2007).</p>	
DESPLACAMENTO DO CONCRETO		
Características	Causas	Exemplos
<p>É caracterizada por fazer com que os agregados se tornem facilmente removíveis da estrutura. Esta manifestação pode ser considerada a mais perigosa por causar danos à integridade física e material (Mehta; Monteiro, 2014).</p>	<p>Quando acontece um ataque químico expansivo devido a componentes intrínsecos ao concreto ou pela baixa resistência do mesmo, há uma diminuição da massa, ocasionando assim a desagregação do concreto. A desagregação da camada de concreto envolvente da armadura, ocorre porque durante o processo de deterioração da barra de aço o produto que é gerado, exerce uma força de tração no concreto, como o concreto apresenta uma resistência baixa em relação à tração o mesmo tende a ocasionar esta patologia (Gentil, 2007).</p>	

As pontes e viadutos são estruturas de alto custo de construção, reparo e recuperação, quando uma intervenção é necessária cria-se grandes transtornos sociais e econômicos, pois os deslocamentos realizados pelos usuários dessas OAE's são interrompidos. O cuidado adequado na preservação dessa construção assegura a proteção contra a agressividade do meio, relacionando-se diretamente com a durabilidade da estrutura. Logo, em virtude do discutido, fica evidenciada a importância das inspeções técnicas nas pontes e viadutos objetivando a sua preservação, tópico que será tratado a seguir.

2.3 Inspeção de manifestações patológicas em pontes e viadutos

No Brasil, para inspeção de Obras de Arte Especiais (OAEs), no qual estão inclusos pontes e viadutos, às duas principais normativas são a NBR 9452 (ABNT, 2019): Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto – Procedimento e a DNIT 010/2004-PRO (BRASIL, 2004): Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido. Atualmente no Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), o Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias (DNIT, 2004b) preconiza um guia de procedimento para a inspeção, objetivando sua classificação e priorização para reabilitação. O manual tem servido como referência para identificação no Sistema de Gerenciamento de Obras de Arte Especiais (SGO) do DNIT, no entanto, os trabalhos de manutenção não são especificados. O principal objetivo do documento é propor um conjunto de serviços mínimos de manutenção que garantam a funcionalidade e condição estrutural projetada das OAE's.

A metodologia do DNIT utiliza a atribuição de uma nota de avaliação para cada elemento componente de uma ponte, variando de 1 a 5 conforme a gravidade das manifestações patológicas (BRASIL, 2004). O Quadro 2 mostra os critérios para atribuição de notas técnicas.

Quadro 2: Instruções para atribuição de notas de avaliação

Nota	Danos no elemento/ insuficiência estrutural	Ação Corretiva	Condição de estabilidade	Classificação das condições da ponte
5	Não há danos nem insuficiência estrutural.	Nada a fazer.	Boa.	Obra sem problemas
4	Há alguns danos, mas não há sinais de que estejam gerando insuficiência estrutural.	Nada a fazer; apenas serviços de manutenção	Boa.	Obra sem problemas importantes
3	Há danos gerando alguma insuficiência estrutural, mas não há sinais de comprometimento da estabilidade da obra.	A recuperação da obra pode ser postergada, devendo-se, porém, neste caso, colocar-se o problema em observação sistemática	Boa aparentemente	Obra potencialmente problemática. Recomenda-se acompanhar a evolução dos problemas através das inspeções rotineiras, para detectar, em tempo hábil, um eventual agravamento da insuficiência estrutural.
2	Há danos gerando significativa insuficiência estrutural na ponte, porém não há ainda, aparentemente, um risco tangível de colapso estrutural.	A recuperação (geralmente com reforço estrutural) da obra deve ser feita no curto prazo.	Sofrível	Obra problemática. Postergar demais a recuperação da obra pode levá-la a um estado crítico, implicando também sério comprometimento da vida útil da estrutura. Inspeções intermediárias são recomendáveis para monitorar os problemas.
1	Há danos gerando grave insuficiência estrutural na ponte; o elemento em questão encontra-se em estado crítico, havendo um risco tangível de colapso	A recuperação (geralmente com reforço estrutural) - ou alguma substituição da obra – devendo ser feita sem tardar	Precária	Obra crítica Em alguns casos, pode configurar uma situação de emergência, podendo a recuperação da obra ser acompanhada de medidas preventivas especiais, tais como: restrição de carga na ponte, interdição total ou parcial ao tráfego, escoramentos provisórios, instrumentação com deslocamentos, leituras contínuas de deformações

Fonte: DNIT 010/2004-PRO (Brasil, 2004).

A nota final da OAE corresponde a menor dentre as notas recebidas pelos seus elementos com função estrutural (BRASIL, 2004).

No Brasil, as vistorias realizadas conforme a NBR 9452:2019, dispõe sobre “Inspeções de pontes, viadutos e passarelas de concreto - procedimento” apresentando os tipos de vistorias, em pontes e viadutos, sendo elas: a cadastral, rotineira, especial, extraordinária. A vistoria cadastral deve ser realizada logo após a conclusão da obra com documentos e informes construtivos, a rotineira deve ser realizada em intervalos de tempo regulares, a cada 2 anos e visando manter o cadastro da obra atualizado e também deve utilizar como roteiro básico um anexo constante na norma referida, a especial é realizada a cada 5 anos, tem a finalidade de interpretar danos encontrados na vistoria rotineira, já a vistoria extraordinária é não programada, requisitada para avaliar um dano estrutural excepcional, originado pelo homem ou pela natureza devendo ser realizada quando ocorrer um grave acidente na obra.

As notas da NBR 9452 (ABNT, 2019) estão atreladas a condição da OAE na avaliação dos parâmetros estrutural, funcional e de durabilidade. Essas notas variam de 1 a 5 refletindo maior ou menor gravidade dos problemas detectados, discriminadas quanto à relevância do elemento avaliado na segurança estrutural da ponte, funcional e de durabilidade. Tais critérios são expostos do quadro 3.

Quadro 3: Classificação da condição de OAE segundo os parâmetros estrutural, funcional e de durabilidade.

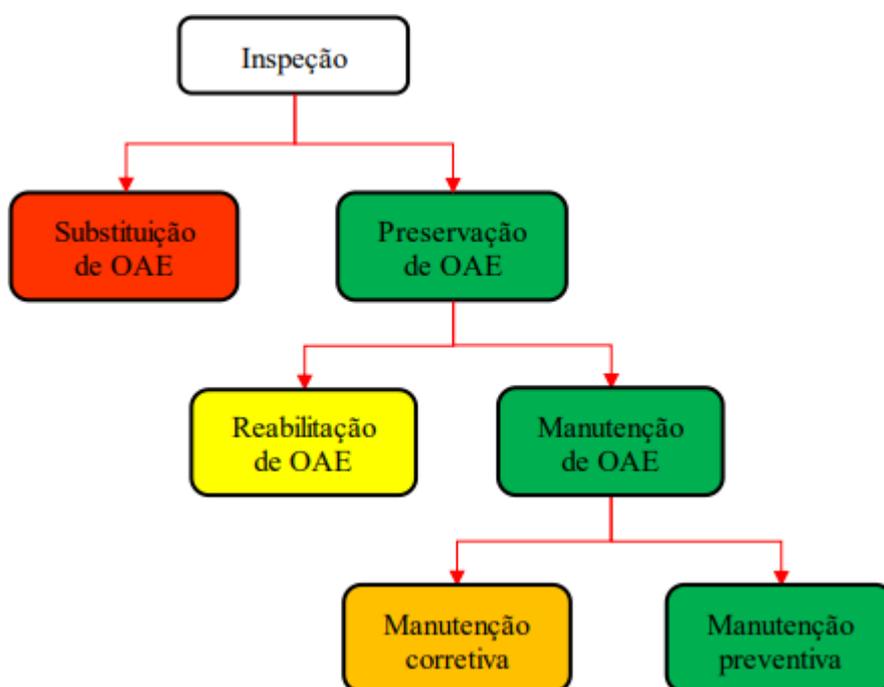
Nota de classificação	Condição	Caracterização Estrutural	Caracterização Funcional	Caracterização de Durabilidade
5	Excelente	A estrutura apresenta-se em condições satisfatórias, apresentando defeitos irrelevantes e isolados.	A OAE apresenta segurança e conforto aos usuários.	A OAE apresenta-se em perfeitas condições, devendo ser prevista manutenção de rotina.
4	Boa	A estrutura apresenta danos pequenos e em áreas, sem comprometer a segurança estrutural.	A OAE apresenta pequenos danos que não chegam a causar desconforto ou insegurança ao usuário.	A OAE apresenta pequenas e poucas anomalias, que comprometem sua vida útil, em região de baixa agressividade ambiental.
3	Regular	Há danos que podem vir a gerar alguma deficiência estrutural, mas não há sinais de comprometimento da estabilidade da obra. Recomenda-se acompanhamento dos problemas. Intervenções podem ser necessárias a médio prazo.	A OAE apresenta desconforto ao usuário, com defeitos que requerem ações de médio prazo.	A OAE apresenta pequenas e poucas anomalias, que comprometem sua vida útil, em região de moderada a alta agressividade ambiental, ou a OAE apresenta moderadas a muitas anomalias, que comprometem sua vida útil em região de baixa agressividade ambiental.
2	Ruim	Há danos que comprometem a segurança estrutural da OAE, sem risco iminente. Sua evolução pode levar ao colapso estrutural. A OAE necessita de intervenções significativas a curto prazo	OAE com funcionalidade com riscos de segurança ao usuário, requerendo intervenções de curto prazo.	A OAE apresenta anomalias moderadas a abundantes, que comprometem sua vida útil, em região de alta agressividade ambiental.
1	Critica	Há danos que geram grave insuficiência estrutural na OAE. Há elementos estruturais em estado crítico, com risco tangível de colapso estrutural. A OAE necessita intervenção imediata, podendo ser necessária restrição de carga, interdição total ou parcial ao tráfego, escoramento provisório e associada instrumentação, ou não	A OAE não apresenta condições funcionais de utilização.	A OAE encontra-se em elevado grau de deterioração, apontando problema de risco estrutural e/ou funcional.

Fonte: NBR 9452 (ABNT, 2019)

Todos os elementos da ponte recebem uma nota em função dos danos identificados, e a nota final será a menor nota atribuída a esses elementos. Porém, nessa metodologia os componentes são classificados de acordo com três parâmetros, estrutural, funcional e de durabilidade, e a nota final será composta por três notas técnicas, sendo uma para cada parâmetro. Todavia, a subjetividade do procedimento proposto pela norma pode gerar resultados insuficientemente confiáveis, ocorrendo devido à maneira prática de como a perícia é executada, pela metodologia de classificação e os critérios apresentados para tal (SIMÕES; RODRIGUES e PINHEIRO, 2019).

Segundo a FHWA (2011), as ações de conservação a serem executadas nas OAE's, agrupam-se em três linhas de atuação: substituição, reabilitação e manutenção, sendo baseadas em procedimentos de inspeção adequados e programados conforme apresentados na figura 2.

Figura 2 - Categorias de ação em OAE



Fonte: FHWA, 2011.

Existe a necessidade de monitoramento e manutenção da integridade das OAE's de concreto armado, fator essencial para garantir a segurança oferecida diariamente, estruturas estas que estão presentes no dia-a-dia de muitos usuários. Mesmo assim, é notável o descaso dos órgãos responsáveis, em manter a operação e manutenção destas estruturas, que se tornam mais complexas e onerosas com o aumento da idade (CHANG; FLATAU; LIU, 2003;

REHMAN *et al.*, 2016; GIBB *et al.*, 2018).

Atualmente, a inspeção de manifestações patológicas em OAE's é feita, em sua maioria, pelo método tradicional que inclui inspeção visual. Esse tipo de avaliação possui uma metodologia simples que inclui não só o levantamento das manifestações patológicas, mas também suas características construtivas e detalhes das condições ambientais em que está inserida. Consiste muitas vezes em levantamentos feitos a olho nu ou até mesmo com auxílio de máquinas de filmar, ou fotográficas, equipamentos simples, favorecendo assim sua ampla adoção (SALES *et al.*, 2018; XIE, 2018; PUSHPAKUMARA; SILVA; SILVA, 2017).

Segundo Bauer (1994), Duque; Seo; Wacker (2018) e Ayele (2021) uma das principais dificuldades para a realização de diagnósticos e ensaios nas pontes é a acessibilidade a determinadas áreas. Portanto, no caso de pontes, há necessidade de outros equipamentos auxiliares para a realização de ensaios, permitindo desta forma acesso aos locais para a sua realização.

Conforme Mattje (2004), existem os métodos manuais de acesso, que são as escadas, cabos e andaimes e no caso de obras um pouco mais extensas podendo utilizar torres especiais. No caso de obras de grande vulto, pode-se optar pelos meios mecânicos de acesso, que são os andaimes deslizantes, viaturas com braços (conforme a figura 3) ou plataformas elevatórias, ou ainda caminhões com braços telescópicos e rotativos. As passarelas montadas sobre caminhões são muito utilizadas em viadutos, pode-se também deixar na estrutura, locais de fixação, tais como argolas chumbados em pontos previamente escolhidos permitindo um acesso a grande parte das zonas exteriores da estrutura, por profissionais denominados alpinistas industriais, como na figura 4.

Figura 3 – utilização de braço mecânico para vistoria em OAE



Fonte: Portal Brasil engenharia, 2020

Figura 4 – utilização do alpinismo industrial para vistoria em OEA



Fonte: Gazeta, 2020.

Entretanto, nesta atividade de inspeção, variáveis como tempo e custo podem apresentar-se superiores quando comparadas com uma nova ferramenta emergente, ideal para coleta de imagens aéreas, a Aeronave Remotamente Pilotada. Além disso, é necessário considerar o risco gerado pelo trabalho em altura em que os profissionais responsáveis pelas inspeções estão submetidos, quando considerado o uso da RPA em caso de queda, ele poderá ser substituído, o que não pode ser feito com a vida humana em serviços de altura.

Com a utilização da RPA tem-se a possibilidade de coletar filmagens completas e imagens de todos os pontos da ponte e viaduto objetivando a detecção de manifestações patológicas. Tal análise detalhista no sistema estrutural pode coletar problemas não observados a olho nu pelos inspetores, como por exemplo: fissuras, trincas, eflorescência e manchas. Em seguida o material obtido poderá ser analisado para indicação das possíveis falhas no sistema estrutural com as devidas recomendações de ações corretivas, para então elaboração do laudo de inspeção.

No capítulo adiante serão tratadas das definições da Aeronave Remotamente Pilotada, assim como suas principais características de fundamental importância para realização do estudo.

3 . AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS (RPA)

No presente capítulo serão apresentados definições, características e classificações importantes sobre a Aeronave Remotamente Pilotada, popularmente conhecidos como drone. Além disso, será apresentada a regulamentação no panorama geral dos requisitos exigidos a nível internacional assim como a regulamentação existente no Brasil visando estabelecer a legalidade do procedimento em território brasileiro. Para torna-se apto a realização do voo para inspeção de OAE's no Brasil não existe regulamentação específica devendo apenas se enquadrar nas exigências gerais determinadas pelo órgão específico de aviação.

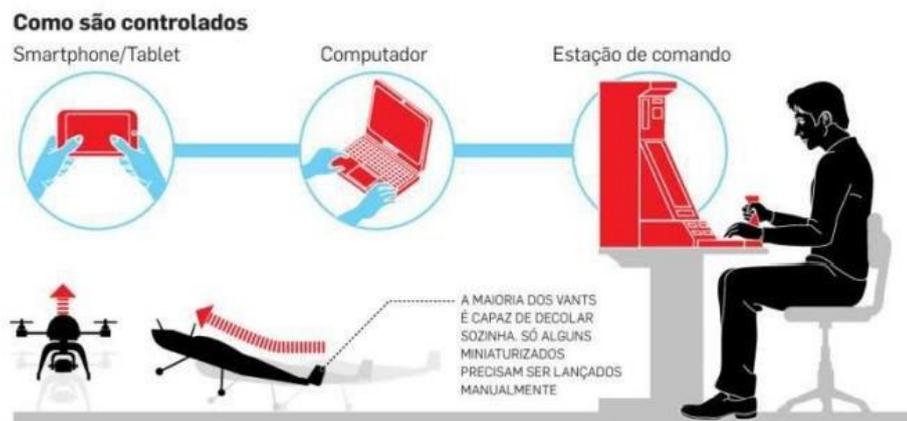
3.1 Definições e características gerais

O termo Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), ou no plural VANT's, traduzido do inglês *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*, trata-se de qualquer tipo de aeronave que pode ser controlada nos 3 eixos e que não necessite de pilotos embarcados para ser guiada, sendo esse termo encontrado em diversas bibliografias técnico-científicas. No entanto, o termo VANT é considerado obsoleto pela Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), conforme o manual denominado RPAS na sua 1ª edição publicada em 2015. RPA é a nomenclatura (na forma original) utilizada pelo OACI e adotada (na forma original ou traduzida – ARP) no Brasil pela ANAC e DECEA.

O termo drone é utilizado de maneira informal, originário dos EUA, para descrever qualquer aeronave (ou mesmo outro tipo de veículo) que possua alto grau de automatismo, qualquer objeto voador não tripulado, seja ele de qualquer origem, característica ou propósito (comercial, recreativo, profissional, militar, etc). Entretanto, como não há uma definição formal para o termo drone, a regulamentação da ANAC utiliza “aeromodelos” e “aeronaves remotamente pilotadas” (RPA), nem todo drone pode ser considerado RPA, visto que um drone utilizado como hobby ou esporte enquadra-se, por definição legal, na legislação pertinente aos aeromodelos (DECEA, 2020).

Segundo a ANAC (2017), as aeronaves remotamente pilotadas são denominadas RPA (*Remotely-Piloted Aircraft*), as estações de pilotagem remota são chamadas RPS (*Remote Pilot Station*), sendo compostas pelos dispositivos de comando e controle além de quaisquer outros elementos envolvidos na operação, conforme a figura 5.

Figura 5: Estações de pilotagem remota (RPS)



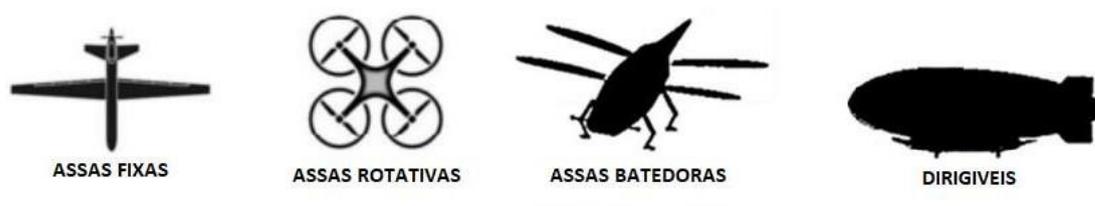
Fonte: Fernandes (2015)

3.2 Classificação da RPA.

Conforme Amorim, Silva e Christakou (2012) a classificação dos RPAs pode se dar através do desempenho, envolvendo questões atreladas: ao alcance (referente à distância da base), peso próprio, carga útil ou *Payload*, tempo máximo de permanência em voo, altitude máxima e tipo de propulsão.

Segundo Angelov (2012), a classificação da RPA podem ser estabelecidas conforme as características aerodinâmicas, tais como, asa fixa, asa rotativa, dirigíveis e asas batedoras (*flapping-wing*), com exposto figura 6.

Figura 6: Tipos de RPA por características aerodinâmicas



Fonte: Autor (2023)

As aeronaves de asa fixa necessitam de pistas para decolagem e pouso, em alguns casos, são utilizadas catapultas para lançamento tendo também a capacidade de realizar voos de longa duração. As assas fixam se assemelham a de um avião o que garante uma maior sustentação e menor gasto energético (PURI, 2005; MELO, 2016; VERA, 2016).

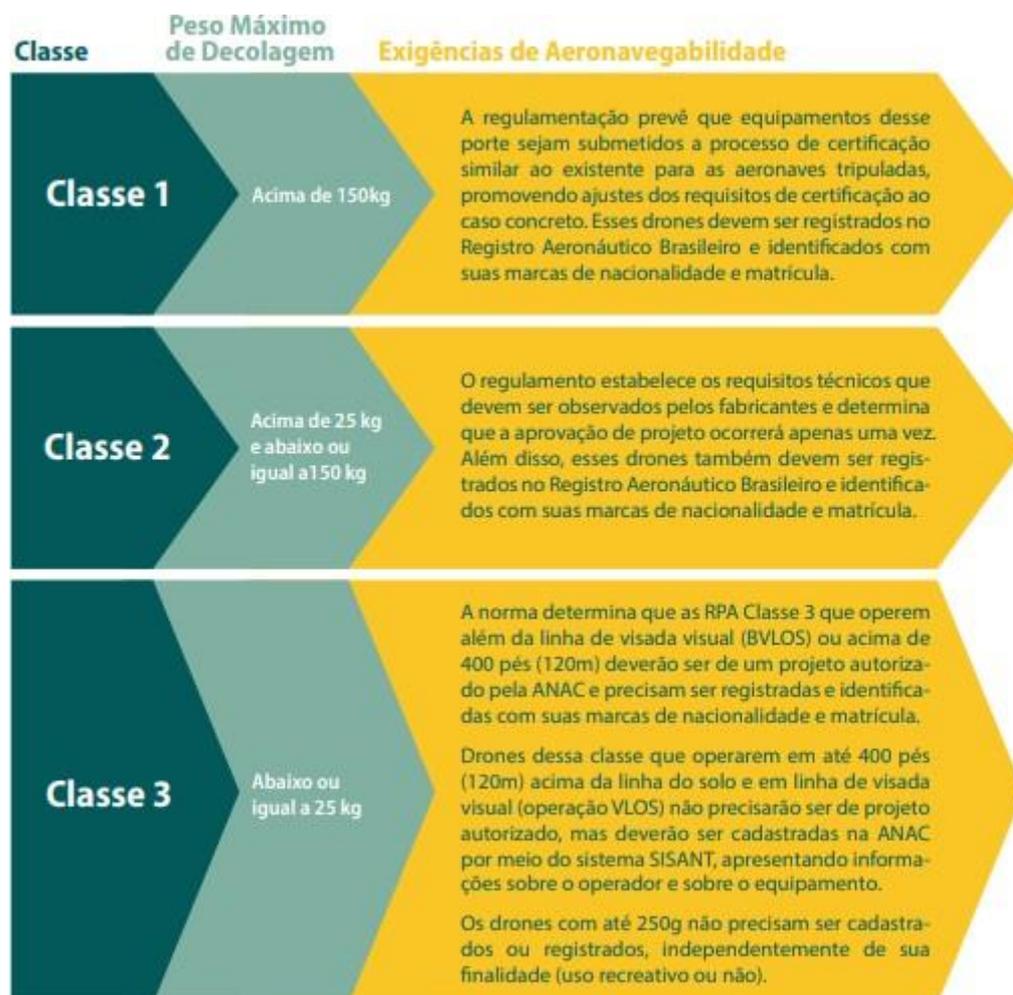
Os dirigíveis são mais leves que o ar e realizam voos de longa duração, voam em baixa

velocidade e normalmente são grandes em tamanho. Os VANTs de asa batidora possuem pequenas asas flexíveis inspiradas em pássaros e insetos voadores (ANGELOV, 2012).

Já as aeronaves de asa rotativa realizam pouso e decolagem verticalmente, tendo como vantagens a capacidade de manter-se estável no ar e a alta manobrabilidade. Tais características tem impulsionado o crescimento das aplicações com drones desse tipo desta classificação (AMORIM; SILVA; CHRISTAKOU, 2012).

Conforme a regulamentação da ANAC (2017), a RPA é dividido em três classes: Classe 1 são aquelas com Peso Máximo de Decolagem (PMD) maior que 150 Kg; Classe 2 são as RPA com PMD maior que 25 Kg e menor ou igual a 150 Kg; e Classe 3 são as RPA com PMD menor ou igual a 25 Kg. Como demonstrado na Figura 7, apresentando as exigências de aeronavegabilidade para cada classe de aeronave.

Figura 7: Classificação de RPA pela ANAC



Fonte: (ANAC, 2017)

A RPA selecionada para o presente trabalho enquadra-se na classe 3, conforme a classificação, devido à grande diversidade de aeronaves disponíveis no mercado brasileiro

que podem ser enquadradas nesta classificação com boa sustentação e equipamentos de coleta de imagens que se encaixam nos objetivos da pesquisa.

Atualmente o mercado brasileiro fornece uma ampla facilidade para obtenção da RPA tipo classe 3 (RUIZ, 2020). Importante salientar que a obtenção da aeronave não torna qualquer usuário apto a pilotagem, existem regras, normas e procedimentos para se tornar piloto destas aeronaves. O programa de regulamentação será tratado adiante.

3.3 Panorama regulatório da RPA

Recentemente, com o avanço da tecnologia as RPAs tornaram-se frequentes no espaço aéreo, o uso dessa ferramenta está atrelado a sua regulamentação com o objetivo de não causar transtornos e insegurança à aviação civil e militar. A utilização da RPA vem se popularizando e os responsáveis pela aviação civil de diversos países do mundo têm intensificando estudos e trabalhos para melhor entenderem esta atividade, buscando sua atuação integrada junto ao espaço aéreo local (SILVA, 2018).

A regulamentação da RPA é necessária para que o mercado possa expandir sem ameaçar a segurança ou privacidade de indivíduos, controlando o risco de colisão com outros objetos, além de evitar o uso destes dispositivos para fins ilícitos (SCHREIBER; OSTIARI, 2014).

A seguir, apresenta-se uma breve explanação acerca da regulamentação do uso da RPA para fins civis, abordando os requisitos principais no contexto internacional e nacional.

3.3.1 Panorama internacional

Apesar da utilização da RPA para fins civis encontrar-se ainda em processo de desenvolvimento em todo o mundo, ela se apresenta em estágios distintos a depender do país. A maioria dos países tem se visto obrigado a regular o uso do drone para fins civis, devido a ampla gama de setores facilitadas através do uso da aeronave.

No âmbito global, em termos de normas e regulamentações, a Convenção de Chicago, assinada em 1944 por representantes de 52 nações, criou a Organização de Aviação Civil Internacional (OACI), órgão das Nações Unidas responsável pelo debate e desenvolvimento seguro e ordenado da aviação civil mundial, estabelecendo normas e regulamentos necessários para a segurança e eficiência aérea (ANAC, 2017).

Muitos países ainda estão por desenvolver normas que visam garantir um ambiente legal e comercialmente favorável para utilização das aeronaves remotamente pilotadas. Austrália, Canadá e França são países considerados pioneiros na regulamentação do RPA, enquanto na Europa, a EASA (*European Aviation Safety Agency*), é a responsável pela regulamentação do

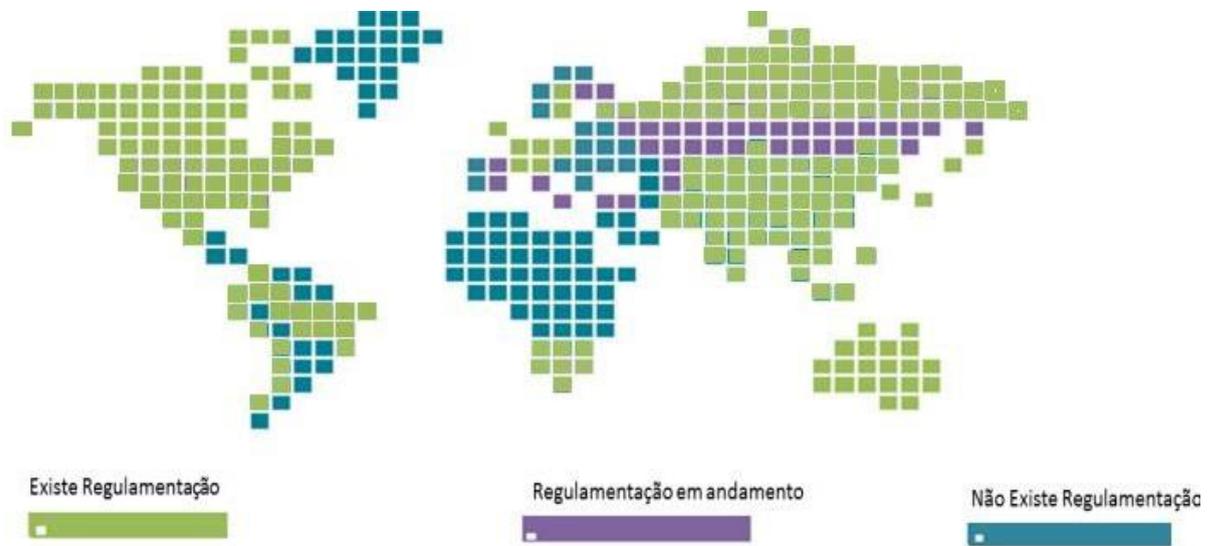
espaço aéreo com legislação para o uso do drone para fins civis, abrangendo normas de segurança, privacidade, proteção de dados, seguros e responsabilidade; no Reino Unido, as operações de RPAs são reguladas pela norma CAP 393, estabelecida pela CAA UK (Civil Aviation Authority United Kingdom) (PECHARROMÁN, VEIGA; 2017).

Segundo Melo (2016), nos Estados Unidos a agência que regulamenta a utilização de RPAs é a Administração de Aviação Federal (FAA – *Federal Aviation Administration*) por meio do documento CFR 14, Part 107(código de regulamentações federais), no qual constam as regras para uso de drones civis. A operação de RPAs no Chile é regulada por meio da norma DAN 151, intitulada de Operações de Aeronaves Pilotadas a Distância.

Em grande parte dos países, os regulamentos são diferenciados entre vôos recreativos e comerciais e seguindo aspectos com alguns princípios em comum, como categorias por peso médio de decolagem, limites de altitude e operacionais, bem como distância mínima de segurança para pessoas, veículos e edifícios (PECHARROMÁN, VEIGA; 2017).

A figura 8 apresenta um panorama da regulamentação do uso da RPA para fins civis no mundo.

Figura 8: Panorama da Regulamentação da RPA no mundo



Fonte: Adaptado (Schreiber e Ostiari, 2014).

3.3.2 . Panorama nacional

No Brasil os órgãos responsáveis pela regulamentação do uso da RPA são a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), a Agência Nacional da Aviação Civil (ANAC), o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e o Ministério da Defesa (MD) (PATRIOTA, 2017).

Segundo a ANAC (2017), as RPAs podem operar, de acordo com os critérios visuais, de três maneiras: operação Além da Linha de Visada Visual (*Beyond Visual Line of Sight - BVLOS*), na qual o piloto não consegue manter o VANT dentro de seu alcance visual, mesmo com a ajuda de um observador; operação em Linha de Visada Visual (*Visual Line of Sight - VLOS*), na qual o piloto mantém o contato visual direto com o VANT (sem auxílio de lentes ou outros equipamentos); e operação em Linha de Visada Visual Estendida (*Extended Visual Line of Sight - EVLOS*), na qual o piloto remoto só é capaz de manter contato visual direto com o VANT com auxílio de lentes ou de outros equipamentos e precisa do auxílio de observadores. Todas essas operações são exemplificadas na Figura 9.

Figura 9: Tipos de operações da RPA



Fonte: (ANAC,2017)

Segundo a ANAC (2017), as operações são classificadas de acordo com o propósito de uso da RPA, podendo-se enquadrar como experimentais, ou seja, sem fins lucrativos; as operações comerciais, quando há contratação de terceirizados para realizar serviços com RPA; e as operações corporativas, quando a própria empresa ou instituição utiliza a RPA sem fins experimentais.

Requisitos gerais são estabelecidos pela ANAC (2017), tais como a idade exigida ao piloto e observadores, que devem ser maiores de 18 anos, o porte do manual de voo durante a operação, a proibição da operação autônoma, a exigência de seguro com cobertura de danos

a terceiros (exceto para órgão de segurança pública ou defesa civil), a proibição de cruzamento de fronteiras com o VANT, a permissão de voo apenas quando em áreas distantes de terceiros (exceto para órgão de segurança pública ou defesa civil) e o cadastro da aeronave junto a Anatel.

Porém, critérios como, a exigência de registros dos voos junto ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), limitações em relação a voos sobre áreas urbanas e aglomerados rurais, tipo de registro da aeronave (Certificado de Matrícula Experimental, Certificado de Matrícula ou apenas Cadastro junto à ANAC), aprovação do projeto de RPAS, necessidade de Certificado de Autorização de Voo Experimental (CAVE), necessidade de Certificado de Aeronavegabilidade Especial e necessidade de apresentar à ANAC uma Declaração de Inspeção Anual de Manutenção (DIAM), variam de acordo com o tipo da operação e a classe da RPA (ANAC, 2017). O resumo dos principais critérios quanto aos requisitos legais referente ao uso da RPA classe 3 e para fins experimentais está apresentado no Quadro 4.

Quadro 4: Principais requisitos legais para o uso da RPA do tipo Classe 3

REQUISITOS	VLOS		BVLOS	
	Até 120m	> 120m	Até 120m	> 120m
Aeronavegabilidade	Cadastro	Registro	Registro	Registro
Licença/ habilitação piloto	Não	Sim	Não	Sim
CAVE - Certificado de Autorização de Voo Experimental	Não	Sim	Não	Sim
Homologação e cadastro da aeronave na ANATEL	Sim	Sim	Sim	Sim
Certificado Médico	Não	Não	Não	Não
Pilotos e observadores >18 anos	Sim	Sim	Sim	Sim
Pilotos e observadores com no mínimo, ensino médio completo	Sim	Sim	Sim	Sim
Operação autônoma	Não	Não	Não	Não
Seguro contra danos a terceiros	Sim	Sim	Sim	Sim
Operar a uma distância > 5 Km (raio) de aeroportos, aeródromos	Sim	Sim	Sim	Sim
Operar a uma distância de 30m de terceiros (exceto pessoas envolvidas e anuentes)	Sim	Sim	Sim	Sim
Operar em área urbana (até 60 m)	Sim	Não	Sim	Não

Fonte: (ANAC, 2017)

De maneira análoga, o DECEA, através da Instrução do Comando da Aeronáutica (ICA 100-40), deu sua contribuição ao regulamentar os procedimentos e as responsabilidades necessários para o acesso seguro ao espaço aéreo brasileiro com a RPA. Estabeleceu que não é permitido sobrevoar prisões, instalações militares ou outras infraestruturas críticas para o

governo brasileiro, além de outras condições aplicáveis a RPA Classe 3.

Após o processo de viabilidade legal, faz-se necessário o desenvolvimento da metodologia para a captura de ativos visuais que atendam requisitos técnicos de acurácia e de precisão adequados para o intuito de detecção de manifestações patológicas. Com isso, é fundamental a introdução de conceitos básicos de fotogrametria digital que serão discutidos a seguir, essenciais para captura de imagens aéreas com qualquer tipo de aeronave.

4. FOTOGRAMETRIA

Este capítulo abordará definições, fases da fotogrametria, as etapas que a compõe, assim como técnicas atualmente utilizadas nos softwares de fotogrametria digital disponíveis. Além disso, serão apresentados conceitos sobre o produto da fotogrametria digital fundamentais para este trabalho e para a exibição de manifestações patológicas, apresenta-se uma breve descrição dos mapas de danos.

4.1 Definição e característica geral

Segundo Melo Jr. (2016) a fotogrametria, engloba métodos de medição e interpretação de imagens com o propósito de obtenção da forma ou localização de um objeto a partir de uma ou mais fotografias. Dentre os aspectos da fotogrametria a serem destacados torna-se importante inferir que na primeira fase de desenvolvimento a restituição fotogramétrica era realizada utilizando-se métodos gráficos tendo por base a geometria projetiva, até o alcance, atualmente, da fotogrametria digital.

A palavra fotogrametria é originada de três palavras gregas: *photos*, *gramma* e *metron*, respectivamente, luz, descrição e medida. A Sociedade Internacional para Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ISPRS) define em seu estatuto a fotogrametria como a ciência e tecnologia para extrair informações geométricas e temáticas tridimensionais confiáveis, muitas vezes ao longo do tempo, de objetos e cenas a partir de imagens e dados de distância (ISPRS,2016).

A fotogrametria representa a reconstrução do ambiente tridimensional a partir de imagens bidimensionais, possível graças ao fenômeno chamado estereoscopia que permite a visão tridimensional quando as imagens possuem uma superposição mínima de 50 % (VIANA, 2021; COELHO; BRITO, 2007). O sistema bidimensional usado é o da própria câmera com as coordenadas preestabelecidas. O sistema tridimensional é o sistema de coordenadas que formam o terreno, obtidas por meio das imagens bidimensionais. Essas coordenadas podem ser geodésicas (latitude, longitude e altitude) ou cartesianas (X, Y, Z) (MELO JR., 2016). Após o estabelecimento dos dois sistemas, um sistema de pontos de controle do espaço-objeto são escolhidos e alocados no espaço-imagem, para compor os dados de entrada para mapear um sistema no outro.

Para reprodução deste fenômeno da fotogrametria com um par de imagens, além da sobreposição mínima, os eixos das câmeras que formarão o par devem estar aproximadamente coplanares a distância entre a posição das câmeras não devendo ser muito maior que a distância da câmera para o objeto. Além disso, todas as distâncias, incluindo a focal e os parâmetros internos da câmera, devem ser conhecidas (VIANNA, 2021; LINDER, 2016;

LILLESAND *et al.*, 2015; COELHO; BRITO, 2007). Com estes registros torna-se possível o cálculo das coordenadas tridimensionais de um ponto contido nas duas imagens, sendo estes princípios usado durante muitos anos em levantamentos aerofotogramétrico, principalmente para levantamento de topografia e mapeamento do território.

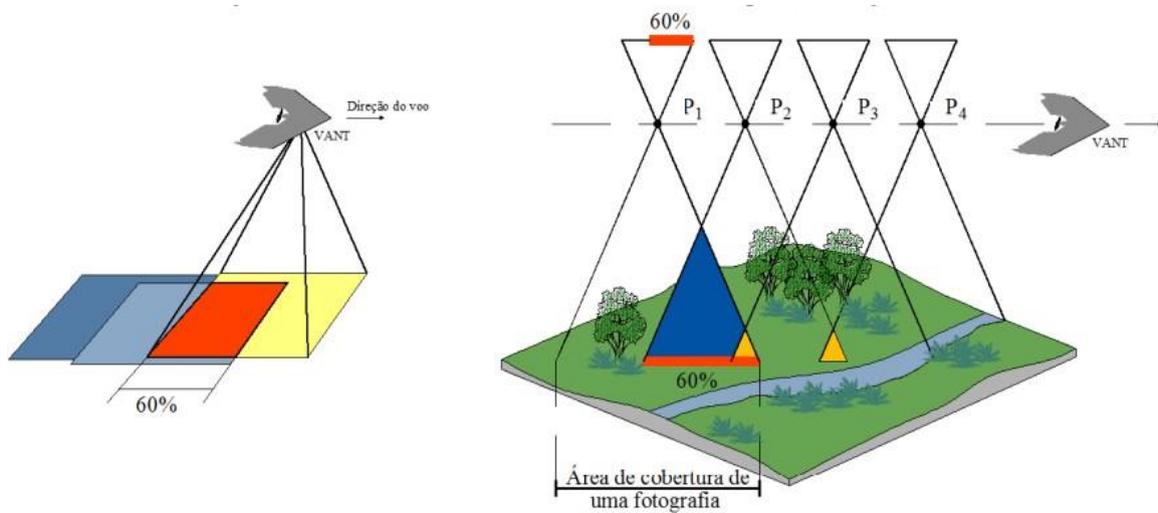
O processamento digital de imagens é utilizado na fotogrametria com o intuito de melhorar a qualidade de visualização, restaurando ou corrigindo distorções, reconhecer padrões nas imagens e identificar feições. As abordagens avançadas de processamento 3D preparam o terreno para desenvolvimento futuro do processamento de nuvens de pontos 3D, permitindo a coleta e processamentos de dados que antes estavam restritos ao uso de equipamentos caros (LATO, 2020).

Segundo Groetelaars (2015), para obter um mapa a partir de fotografias é fundamental a sobreposição das fotos coletadas. Com o uso de procedimentos fotogramétricos, torna-se possível a obtenção de uma réplica tridimensional do terreno em uma certa escala, permitindo determinar a posição planimétrica e altimétrica de pontos do terreno, para extração de uma informação específica.

Assim, para execução do levantamento fotogramétrico é imprescindível o planejamento para obtenção das fotografias. Para a execução de mapas topográficos ou de ortomosaicos utilizam-se normalmente fotografias verticais, em que o eixo da câmera é colocado verticalmente (RUIZ, 2020; MELO JR., 2016; GROETELAARS, 2015).

A cobertura fotogramétrica de uma área é realizada por meio de fotografias verticais obtidas ao longo de diversas faixas ou linhas de voo com uma série de imagens que devem possuir sobreposição longitudinal. Cada fotografia deve possuir uma sobreposição em relação a sua sucessiva foto, sendo normalmente 60% da área coberta por uma fotografia, como ilustrado na Figura 10. Assim, a mesma região da superfície deverá ser captada e registrada em duas ou mais imagens distintas permitindo a combinação de imagens e construção de mosaicos (MANFREDA *et al.*, 2019; MELO JR., 2016).

Figura 10: Processo de captura de imagens para fotogrametria



Fonte: Adaptado (Santos,2014).

4.2 Fases da fotogrametria

Conforme Ruiz (2020) e Groetelaars (2015), no processo de levantamento fotogramétrico há três fases principais:

- I. Registro fotográfico: nesta fase são atribuídos dois grupos de parâmetros, o objeto tridimensional (X, Y, Z) e as informações da câmera, como posicionamento, orientação e tipo da câmera fotográfica
- II. Orientação: embora definida na fase anterior, nesta fase são determinados os parâmetros de orientação e realiza-se por meio da correlação de pontos de controle obtidos em campo, com posições conhecidas nos dois espaços
- III. Restituição: com os parâmetros de orientação agora conhecidos, o espaço-imagem (X, Y) pode ser transformado em espaço-objeto (X, Y, Z) e, desta maneira, gerar um novo modelo geométrico, possibilitando a obtenção de informações quanto à forma, posição, dimensão, dentre outras, do objeto fotografado

De maneira análoga, conforme Jardim e Gomes (2020), Coelho e Brito (2007) a relação geométrica entre imagem e o objeto pode ser classificada em três categorias: gráfica, usando relações geométricas; analógica, usando os componentes ótico-mecânicos; ou analítico e digital, onde o modelamento é numérico e o processamento é eletrônico-digital. Existem diferentes técnicas para esse processamento, entre elas, a mais comum nos softwares de fotogrametria digital atuais é a Correspondência Estéreo Densa (*Dense Stereo Matching* –

DSM, conhecida também como *Structure For Motion* - SFM) que será descrita adiante.

4.3 Técnica Dense Stereo Matching

Dense Stereo Matching (DSM) é uma das formas utilizadas para tratar da técnica de extração de nuvens de pontos por processamento digital de imagens fotográficas (ARAÚJO; GROETELAARS; AMORIM, 2018).

Segundo Viana (2021), Carrivick (2016) o DSM é uma técnica de levantamento topográfico digital que surgiu da combinação da fotogrametria aliada com os avanços em visão computacional. Quando comparado à fotogrametria tradicional o método possui a vantagem de que cada ponto de cena é garantido a partir de um número elevado de imagens, garantindo uma grande qualidade de dados, uma vez que os pontos com precisão abaixo de um limiar são descartados pelo algoritmo (BISTACCHI *et al.*, 2015).

A execução da técnica DSM tem como base a correlação automática de agrupamentos de pixels homólogos em fotos distintas para a criação do modelo geométrico do tipo "nuvem de pontos".

Além disso, o levantamento fotográfico completo do objeto deve-se encontrar sob as mesmas condições de luminosidade, ou seja, sendo realizado em curto intervalo de tempo, possibilitando o processo de correlação dos pixels entre as mesmas (TOLENTINO e GROTELAARS, 2017).

Para que seja possível essa correlação automática, é fundamental a existência de pelo menos 2 imagens da mesma cena, obtidas de posições diferentes (centros de projeções distintos) tal que, com a posse de dados como a distância focal, posição, e orientação, torna-se possível encontrar a posição de um ponto no espaço a partir das coordenadas bidimensionais das imagens pelo princípio da geometria epipolar (descreve a relação entre os dois pontos de vista resultantes), conseguindo encontrar as relações geométricas entre os pontos 3D a partir de suas projeções nas as imagens 2D (MELO JR. *et al.*, 2018).

Em suma, os softwares de fotogrametria digital que utilizam a técnica DSM tem por base as fotografias digitais, realizando um comparativo entre pequenas áreas compostas por conjunto de pixels da imagem digital presentes em duas ou mais fotos que, por sua vez, são formadas pelas texturas ou marcas de contrastes da superfície do objeto ou cena. O processo comparativo se estende até o programa reconhecer as melhores correspondências entre as imagens (MELO JR., 2016; GROETELAARS; AMORIM, 2012).

Quando as correspondências ótimas ou ideais são encontradas, dados da orientação e posição computada pelas fotografias são utilizados para o cálculo da localização do ponto no espaço, mesmos pontos que permitem a construção de ortofotografias e ortomosaicos a partir da retificação das fotografias originais (VIANA, 2021; TAVANI *et al.*, 2014), como descritos

no tópico a seguir.

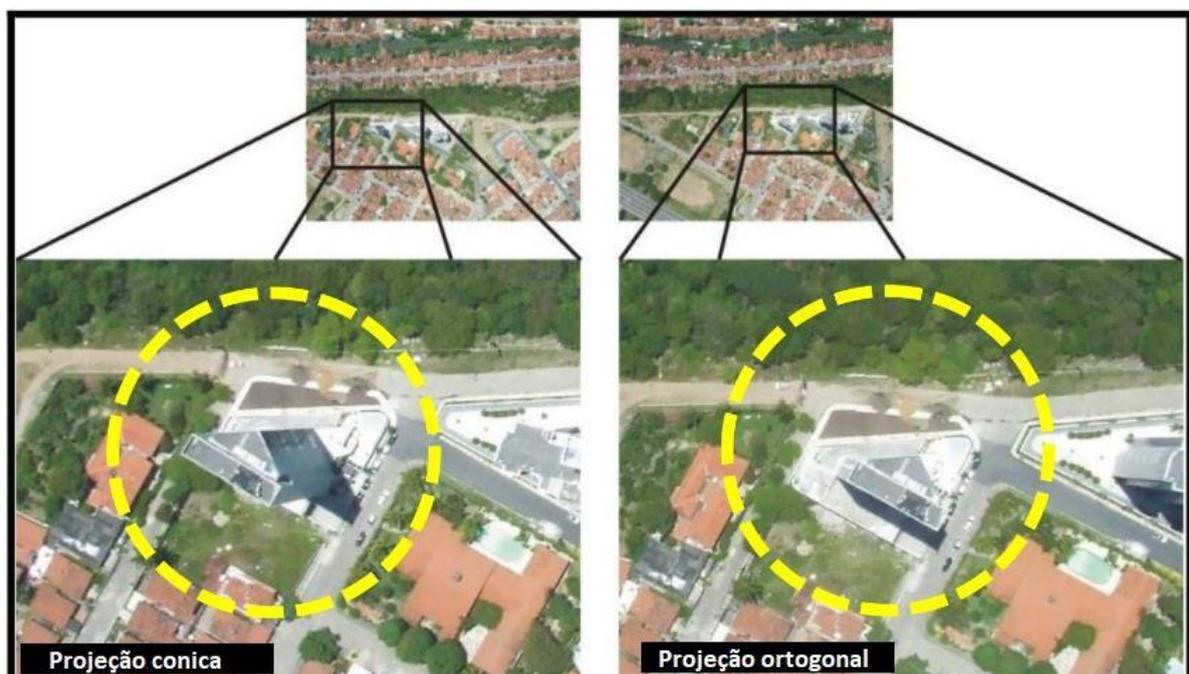
4.4 Ortofotografia e ortomosaico

Uma ortofotografia é uma fotografia que mostra imagens de objetos em suas posições ortográficas reais. As ortofotografias possibilitam o registro das propriedades dos materiais utilizados, as cores, as manifestações patológicas, assim representando o estado de conservação no momento do registro fotográfico, (MELO JR. *et al.*, 2018).

Além disso, segundo Ruiz (2020) e, Melo Jr. (2016), uma ortofotografia se consegue mediante um conjunto de imagens aéreas (tomadas desde um avião, RPA ou satélite) que tenham sido corrigidas digitalmente para representação de uma projeção ortogonal sem efeitos de perspectiva, no qual possibilita a realização de medições exatas, diferindo-se de uma fotografia aérea simples, que sempre apresenta deformações causadas seja pela altitude, perspectiva da câmera ou da velocidade que a câmera se move.

De modo geral, a ortorretificação digital é um procedimento executado por algoritmos computacionais que reorganizam cada píxel da imagem segundo a projeção ortogonal de cada elemento, resultando na ortoimagem digital a partir dos modelos geométricos. As coordenadas do espaço-objeto (X, Y, Z), que fazem parte do modelo digital, são transformadas em coordenadas do espaço-imagem (X, Y) a partir de equações de colinearidade, tal processo representa transformação de uma fotografia original com projeção cônica em uma fotografia com projeção ortogonal (MELO JR. *et al.*, 2018). Processo representado na figura 11.

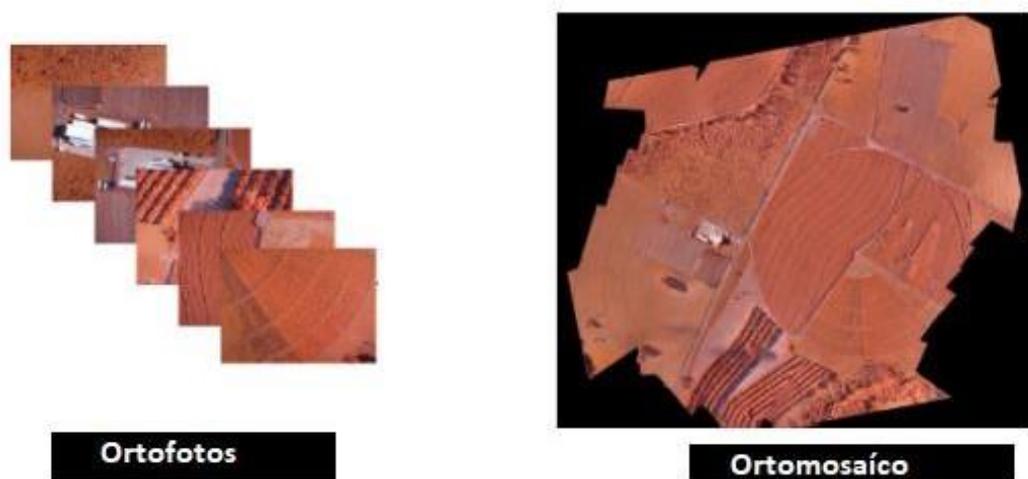
Figura 11: Fotografia digital em projeção cônica e ortogonal



Fonte: Adaptado (Wolf; Dewitt, 2000).

A ortofoto é um resultado da conversão de uma foto original em uma foto cujo os movimentos devido ao relevo e a inclinação da fotografia são excluídos. Então um ortomosaico nada é mais que a criação de um produto a partir de projeção e combinação de imagens originais com o modelo digital de superfície, através do processo de aerotriangulação e mosaicagem das ortofotos, como exposto na Figura 12 (VIANA, 2021).

Figura 12: Criação de ortomosaico a partir de ortofotos



Fonte: Adaptado (Candido,2019).

Particularmente para os objetivos do presente trabalho, os ortomosaicos constituem um potencial recurso para a inspeção de pontes e viadutos, além da capacidade de exibição das manifestações patológicas, permitindo a elaboração de mapas de danos das mesmas. Visto que esses ativos visuais são geometricamente equivalentes a mapas convencionais planimétricos, capazes de gerar a localização ortográfica verdadeira das manifestações patológicas.

4.5 Mapa de danos

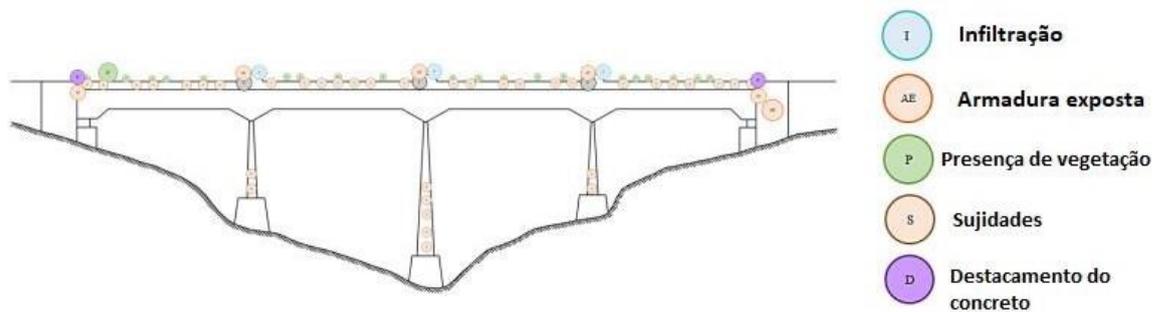
Conforme Carvalho (2018) e Tinico (2009), o mapa de danos é uma documentação gráfica que compila dados através da representação gráfica sobre manifestações patológicas detectadas em uma construção, condensando as informações e diagnósticos adquiridos no mapeamento dos danos com todas as manifestações de degradação da construção, fornecendo informações sobre o estado de conservação.

Melo Jr. (2016) e Barthel, Lins e Pestana (2009) classificam este documento como um mecanismo de representação gráfica do levantamento dos danos identificados numa

construção, relacionando-os com os possíveis agentes e causas, como: fissura, degradação por umidade, destacamentos, corrosão dentre outros. Este elemento traz como forma de apresentação a sobreposição de elementos gráficos, fotografias, hachuras, índices, cores, letras, e legendas contendo dados sobre as manifestações patológicas na construção.

Além disso, segundo Melo Jr., (2016) e Tirrelo e Correia (2012), devido à ausência de regras ou padrões de representação, existe uma liberdade de criação na elaboração de mapas de danos por diversos autores em suas tentativas em demonstrar os sistemas e suas diferentes manifestações patológicas. Assim, o mapa de danos é exemplificado na Figura 13, no qual as manifestações patológicas são identificadas.

Figura 13: Exemplo de mapa de danos



Fonte: Adaptação (Bento, 2021).

Exposto os conceitos básicos disponíveis na literatura a respeito das manifestações patológicas em pontes e viadutos de concreto, Aeronaves Remotamente Pilotadas e critérios de fotogrametria digital, torna-se oportuna a avaliação do método para o estudo exploratório do procedimento de inspeção de manifestações patológicas com uso de RPA, a partir da metodologia adotada neste trabalho, conforme descrita no capítulo adiante.

5. METODOLOGIA

Este capítulo estrutura-se em três tópicos, o primeiro referente aos aspectos conceituais que direcionam a metodologia utilizada nesta pesquisa, e os dois tópicos seguintes descrevem as duas etapas formuladas para obtenção dos objetivos, sendo compostos pela pesquisa exploratória e a experimental.

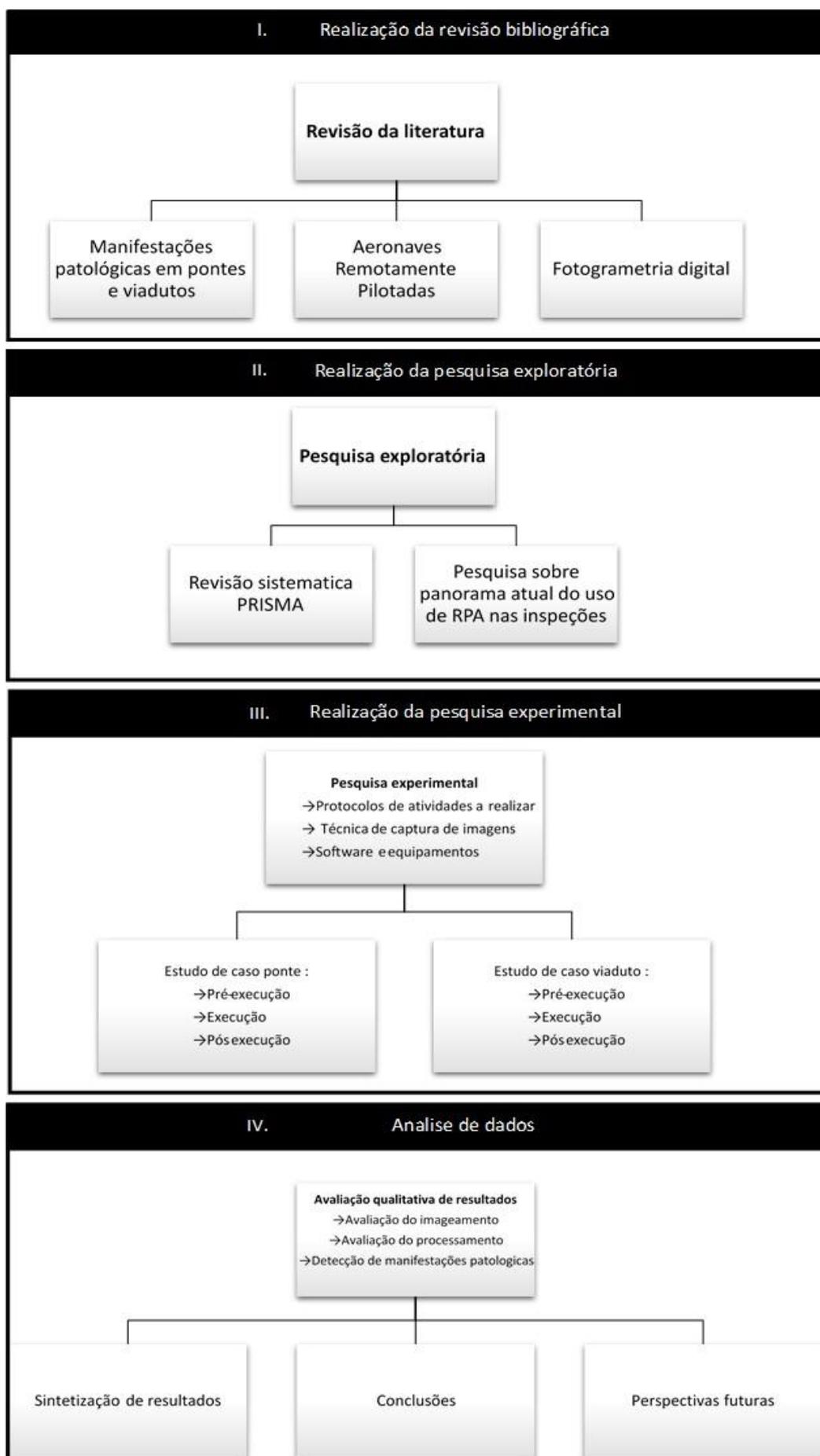
5.1 Delineamento da pesquisa

O trabalho no que diz respeito a sua natureza, classifica-se como pesquisa aplicada objetivando a produção de conhecimentos para aplicação prática e dirigidos à solução de problemas específicos. Adicionalmente, de acordo com a forma de abordagem do problema, classifica-se como pesquisa qualitativa, que segundo Van Aken, Berends e Bij (2012) é caracterizada através de uma abordagem interpretativa, focando-se no caráter subjetivo do objeto analisado, que no caso deste trabalho, é o procedimento de inspeção de manifestações patológicas em pontes e viadutos com uso da RPA, pretendendo estudar suas particularidades.

Consequentemente, a estratégia de pesquisa adotada que melhor se adequa ao presente trabalho é o estudo de caso aplicado de caráter exploratório, que através dos conceitos de Gil (2017) aborda técnicas de experimentação, visto que, durante a inspeção das estruturas foram aplicadas fichas de inspeção visando coletar o máximo de informações sobre a estrutura em análise. Geralmente, adota-se o estudo exploratório quando há pouco conhecimento sobre o tema a ser abordado, que é o caso desta dissertação, visto que existe um limitado número de estudos científicos que abordam o uso da RPA como ferramenta para propósitos de inspeção de manifestações patológicas em pontes e viadutos.

No presente trabalho, a metodologia adotada pode ser dividida em quatro etapas quais sejam: elaboração da pesquisa exploratória, realização do estudo experimental, traçado de diretrizes e, identificação dos fatores positivos e barreiras. Essas etapas são desenvolvidas como segue na Figura 14.

Figura 14: Metodologia da pesquisa



I) Elaboração da revisão bibliográfica com base em consultas a artigos de periódicos e eventos científicos nacionais e internacionais, livros, dissertações, normas técnicas e documentos técnicos relacionados. A revisão bibliográfica envolveu os seguintes temas pertinentes:

- Principais manifestações patológicas detectadas por inspeção visual em pontes e viadutos assim como a sua inspeção.
- Aeronaves Remotamente Pilotadas, definição, características gerais e classificação; legislação nacional e internacional referente a operação da RPA.
- Fotogrametria digital, descrição das suas fases, princípios e classificação, com ênfase na aerofotogrametria.

II) Realização da pesquisa exploratória para investigação e caracterização do panorama atual do uso da RPA na inspeção de OAE's, o método selecionado buscou:

- Realização da revisão sistemática considerando as indicações do método PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*), fundada em artigos científicos relevantes e atuais que consideram o cenário da utilização da RPA como ferramenta para inspeção visual (LIBERATI; ALTMAN; TETZLAFF, 2009).
- Estudo das etapas de coleta e processamento empregadas na literatura, pretendendo avaliar os ativos visuais gerados e a aplicação dos protocolos desenvolvidos.
- Identificação do problema a ser analisado para o melhor entendimento sobre como a RPA deveria ser aplicado para inspeção de manifestações patológicas de pontes e viadutos, seguido do treinamento da tecnologia, assim como a compreensão técnica a fim de determinar as etapas de coleta de dados.

III) Realização da pesquisa experimental do procedimento de inspeção aplicando as diretrizes e determinando as etapas de processamento dos dados, buscando:

- Identificação e caracterização das atividades do processo de implantação da tecnologia RPA: descrição das atividades constituintes, dos recursos necessários e dificuldades encontradas.
- Determinação dos parâmetros de coleta dos dados, objetivando o desenvolvimento do protocolo das atividades a realizar para inspeção de manifestações patológicas de pontes e viadutos, planejamento de voo, *checklist* para missão e planilha *Flight Log*.
- Desenvolvimento e validação do protocolo de atividades a realizar para a

inspeção de manifestações patológicas de pontes e viadutos com o uso da RPA. Analisando e comparando os resultados com as experiências práticas oriundas das referências, buscando estabelecer diretrizes que promovam maiores possibilidades de sucesso na implantação da tecnologia.

- Determinação das etapas de processamento de dados e imagens para a geração de modelos digitais 3D usando a técnica *Dense Stereo Matching* (DSM), por meio de software de fotogrametria digital empregado na geração de modelos geométricos.
- Geração de ortomosaicos das pontes e viadutos por meio dos recursos de exportação do software de fotogrametria digital, para serem utilizadas na inspeção visual e detecção de manifestações patológicas.

IV) Análise dos resultados identificando os fatores positivos e barreiras para inspeção de manifestações patológicas de pontes e viadutos com utilização da RPA, buscou:

- Avaliação qualitativa das vantagens e desvantagens da utilização da RPA como ferramenta para inspeção de manifestações patológicas, análise dos modelos geométricos 3D e ortomosaicos gerados por processamento digital de imagens.
- Sintetização dos resultados obtidos, apresentando e avaliando vantagens e desvantagens do uso da RPA na inspeção de manifestações patológicas, visando vislumbrar perspectivas futuras desta ferramenta na indústria da construção civil.

5.2 Pesquisa exploratória

Conforme delineado na pesquisa, após a revisão bibliográfica foi realizada a pesquisa exploratória. Na presente pesquisa foi elaborada uma revisão sistemática objetivando a análise das publicações científicas relevantes. Trabalhos que apresentam o uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas como ferramenta de obtenção de dados para alguma atividade de inspeção ou mapeamento de pontes e viadutos, contribuindo no entendimento do potencial desta tecnologia e posteriormente auxiliando no desenvolvimento das diretrizes para a inspeção de manifestações patológicas com RPA.

De maneira semelhante, realizou-se a pesquisa exploratória para investigar o panorama atual do uso da RPA, assim como a utilização dos equipamentos e softwares empregados nos procedimentos de inspeção.

A seguir, será apresentada a estratégia de pesquisa utilizada para a elaboração desta revisão considera as indicações do método PRISMA. Assim como revisão sistemática para o

tópico de inspeção de manifestações patológicas em pontes e viadutos com uso da RPA.

5.2.1 Revisão sistemática pelo método PRISMA

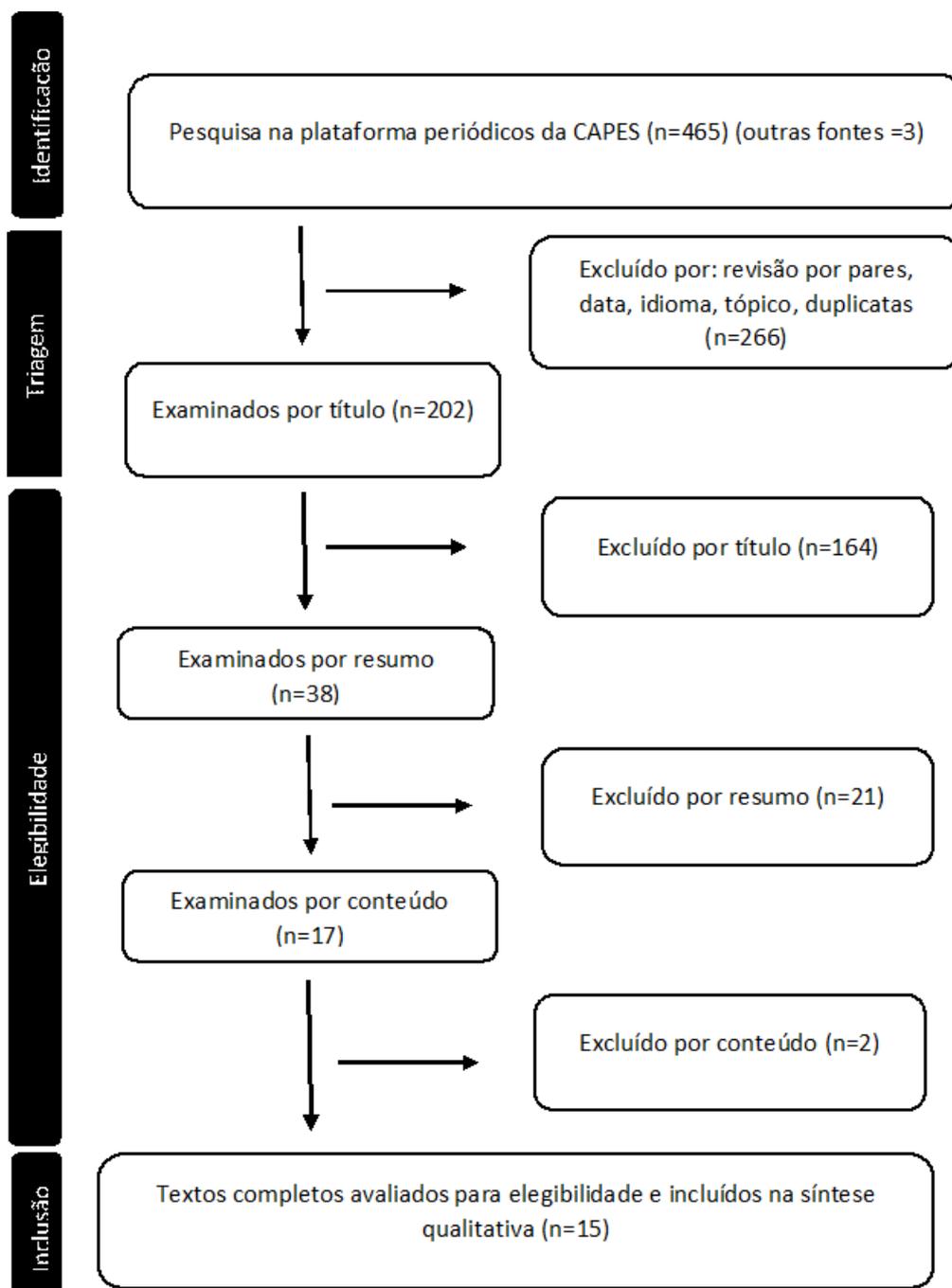
A busca de artigos científicos foi realizada em várias bases de dados, incluindo: JCR, SCIELO, SCOPUS, Web of Science, Science Direct, ICE Proceedings e Journals, DRJI e DOAJ. Acessando a elas por meio do Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). A busca avançada foi realizada em julho de 2021, contemplando os artigos publicados até aquela data e através das opções de pesquisa fornecidas pelo portal.

As palavras chave usadas em inglês para a busca foram: “*Corrosion*”, “*fissure*”, “*Deterioration*”, “*Degradation*”, “*Concrete construction*”, “*Durability*”, “*Inspection equipment*”, “*Unmanned aerial vehicles*”, “*Vehículo Aéreo No Tripulado*”, “*Remotely Piloted Aircraft*”, “*Inspection bridge*”, “*Inspection viaduct*”, “*Drones*”, “*Concrete bridges*”, “*Bridges*”, “*viaduct*”.

Foram aplicados alguns critérios de seleção: (a) Artigos acessíveis no portal de periódicos CAPES para download gratuito; (b) Por pares (trabalhos científicos submetidos ao escrutínio de um ou mais especialistas do mesmo escalão que o autor); (c) Por ano (publicações com no máximo 5 anos de antiguidade, de 2016 até 2021); (d) Por idioma, preferencialmente a língua inglesa, por ser considerado o idioma aceito internacionalmente para artigos científicos na área do trabalho, além de artigos relevantes encontrados na língua portuguesa, publicados em eventos nacionais relacionados à área de pesquisa, também foram considerados; (e) Por tópico (artigos relacionados à engenharia civil, arquitetura e construção); (f) Por duplicatas (trabalhos científicos não duplicados); (g) Por título (excluindo os artigos que não consideram algum tipo de inspeção com RPA); (h) Por resumo (excluindo os artigos que não contêm os parâmetros de interesse analisados na revisão); ao fim sendo excluídos os estudos de revisão sistemática sem o texto completo disponível e com resumo não disponível.

Foi realizada a extração e sintetização de dados como: autoria; ano de publicação; modelo da Aeronave Remotamente Pilotada e suas respectivas características; forma de coleta de dados; metodologia do estudo; software de processamento de dados; resultados e conclusões. Após todo o processo de seleção e aplicação dos critérios de elegibilidade, foram incluídos 15 artigos nesta revisão sistemática, todo esse processo de seleção e aplicação dos critérios de elegibilidade pode ser observado através do fluxograma da seleção dos artigos na Figura 15.

Figura 15: Fluxograma da seleção de artigos



Fonte: Autor (2023)

Logo após a elaboração da pesquisa exploratória foi realizada a pesquisa experimental contemplando a execução de um voo teste em uma ponte, objetivando a coleta de dados e imagens com auxílio da RPA. Com isso, permitindo a avaliação de ativos visuais para a detecção de manifestações patológicas presentes na estrutura de concreto das OEA's.

5.3 Pesquisa experimental

Nesta seção serão indicados os procedimentos empregados na pesquisa experimental. Essas diretrizes objetivam a estruturação, padronização e otimização do procedimento de coleta de imagens, permitindo operar com segurança, como também, gerar ativos visuais com maior qualidade e adequados para as especificações particulares dos softwares de fotogrametria digital que utilizam técnicas de DSM.

A seguir, será apresentada a estratégia adotada para a execução da pesquisa experimental, estruturada por meio do protocolo de atividades a realizar e a técnica de captura de imagens com a RPA. Consecutivamente, também são expostos os equipamentos e softwares empregados para a coleta e processamento de imagens das OAE's.

5.3.1 Protocolo de atividades a realizar

O desenvolvimento do protocolo das atividades a realizar teve por base a análise bibliográfica geral e revisão sistemática PRISMA, através da observação das boas práticas da aplicação desta tecnologia em diversos procedimentos de inspeção. Conforme exposto em capítulos anteriores, alguns autores vêm aplicando metodologias empíricas efetivas para diferentes tipos de inspeções usando a RPA como ferramenta para obtenção de imagens e dados, com isso foi necessária uma adaptação dos estudos realizados enquadrando na perspectiva temática tratada neste presente trabalho.

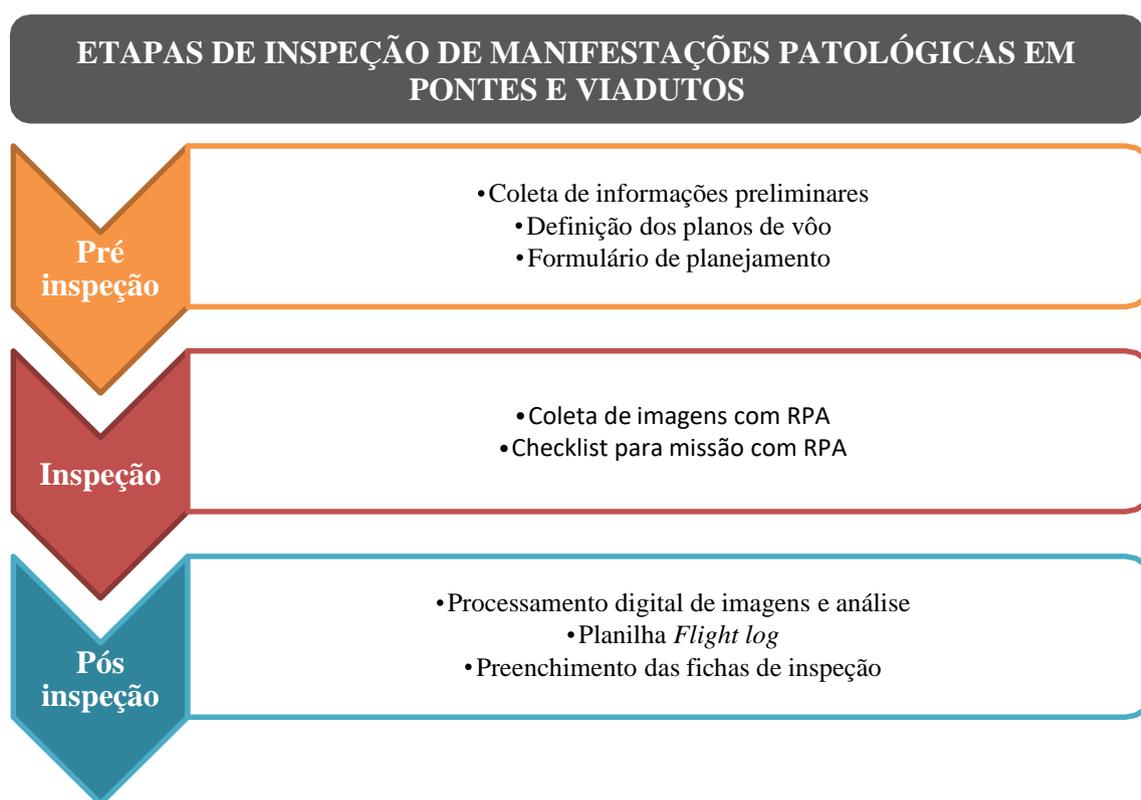
Em suma, existem estudos com protocolos estruturados para outros tipos de objetivos, embora com orientações distintas ao objetivo deste estudo, agregaram valiosas contribuições para o desenvolvimento do protocolo das atividades a realizar como Ruiz (2020). No entanto, estudos realizados por Lee *et al.* (2021); Zollini *et al.* (2020); Liu *et al.* (2019); Duque, Seo e Wacker (2018), apresentam maior similaridade para fornecimento das diretrizes do protocolo para a inspeção de manifestações patológicas em pontes e viadutos. Tendo como justificativa a implícita similaridade na técnica utilizada para coletar fotografias digitais aéreas com RPA, visando o processamento computacional das imagens para a geração de ativos visuais 3D e ortomosaicos.

O protocolo desenvolvido consiste em um conjunto de formulários e *checklists* elaborados ou adaptados conforme as necessidades e particularidades do procedimento de inspeção ao qual o mesmo está alinhado. Portanto, eles auxiliam no planejamento, coleta e processamento de dados no serviço de inspeção com uso da RPA.

Em síntese, o protocolo objetiva a estruturação e guia dos processos de inspeção de pontes e viadutos com uso da RPA e, conseqüentemente a coleta dos dados em campo para

processamento dos dados em laboratório. O protocolo para inspeção de manifestações patológicas em pontes e viadutos é apresentado na figura 16, contemplando as etapas de pré-inspeção, referente ao planejamento; a inspeção, referente ao levantamento fotográfico; e a pós-inspeção, relativa ao processamento das imagens e posterior análise para detecção de manifestações patológicas. Assim, os formulários e *checklist* que contribuem nas fases do protocolo é descrito na continuação.

Figura 16: Protocolo de atividades



Fonte: Autor (2023)

5.3.1.1 Pré-inspeção: Formulário de planejamento

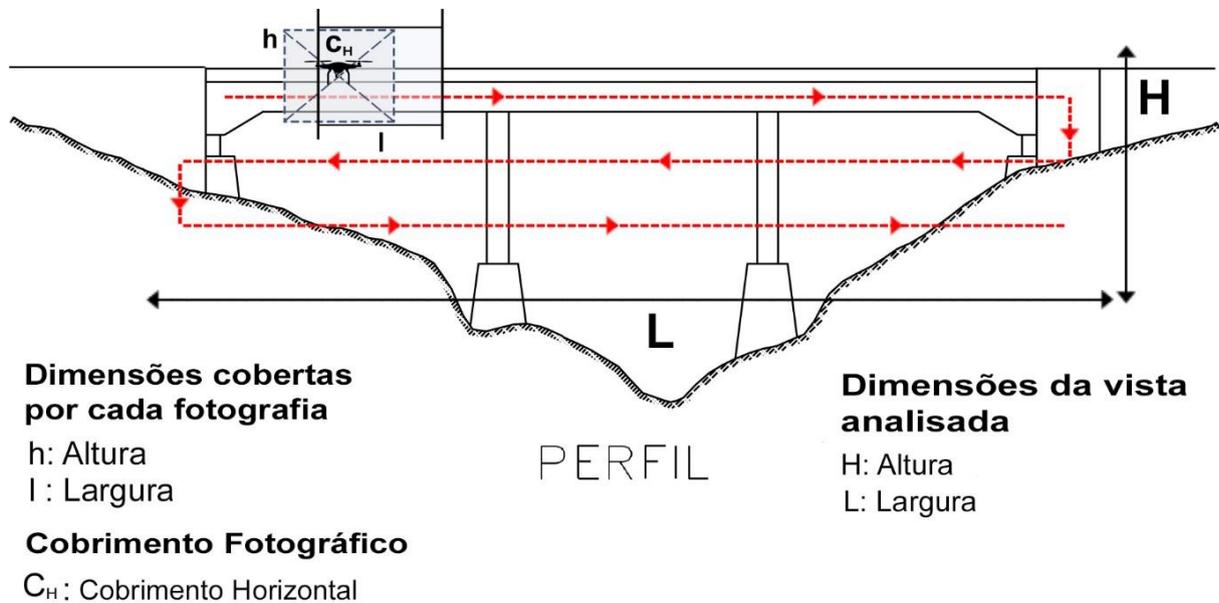
A elaboração do formulário de planejamento usado na etapa pré-execução, permitiu sistematizar a análise do projeto de inspeção de pontes e viadutos além disso, criando um padrão de planejamento.

Tal formulário funciona como guia para realização do fluxo de trabalho e a coleta de informações iniciais fundamentais para execução do procedimento de manifestações patológicas nas OAE's com uso da RPA, visando o conhecimento de informações gerais da edificação, a definição do plano de voo, assim como o plano de captura das imagens.

Na sequência serão detalhadas informações que cada uma dessas seções deve apresentar em sua estrutura (LEE *et al.*, 2021; ZOLLINI *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2019; DUQUE; SEO; WACKER, 2018).

- A. Informações da OAE: padronizar a coleta de dados concernentes à construção a ser estudada, informações como: localização, níveis governamentais pertencente (federais, estaduais e municipais), idade da construção e finalmente o número de vistas a serem estudadas e sua geometria.
- B. Plano de voo: contém os detalhes que compõem o plano de voo, definindo o modelo da RPA a ser usado, o número de baterias requerido para a operação, data e horário do serviço, previsões meteorológicas a considerar (temperatura, chance de chuva, velocidade do vento e visibilidade), tipo de operação (VLOS, EVLOS ou BVLOS), características particulares da localização da construção (distância de aeroportos, aeródromos, terceiros, instalações militares ou prisões), identificação de obstáculos adjacentes, além de indicar as áreas de interesse que serão recobertas ao longo do procedimento de inspeção.
- C. Plano de captura de imagens: a seção final do formulário para planejamento pretende compilar a informação necessária para o plano de captura das imagens, abrangendo dados referentes ao modelo de câmera digital da RPA, distância a partir da qual a RPA realizará a captura de imagens, dimensões da construção coberta por cada fotografia gerada pela câmera (altura e largura), porcentagem de cobertura fotográfica considerado para a ortorretificação e mosaicação, assim como a determinação do número de fotografias mínimo por cada vista, calculado pela equação apresentada na Figura 17.

Figura 17: Número mínimo de fotografias por vista lateral



EQUAÇÃO PARA CÁLCULO DO NÚMERO MÍNIMO DE FOTOGRAFÍAS

$$\text{N}^{\circ} \text{ de fotografías} = \left[\frac{(L - C_H * 75\% - (C_H - C_H * 75\%))}{C_H * (1-75\%) + 1} \right]$$

Fonte: Autor (2023)

5.3.1.2 Inspeção: Checklist para missão com RPA

O *checklist* para missão com a RPA foi usado na etapa de execução do levantamento para a preparação do voo, controle, e operações de pouso e decolagem, objetivando estruturar o procedimento de inspeção em campo e tornar o fluxo de trabalho de captura de imagens mais eficiente, considerando requisitos de segurança e o uso apropriado do equipamento.

O *checklist* abrange todos os procedimentos necessários para operação da RPA em condições adequadas de segurança, preservando a integridade de todos os envolvidos na operação e ao aparelho. Inclui as etapas de cadastro de voo, pré-decolagem, pós-decolagem, pré-pouso, pós-pouso (retomando o voo imediatamente para troca de bateria), e fim de missão. Em seguida, apresentam-se os dados relevantes para cada uma dessas seções (LEE *et al.*, 2021; ZOLLINI *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2019; DUQUE; SEO; WACKER, 2018).

- A. Cadastro de voo: cadastro de dados técnicos do voo como data, horários de início e término, identificação das vistas cobertas e o número de imagens capturadas,

informação registrada para cada bateria usada.

- B. *Checklist* Pré-decolagem: lista de verificação dos elementos necessários para iniciar o voo, englobando as regulamentações básicas para operação da RPA e padronizando a etapa de preparação de equipamentos.
- C. *Checklist* Pós-decolagem: compreende o teste de manobrabilidade do veículo aéreo, verificando o adequado funcionamento dos comandos e o controle total do aparelho, considerando requisitos de segurança e o uso apropriado do equipamento.
- D. *Checklist* Pré-pouso: lista para conferir os requerimentos mínimos para o pouso da aeronave, referente à adequada visualização da câmera e as condições do local de pouso, registrando toda essa informação para cada bateria usada.
- E. *Checklist* Pós-pouso e retomada de voo imediatamente: lista de verificação que organiza os passos para a retomada de voo, abarcando o desligado da RPA, a troca de bateria, verificação do espaço no cartão de memória, comprovação das conexões com o aplicativo e satélite, e finalmente incluindo elementos de pré-decolagem e pós-decolagem, registrando toda essa informação para cada bateria usada.
- F. *Checklist* Fim da missão: lista de verificação com o intuito de constituir o passo a passo do processo de finalização da missão com a RPA.

5.3.1.3 Pós-execução: Planilha Flight Log

A planilha *flight log* é um registro de dados dos voos que objetivam sintetizar a relação de todos os dados físicos dos voos realizados, registrados no formulário de planejamento e no *Checklist* para missão com a RPA, dentre eles o local onde foi realizado o voo, data, horário, fase do estudo no qual o voo se enquadra, número de imagens coletadas, distância da vista analisada a partir da qual as fotos foram obtidas, altitude máxima alcançada pelo veículo aéreo e a duração do voo.

Toda informação sintetizada é de grande utilidade para o posterior processamento computacional das imagens (LEE *et al.*, 2021; ZOLLINI *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2019; DUQUE; SEO; WACKER, 2018).

Os formulários descritos, representam elementos que auxiliam e padronizam o fluxo de trabalho para o procedimento de inspeção de manifestações patológicas em pontes e viadutos, possibilitando um desenvolvimento mais eficiente do trabalho.

Por outro lado, é de extrema importância a utilização de uma técnica de captura de imagens adequada, que juntamente com o protocolo, permita a obtenção de dados e imagens de qualidade suficiente para viabilizar a reconstrução digital da construção num modelo 3D,

e conseqüentemente, das respectivas vistas.

Logo, em seguida é exemplificada a técnica apropriada para capturar imagens visando o processamento digital por meio de softwares de fotogrametria digital.

5.3.2 Técnica de captura de imagens

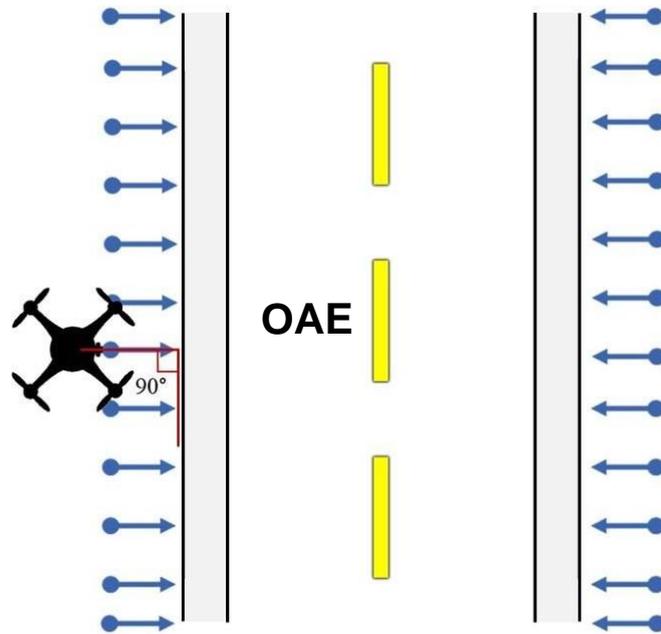
A técnica de coleta de imagens com a RPA foi definida com base na premissa de que essas fotografias seriam processadas em softwares de fotogrametria digital. Logo, foi fundamental seguir os critérios mínimos que possibilitassem a aplicação da técnica de DSM, como por exemplo, a perpendicularidade ao plano a ser estudado.

5.3.2.1 Posicionamento da câmera

Como exposto em capítulos anteriores, a RPA de asa rotativa traz a solução para a captura de imagens perpendicularmente ao plano da superfície analisada, justificando-se pelas características aerodinâmicas deste veículo e sua grande versatilidade na locomoção vertical e horizontal, permitindo o posicionamento da câmera incorporada para a captura de fotografias aéreas.

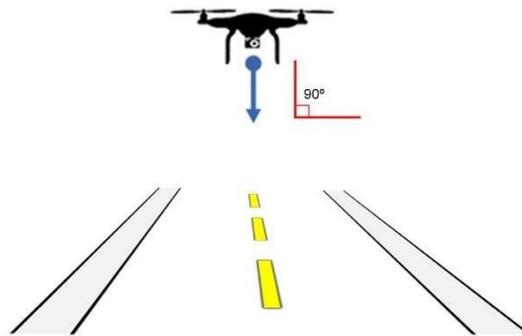
Vale salientar que o movimento de rotação da câmera é limitado, dificultando portanto a coleta de imagens da parte inferior do tabuleiro da ponte. O posicionamento ideal é retratado na figura 18, vista em planta, assim como a coleta realizada na vista superior na figura 19, exemplificando a perpendicularidade pretendida do eixo da câmera sobre a vista da OAE fotografada.

Figura 18: Posição para captura de imagens, vista em planta.



Fonte: Autor (2023)

Figura 19: Posição para captura de imagens para vista superior



Fonte: Autor (2023)

Segundo Ruiz (2020) e Melo Jr. (2016), a principal característica do posicionamento das câmeras para as tomadas fotográficas é o paralelismo entre si, possuindo uma tolerância de até 10 graus, devendo estar sempre perpendicular ao plano do objeto de interesse.

Por outro lado, Verhoeven (2011) afirma que alguns programas de processamento podem lidar com ângulos de incidência entre 45° e 90°, especificamente o software *Agisoft PhotoScan* (novo *Agisoft Metashape*), permitindo assim, processar imagens aéreas verticais e oblíquas.

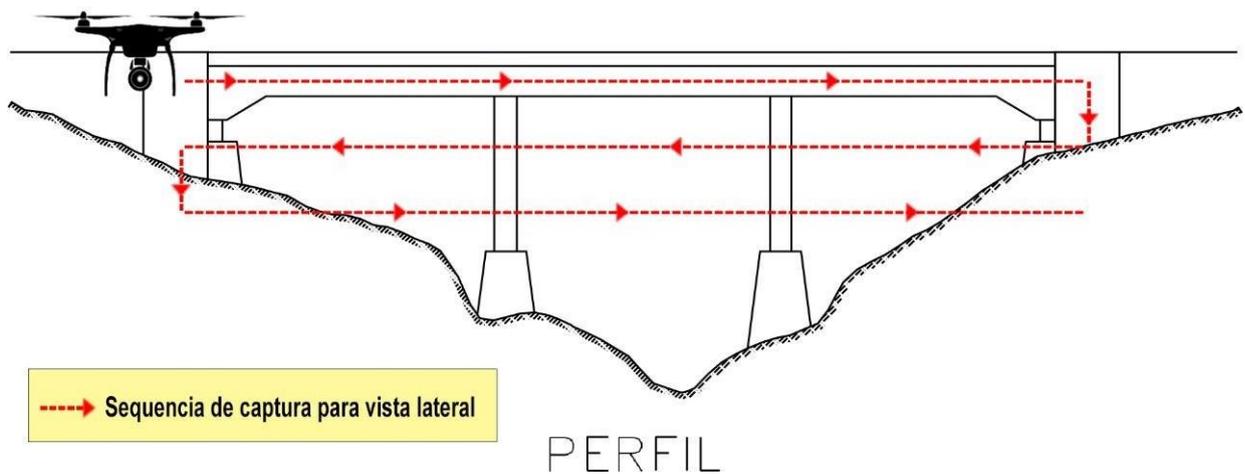
5.3.2.2 Sequência de captura

Tendo por base as informações anteriormente mencionadas, a Figura 20 e figura 21 expõe a sequência de captura de imagens e posicionamento da câmera em relação aos planos das vistas laterais e superior da ponte ou viaduto.

Assim, a sequência de captura proposta para a pesquisa foi a horizontal, de forma independente para cada vista da OAE analisada, adotando-se a que proporciona maior conforto ao piloto conforme critérios de manobrabilidade da RPA, da geometria da construção analisada e em função dos obstáculos encontrados em campo.

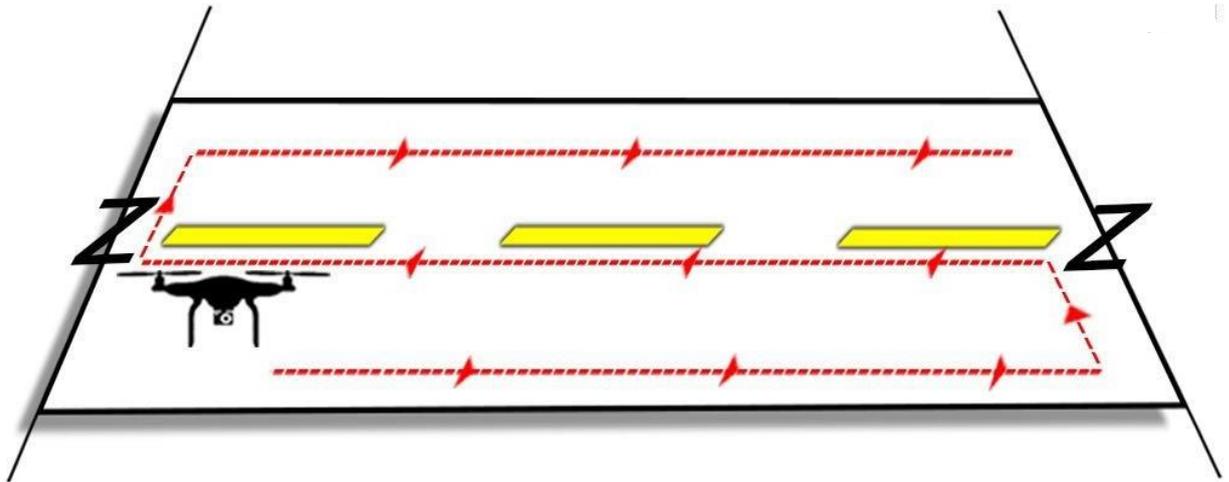
Na sequência de captura horizontal as fotografias são coletadas em faixas horizontais, iniciando de esquerda para direita e realizando uma varredura horizontal de toda a vista, devendo-se respeitar o princípio da sobreposição.

Figura 20: Sequência para coleta de imagens para cada vista da OAE



Fonte: Autor (2023)

Figura 21: Sequência para coleta de imagens para vista superior da OAE



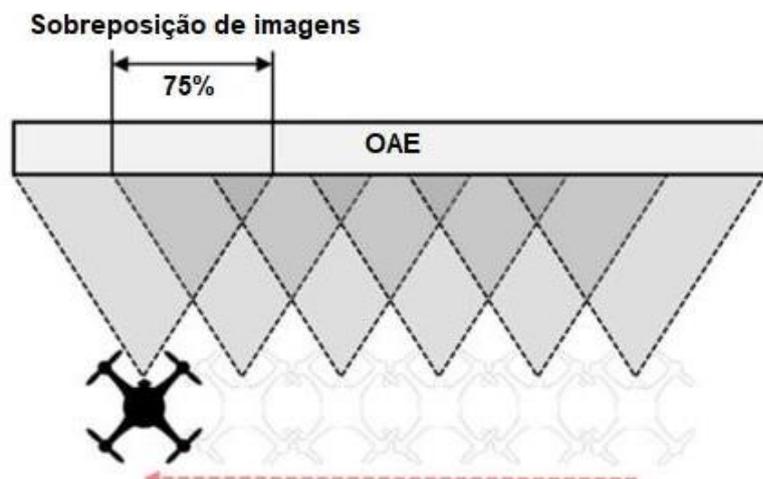
Fonte: Autor (2023)

5.3.2.3 Sobreposição entre fotografias

A sobreposição entre cada fotografia é outro aspecto essencial na coleta de imagens do objeto estudado, sendo um item fundamental para maximizar os procedimentos referentes às correlações automáticas do software de fotogrametria digital por meio da técnica DSM.

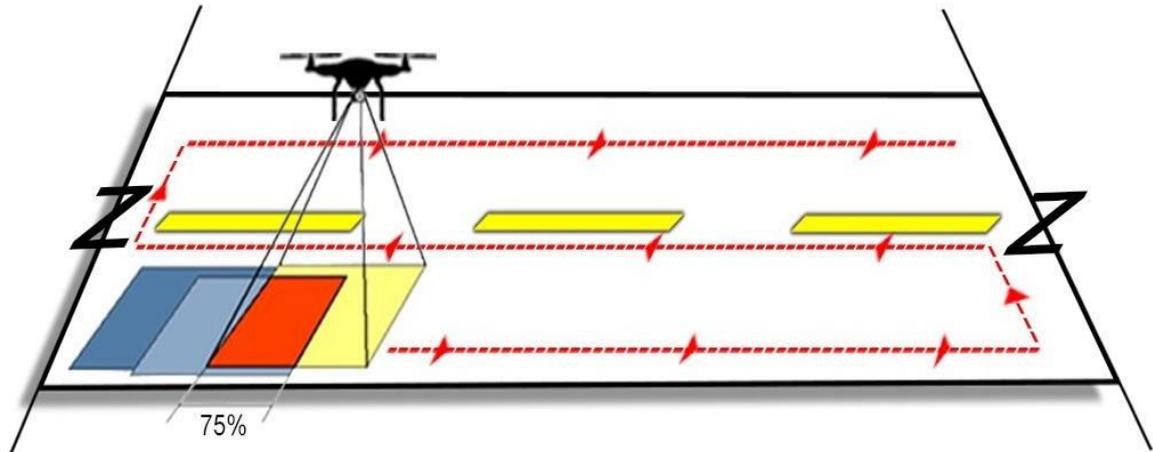
Segundo Ruiz (2020), Lin *et al.* (2020), Nakao *et al.* (2019) e Melo Jr. (2016) deve-se garantir a sobreposição mínima de 75- 80% de uma fotografia para outra, tanto na vistas laterais conforme ilustrado na Figura 22 quanto na vista superior como na figura 23, a fim de possibilitar a detecção automática dos pontos homólogos nas imagens digitais e, conseqüentemente, a orientação da imagem.

Figura 22: Posicionamento das tomadas fotográficas para vista lateral



Fonte: Adaptado (Agisoft, 2018)

Figura 23: Posicionamento das tomadas fotográficas para vista superior



Fonte: Autor (2023)

Em suma, Zollini *et al.* (2020) e Duque; Seo; Wacker (2018) indicam que o software de fotogrametria digital *Agisoft PhotoScan* (novo *Metashape*) permite a reconstrução digital tendo só como premissa que o mesmo objeto ou cena, ou parte desses, sejam visualizadas somente em duas imagens com centros perspectivais diferentes. Porém, esses autores não mencionam em seus trabalhos os valores de sobreposição entre fotografias necessários para se obter resultados precisos no processamento com o *Agisoft Metashape* (antigo *PhotoScan*). Em conclusão, Verhoeven (2011) afirma que qualquer parte que seja visível em pelo menos duas imagens pode ser reconstruída por esse software.

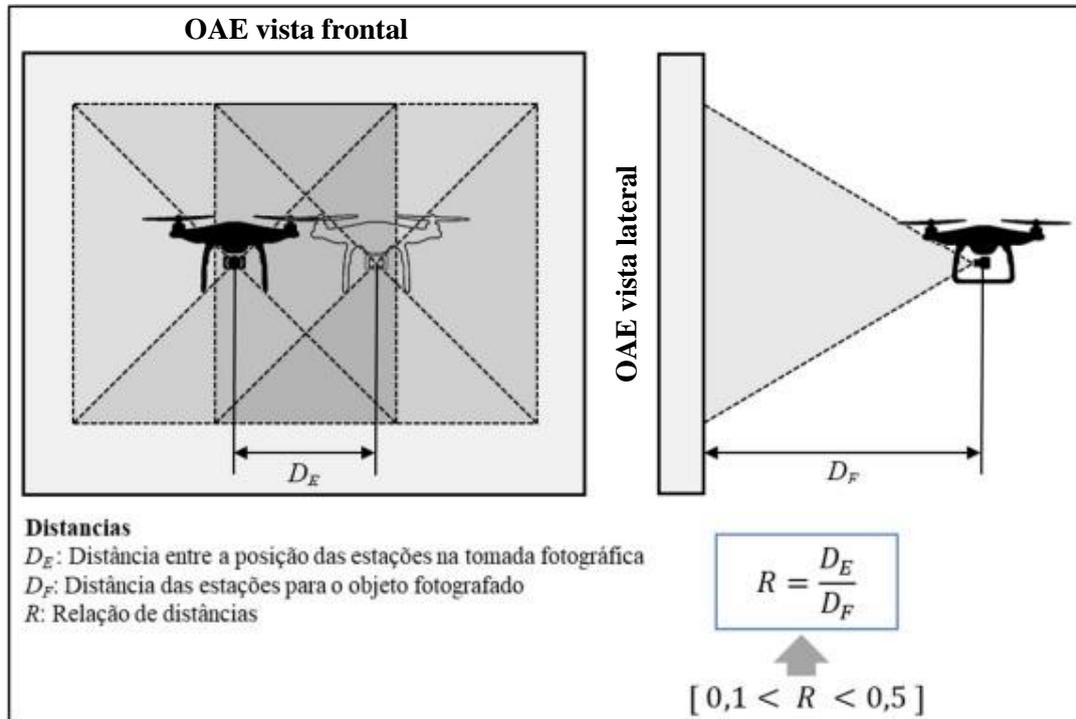
Além disso, outro aspecto fundamental abordado por Ruiz(2020), Melo Jr. (2016), é a importância de garantir adequada relação da distância entre a posição das estações na tomada fotográfica e a distância das estações para a vista que se pretende fotografar. Assim, os autores recomendam que essa relação, que garante a sobreposição entre as fotografias, deve se manter no intervalo inferior de 0,1 e superior de 0,5 como exemplificado na Figura 24, pois se o mesmo for muito pequeno a correlação automática dos pontos é facilitada, mas a precisão geométrica na reconstrução 3D é prejudicada, sendo ocorrido o contrário caso o valor dessa relação seja elevado (PIERROT-DESEILLIGNY; DE LUCA; REMONDINO, 2011).

Logo, conforme os tópicos expostos anteriormente, os parâmetros adotados para a coleta de imagens na pesquisa consideraram áreas de sobreposição entre as fotografias de

aproximadamente 75% nos sentidos longitudinal e lateral das faixas de voo da RPA.

De maneira análoga, a distância da estação para a vista lateral foi de 8 metros, e conseqüentemente, a distância entre as estações na tomada fotográfica foi de 1,8 metros no sentido vertical e 3,2 metros no sentido horizontal, já na vista superior a distância foi de 60 metros, permitindo uma relação de distâncias dentro dos intervalos exemplificados na Figura 24.

Figura 24: Relação de distância entre as tomadas fotográficas



Fonte: Adaptado (Ruiz, 2020)

5.3.2.4 Iluminação e sombras

Quanto à iluminação e sombras na captura de imagens, é indicado que se execute o levantamento fotográfico completo da cena, sem alteração das condições de luminosidade (DUQUE; SEO; WACKER, 2018).

Dessa maneira, deve-se realizar o levantamento em um curto espaço de tempo, quando sob condições de iluminação solar, visto que no caso de registros aéreos com a RPA é necessário atentar há ocorrência de grandes sombras presentes em dias muito ensolarados, devendo ser realizado o voo quando o sol estiver alto (RUIZ, 2020; COELHO; BRITO, 2007).

5.3.2.5 Equipe para captura de imagens

Nesta etapa de captura de imagens, para todos os voos, pelo menos três membros devem ser envolvidos: o piloto, o observador que guiou o piloto para a coleta de imagens, e um

segundo observador que se concentrou na segurança do voo (aproximação à ponte, cabos de alta/média tensão, veículos, aeronaves, pássaros, árvores ou outros quaisquer obstáculos que possam pôr em riscos o voo).

5.3.3 *Software e equipamentos utilizados*

O *software* de processamento selecionado foi o *Agisoft Metashape*, os equipamentos de processamento foi um computador disponibilizado pelo laboratório de computação da escola politécnica da Universidade de Pernambuco, e finalmente, o equipamento de captura de imagens corresponde a RPA de asas rotativas Mavic 2 Pro, apropriado para voos ascendentes ou descendentes e que permitiram voos mais próximos às construções analisadas, conforme analisado em estudos semelhantes que utilizaram equipamento de mesmo fabricante, sendo essas escolhas detalhadas a seguir.

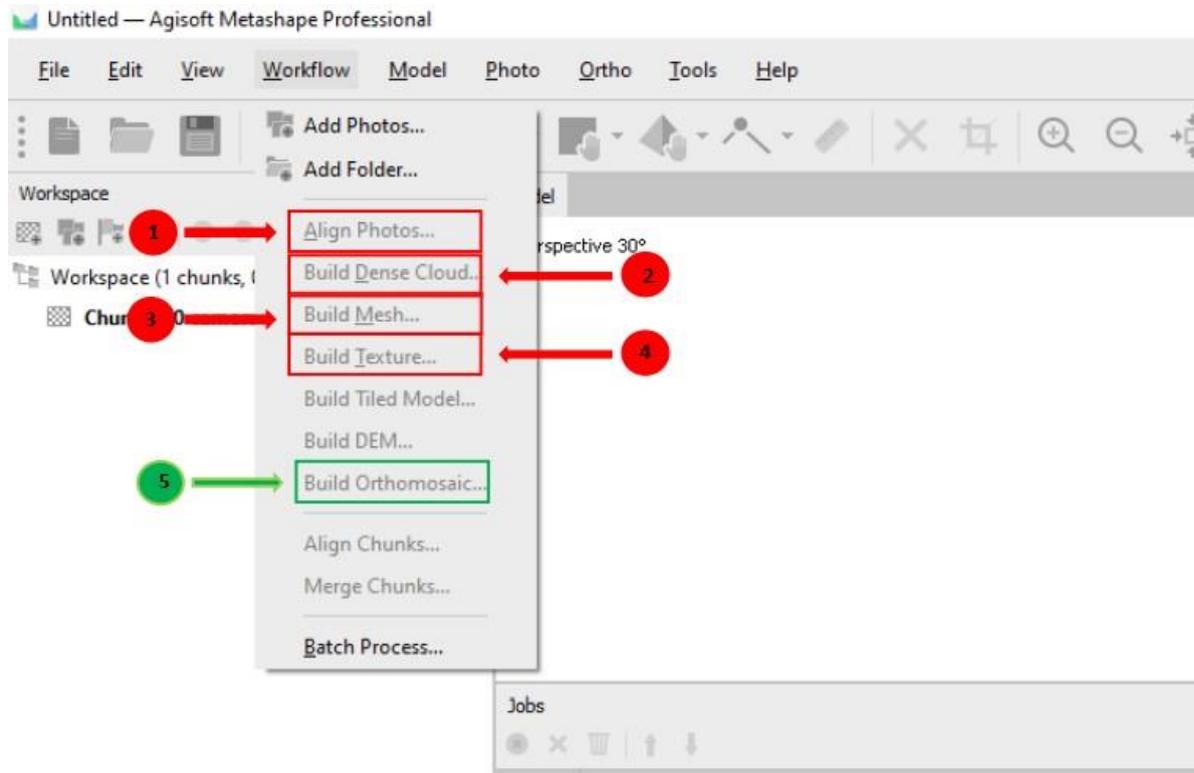
5.3.3.1 *Software de fotogrametria digital*

Existem diversos softwares disponíveis no mercado que tornam possível a reconstrução digital por meio da técnica DSM, capazes de gerar uma nuvem de pontos que reproduzem a geometria do objeto analisado baseando-se no processamento de fotografias digitais, dentre \os quais se pode destacar Pix4D, Drone Deploy, *Metashape* e Autodesk *Recap* (VIANA, 2021; RUIZ, 2020; ZOLLINI *et al.* (2020); DUQUE; SEO; WACKER, 2018; MELO JR., 2016).

Assim, dentre os softwares que cumprem o requisito de exportar mosaicos ortoretificados, essencial para detecção de manifestações patológicas que é o objetivo do trabalho, estudos realizados por Viana (2021), Zollini *et al.* (2020), Ruiz (2020), Duque; Seo; Wacker (2018) e Melo Jr. (2016), enfatizam as vantagens do *Agisoft Metashape* (antigo *PhotoScan*), que se tem apresentado como uma ferramenta de baixo custo, intuitiva e que proporciona modelos digitais com boa qualidade visual.

Com isso o software escolhido para a etapa de processamento das imagens foi o *Agisoft Metashape*. A seguir são descritas algumas particularidades dessa ferramenta, inicialmente apresentando a sequência do fluxo de trabalho na Figura 25.

Figura 25: Fluxo de trabalho Agisoft Metashape



Fonte: Autor (2023)

A versão específica do software da *Agisoft* utilizado foi o *Metashape Pro* para sistema operativo Windows 64 bits. Ele possui um fluxo de trabalho composto por etapas bem objetivas e uma interface clara no que diz respeito à operação, que possui a seguinte sequência: alinhamento de imagens; construção da nuvem densa; construção da malha ou *mesh*; aplicação da textura; e construção do ortomosaico.

A seguir, serão expostas de maneira resumida as fases que compõem a sequência de processamento para obtenção de modelos 3D e ortomosaicos no *software Agisoft Metashape*:

1. A etapa um do processamento é composta pelo alinhamento das imagens (*Align Photos*), cujo o software procura semelhanças entre as fotos. Tal etapa realiza o cálculo de parâmetros geométricos, posições do ponto principal além de parâmetros de rotação das fotos. Resultando em uma nuvem de pontos ou *Tie Points*, que é um material primário para gerar a nuvem densa de pontos, modelos 3D e pontos de conexão entre ortofotos no processo de mosaicagem.
2. Na etapa dois é realizada a nuvem densa de pontos ou *Dense Cloud*, sendo realizada uma seleção com a exclusão de pontos indesejados para a geração do Modelo Digital da Superfície (MDS). Com isso, através de posições estimada do sistema de coordenadas presente na RPA, sendo calculados informações de profundidade para

cada fotografia através do *software*. A qualidade pode ser ajustada de parâmetros que vão de *lowest* a *ultra high* porém o aumento de qualidade resulta na necessidade computacional de custo mais elevado. Além disso é disponibilizado um recurso avançado no qual quando de objetiva um processamento mais detalhado deve-se utilizar a opção *agressive* ou quando tal detalhamento não é necessário pode ser usado o modo *mild* (Agisoft,2018).

3. Na etapa três é criada a malha ou *Mesh*, através de grupos vértices da nuvem densa de pontos. Alguns parâmetros disponíveis no software, como: Tipo de Superfície (*Surface Type*), Dados de Origem (*Source Data*) e Contagem de Faces (*Face Count*). No que diz respeito ao Tipo de Superfície, optou-se pelo modelo 3D arbitrário e nos dados de origem a malha selecionada foi a nuvem densa de pontos pelo maior nível de detalhamento obtido com o uso da mesma (AGISOFT,2018).
4. Na etapa quatro aplica-se uma texturização no modelo tridimensional gerado, assim aprimorando o visual do elemento gerado, no caso analisado melhorando a detecção das manifestações patológicas das pontes e viadutos. Alguns parâmetros são definidos nessa etapa, tais como: Tamanho/contagem da Textura (*Texture size/count*) e Modo de Mapeamento (*Mapping mode*). O modo mapeamento é um ponto fundamental pois define como a textura será aplicada ao elemento analisado, conforme expostos no quadro 5. A ortofoto adaptativa (*Adaptive orthophoto*) é especificada para superfícies divididas em partes planas e regiões verticais (RUIZ, 2020; MELO JR., 2016).

Quadro 5: Variações de textura Agisoft Metashape

Modelos de textura	Indicação
Genérica (<i>Generic</i>)	Permite parametrizar a textura para os tipos de geometrias arbitrarias.
Ortofoto Adaptativa (<i>Adaptive orthophoto</i>)	Neste modo, a superfície do objeto é dividida em partes planas e regiões verticais, em que cada uma recebe a textura separadamente para obtenção da precisão.
Ortofoto (<i>Orthophoto</i>)	A superfície do objeto inteiro é texturizada por projeção ortográfica.
Esférica (<i>Spherical</i>)	Adequado para classe de objetos que possuem formato esférico.
Foto única (<i>Single photo</i>)	Permite gerar a textura a partir de uma única foto selecionada.
Manter uv (<i>Keep uv</i>)	Usado para reconstruir texturas usando diferentes resoluções ou para gerar atlas de texturas para modelos parametrizados em outros programas.

Fonte: Adaptado (Melo Jr., 2016)

5. Na etapa cinco que constitui a última, para geração do ortomosaico o *software* executa o processo de ortoretificação das imagens coletadas no qual as fotos são projetadas ortogonamlmente, sem apresentar deslocamentos devido ao relevo e inclinação da câmera. Após a aplicação do processo corretivo é realizada a mosaicagem das ortofotos e gerado um produto único. Tais produtos puderam ser exportados, sendo utilizadas neste o formato de arquivo TIFF - *Tagged Image File Format*.

O software utilizado permite a escolha de uma faixa diversa no que se refere a qualidade do resultado que se deseja obter, variando de uma faixa de muito baixa resolução (lowest) até muito alta (ultra high), aumentando a necessidade computacional de forma proporcional a elevação da qualidade selecionada.

Neste aspecto, alguns requisitos mínimos para utilização do *Agisoft Metashape* são necessários, tais como: o sistema operacional Windows XP ou superior (32/64 bits), processador Intel Core 2 Duo ou equivalente e 4 GB de memória RAM. No que diz respeito a configuração recomendada são: Windows 7 SP 1 ou superior, processador Intel Core i7 e 16 GB de RAM, permitindo processar até 300-400 fotografias assumindo uma resolução das fotografias da ordem de 10 megapixels (AGISOFT, 2018).

5.3.3.2 Aeronave Remotamente Pilotada

Os equipamentos selecionado para a realização da pesquisa foram o Mavic 2 Pro e Phantom 4 Pro V 2.0 conforme mostrado na figura 26. A escolha é fundamentada pela confiabilidade e bons resultados expostos na experiência piloto de diferentes autores (LEE *et al.*, 2021; BENTO, 2021; ALIYARI; ASHRAF; AYELE, 2021; ZOLLINI *et al.*, 2020; RUIZ, 2020; LIU *et al.*, 2019; DUQUE; SEO; WACKER, 2018), com equipamentos iguais ou similares do mesmo fabricante.

Além disso, a escolha por estes equipamentos também se justifica por representar uma tecnologia acessível, fácil comércio no mercado brasileiro, fator que pode promover maior facilidade de incorporação da mesma pelo setor da construção civil, em construtoras e empresas especializadas nos serviços de inspeção ou monitoramento de construções.

Figura 26: Equipamentos RPAs utilizados



Fonte: Autor (2023)

O DJI Mavic 2 Pro (estudo de caso A) e DJI Phantom 4 Pro V 2.0 (estudo de caso B) são RPAs classificadas como quadricóptero devido a sua sustentação ser feita por quatro asas rotatórias, classificando-se ainda conforme a legislação brasileira do tipo RPAS Classe 3 (ANAC, 2017).

Estas aeronave possuem uma bateria inteligente no consumo durante o uso que proporciona autonomia máxima de aproximadamente 31 minutos de voo, comandado via controle remoto (integrado ao celular) conforme a figura 27, interligado a dois aplicativos de captura de voo: Drone Deploy (para captura de imagens da vista superior da ponte/viaduto) e Pix4D *capture* (para captura de imagens das vistas laterais da ponte ou viaduto), a câmera possui uma resolução de 20 megapixels permitindo registrar fotos no formato JPEG e DNG e vídeos em MP4 (DJI, 2018).

Figura 27: Controles das aeronaves utilizadas



Fonte: Autor (2023)

Os aplicativos de comando Drone Deploy e Pix4D *capture*, auxiliam na captura de imagens e disponibilizam o monitoramento de vários parâmetros de voo, como altitude da aeronave, velocidade, alarmes dos sensores de proximidade, distância da construção analisada, número de satélites em conexão com a RPA, nível de bateria, além disso a câmera presente na RPA, permite o acompanhamento de imagens que estão sendo coletadas em tempo real.

O DJI Mavic 2 Pro e DJI Phantom 4 Pro V 2.0 apresentam alguns dispositivos de segurança como a função *Return to Home* (RTH), permitindo o retorno da aeronave ao ponto de decolagem em caso de perda conexão com o dispositivo de controle, devido ao sistema de GPS presente neste equipamento (DJI, 2018). A seguir serão apresentados os estudos de caso realizados assim como os critérios que levaram a escolha das mesmas.

5.4 Escolha das OAE's para estudos de caso

A escolha das OAE's para a execução do estudo foi realizada na área urbana da Região metropolitana do Recife e proximidades, levando em consideração os critérios legais estabelecidos pela ANAC, conforme exposto em capítulos anteriores.

Alguns pontos são fundamentais para escolha da construção analisada, tais como: a operação com a RPA em distancias com um raio maior que 5 Km de aeroportos, aeródromos, heliportos e não sobrevoar instalações militares.

Além disso, de maneira análoga, evitou-se a seleção de pontes e viadutos para coleta de imagens que possuíssem uma concentração grande de pessoas e veículos, quando necessário foi avaliado o horário que o fluxo seria reduzido (associada a luminosidade ideal nas vistas analisadas) pois no caso de viadutos o fluxo de veículos pesados poderia gerar uma colisão com equipamento ou até mesmo instabilidade devido o deslocamento de correntes de ar gerado com a passagem dos mesmos. Também buscou-se evitar gerar uma concentração de pessoas curiosas buscando observar a operação de funcionamento do equipamento e inúmeras perguntas sobre o procedimento que estaria sendo realizado.

Para a execução do estudo e aplicação do protocolo de voo, foram selecionados duas OAE's sendo 1 ponte e 1 viaduto, pois esses tipos de construções são o foco da pesquisa. Na sequência são apresentados os estudos de caso com as construções escolhidos para realização dos trabalhos de campo.

5.4.1 Estudo de caso A

Foi selecionada para o primeiro estudo de caso, uma ponte (figura 28) localizada no município de Paudalho, sobre o Rio Capibaribe. Antes da execução da inspeção foi realizada uma reunião com a equipe que realizaria a coleta de imagens com a RPA, para que fosse possível um conhecimento mais profundo do lugar em que a ponte estava inserida, verificando os locais de acesso para equipe, os pontos de apoio para o operador da RPA, local ideal para realização das decolagens com a aeronave, pontos fundamentais para otimização do trabalho e da coleta de imagens, além de condições de risco, climáticas, geográficas e de vizinhança.

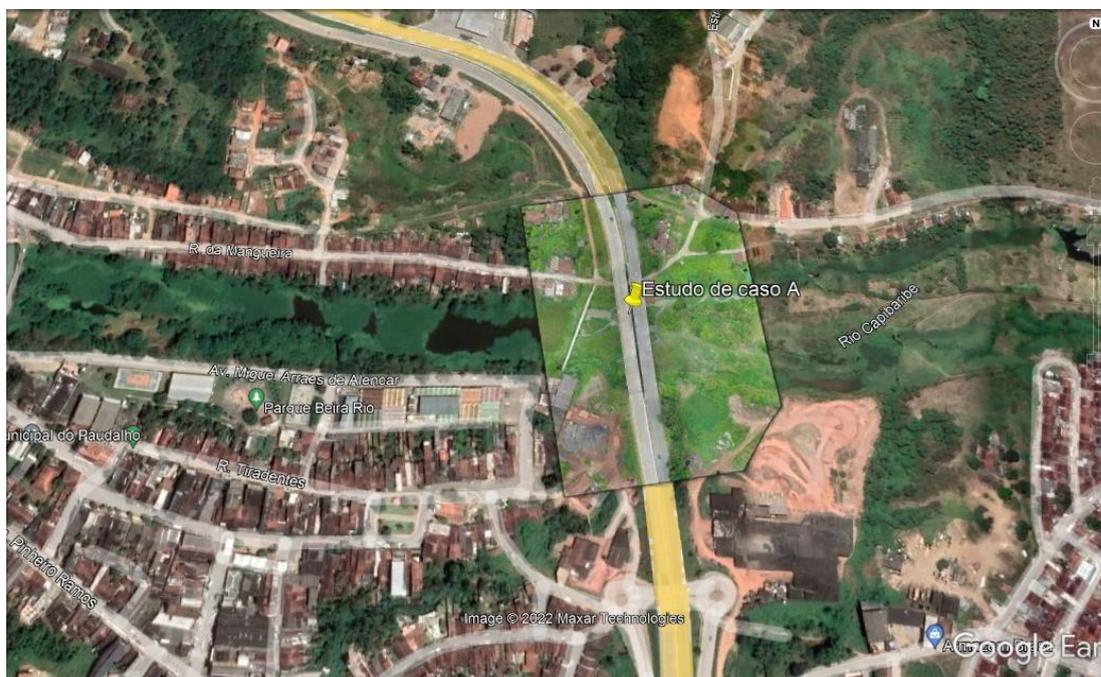
Figura 28: Fotografia aérea do estudo de caso A



Fonte: Autor (2023)

A ponte está localizada no município de Paudalho (figura 29), mais precisamente sobre a BR-408 (aproximadamente do km 73.7 até o km 73.82). Tal construção foi selecionada para o primeiro estudo de caso devido a presença de pontos nas suas laterais que permitiam a realização da decolagem da aeronave e um bom posicionamento dos observadores, além disso por se tratar de uma construção mais isolada a baixa movimentação de pessoas ao seu redor foi uma característica ideal para o primeiro estudo de caso permitindo o treinamento e aperfeiçoamento inicial dos voos com a RPA, assim como a aplicação dos protocolos.

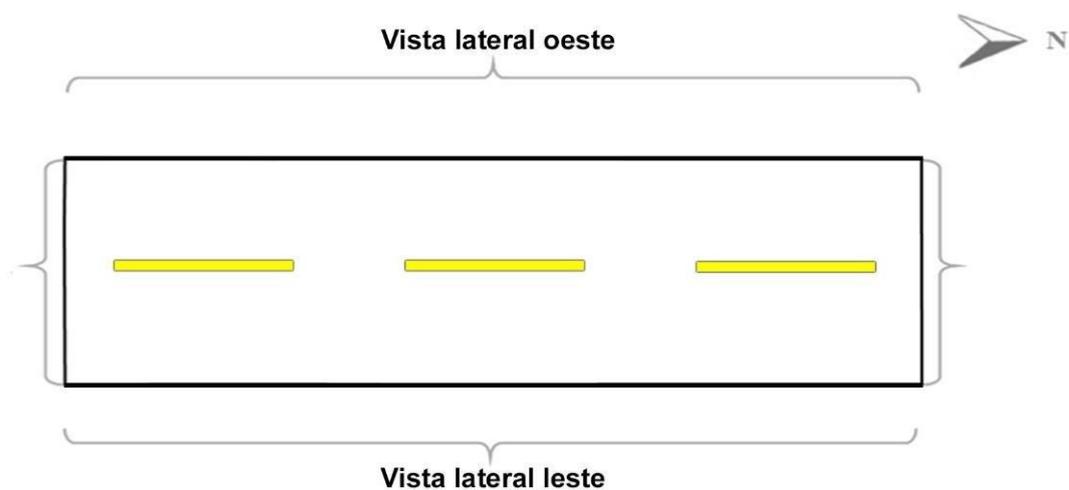
Figura 29: Imagem de satélite do estudo de caso A



Fonte: Autor (2023)

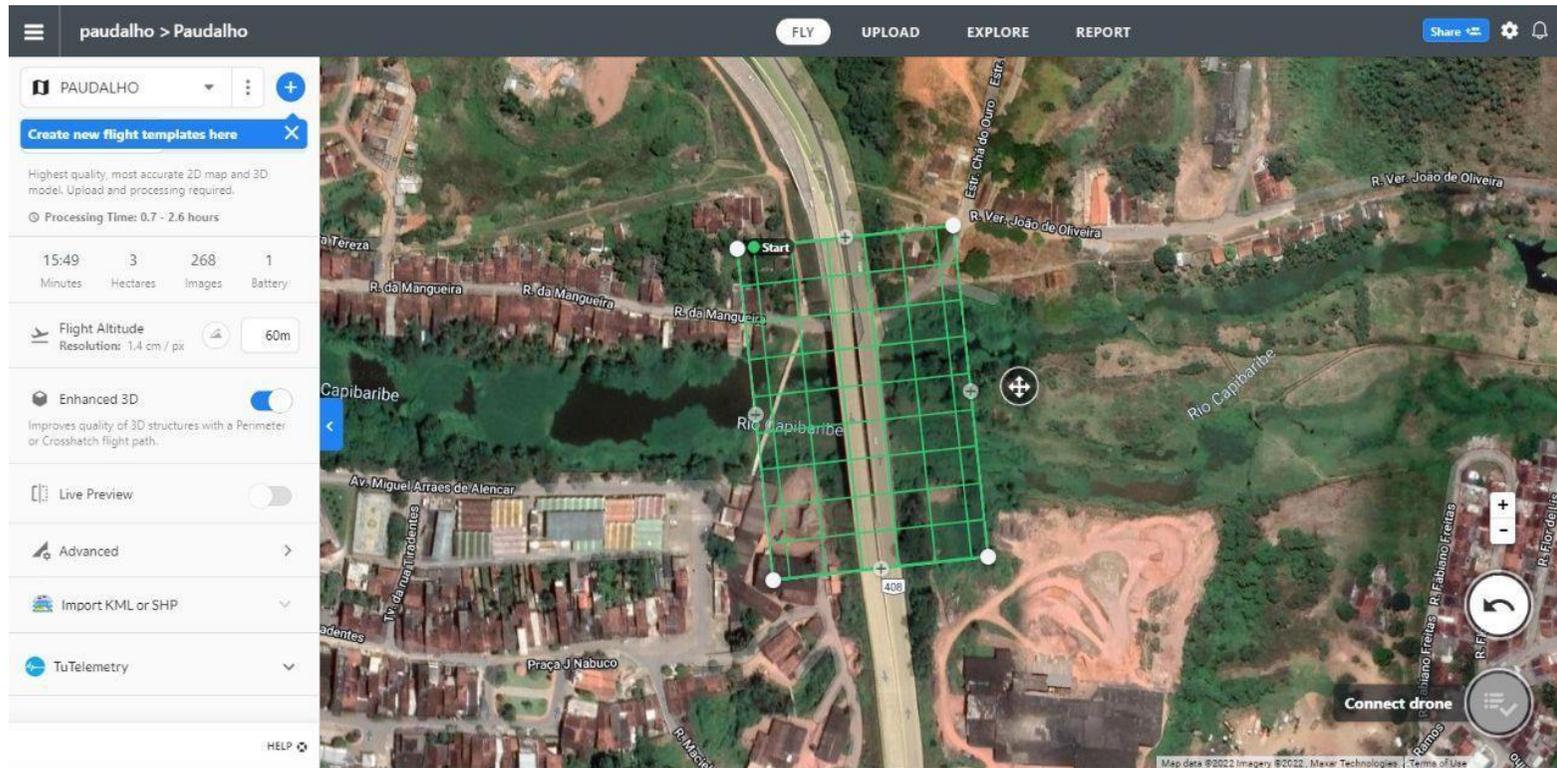
Antecedendo os trabalhos de campo, foram colhidas informações atualizadas do local, que incluíram esboço para as vistas que foram realizadas o levantamento através de um croqui (Figura 30). Além disso foi realizado o plano de voo para determinação da rota de movimentação da RPA e coleta de imagens da vista superior de maneira automatizada via Drone Deploy (figura 31).

Figura 30: Croqui com as vistas analisadas



Fonte: Autor (2023)

Figura 31: Plano de voo Drone Deploy estudo de caso A



Fonte: Autor (2023)

5.4.2 Estudo de caso B

Selecionou-se também para o estudo de caso, um viaduto (figura 32) localizado no município de Goiana. Antes da execução da inspeção foi realizada uma reunião com a equipe que realizaria a coleta de imagens com a RPA, para que fosse possível um conhecimento mais profundo do lugar em que a ponte estava inserida, verificando os locais de acesso para equipe, os pontos de apoio para o operador da RPA, local ideal para realização das decolagens com a aeronave, pontos fundamentais para otimização do trabalho e da coleta de imagens, além de condições de risco, climáticas, geográficas e de vizinhança.

Figura 32: Fotografia aérea do estudo de caso B



Fonte: Autor (2023)

O viaduto está localizada no município de Goiana (figura 33), mais precisamente sobre a BR-101.

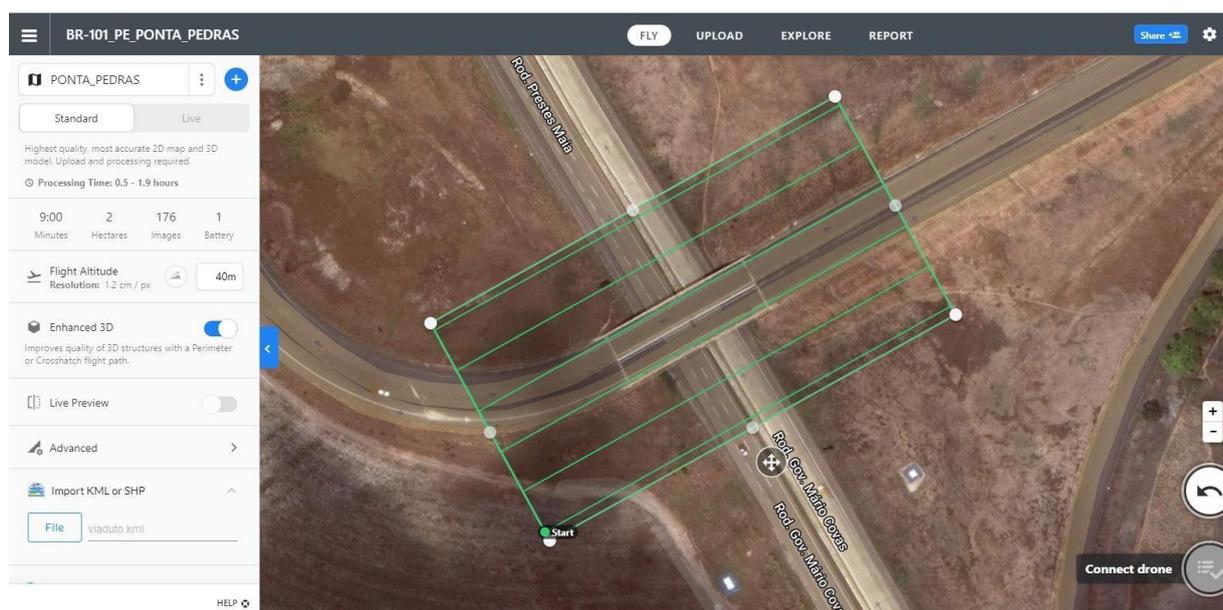
Figura 33: Imagem de satélite do estudo de caso B



Fonte: Autor (2023)

Antecedendo os trabalhos de campo, foram colhidas informações, conforme o estudo de caso anterior. Além disso foi realizado o plano de voo para determinação da rota de movimentação da RPA e coleta de imagens da vista superior de maneira automatizada via Drone Deploy (figura 34).

Figura 34: Plano de voo Drone Deploy estudo de caso B



Fonte: Autor (2023)

No capítulo adiante serão tratados os resultados obtidos, assim como as discussões acerca das análises realizadas.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos após a execução das etapas metodológicas descritas no capítulo anterior. Tendo início pela pesquisa exploratória, responsável pelo direcionamento das boas práticas atuais com a utilização da RPA como ferramenta de inspeção em pontes e viadutos, facilitando o entendimento do potencial desta tecnologia e auxiliando no desenvolvimento de diretrizes para inspeção de manifestações patológicas com o uso da RPA.

Logo em seguida, são expostos os resultados obtidos nos estudos de caso desenvolvidos neste trabalho, tratando das questões referentes ao desempenho do equipamento RPA, do protocolo das atividades a realizar, técnica de coleta de imagens assim como o processamento no software de fotogrametria digital *Agisoft Metashape*. Assim, os resultados serão discutidos sob dois pontos de vista, a captura de imagens com a RPA e o processamento computacional. Finalmente, serão apresentados os resultados da análise dos ativos visuais gerados em busca de manifestações patológicas nas pontes e viadutos assim como suas diretrizes.

6.1 Pesquisa exploratória

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos na pesquisa exploratória, sendo composta pela seleção através da revisão sistemática PRISMA, com a análise de publicações científicas relevantes na atualidade usando a RPA para inspeção de pontes e viadutos.

6.1.1 Resultados da revisão sistemática pelo método PRISMA

Para a revisão sistemática, foi realizada a análise completa dos dados de 15 artigos previamente selecionados (Lee *et al.*, 2021; Zollini *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2019; Duque; Seo; Wacker, 2018; Ayele; Droguett, 2019; Lin *et al.*, 2020; Ellenberg *et al.*, 2016; Yamada *et al.*, 2017; Nakao *et al.*, 2019; Aliyar; Ashrafi; Ayele, 2021; Yoon *et al.*, 2022; Ferroz; Dabous, 2021; Reagan; Sabato; Niezrecki, 2017; Sguissardi, 2019; Mader, 2016, levando em consideração os critérios de elegibilidade previamente descritos na metodologia, sendo extraídas as informações mais relevantes para o adequado entendimento das experiências científicas do uso da RPA como ferramenta de inspeção em pontes e viadutos.

Para facilitar o entendimento e a visualização das extrações dos dados presentes nos textos para posterior análise foram utilizados 3 quadros que contemplam informações sobre

os estudos, características dos equipamentos, e dados qualitativos essenciais conforme exposto nos quadros 6, 7 e 8.

Quadro 6: Dados gerais sobre os estudos realizados

N	Autor/ano	País	OAE analisada
1	Lee <i>et al.</i> (2021)	República da Coréia	Viaduto
2	Zollini <i>et al.</i> (2020)	Itália	Viaduto
3	Liu <i>et al.</i> (2019)	China	Ponte
4	Duque, Seo e Wacker (2018)	EUA	Viaduto
5	Ayele e Droguett (2019)	Noruega	Ponte
6	Lin <i>et al.</i> (2020)	Japão	Ponte
7	Ellenberg <i>et al.</i> (2016)	EUA	Ponte
8	Yamada <i>et al.</i> (2017)	EUA	Ponte
9	Nakao <i>et al.</i> (2019)	Japão	Ponte

Quadro 6: Dados gerais sobre os estudos realizados			
10	Aliyar, Ashrafi e Ayele (2021)	Noruega	Ponte
11	Yoon <i>et al.</i> (2022)	Japão	Ponte
12	Ferroz e Dabous, (2021)	RS	Ponte
13	Reagan, Sabato e Niezrecki (2017)	EUA	Viaduto
14	Sguissardi (2019)	Brasil	Ponte
15	Mader (2016)	República Checa	Ponte

Fonte: Autor (2023)

Quadro 7: Características da RPA utilizada nos estudos incluídos

N	Modelo da RPA	Número de rotores	Tipo de asas	Classificação segundo ANAC	Planode voo
1	DJI Agras	4	Rotatória	RPAS classe3 (< 25 kg)	Automá-tico
2	FlyNovex	6	Rotatória	RPAS classe3 (< 25 kg)	Manual
3	Dji Inspire 2	4	Rotatória	RPAS classe3 (< 25 kg)	Manual
4	Dji Phantom 4 Obs deploy e pho-toscan	4	Rotatória	RPAS classe3 (< 25 kg)	Manual
5	Não informado	6	Rotatória	Não infor-mado	Não in-formado
6	Dji Phanton 4	4	Rotatória	RPAS classe3 (< 25 kg)	Manual
7	Dji Phantom 4	4	Rotatória	RPAS classe3 (< 25 kg)	Manual
8	Fabricação própria	4	Rotatória	RPAS classe3 (< 25 kg)	Manual

Quadro 7: Características da RPA utilizada nos estudos incluídos					
9	Fabricação própria	4	Rotatória	RPAS classe3 (< 25 kg)	Manual
10	Phantom 4 Pro	4	Rotatória	RPAS classe3 (< 25 kg)	Manual
11	Não informado	4	Rotatória	RPAS classe3 (< 25 kg)	Não informado
12	Não informado	4	Rotatória	Não informado	Não informado
13	PSI InstantEyeGen4 heavy lift	4	Rotatória	RPAS classe3 (< 25 kg)	Manual
14	Phantom 4	4	Rotatória	RPAS classe3 (< 25 kg)	Automático e manual
15	ADFEX cópter Go-liath Coax 8 from CADMIC.	4	Rotatória	RPAS classe3 (< 25 kg)	Automático e manual

Fonte: Autor (2023)

Quadro 8: Resultados dos estudos incluídos

N	Vantagens do uso da RPA	Desvantagens do uso da RPA	Comparação com o meio tradicional	Conclusão do estudo
1	Economia de tempo e simplificação da tarefa.	Tempo de voo curto	Algoritmo para análise de imagens para detecção de trincas e fissuras.	Redução drástica do tempo e o custo necessários no processo de seleção e classificação de imagens da ponte.
2	Permite realizar inspeções periódicas fáceis, rápidas e com redução dos custos	Condições climáticas como rajadas de vento superior a 30 km/h não deve ser realizado o voo	A possibilidade de obter imagens aéreas em locais de difícil acesso, não gera problemas de trânsito devido a interdição de vias	Mostrou-se satisfatório para a identificação, levantamento e classificação de áreas de concreto deteriorado além de quantificar informações métricas, como largura e comprimento de trincas e extensão de áreas intemperizadas.

3	Coleta de imagens re-alizada de maneira rá-pida, reconstrução de imagens 3D o que fa- cilita a detecção de trincas	As condições cli- máticas frias po- dem resultar em um baixo desem-penho da bateriasda RPA, buscar horários com a iluminação solar uniforme	Existem estruturas de grandes dimen- sões sendo difícil re- alizar inspeção de maneira tradicional	O uso da RPA para detecção de trincas em pila- res de pontes evidenciou-se com potencial para implemen- tação prática de inspeções, sendo a geração do modelo 3D um facilitador na detecção de trincas
4	Voar entre seções complicadas perto da ponte e geração de um modelo virtual 3D de imagens.	Limitações causa- das principal- mente por condi- ções climáticas desfavoráveis, in- cluindo veloci- dade do vento ilu- minação limitada e superexposição e subexposição da imagem em re-	Acesso a lugares que o inspetor não conseguiria acessar	Os métodos ba- seados em foto- grametria se mostraram efici- entes para gera- ção do modelo virtual 3D e quantificação de danos.

Quadro 8: Resultados dos estudos incluídos				
		giões que não foram devidamente iluminadas		
5	Realização de inspeção em locais de difícil acesso de qualquer ponte complexa.	O processo buro-crático para realização do voo junto aos órgãos regulamentados.	Redução de risco e custo	O uso da RPA se mostrou uma ferramenta eficiente contribuindo significativamente para superar as deficiências da forma atual de inspeção
6	Não exigência de equipamentos delicados, não impactar no fluxo do tráfego e não ameaçar a segurança dos inspetores	Distorção em algumas imagens coletadas	As práticas atuais de inspeção de pontes são caras e podem atrapalhar o tráfego. Além disso, as documentações no local também são demoradas e as avaliações podem ser inconclusivas, redução o custo associado à inspeção	Garantiu-se precisão e integridade do modelo de realidade reconstruído, reconstrução 3D para estruturas elevadas, detecção e localização automatizada de danos e relatório

7	O rastreamento da deterioração em uma resolução temporal muito maior e fornecimento de uma melhor compreensão de como as mudanças ocorrem com o tempo para melhorar os modelos de previsão	A influência de sombras, ruído de imagem e outros fatores operacionais e ambientais que afetam as imagens da superfície com fissuras e trincas, perda de sinal do GPS	Custos elevados para inspeção das estruturas e longo tempo, acesso a locais remotos	Demonstrou a viabilidade da aplicação de uma RPA e imagens associadas para medições quantitativas de tipos de danos simulados encontrados em pontes
8	Coleta de imagens com alta resolução e em espaços de difícil acesso.	Manter manualmente uma distância segura e fixa do alvo de inspeção devido à perturbação do vento e à falta de noção de distância para alvos distante. Riscos potenciais causados por obstáculos que não podem ser detectados por sensores ou imprevisíveis como rajadas de vento.	Coletar informações de locais inacessíveis a inspetores humanos	A RPA proposta mostrou-se capaz de inspeções do píer, laje de piso, sapata e espaços estreitos de pontes, de difícil acesso para inspetores humanos.
9	Capturar imagens com segurança e facilidade	O risco de colisão e falhas quando se aproximam de	Apresenta custos adicionais e causam congestionamento	Foi possível a identificação de rachaduras com

Quadro 8: Resultados dos estudos incluídos

	da superfície de estruturas analisadas	estruturas para capturar imagens	de tráfego.	tecnologia de modelagem 3D e criação de informações 3D de danos e desenvolvendo um banco de dados de manutenção de pontes baseado em modelo 3D
10	Não requer o fechamento de faixas de tráfego para o período da fiscalização, os inspetores estão expostos a riscos de segurança significativos quando operam em áreas de acessibilidade limitada, redução de custos	Condições climáticas adversas como o vento, o gelo e a escuridão reduzem a eficácia operacional, aumentando consideravelmente a possibilidade de cometer erros ou ser imprecisos durante os voos, perda de sinal do GPS em alguns locais	As ferramentas atuais de detecção, inspeção e monitoramento de danos em pontes não são capazes de capturar o perfil de risco do sistema em tempo real, por meio de ferramentas tradicionais de inspeção, torna-se difícil identificar trincas e outras anomalias, principalmente elementos de difícil acesso	A implantação de drones na inspeção de pontes pode economizar tempo e dinheiro, enquanto as inspeções de pontes habilitadas por drones podem ser significativamente afetadas por vários perigos relacionados a condições ambientais sendo bastante prejudicadas em ambiente frio

Quadro 8: Resultados dos estudos incluídos

Quadro 8: Resultados dos estudos incluídos				
11	Fornecimento de dados de forma precisa e econômica.	Dificuldade de acesso a algumas regiões da ponte devido a perda do sinal de GPS	Não expõe a segurança dos inspetores	O uso da RPA para levantamento de imagens e detecção de danos se mostrou bastante eficiente, também foi possível a criação de um modelo 3D.
12	Acessibilidade aprimorada, eficiência de custos, não necessidade de fechamento de tráfego	Perda de sinal do GPS e condições de vento também podem resultar na perda de controle da RPA	As técnicas tradicionais são demoradas, subjetivas, muitas vezes incompletas e inseguras para os inspetores	As RPAs provaram melhorar a acessibilidade e a eficiência de custos, evitar o fechamento do tráfego, bem como reduzir os riscos de segurança durante o processo de inspeção.

Quadro 8: Resultados dos estudos incluídos				
13	Permite a geração de modelos 3D de elementos com geometria complexa, deslocamento de campo total	Limitações na transmissão de dados;	Eliminação do risco de trabalho em altura; Diminuição de custos; maior velocidade	A RPA pode ser usada para escanear grandes estruturas, com geometria complexa, reconstruindo sua forma, permitindo a geração de modelos 3D
14	Agilidade no processo de inspeção, imagens coletadas com boa qualidade fornecendo detalhes importantes de patologias.	Não conseguiram coletar imagens da parte inferior do tabuleiro devido a rotação vertical da câmera	Acesso a locais no qual inspetores não conseguiriam chegar, não interdição de vias para realização de inspeção	Concluiu-se que a RPA alcançou o resultado esperado, facilitando e agilizando os processos.
15	Viabilidade econômica e eficácia na detecção de danos	Dificuldade na sincronização de planos de voo para captura de dados simultânea das 3 RPAs usadas para o estudo	Eliminação do risco de trabalho em altura; diminuição de custos; maior velocidade	A detecção de danos baseada em RPA é uma ferramenta útil e flexível de auxílio na inspeção da construção. Facilitando significativamente a interpretação visual de características e danos

Fonte: Autor (2023)

Após a elaboração da revisão sistemática e a construção dos Quadros 6 a 8, foi confirmada a existência de diferentes tipos de RPA potencialmente úteis para diversos objetivos na indústria da construção civil, entre eles, a inspeção de manifestações patológicas em pontes e viadutos. Foi percebido nos estudos analisados que a RPA sustentada através de asas rotatórias permitiram deslocamentos mais rápidos e versátil nos voos.

As características citadas são primordiais na captura de imagens horizontais e verticais como demonstrado nos estudos de Liu *et al.* (2019), Duque, Seo e Wacker (2018), Lin *et al.*(2020), Nakao *et al.*(2019), Reagan, Sabato e Niezrecki (2017), nos estudos foram realizados reconstruções em modelos 3D de pontes e viadutos integralmente ou apenas elementos estruturais, como pilares que fazem parte da OAE's sendo coletadas com uso da RPA.

A versatilidade da RPA é capaz de permitir a movimentação em todos os eixos possíveis, sendo eficaz na captura de imagens verticais simples e verticais oblíquas como é apresentado nos casos de estudo de Mader *et al.* (2016) e Sguissardi (2019) na detecção da superfícies, constituindo assim, uma ferramenta útil para a inspeção visual de elementos verticais.

Conforme as informações expostas no Quadro 4, as RPAs de asas rotatórias utilizadas nos estudos estão enquadradas na classificação RPAS classe 3 da ANAC, conseqüentemente as missões com este tipo de aeronave apresentam restrições e requerimentos mais brandos segundo a legislação vigente (ANAC, 2017; DECEA, 2020). Tal característica viabiliza o uso deste tipo de aeronave em áreas urbanas e canteiros de obras, potencializando a aplicação desta ferramenta tecnológica na indústria da construção civil.

Além disso, os estudos analisados confirmaram a boa estabilidade da aeronave, como descreveram Ferroz e Dabous (2021), pois sua decolagem e aterragem vertical, não necessitam de grandes áreas. Portanto, essas aeronaves representam uma opção promissora para o procedimento de inspeção de manifestações patológicas de OAE.

Após a execução da revisão sistemática, a figura 35 apresenta o resumo das principais vantagens e desvantagens observadas na RPA segundo o tipo de sustentação, asas rotatórias. Todas elas foram inferidas após a análise completa dos textos incluídos na revisão e a comparação dos Quadros apresentados.

superfícies, constituindo assim, uma ferramenta útil para a inspeção visual de elementos verticais.

Conforme as informações expostas no Quadro 4, as RPAs de asas rotatórias utilizadas nos estudos estão enquadradas na classificação RPAS classe 3 da ANAC, conseqüentemente as missões com este tipo de aeronave apresentam restrições e requerimentos mais brandos segundo a legislação vigente (ANAC, 2017; DECEA, 2020). Tal característica viabiliza o uso deste tipo de aeronave em áreas urbanas e canteiros de obras, potencializando a aplicação desta ferramenta tecnológica na indústria da construção civil.

Além disso, os estudos analisados confirmaram a boa estabilidade da aeronave, como descreveram Ferroz e Dabous (2021), pois sua decolagem e aterragem vertical, não necessitam de grandes áreas. Portanto, essas aeronaves representam uma opção promissora para o procedimento de inspeção de manifestações patológicas de OAE.

Após a execução da revisão sistemática, a figura 35 apresenta o resumo das principais vantagens e desvantagens observadas na RPA segundo o tipo de sustentação, asas rotatórias. Todas elas foram inferidas após a análise completa dos textos incluídos na revisão e a comparação dos Quadros apresentados.

Foto 35: Vantagens e desvantagens da RPA do tipo quadricóptero



Fonte: Autor (2023)

Foi percebido que a totalidade dos estudos analisados usaram ao menos um software para pilotagem, organização do plano de voo ou para avaliação dos dados coletados no voo. Dentre os softwares utilizados estão o Drone Deploy e Pix4D Capture, sendo eles caracterizados pela automação do voo e/ou coleta de imagens fundamentados na fotogrametria aérea, enfatizando-se em voos nos planos horizontais e verticais (DUQUE, SEOE WACKER, 2018; REAGAN, SABATO e NIEZRECKI, 2017).

Em resumo, alguns estudos realizaram adaptações como sensores, câmeras ou elementos protetores da aeronave para prevenção de impactos e melhoria na aproximação de pontes e viadutos conforme evidenciado por Nakao *et al.*(2019), Yamada *et al.*(2017). Com isso, evidenciando a versatilidade das aeronaves permitindo o acoplamento de diferentes tecnologias para coleta de dados.

Nos estudos realizados por Ellenberg *et al.*(2016), Lee *et al.*(2021), Ferroz e Dabous (2021) foi notado os benefícios obtidos com o uso de *gimbals* ligados a câmeras. Tal ferramenta é responsável pela estabilização da câmera no processo de voo, reduzindo as distorções geradas pela movimentação constante da aeronave. Sendo primordial no processo de coleta de imagens para posterior identificação de manifestações patológicas, algumas características mínimas para captura de imagens com intuito de inspeção em pontes e viadutos são expostas na figura 36.

Figura 36: Características mínimas do equipamento para inspeção visual de OEA's



Fonte: Autor (2023)

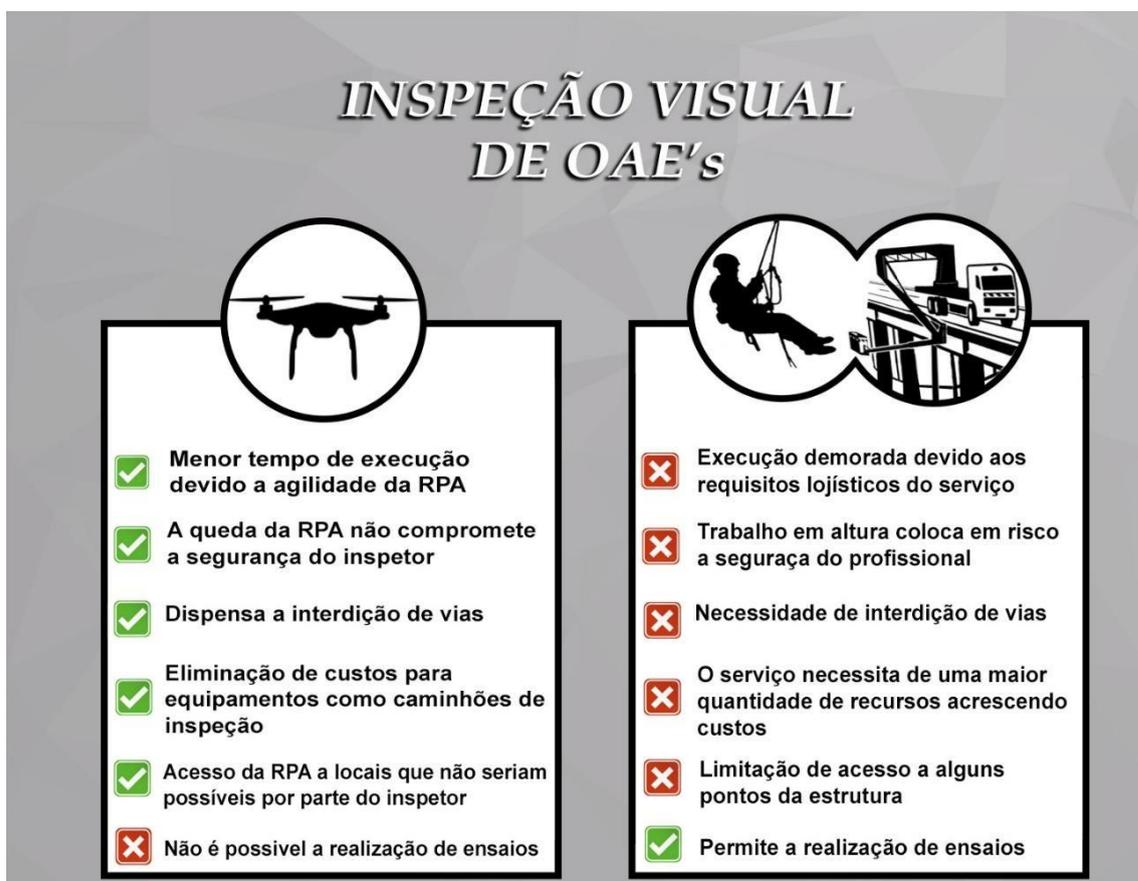
De acordo com a revisão sistemática apresentada, percebeu-se a aplicação de diferentes procedimentos de inspeção com a utilização da RPA. Com isso, os estudos realizados possuem em comum o objetivo de mapeamento de OAE com levantamentos horizontais e/ou verticais para detecção de danos mas através da aplicação de procedimentos distintos para

obtenção destes resultados.

Entretanto, através da análise dos quadros 6 e 8, torna-se possível o desenvolvimento de uma metodologia que agregue diversos pontos positivos de cada estudo, com isso traçar um passo a passo para processos de inspeção, conforme os objetivos deste trabalho, que tem como foco a detecção de manifestações patológicas em pontes e viadutos. Com isso desenvolveu-se um protocolo de voo englobando etapas de pré-inspeção, inspeção e pós-inspeção.

Portanto, essa estruturação pode resultar em inúmeras vantagens quando comparadas aos modelos tradicionais de inspeção. Tais vantagens foram ponderadas na conclusão deste estudos inseridos na revisão sistemática. Tópicos sintetizados numa comparativa com o método tradicional de inspeção estão expostos na Figura 37.

Figura 37: Comparativo de procedimentos para inspeção visual de fachadas



Fonte: Autor (2023)

6.2 Pesquisa experimental

Nesta etapa foi realizada a implementação, refino e validação da técnica de coleta da imagens junto ao protocolo de voo realizado para inspeção de manifestações patológicas em pontes e viadutos com uso da RPA. Assim, como apresentado na metodologia, os estudos de caso foram dispostos e executados segundo as etapas do protocolo de atividades realizados: treinamento para uso da RPA, pré-inspeção com o formulário de planejamento, inspeção com o *checklist* para missão com a RPA e por fim a pós-inspeção com auxílio da planilha *flight log*.

6.2.1 Treinamento do procedimento

Inicialmente foram realizados treinamentos no que se refere a operação da RPA, na Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco e mecanismos técnicos primordiais para execução do procedimento dentro do critérios de segurança vigentes.

Além disso, foi realizado treinamento para uso do software *Agisoft Metashape*, com leitura de informações através de manuais e bibliografias, visualização de tutoriais e modelagens 3D testes através de imagens capturadas com auxílio da RPA.

Com isso, esta etapa inicial do estudo de caso englobou a desenvoltura de habilidades técnicas para uso da RPA e o software, além de todos os pontos fundamentais para o processo de reconstrução 3D das pontes e viadutos, desenvolvimento de ortomosaíco através de dados coletados a aeronave Mavic 2 Pro (estudo de caso A) e Phantom 4 Pro V 2.0 (estudo de caso B) da DJI. Fundamental para o desenvolvimento do protocolo de atividades a realizar junto com procedimentos mais adequados para captura de imagens.

De maneira análoga, foram realizados treinamentos, como mencionado, para avaliação dos modos de voo automatizados e semiautomatizados, tais processos testaram o Drone Deploy e Pix4D *Capture*, observou-se que o Drone Deploy, realiza voo automatizado tendo como foco o mapeamento de superfícies horizontais já o Pix4D *Capture* permite a realização de um voo semiautomatizado, conforme o modo de voo *Free Flight* apresentado na figura 38, onde a coleta de imagens é realizada de maneira automática porém a aeronave deve ser controlada de forma manual pelo piloto, adequando-se para o mapeamento de superfícies verticais de pontes e viadutos.

Figura 38: Modo de voo selecionado no Pix4D



Fonte: Autor (2023)

O treinamento da operação foi realizado em uma ponte escolhida para o estudo de caso A, alguns fatores foram determinantes para esta definição, a saber: o local possuía baixo fluxo de pessoas, lugar amplo, aberto e com baixo número de obstáculos, disponibilidade de locais que permitem a decolagem/pouso e uma visão adequada da aeronave de ambas as vistas analisadas. Tais fatores mitigaram os riscos presentes na operação da RPA para execução desse primeiro estudo de caso, sendo realizadas as etapas de pré-inspeção, inspeção e pós-inspeção conforme apresentado a seguir.

6.2.2 Pré-inspeção

A primeira etapa correspondeu ao planejamento da missão independentemente para o estudo de caso. Assim, os formulários de planejamento foram preenchidos completamente conforme apresentado, coletando informações gerais das regiões e OAE's estudadas, realizando os planos de voo e de captura das imagens.

As informações foram compiladas nos formulários de planejamento para o estudos de caso realizados, conforme expostas nos quadros 9 e 10 sendo esse voo de mapeamento planejado e executado considerando uma distância de 8 metros nas vistas laterais e 60 metros no plano superior com uma sobreposição de 75% entre as imagens coletadas com a câmera ortogonal ao plano estudado. Além disso, levando em consideração algumas informações fornecidas no manual das aeronaves, que resulta na coleta de fotografias com altura e largura de 8,72 x 11,63 metros.

Quadro 9: Formulário de planejamento estudo de caso A

Estudo de caso A (Vista Leste)	
Informações da OEA	
Município: Paudalho	Jurisdição: União
Quantidade de vistas analisadas: 1	Comprimento: 112 metros
Obra: Ponte	Largura: 12 metros
Número de vãos: 5	Número de apoios: 6
Comprimento dos vãos: 20 e 24 metros	Altura dos pilares: entre 7,5 e 9,0 metros
Pavimento (asfáltico, concreto): Asfáltico	Juntas: Jeene
Plano de voo	
Tipo de operação: VLOS (<i>Visual Line of Sight</i>)	Número de baterias: 1
Tempo de operação: 16 minutos	Data de operação: 30/04/2022
Previsão de temperatura: Nublado	Chance de chuva: baixa
Velocidade do vento: 13 km/h	Horário da operação: 10:30
Plano de captura de imagens	
Distância câmera-vista lateral: 8 metros	
Cobrimentos fotográficos: 75%	
Número estimado de fotografias: 150	
(Vista Oeste)	
Informações da OEA	
Comprimento dos vãos: 20 metros	Altura dos pilares: entre 2,5 e 6,3 metros
Quadro 7: Formulário de planejamento estudo de caso	
Pavimento (asfáltico, concreto): Asfáltico	Juntas: Jeene
Plano de voo	
Tipo de operação: VLOS (<i>Visual Line of Sight</i>)	Número de baterias: 1
Tempo de operação: 25 minutos	Data de operação: 30/04/2022
Previsão de temperatura: Nublado	Chance de chuva: baixa
Velocidade do vento: 13 km/h	Horário da operação: 15:00
Plano de captura de imagens	
Distância câmera-vista lateral: 8 metros	

Quadro 9: Formulário de planejamento estudo de caso A		
Cobrimentos fotográficos: 75%		
Número estimado de fotografias: 158		
(Vista Superior)		
Informações da OEA		
Município: Paudalho	Jurisdição: União	
Pavimento (asfáltico, concreto): Asfáltico	Juntas: Jeene	Aparelho de apoio: Neoprene
Plano de voo		
Tipo de operação: VLOS (<i>Visual Line of Sight</i>)	Número de baterias: 1	
Tempo de operação: 16 minutos	Data de operação: 30/04/2022	
Previsão de temperatura: Nublado	Chance de chuva: baixa	
Velocidade do vento: 13 km/h	Horário da operação: 14:26	
Plano de captura de imagens		
Distância câmera- pavimento: 60 metros		
Cobrimentos fotográficos: 75%		
Número estimado de fotografias: 250		

Quadro 10: Formulário de planejamento estudo de caso B

Estudo de caso B	
Vista Norte	
Informações da OEA	
Município: Goiana	Jurisdição: União
Quantidade de vistas analisadas: 1	Comprimento: 66 metros
Obra: viaduto	Largura: 21,5 metros
Número de vãos: 2	Número de apoios: 3
Comprimento dos vãos: 33 metros	Altura dos pilares: entre 7,0 metros
Pavimento (asfáltico, concreto): Asfáltico	Juntas: Jeene
Plano de voo	
Tipo de operação: VLOS (<i>Visual Line of Sight</i>)	Número de baterias: 1
Tempo de operação: 15 minutos	Data de operação: 11/03/2023
Previsão de temperatura: Sol	Chance de chuva: baixa
Velocidade do vento: 14 km/h	Horário da operação: 10:20
Plano de captura de imagens	
Distância câmera-vista lateral: 8 metros	
Cobrimentos fotográficos: 75%	
Número estimado de fotografias: 111	

Vista Sul	
Plano de voo	
Tipo de operação: VLOS (<i>Visual Line of Sight</i>)	Número de baterias: 1
Tempo de operação: 18 minutos	Data de operação: 11/03/2023
Previsão de temperatura: Sol	Chance de chuva: baixa
Velocidade do vento: 14km/h	Horário da operação: 09:44
Plano de captura de imagens	
Distância câmera-vista lateral: 8 metros	
Cobrimentos fotográficos: 75%	
Número estimado de fotografias: 160	
Vista Superior	
Informações da OEA	
Aparelho de apoio: Neoprene	
Plano de voo	
Tipo de operação: VLOS (<i>Visual Line of Sight</i>)	Número de baterias: 1
Tempo de operação: 13 minutos	Data de operação: 11/03/2023
Previsão de temperatura: Sol	Chance de chuva: baixa
Velocidade do vento: 14 km/h	Horário da operação: 10:50
Plano de captura de imagens	
Distância câmera- pavimento: 40 metros	
Cobrimentos fotográficos: 75%	
Número estimado de fotografias: 106	

Fonte: Autor (2023)

Conforme todos os pontos expostos anteriormente e características da OAE, foi previsto o número de baterias necessárias para execução dos estudos de caso. Além da utilização de equações para definição do número mínimo de imagens necessárias para o mapeamento de cada vista analisada, como demonstrado na metodologia.

Nos estudos de caso, mediante ao planejamento e formulário proposto, foram definidos

diferentes pontos para pouso e decolagem além de uma área de acesso fácil para pouso emergencial (figura 39), foram considerados também fatores específicos, como por exemplo, a seleção adequada do horário para a realização da operação, devido a luminosidade que poderia influenciar na qualidade das imagens coletadas pela RPA.

Figura 39: planejamento para decolagem e pouso dos estudos de caso





Fonte: Autor (2023)

6.2.3 Inspeção

Logo após a realização da planificação das missões através da execução de formulários de planejamento e avaliação das condições de meteorologia previstas, deu-se início a realização da etapa de inspeção. Foi estabelecido o ponto de pouso e decolagem mais adequados para as vistas da ponte analisada, onde se realizou a montagem da RPA (Figura 40).

A aeronave DJI Mavic 2 Pro possui uma duração de bateria limite de 31 minutos de voo, sob condições ideais como ausência de ventos. No estudos de caso exposto a diferentes condições de vento e alturas de voo, foi usada em média 25 minutos de tempo de voo conforme indicação do manual DJI, terminando com cerca de 15% de bateria restante, visto que sistemas de segurança de aplicativos de controle como o Drone Deploy e Pix4D *Capture* não permitem voar até que a bateria esteja completamente esgotada.

Figura 40: Montagem do equipamento RPA Mavic 2 Pro em campo, para realização estudo de caso A



Fonte: Autor (2022)

Para assegurar eficiência e segurança durante o processo de decolagem e pouso da RPA foi seguido um *Checklist* para missão. Tal missão enquadrou-se no tipo VLOS, em linha de visada visual, onde o piloto mantém o contato visual direto com a aeronave, o *Checklist* teve por objetivo o auxílio no preparo do voo, controle, operações de pouso e decolagem visando a utilização adequada do equipamento.

Assim, os dados foram coletados e posteriormente preenchido, conforme exposto nos apêndices 1,2 e 3 que permitiram a elaboração do quadro 11, sintetizando informações de voo, número de vistas abrangidas e quantidade de imagens coletadas por cada bateria.

Com isso, no estudo de caso, a operação da RPA deu-se de forma automatizada na vista superior e semiautomatizada nas vistas laterais, com auxílio de sensores de proximidade da aeronave e auxiliada por observadores, verificando a distância adequada a obstáculos identificados previamente e a manutenção da distância entre a aeronave e a vista lateral da OAE, conforme exposto na figura 41.

Figura 41: Coleta de imagens com a RPA no estudo de caso A



Fonte: Autores (2022)

Quadro 11 – Formulário de planejamento dos estudos de caso

Estudo de caso A			
Cadastro de voo	Bateria 1	Bateria 2	Bateria 3
Data:	30/04/2022	30/04/2022	30/04/2022
Horário de início:	10:30	15:00	14:26
Horário de término:	10:46	15:25	14:42
Vista analisada:	Leste	Oeste	Superior
Número de imagens:	150	158	250
Estudo de caso B			
Cadastro de voo	Bateria 1	Bateria 2	Bateria 3
Data:	11/03/2023	11/03/2023	11/03/2023

Horário de início:	9:44	10:20	10:50
Quadro 11 – Formulário de planejamento dos estudos de caso			
Horário de término:	10:02	10:35	11:03
Vista analisada:	Sul	Norte	Superior
Número de imagens:	160	111	106

Fonte: Autor (2023)

Embora a operação da RPA nas vistas laterais tenha sido manual, o processo de captura de imagens foi realizada de modo automático, usando o aplicativo Pix4D Capture, empregando o modo de voo mencionado anteriormente, ajustado para acionar o obturador da câmera a cada 1 metro no deslocamento horizontal e 1 metro no deslocamento vertical embora a quantidade imagens pudesse ser reduzida para acionamentos a cada 2,2 metros de deslocamento vertical e 2,9 metros de deslocamento horizontal, resultando nos cobrimentos frontal e lateral planejados de 75%. Optou-se por coletar um acervo maior de imagens por se tratar do primeiro estudo de caso.

6.2.4 Pós-inspeção

Após a realização da coleta de imagens, foi realizada a verificação da qualidade dos ativos visuais gerados, excluindo fotografias fora de foco ou capturadas erroneamente. Logo após, a planilha *Flight log* foi devidamente preenchida para o estudo de caso como apresentado no quadro 12, sintetizando a relação de todos os dados físicos dos voos realizados.

Quadro 12: Planilha *flight log*

Local	Vista	Data	Hora	Fase do estudo	Número de fotos	Altitude máxima (m)	Duração do voo (min)	Distância da fachada (m)
Estudo de caso A								
Paudalho	Leste	30/04/2022	10:30	Execução	150	12	16	8
Paudalho	Oeste	30/04/2022	15:00	Execução	158	9	25	8
Paudalho	Superior	30/04/2022	14:26	Execução	250	60	16	8
Estudo de caso B								
Goiana	Sul	11/03/2023	9:44	Execução	160	9	18	8

Quadro 12: Planilha <i>flight log</i>								
Goiana	Norte	11/03/2023	10:20	Execução	111	10	15	8
Goiana	Superior	11/03/2023	10:50	Execução	106	40	13	8

Fonte: Autor (2023)

As imagens foram armazenadas acompanhando a ordem de captura, agrupando-as em arquivos correspondentes a cada uma das vistas estudadas, permitindo que estes recursos ficassem prontos e organizados para iniciar a criação do modelo 3D com o software *Agisoft Metashape*.

Nos estudos de caso A as fotografias foram carregadas parcialmente no software da *Agisoft Metashape*. Desta maneira, cada vista foi processada de forma independente, carregando cada grupo de fotografias separadamente para cada processamento. Resultando em modelos 3D independentes, um para cada vista analisada, permitindo a produção de ortomosaicos individualmente.

A divisão geométrica por vista se dar, principalmente, pela elevada configuração computacional que seria necessário para realização do processamento de todas as imagens juntas para criação do modelo 3D completo. Uma modelagem de forma individualizada para as vistas representa um menor tempo de processamento, pelo número inferior de imagens processadas a cada vez, já que o estudo de caso é composto por uma quantidade elevada de fotografias.

Adiante apresenta-se a sequência das etapas de processamento realizadas.

- 1. Alinhamento de fotografias (*Align fotos*):** Nesta etapa do processamento é realizado alinhamento das imagens coletadas, no qual o *software* detecta semelhança entre as imagens e coordenadas de cada foto coletada. Após o processo de alinhamento das fotografias, em cada vista realizou-se a exclusão de pontos indesejados como: as áreas de superfície distorcidas, áreas não pertencentes a estrutura analisada como vegetação e pontos distantes. Obtendo ao fim desta etapa o modelo *Tie Points* ou pontos de amarração conforme apresentados na figura 38. Sendo a nuvem de pontos de baixa densidade, também responsável pela definição da geometria da estrutura analisada.
- 2. Construção da nuvem densa de pontos (*Build dense cloud*):** Após a criação da nuvem *Tie points* de cada vista da estrutura, foram construídas a nuvens densas de pontos 3D ou *Dense Clouds*, no qual mais uma vez foi realizada a seleção e retirada de pontos não desejados já que essa etapa permite uma melhor visualização devido a maior qualidade gerado logo em seguida o modelo digital das superfícies. Entre

os parâmetros selecionados para o processamento, a qualidade (*Quality*) foi a alta (*High*) e a filtragem de profundidade na opção agressiva (*Aggressive*). Em resumo, na configuração da densificação escolheu-se o nível alto, resultando em nuvens de pontos com as quantidades expostas no Quadro 10. Esta etapa consiste no incremento da densidade na nuvem de pontos gerada anteriormente. Realizando o aumento da quantidade de pontos na nuvem de *tie points*, através do software, diminuindo também os espaços vazios para melhor representação da área mapeada, os modelos gerados nesta etapa são apresentados na Figuras 38 com a totalidade dos detalhes geométricos das edificações reconstruídos digitalmente.

3. **Construção das malhas triangulares (*Build Mesh*):** Nesta etapa são construídas as malhas ou *Mesh*, criadas através do agrupamento de vértices da nuvem densa de pontos. Nos parâmetros selecionados para o processamento, no tipo de superfície (*Surface Type*) usou-se o modelo 3D arbitrário; na origem dos dados (*Source Data*) foi selecionada a construção das malhas a partir das nuvens de pontos densas para cada estudo de caso; e na contagem de faces (*Face Count*) foi selecionado o nível alto. Os modelos 3D obtidos nesta etapa é apresentado na Figuras 38, com os números de faces ou polígonos adjacentes descritos no Quadro 13.
4. **Construção da textura (*Build texture*):** Após a construção do modelos de malhas triangulares, são aplicadas texturas nos modelos tridimensionais com objetivo de melhoramento da sua qualidade visual para posterior detecção de manifestações patológicas. Alguns parâmetros foram selecionados para o processamento, no modo de mapeamento foi escolhida a opção ortofoto adaptativa (*Adaptive orthophoto*). No modo de mesclagem (*Blending mode*) utilizou pelo tipo mosaico (*Mosaic*), o qual permitiu uma melhor resolução nas ortoimagens. Os modelos 3D texturizado gerados nesta etapa são apresentados na Figuras 42, porém a qualidade visual deste modelo se mostrou insuficiente para exibição da totalidade das manifestações patológicas, devido a presença de algumas distorções da geometria, resultando em uma maior dificuldade de detecção quando aplicado o zoom nos modelos
5. **Construção do ortomosaico (*Build orthomosaic*):** Para um resultado mais refinado foram gerados modelos ortomosaíscos de cada vista analisada da OEA. Com isso, a partir da nuvem densa de pontos, o *software* projetou ortogonalmente cada uma das fotografias da vista selecionada, executando a mosaicagem das ortofotos e criando um único produto único em cada vista. Para todas as exportações das ortoimagens, o formato de arquivo utilizado foi o TIFF (*Tagged Image File Format*). Tais resultados obtidos nesta exportação são exemplificados na Figura 42. Esses recursos de reconstrução geométrica das vistas demonstraram maior

qualidade visual quando comparada com o modelo 3D.

Quadro 13: Quantitativos dos modelos gerados

Estudo de caso	Modelo	Nuvem de <i>Tie point</i>	Nuvem densa	Malhas triangulares
A	Vista Leste	46.838 <i>Points</i>	9.736.916 <i>Points</i>	1.947.385 <i>Faces</i>
	Vista Oeste	31.354 <i>Points</i>	24.147.579 <i>Points</i>	4.829.514 <i>Faces</i>
	Vista Superior	45.607 <i>Points</i>	15.786.513 <i>Points</i>	3.157.302 <i>Faces</i>
B	Vista Norte	51.535 <i>Points</i>	25.285.306 <i>Points</i>	5.057.057 <i>Faces</i>
	Vista Sul	60.016 <i>Points</i>	29.948.962 <i>Points</i>	5.948.962 <i>Faces</i>
	Vista Superior	62.999 <i>Points</i>	21.196.263 <i>Points</i>	8.315.478 <i>Faces</i>

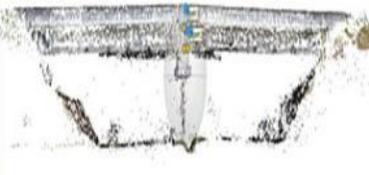
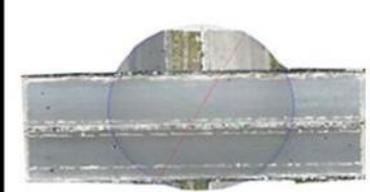
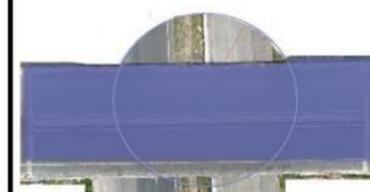
Fonte: Autor (2023)

Figura 42: Sequência de processamento dos estudos de caso

Estudo de caso A

	Nuvens de tie points	Nuvens densas	Malhas triangulares	Modelos texturizados	Ortomosaicos
Vista Leste					
Vista Oeste					
Vista superior					

Estudo de caso B

	Núvens de tie points	Núvens densas	Malhas triangulares	Modelos texturizados	Ortomosaícos
Vista Norte					
Vista Sul					
Vista Superior					

Fonte: Autor (2023)

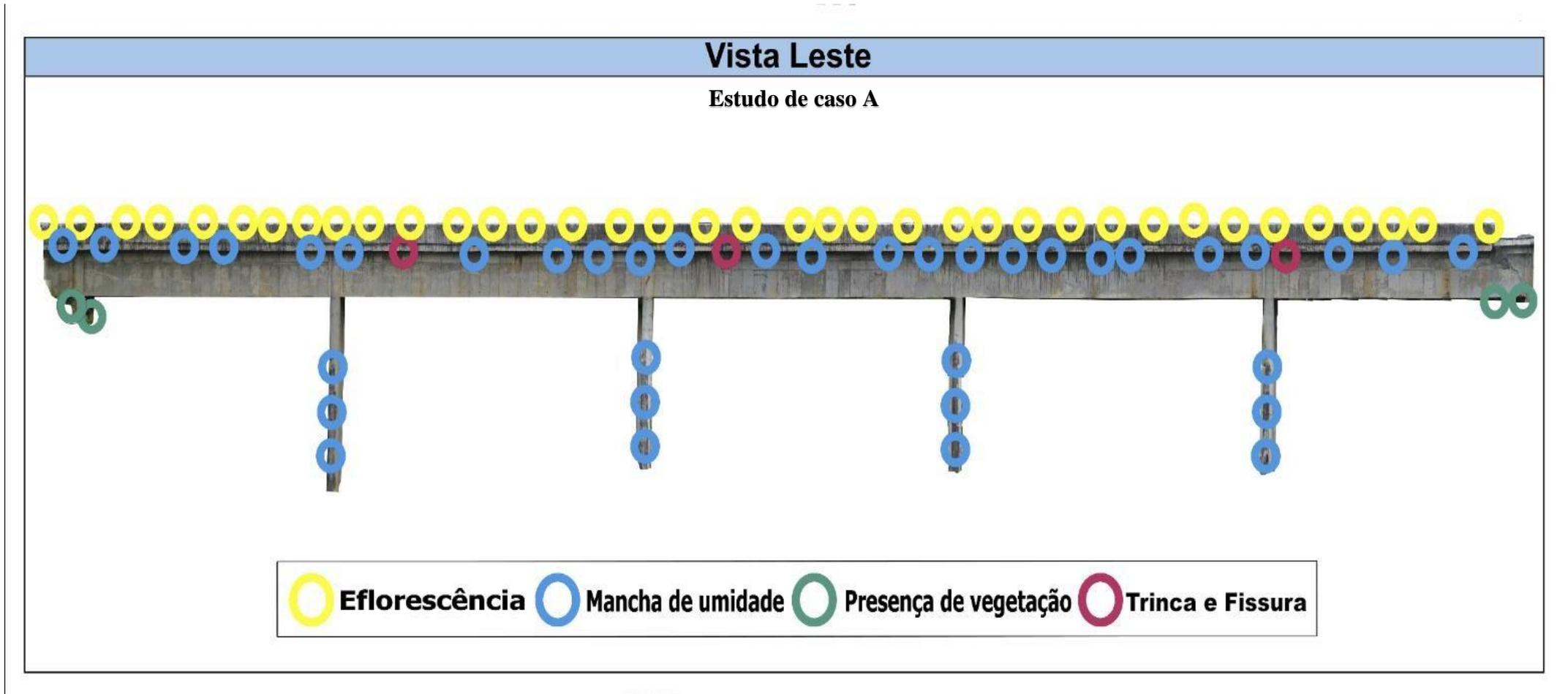
6.2.5 Detecção de manifestações patológicas

O processo de detecção de manifestações patológicas foi realizado através da inspeção visual dos recursos obtidos, sendo eles: fotografias digitais, ortomosaícos e modelos 3D. Tendo cada produto obtido contribuições de distintas qualidades que auxiliaram na fase de detecção.

Dentre as características obtidas com a geração dos três tipos de recursos, o modelo 3D apresentou resultado satisfatório em sua reconstrução geométrica, principalmente na visualização espacial da OAE. Já os ortomosaícos, além da eficiente resolução espacial demonstraram boa vista ortogonal apesar de apresentar algumas falhas devido ao não reconhecimento de algumas imagens por parte do *software*, caso da vista Oeste, entretanto contribuindo consideravelmente na detecção de manifestações patológicas ao âmbito geral das vistas. Por fim, as fotografias digitais, sendo um produto que não foi realizado alteração, se mostrou com maior qualidade dentre todos os recursos obtidos, gerando maior confiabilidade para inspeção visual.

Nos estudos de caso foram visualizadas manifestações patológicas, no estudo de caso A: eflorescência, fissura, mancha de umidade, presença de vegetação e ferragem exposta e no estudo de caso B: Mancha de umidade, fissuras e presença de vegetação. A localização espacial dos achados na vista ortogonal é apresentada nas Figuras 43,44 e 45 assim, cada manifestação patológica é representada no ortomosaíco produzido no *software Agisoft MetaShape*. Por sua vez, cada achado foi verificado mediante o modelo ortomosaíco e confirmado nas fotografias digitais originais.

Figura 43: Mapa de danos das vista laterais Leste/ Norte



Vista Norte

Estudo de caso B

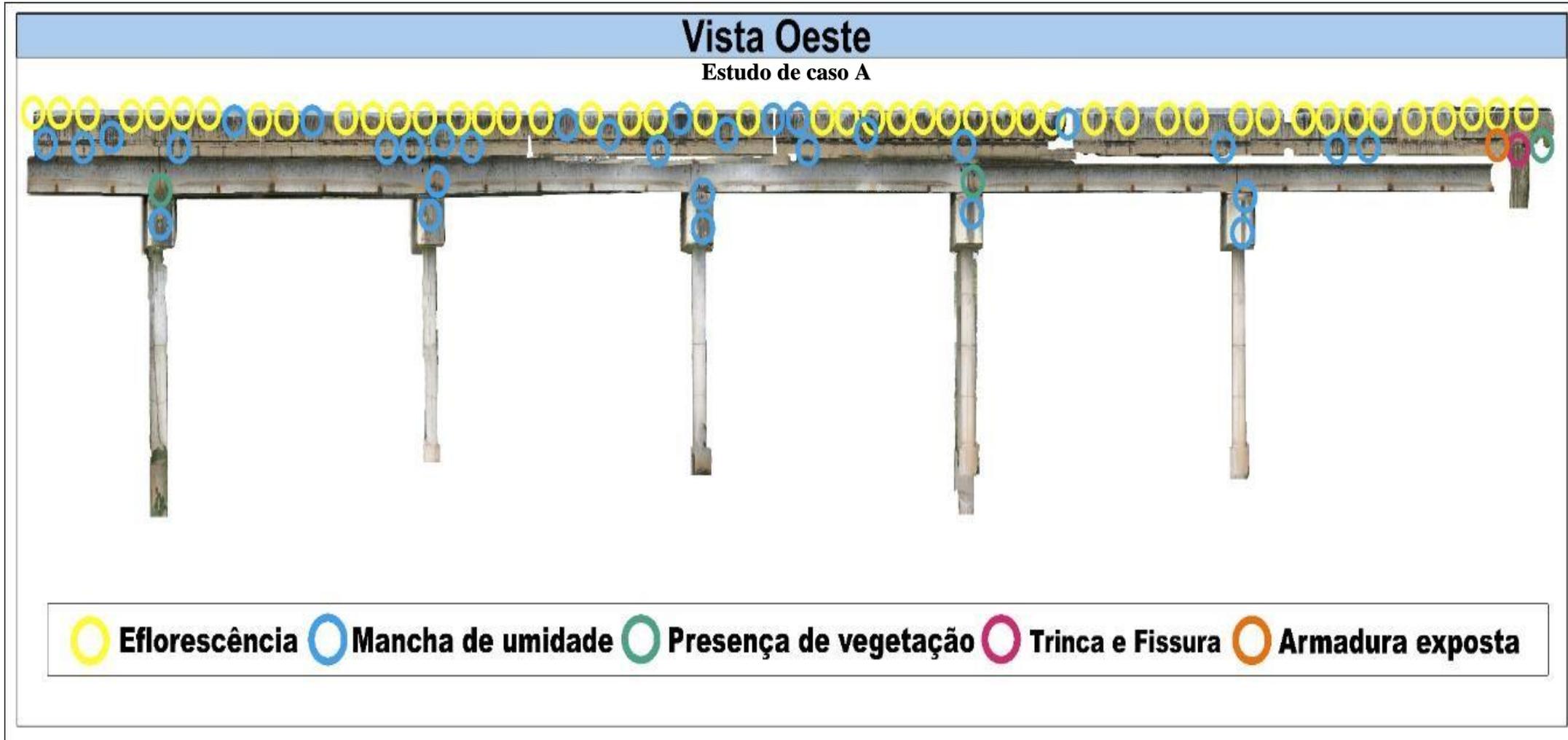


Mancha de umidade



Presença de vegetação

Figura 44: Mapa de danos das vista laterais Oeste / Sul



Vista Sul

Estudo de caso B

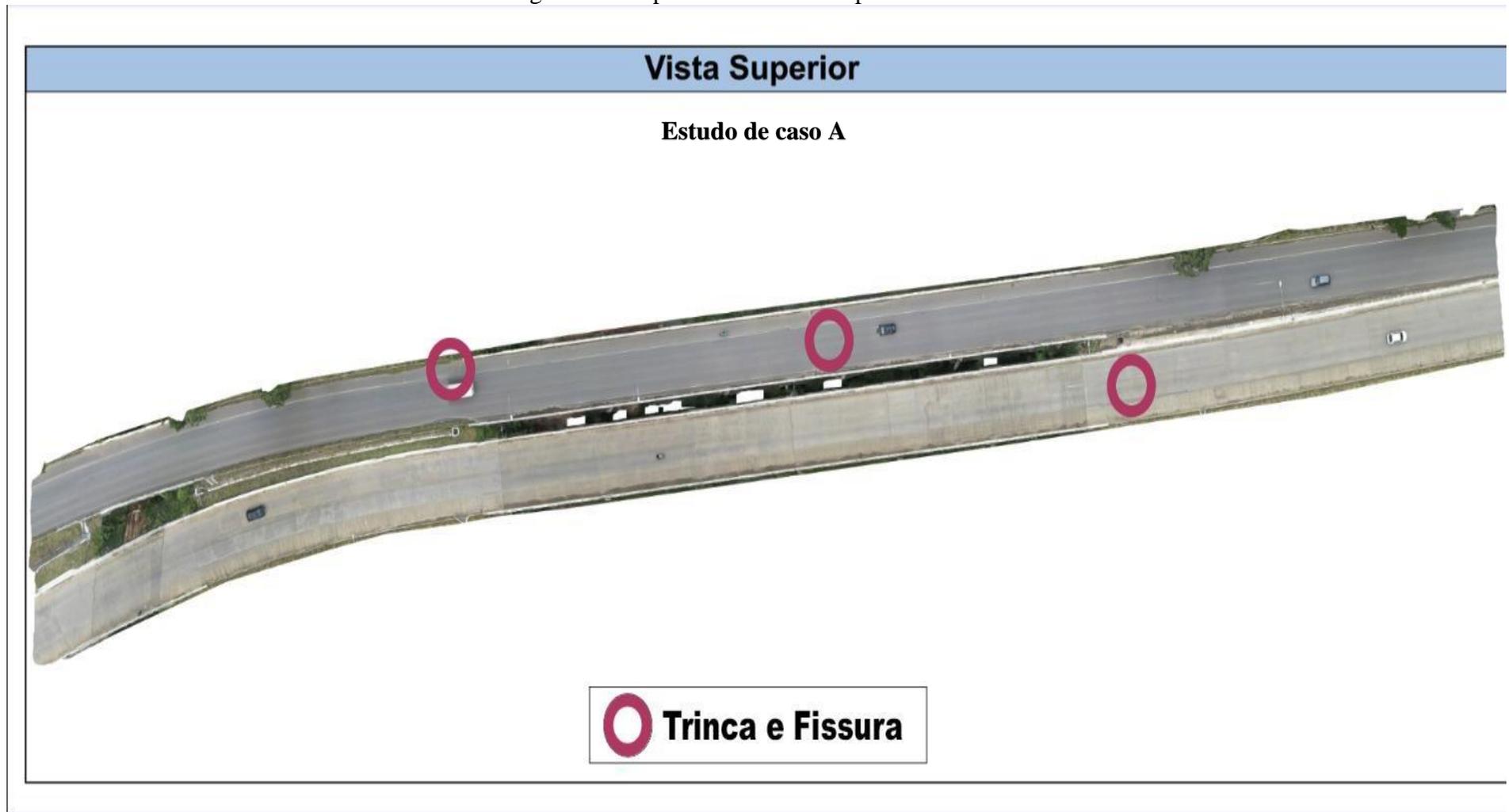


Mancha de umidade



Presença de vegetação

Figura 45: Mapa de danos vista superior



Vista Superior

Estudo de caso B



Trinca e Fissura

Fonte: Autor (2023)

6.3 Análise dos resultados

Após a finalização do processo de inspeção e detecção de manifestações patológicas no estudos de caso, realizou-se uma análise das fases de coleta de imagens, processamento computacional e o procedimento de detecção de manifestações patológicas, objetivando determinar o ativo visual mais apropriado e expondo as diretrizes para o procedimento de inspeção de manifestações patológicas em pontes e viadutos.

6.3.1 Análise da captura de imagens

A realização do protocolo de atividades a realizar na etapa de pré-execução e execução, combinado a técnica de coleta de imagens apresentadas neste trabalho, originou um conjunto de 558 imagens no estudo de caso A e 377 imagens no estudo de caso B, as quais sozinhas representam um tipo de ativo visual importante das vistas analisadas, proporcionando cobrimentos com a sobreposição propícia para a reconstrução digital. Foram coletadas imagens em quantidade superior ao mínimo calculado devido a disponibilidade de baterias adicionais.

Nos estudos de caso, baseando-se nos registros dos formulários de planejamento, *checklist* para missão e observações diretas do pesquisador, foi evidenciada a dificuldade de acesso a parte inferior das OAE's, pois o número de satélites responsável pelo sinal entre controle e aeronave chegou ao limite, após esse número mínimo de satélites é acionada o *Return To Home* (RTH) no qual a aeronave sobe 30 metros (ou altura programada) e volta ao ponto de decolagem, tal subida ocasionaria uma colisão da RPA com a OAE.

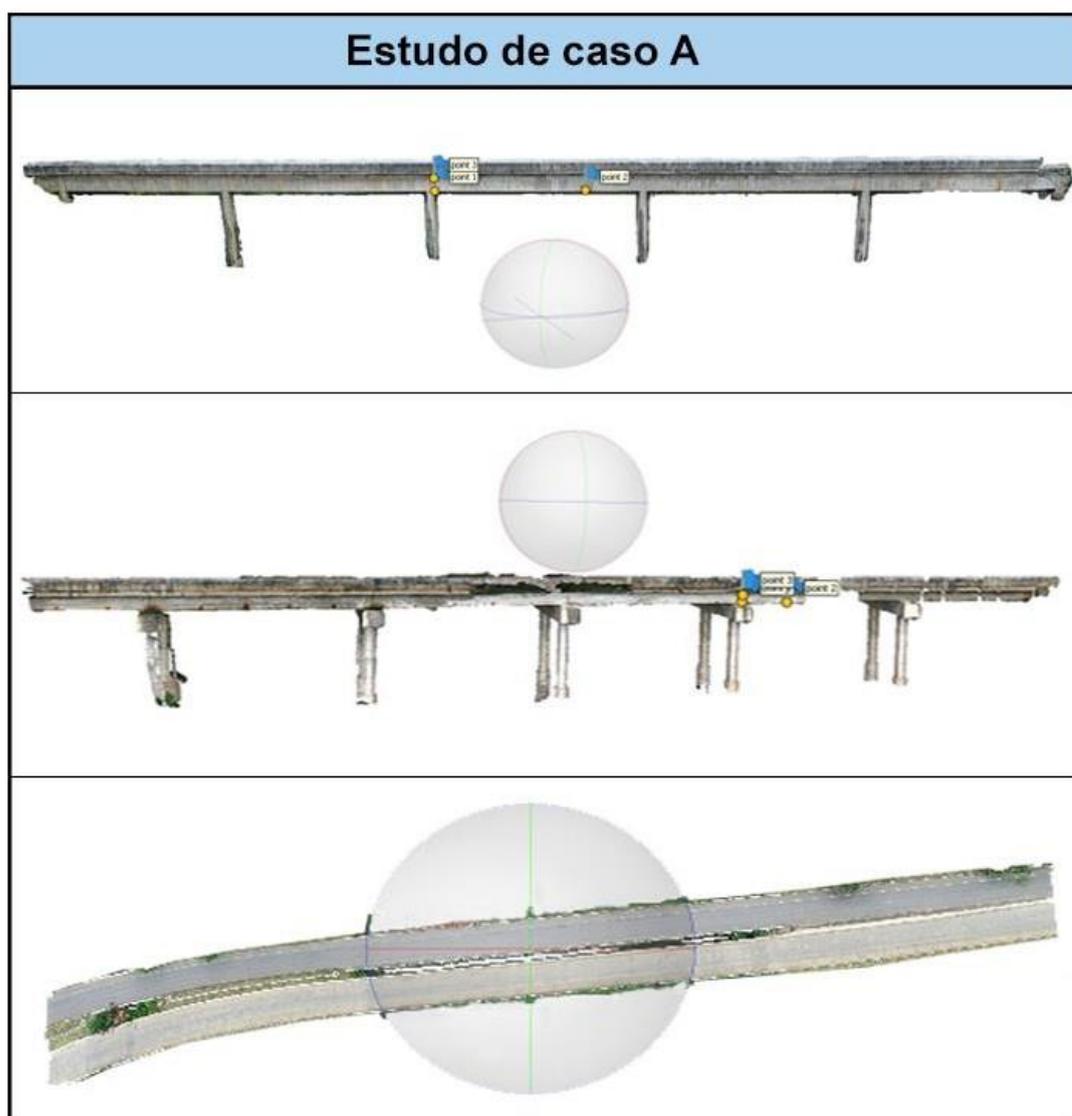
Além disso, notou-se a presença de obstáculos, como árvores e condições meteorológicas adversas. Por outro lado, percebeu-se a facilidade no acesso a locais propícios para decolagem e pouso com a RPA.

Quanto à legalidade do procedimento de captura de imagens, enfatiza-se a importância da emissão de autorização de voo junto ao departamento de controle do espaço aéreo (DECEA) através do sistema SARPAS (Solicitação de Acesso de Aeronave Remotamente Pilotadas) e a presença de seguro para terceiros da RPA. Assim realizando o processo de coleta de imagens dentro das solicitações de segurança exigidas e preservando-se de qualquer eventualidade que pudesse ocorrer.

6.3.2 Análise do processamento de imagens

Na etapa de processamento das imagens através do *Agisoft MetaShape* foram gerados 6 modelos digitais 3D (Figuras 46). Nos estudos de caso, foi gerada uma nuvem densa que superou os 123 milhões de pontos e mais de 28 milhões de faces construídas no *mesh*. Essas nuvens são itens fundamentais, que podem ser exportadas e trabalhadas em diversos aplicativos de modelagem 3D, plataformas BIM ou em ortomosaicos, como nos casos de estudo desta pesquisa.

Figura 46: Modelos digitais 3D gerados nos estudos de caso





Fonte: Autor (2023)

Um aspecto importante observado foi o tempo necessário para realização do processamento computacional no *Agisoft MetaShape*, para que os modelos 3D fossem gerados com densificação e texturização.

Além disso, foram necessários alguns reprocessamentos devido a presença de erros obtidos, percebeu-se que uma limpeza de pontos que não faziam parte da ponte analisada e a fixação de marcadores tornaram-se primordiais na geração do modelo.

No processamento foi percebido que para todos os mapeamentos 3D dos estudos de caso, quanto maior o número de imagens utilizadas, maior tempo de processamento no software *Agisoft MetaShape*. Optando-se com isso, pela geração de modelos por vista ao invés do processamento único com todas as imagens coletadas.

Além disso, no quadro 14 são apresentados os tempos para cada etapa de processamento de todos os mapeamentos 3D gerados no software *Agisoft MetaShape*, para o estudo de caso

A, além da quantidade de fotografias digitais utilizadas em cada mapeamento e os parâmetros mais relevantes considerados no processamento.

Quadro 14: Tempo de processamento no *Agisoft Metashape*

Estudo de Caso	Etapa	Parâmetros		Tempo de Processamento
A (Vista Leste)	<i>Align Photos</i>	<i>Accuracy</i>	<i>Highest</i>	4 min e 47 seg
		<i>Pair preselec-tion</i>	<i>Generic</i>	
		Nuvem Es-parsa	46.838 <i>Points</i>	
	<i>Build Dense Cloud</i>	<i>Quality</i>	<i>High</i>	313 min
		<i>Depth filte-ring</i>	<i>Aggressive</i>	
		Nuvem densa	9.736.916 <i>Points</i>	
	<i>Build mesh</i>	<i>Surface type</i>	<i>Arbitrary 3D</i>	4 min e 38 seg
		<i>Face count</i>	<i>High</i>	
		<i>Faces</i>	1.947.385 <i>Faces</i>	
	<i>Build texture</i>	<i>Mapping mode</i>	<i>Adaptive or-thophoto</i>	2 min e 56 seg
		<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>	
	<i>Build Orthomo-saic</i>	<i>Type</i>	<i>Planar</i>	1 min
<i>Blending mode</i>		<i>Mosaic</i>		
Estudo de Caso	Etapa	Parâmetros		Tempo de Processamento
A (Vista Oeste)	<i>Align Photos</i>	<i>Accuracy</i>	<i>Highest</i>	2 min e 54 seg
		<i>Pair preselec-tion</i>	<i>Generic</i>	
		Nuvem Es-parsa	31.354 <i>Points</i>	
	<i>Build Dense Cloud</i>	<i>Quality</i>	<i>High</i>	27 min e 47 seg
		<i>Depth filte-ring</i>	<i>Aggressive</i>	
		Nuvem densa	24.147.579 <i>Points</i>	
	<i>Build mesh</i>	<i>Surface type</i>	<i>Arbitrary 3D</i>	15 min e 5 seg
		<i>Face count</i>	<i>High</i>	
		<i>Faces</i>	4.829.514 <i>Faces</i>	
	<i>Build texture</i>	<i>Mapping mode</i>	<i>Adaptive or-thophoto</i>	4 min e 38 seg
		<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>	
	<i>Build Orthomo-saic</i>	<i>Type</i>	<i>Planar</i>	3 min e 13 seg
<i>Blending mode</i>		<i>Mosaic</i>		

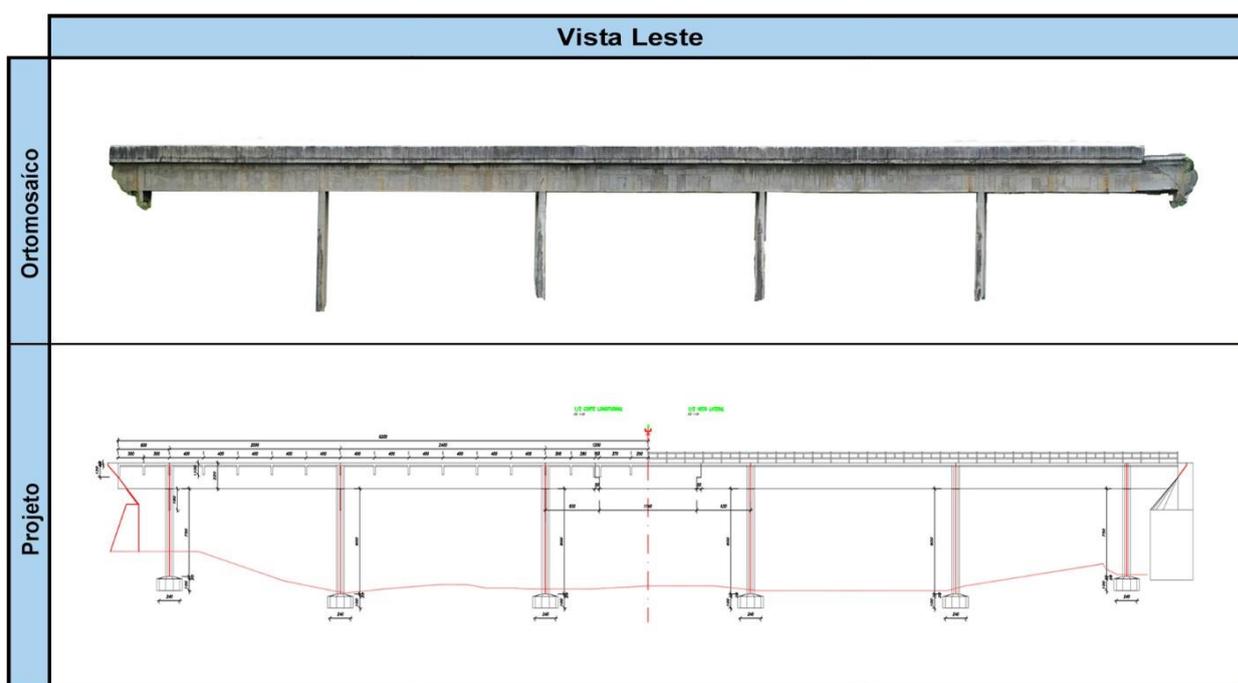
Quadro 14: Tempo de processamento no Agisoft Metashape				
Estudo de Caso	Etapa	Parâmetros		Tempo de Processamento
A (Vista superior)	<i>Align Photos</i>	<i>Accuracy</i>	<i>Highest</i>	4 min e 45 seg
		<i>Pair preselec-tion</i>	<i>Generic</i>	
		Nuvem Es-parsa	45.607 <i>Points</i>	
	<i>Build Dense Cloud</i>	<i>Quality</i>	<i>High</i>	37 min e 34 seg
		<i>Depth filte-ring</i>	<i>Aggressive</i>	
		Nuvem densa	15.786.513 <i>Points</i>	
	<i>Build mesh</i>	<i>Surface type</i>	<i>Arbitrary 3D</i>	4 min e 38 seg
		<i>Face count</i>	<i>High</i>	
		<i>Faces</i>	3.157.302 <i>Faces</i>	
	<i>Build texture</i>	<i>Mapping mode</i>	<i>Adaptive or-thophoto</i>	8 min e 30 seg
		<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>	
	<i>Build Orthomo-saic</i>	<i>Type</i>	<i>Planar</i>	1 min e 47 seg
<i>Blending mode</i>		<i>Mosaic</i>		
<i>Blending mode</i>		<i>Mosaic</i>		
Estudo de Caso	Etapa	Parâmetros		Tempo de Pro-cessamento
B (Vista Norte)	<i>Align Photos</i>	<i>Accuracy</i>	<i>Highest</i>	45 seg
		<i>Pair preselec-tion</i>	<i>Generic</i>	
		Nuvem Es-parsa	46.838 <i>Points</i>	
	<i>Build Dense Cloud</i>	<i>Quality</i>	<i>High</i>	45 min e 42 seg
		<i>Depth filte-ring</i>	<i>Aggressive</i>	
		Nuvem densa	9.736.916 <i>Points</i>	
	<i>Build mesh</i>	<i>Surface type</i>	<i>Arbitrary 3D</i>	8 min e 28 seg
		<i>Face count</i>	<i>High</i>	
		<i>Faces</i>	1.947.385 <i>Faces</i>	
	<i>Build texture</i>	<i>Mapping mode</i>	<i>Adaptive or-thophoto</i>	4 min e 56 seg
		<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>	
	<i>Build Orthomo-saic</i>	<i>Type</i>	<i>Planar</i>	2 min e 28 seg
<i>Blending mode</i>		<i>Mosaic</i>		
Estudo de Caso	Etapa	Parâmetros		Tempo de Pro-cessamento

B (Vista Sul)	<i>Align Photos</i>	<i>Accuracy</i>	<i>Highest</i>	1 min e 47 seg
		<i>Pair preselec-tion</i>	<i>Generic</i>	
		Nuvem Es-parsa	31.354 <i>Points</i>	
	<i>Build Dense Cloud</i>	<i>Quality</i>	<i>High</i>	211 min
		<i>Depth filte-ring</i>	<i>Aggressive</i>	
		Nuvem densa	24.147.579 <i>Points</i>	
	<i>Build mesh</i>	<i>Surface type</i>	<i>Arbitrary 3D</i>	15 min e 5 seg
		<i>Face count</i>	<i>High</i>	
		<i>Faces</i>	4.829.514 <i>Faces</i>	
	<i>Build texture</i>	<i>Mapping mode</i>	<i>Adaptive or-thophoto</i>	6 min e 38 seg
		<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>	
	<i>Build Orthomo-saic</i>	<i>Type</i>	<i>Planar</i>	3 min e 37 seg
<i>Blending mode</i>		<i>Mosaic</i>		
Estudo de Caso	Etapa	Parâmetros		Tempo de Pro-cessamento
B (Vista superior)	<i>Align Photos</i>	<i>Accuracy</i>	<i>Highest</i>	1 min
		<i>Pair preselec-tion</i>	<i>Generic</i>	
		Nuvem Es-parsa	45.607 <i>Points</i>	
	<i>Build Dense Cloud</i>	<i>Quality</i>	<i>High</i>	37 min e 34 seg
		<i>Depth filte-ring</i>	<i>Aggressive</i>	
		Nuvem densa	15.786.513 <i>Points</i>	
	<i>Build mesh</i>	<i>Surface type</i>	<i>Arbitrary 3D</i>	5 min e 8 seg
		<i>Face count</i>	<i>High</i>	
		<i>Faces</i>	3.157.302 <i>Faces</i>	
	<i>Build texture</i>	<i>Mapping mode</i>	<i>Adaptive or-thophoto</i>	3 min e 25 seg
		<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>	
	<i>Build Orthomo-saic</i>	<i>Type</i>	<i>Planar</i>	6 min e 3 seg
<i>Blending mode</i>		<i>Mosaic</i>		
<i>Blending mode</i>		<i>Mosaic</i>		

Adicionalmente, os modelos ortomosaicos de mostraram uma ferramenta importante, permitindo uma análise visual bastante proveitosa. Alguns recursos são disponibilizadas pelo *software* utilizado, dentre elas uma permite a realização de medidas o que viabiliza a retirada de dados que se pretende obter.

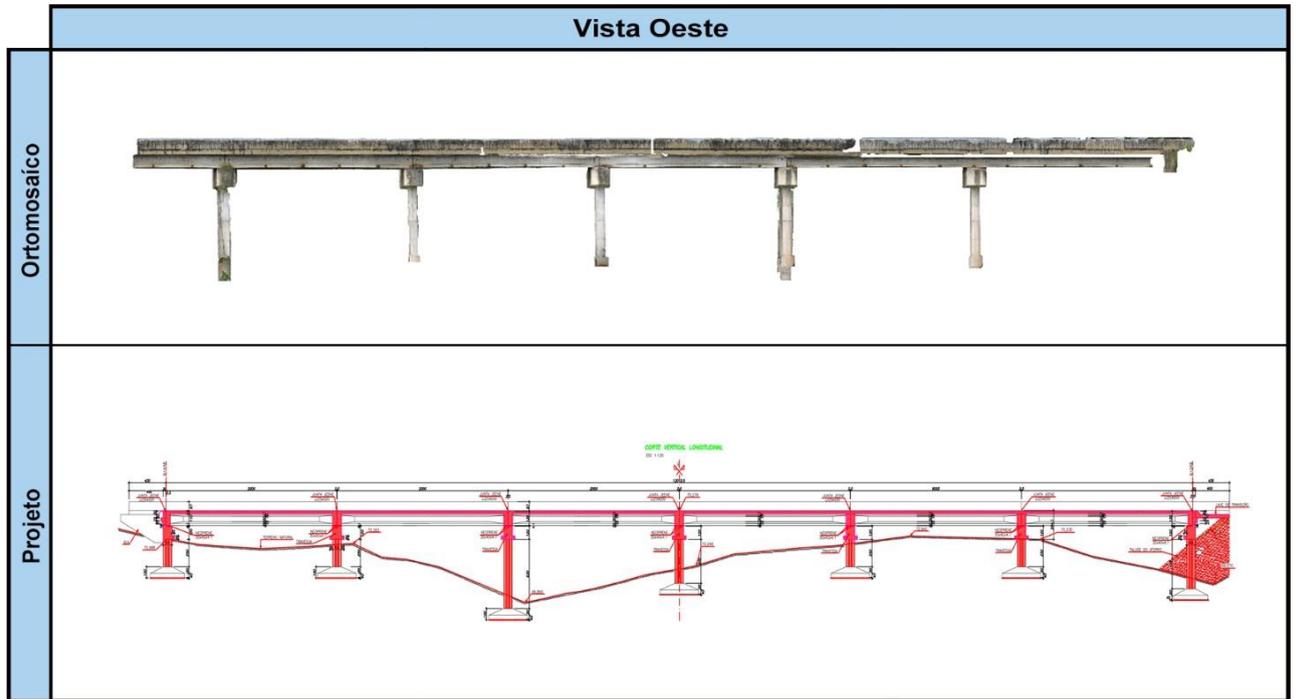
A seguir nas figuras 47,48 e 49 são apresentados ativos visuais (ortomosaicos) gerados na pesquisa experimental do estudo de caso A, comparados ao projeto realizado, mostrando que os produtos gerados são bastante eficientes para realização de análises.

Figura 47:Comparativo do ortomosaico vista Leste gerado e projeto estudo de caso A



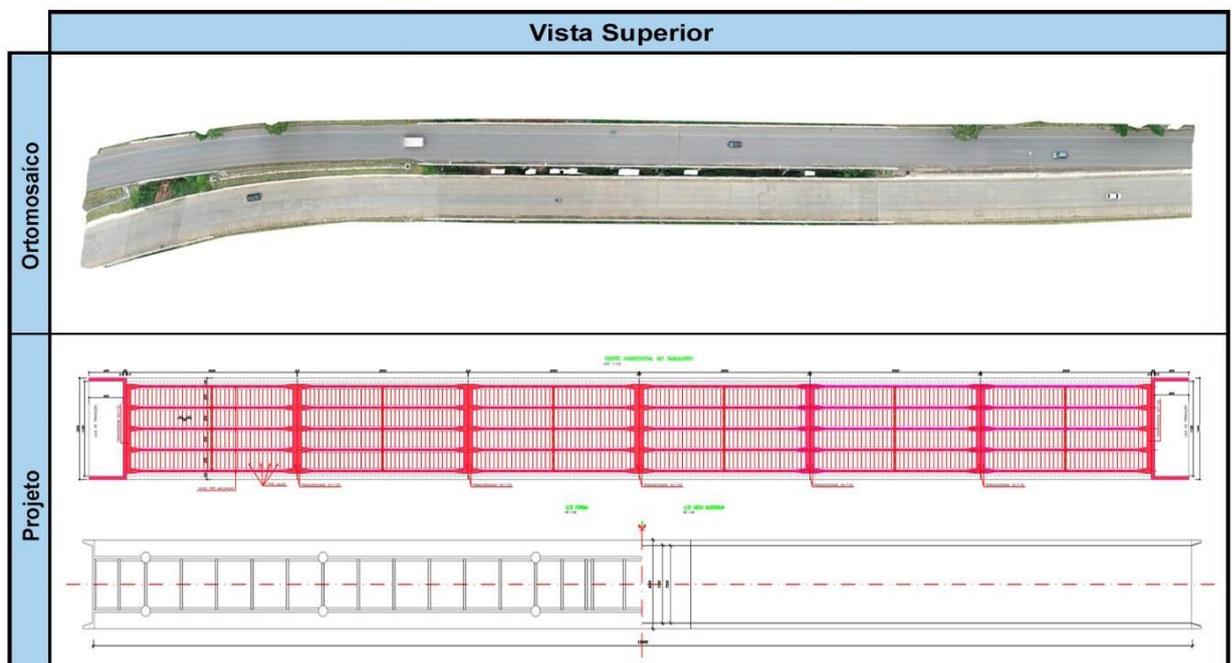
Fonte: Autor (2023)

Figura 48: Comparativo do ortomosaico vista Oeste gerado e projeto estudo de caso A



Fonte: Autor (2023)

Figura 49: Comparativo do ortomosaico gerado da vista superior e projeto estudo de caso A



Fonte: Autor (2023)

6.3.3 Análise da detecção de manifestações patológicas

Após uma análise global das manifestações patológicas, identificou-se que a manifestação patológica visualizada com maior frequência nos estudos de caso foram manchas de umidade e eflorescência porém também detectou-se fissuras e trincas, presença de vegetação e armadura exposta.

Quanto à eficiência dos ativos visuais, o ortomosaico apresentou-se eficaz para detecção de manifestações patológicas pois permite a análise de toda a estrutura em apenas uma imagem, conforme exposto na figura 50.

Tal ferramenta se torna mais eficaz quando associada a verificação de pontos específicos nas fotografias originais pois permite a confirmação dos danos detectados. As fotografias digitais originais geradas pela RPA, por si mesmo não permitem o mapeamento das manifestações patológicas, já que individualmente cada imagem apenas representa uma determinada fração da OAE, necessitando de representação geométrica, sejam planos ou ortomosaicos, que permitam a localização espacial da manifestação patológica.

Figura 50: Detalhe de patologia detectado através do modelo ortomosaico no estudo de caso A



Fonte: Autor (2023)

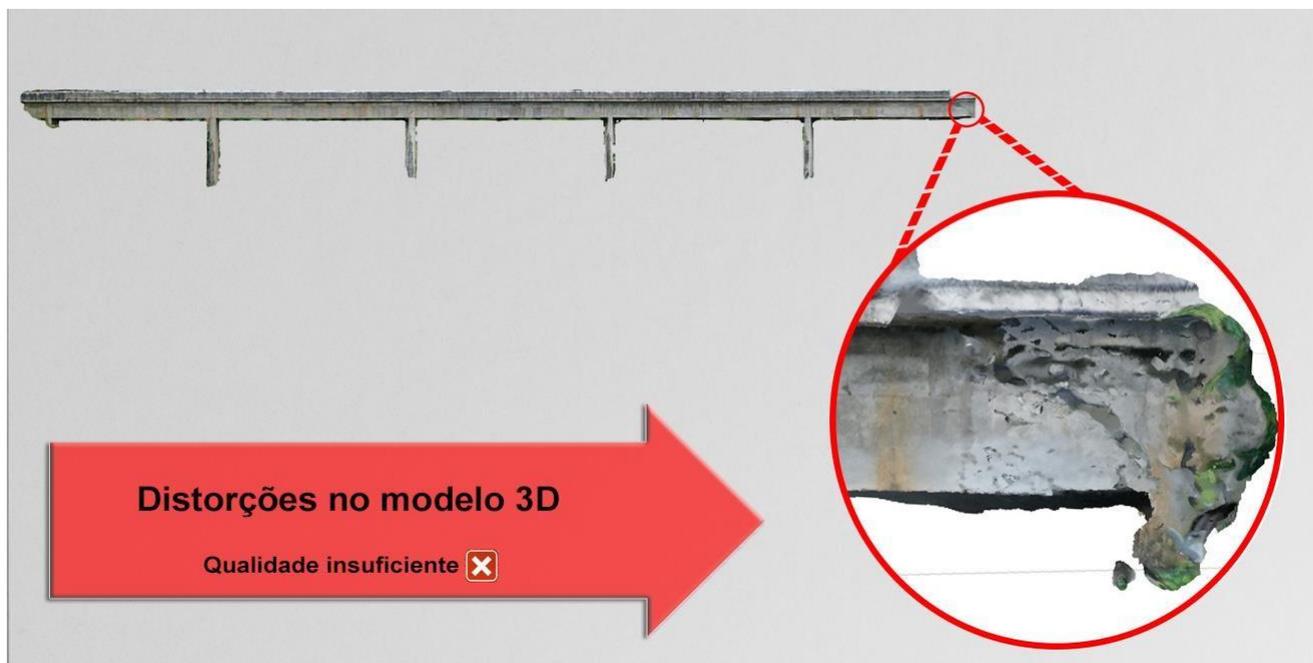
Dessa forma, os mapas de danos podem auxiliar na produção de laudos técnicos,

propiciando a apresentação clara da localização e tipologia das manifestações patológicas detectadas, que como resultado favorecerão no processo de manutenção ou restauração da ponte ou viaduto analisado.

Por outro lado, o modelo 3D é o recurso visual que permite a reconstrução espacial da geometria da OEA. Porém, no estudo de caso realizado apresentou a pior relação custo/benefício para o objetivo particular de detecção de manifestações patológicas. Afirmação justificada pela presença de distorções apresentadas nas imagens, dificultando a detecção de manifestações patológicas. Assim, este foi o recurso que permitiu menor aproveitamento na detecção de manifestações patológicas.

Esse cenário foi resultado das distorções geradas pelo software na etapa da texturização do modelo 3D. Nesta etapa, o algoritmo busca adequar geometricamente as ortoimagens para preencher às malhas triangulares que compõem o modelo, situação que compromete consideravelmente a qualidade visual do modelo texturizado e conseqüentemente a exibição das manifestações patológicas, conforme exemplificado na figura 51.

Figura 51: Distorção no modelo 3D no estudo de caso A



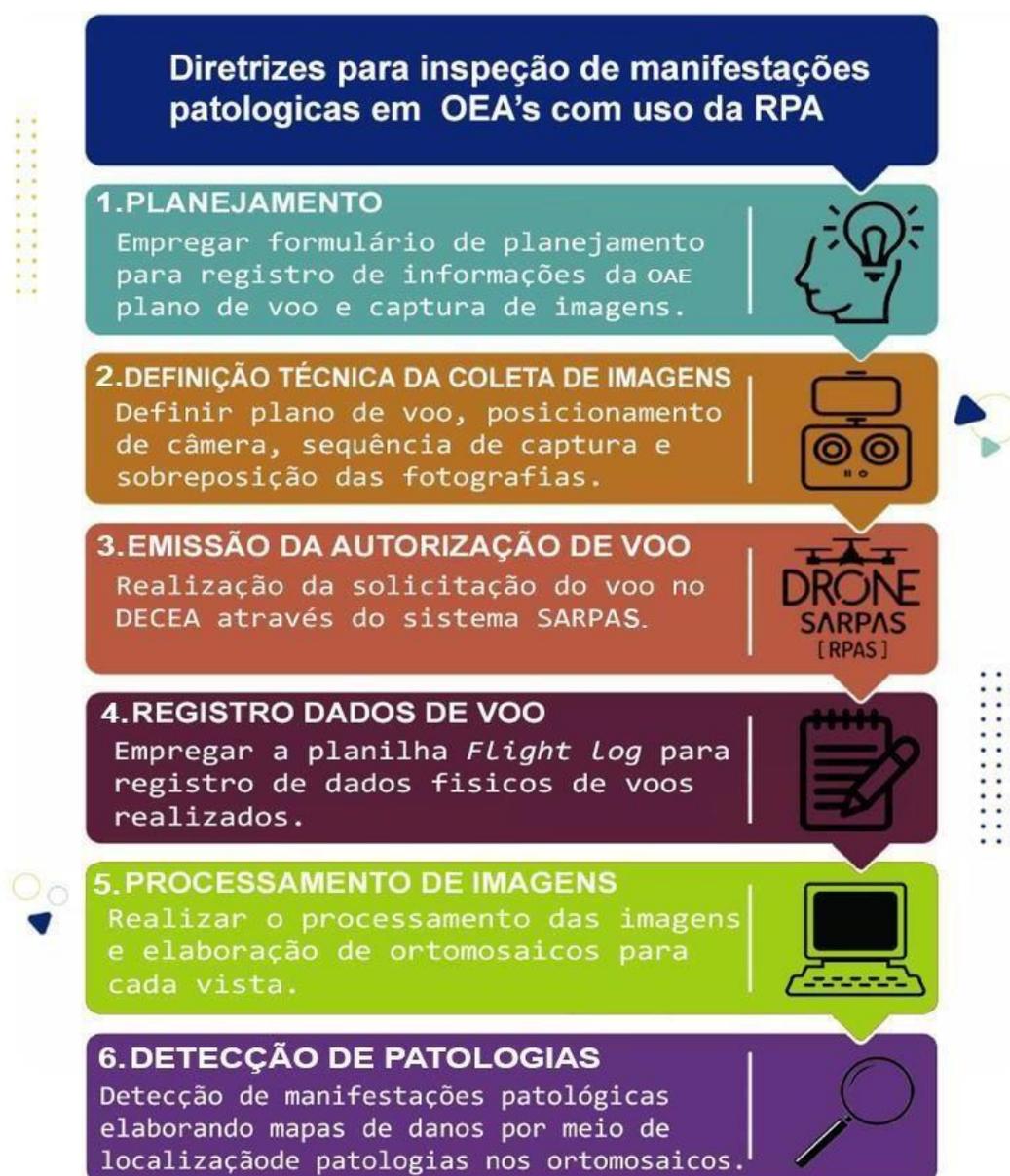
Fonte: Autor (2023)

6.4 Diretrizes

Em função do protocolo de atividades a realizar desenvolvido, utilizado e validado em capítulos anteriores, baseando-se nas informações obtidas e experiências vivenciadas através da revisão do estado da arte, pesquisa exploratória e pesquisa experimental que constituem este trabalho, serão elaboradas diretrizes para a inspeção de manifestações patológicas em pontes e viadutos com uso da RPA, conforme apresentado na Figura 52.

Figura 52: Diretrizes para a inspeção de manifestações patológicas em OEA's

Fonte: Autor (2023)



Fonte: Autor (2023)

6.4.1 Planejamento

A etapa um das diretrizes propostas para o processo de inspeção corresponde ao planejamento. Devendo-se utilizar o formulário de planejamento exposto, permitindo a padronização e simplificação do planejamento. Compondo assim um guia que estrutura o fluxo de trabalho para coletas de informações iniciais, que são fundamentais para o processo, desenvolvendo o plano de execução da inspeção de manifestações patológicas em OAE's com uso da RPA.

Dessa forma a sequência de obtenção de informações e planejamento são compostas por etapas que vão desde a coleta de dados da OAE analisada, planejamento de voo e técnica de captura de imagens.

6.4.2 Definição de técnica de captura de imagens

Na segunda etapa das diretrizes é definida a técnica de captura de imagens com a RPA. Para isso, é necessário que as fotografias coletadas serão processadas em um *software* de fotogrametria digital para produção de ortomosaicos e mapa de danos. Logo torna-se necessário definir a técnica de captura de imagens que satisfaça os critérios mínimos *software* usado na produção, sendo o paralelismo e sobreposição fotográfica mínima, fatores primordiais.

6.4.3 Captura de imagens

A terceira etapa das diretrizes é constituída pelo processo de captura de imagens. Para isso é recomendado a coleta total de imagens da vista analisada sem alteração da luminosidade, necessitando portanto ser realizada em um curto espaço de tempo visto que o sombreamento é prejudicial a qualidade da imagem.

De maneira análoga, recomenda-se uma equipe composta por no mínimo um observador, responsável pela segurança do voo (distancia da RPA para OAE analisada, vegetações e outros obstáculos) e um piloto da aeronave, responsável pela coleta fotográfica.

6.4.4 Registro dados de voo

A quarta etapa sintetiza informações importantes para o processamento das imagens, recomendando-se a utilização da planilha *flight log* que busca compilar todos os dados físicos de voos realizados, registrados no formulário de planejamento e checklist para missão com RPA. O preenchimento da planilha *flight log* devera possuir informações do local onde foi realizado o voo, altitude máxima atingida pela RPA e duração do voo.

6.4.5 Processamento de imagem

Na quinta etapa das diretrizes é realizado o processamento das imagens, objetivando a produção de um recurso visual para detecção de manifestações patológicas, através da criação de um modelo ortomosaico digitais que permitam a localização geométrica das manifestações patológicas viabilizando a criação do mapa de danos das vistas analisada da OAE.

Para produção do ortomosaico pode-se utilizar alguns softwares de fotogrametria, pela boa experiência obtida na execução deste trabalho recomenda-se o uso do *Agisoft Metashape*, que propiciou modelos com elevada qualidade visual.

6.4.6 Detecção de manifestações patológicas

A última etapa das diretrizes para detecção de manifestações patológicas, recomenda-se a utilização das fotografias digitais para confirmação da manifestação patológica identificada no modelo ortomosaico, analisando separadamente cada vista da OAE.

Assim, a detecção de manifestações patológicas é realizada através da inspeção visual individual das vistas, devendo-se definir um sentido de varredura para análise. Neste trabalho foi realizado da esquerda pra direita e de cima para baixo, quando uma manifestação patológica é detectada, deve ser posteriormente classificada.

7. CONCLUSÕES

7.1 Considerações finais

Os resultados coletados nesta pesquisa demonstram a eficiência do uso da RPA como ferramenta para coleta de imagens aéreas para inspeção, além da versatilidade na locomoção vertical e horizontal, bem como a praticidade para alcançar as regiões mais elevadas das OAE's. Possibilitando a realização de um mapeamento fotográfico completo das vistas analisadas, atendendo características exigidas pelos *softwares* que utilizam técnicas de *Dense Stereo Matching* para a reconstrução 3D e geração de ortomosaicos com elevada resolução. Dessa maneira, a aeronave representa uma alternativa conveniente para as inspeções de pontes, proporcionando imagens com qualidade satisfatória e agilidade aos processos, podendo comparar os dados obtidos com projetos existentes.

Por outro lado, diante dos resultados obtidos na pesquisa experimental, percebeu-se a dificuldade gerada por obstáculos como vegetações na coleta de imagens, além do fraco sinal da aeronave no acesso a algumas regiões da ponte do estudo de caso A, impossibilitando no o acesso a região inferior da OAE. No estudo de caso B, o fluxo de veículos de grande porte dificulta a coleta de imagem das vistas laterais, além da chance de colisão existe o deslocamento de ar que pode afetar a estabilidade da aeronave e conseqüentemente derrubá-la. Além disso, também foi percebida a ausência de sinal quando tentou-se sobrevoar a parte inferior do viaduto.

Os resultados obtidos foram para os estudos de casos realizados em ponte e viaduto, entretanto podendo servir de diretriz inicial para estudos de casos análogos de coleta e obtenção de dados com a utilização de RPA.

Na realização dos estudos de casos, o uso das diretrizes estabelecidas mostrou-se primordial para o processo de obtenção dos recursos visuais. Logo os formulários e *checklist* demonstraram eficácia para delineamento da pesquisa, desde a etapa de planejamento até coleta e processamento de imagens para a obtenção dos diferentes recursos visuais gerados como ortomosaicos, modelos 3D.

Adicionalmente os ortomosaicos se mostraram como recurso visual mais eficiente no aspecto geral, pois neles foram produzidos os mapas de danos e quando comparados com as fotografias digitais apesar da alta qualidade, pois não existe nenhum tipo de processamento, torna a análise de patologias bastante lenta por ter que se avaliar as fotos de forma individualizada, levando bastante para realização de tal tarefa. Já o recurso visual do modelo 3D mostrou-se bastante ineficiente para detecção de manifestações patológicas devido a grandes distorções apresentadas. A seguir será apresentado no quadro 15, um resumo dos estudos de caso realizados.

Por fim, o trabalho atingiu os objetivos almejados que era um estudo exploratório do uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) como ferramenta visual para inspeção de pontes e viadutos, sendo possível a detecção de manifestações patológicas nas OAE's através da coleta de imagens e posterior processamento fotográfico com o software *Agisoft Metashape*. No entanto, a pesquisa apresentou algumas delimitações e estas podem direcionar as realizações em pesquisas futuras.

7.2 Recomendações para trabalhos futuros

Por fim, em face de algumas adversidades encontradas no desenvolvimento desta pesquisa, recomenda-se aos trabalhos futuros :

- Utilizar um modelo de aeronave do tipo RTK, para acessar a parte inferior das OAE's.
- Utilizar um modelo de aeronave com câmera termográfica para inspeção das OAE's.
- Desenvolvimento de técnicas de processamento digital que detecte de forma automatizada a presença de manifestações patológicas nos materiais coletados com o uso da RPA.
- Desenvolvimento de uma metodologia que para acompanhamento da evolução das manifestações patológicas.

8. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Regulamento Brasileiro da aviação Civil Especial (RBAC-E nº94)**. Brasília, DF: 2017. Disponível em : <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94> Acesso em: 26 de setembro de 2021.

AGISOFT PhotoScan. **User Manual: Professional edition, Verszoion 1.4**. 2021. 187 p.
 ALIYARI, M.; ASHRAFI, B.; AYELE, Y.Z. Drone-based bridge inspection in harsh operating environment: Risks and safeguards. **International Journal of Transport Development and Integration**,2021.

ÁLVARES, J. S.; COSTA, D. B.; MELO, R. R. S.; BELLO, A. Estudo exploratório de mapeamento 3D de canteiros de obras utilizando veículos aéreos não tripulados. In: XVI ENTAC, 1., 2016. São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2016.

ANGELOV, A. **Sense and avoid in UAS : research and applications**. First edition. United Kingdom: Wiley,2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9452: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2019.

AYELE, Y.Z. Drones for inspecting aging bridges. **Proceedings of the International Conference on Natural Hazards and Infrastructure**,2019.

BARTHEL, C.; LINS, M.; PESTANA, F. O papel do mapa de danos na conservação do patrimônio arquitetônico. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO Y JORNADA TÉCNICAS DE RESTAURACIÓN E CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO, VIII 2009, La Plata, Buenos Aires, Argentina. **Anais...** La Plata, 2009. 20 p.

BASTOS, H. C. N.; MIRANDA, M. Z. Principais Patologias em Estruturas de Concreto de Pontes e Viadutos: Manuseio e Manutenção das Obras de Arte Especiais. **Revista CONSTRUINDO**, Belo Horizonte, v 9, Ed. Esp. de Patologia. Belo Horizonte, 2017.

BENTO, A. J. **Avaliação do estado de conservação de viadutos em concreto armado: estudo de caso da ferrovia Recife/Gravatá - PE**. Recife,2021. 177 p. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco.

BISTACHI, A., Balsamo, F., Storti, F., Mozafari, M., Swennen, R., Solum, J., Tueckmantel, C., e Taberner, C., 2015, Reconstrução fotogramétrica de afloramento digital, visualização com superfícies texturizadas e análise e modelagem estrutural tridimensional: Metodologias inovadoras aplicadas à dolomitização relacionada a falhas (Vajont Limestone, Southern Alps, Itália): *Geosphere*, v. 11, no. 6, pág. 2031-2048, doi: 10.1130/GES01005.1

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). **DNIT 010/2004 – PRO: Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2004.

Carrivick, J. F.; Smith, M. W.; Quincey, D. J., 2016. **Structure from motion in the geosciences**: John Wiley.

CARVALHO, G. B. **Dissertação de mestrado em arquitetura e urbanismo ; proposta para**

representação gráfica de mapa de danos em fachadas modernistas de concreto armado aparente. Brasília, 2018. 126 p. Dissertação de mestrado – Universidade de Brasília.

CHANG, P. C.; FLATAU, A.; LIU, S. C. Health monitoring of civil infrastructure. **Structural health monitoring**, California, v. 2, p. 257-267. 2003. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2008/Lei/L11771.htm. Acesso em: 10 ago. 2021

COELHO, L.; BRITO, J. **Fotogrametria digital**. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro: 2007. Disponível em: Acesso em: 20 mai. 2022.

Costa, Márcia Silvano; Christakou, Evangelos D.; Silva, Lenildo S. Da; Nepomuceno, Antônio A.; "Identificação de Danos em Fachadas de Edificações: Geração de Mosaicos Fotográficos Obtidos por Plataforma Robótica", p. 161-165 . In: **Proceedings of the XVII Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics: Knowledge-based Design** [=Blucher Design Proceedings, v.1, n.7].

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO (DECEA). **Aeronaves não tripuladas e o acesso ao espaço aéreo brasileiro (ICA 100-40)**. Brasil, 2020. Disponível em : <https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=5250> Acesso em: 26 de setembro de 2021.

DORAFSHAN, S.; THOMAS, R. J.; MAGUIRE, M. (2018). Comparison of deep convolutional neural networks and edge detectors for image-based crack detection in concrete. **Construction and Building Materials**, 186, 1031–1045. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.011>

DUQUE, L. and SEO, J. and WACKER, J., Bridge Deterioration Quantification Protocol Using UAV. **Journal of Bridge Engineering**, v. 23(10) 2018.

Ellenberg, A. and Kontsos, A. and Moon, F. and Bartoli, I., Bridge related damage quantification using unmanned aerial vehicle imagery. **Structural Control and Health Monitoring**

EMELIANOV, S.; BULGAKOW, A., SAYFEDDINE, D. Aerial laser inspection of buildings facades using quadrotor. In: **Creative Construction Conference**, 1., 2014. Prague. Proceedings... Prague, 2014.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - FHWA. National Bridge Inventory (NBI). 2011. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/bridge/nbi.cfm>. Acesso em: 03 set. 2021

FEROZ, S.; DABOUS, S.A. Uav-based remote sensing applications for bridge condition assessment. **Remote Sensing**. 2021.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 5 ed.[Rio de Janeiro]: Livros Técnicos e Científicos, 2007. 353 p

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 360p

GIBB, S. et al. Nondestructive evaluation sensor fusion with autonomous robotic system for civil infrastructure inspection. **Journal of Field Robotics**, Pittsburgh, v. 35, n. 6, p. 988-1004, 2018.

GOMIDE, T. L. F; FLORA, S. M. D. **Engenharia Legal** 6. 1ª ed. São Paulo: Editora Leud, 2019

GROETELAARS, N. J. **Criação de modelos BIM a partir de nuvens de pontos: estudo de métodos e técnicas para documentação arquitetônica**. 2015. 372p. Tese (Doutorado). Universidade Federal da Bahia, Faculdade de Arquitetura.

GROETELAARS, N. J.; AMORIM, A. L. **Dense Stereo Matching (DSM): conceitos, processos e ferramentas para criação de nuvens de pontos por fotografias**. In: SIGRADI 2012 - CONGRESO DE LA SOCIEDAD IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, 2012,

Fortaleza. SIGraDi 2012 [Proceedings of the 16th Iberoamerican Congress of Digital Graphics], 2012. p. 361-365.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da USP. São Paulo, 1993.

HELENE, P.; PEREIRA, F. **Rehabilitación y mantenimiento de estructuras de concreto**. São Paulo, Brasil, 2007.

IRIZARRY, J.; COSTA, D. B. Exploratory Study of Potential Applications of Unmanned Aerial Systems for Construction Management Tasks. **Journal of Management in Engineering**. 1 May 2016, Vol.32(3). Atlanta, 2016.

ISPRS, 2016, Statutes International Society for Photogrammetry and Remote Sensing: URL <https://www.isprs.org/documents/pdf/statutes16.pdf>.

Jardim, H. C. M.; GOMES, G. A. M. **Utilização da fotogrametria para levantamentos topográficos na construção civil**. 2020

JUNG, H.-J. and Lee, J.-H. and Yoon, S. and Kim, I.-H. Bridge inspection and condition assessment using unmanned aerial vehicles (UAVs): Major challenges and solutions from a practical perspective. **Smart Structures and Systems**, 2019.

KHALOO, A.; Lattanzi, D.; Jachimowicz, A.; Devaney, C. Utilizing UAV and 3D computer vision for visual inspection of a large gravity dam. **Front. Built Environ**. 4:31. 2018.

KIM, H. and Sim, S.H. and Cho, S. Unmanned aerial vehicle (UAV)-powered concrete crack detection based on digital image processing. **International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering**, 2016. Vol. 23 (9), p. 1168-1179.

LATO, M.J., 2020, Canadian Geotechnical Colloquium: 3D remote sensing. 4D aitalysis in geotechnical engineering; state-of-the-art and outlook: **Canadian Geotechnical Journal**, p 1- 26, doi: 10.1139/cgj-2020-0399.

Lee, J. H.; Yoon S.; Kim B.; Gwon G. H.; Kim, I. H.; Jung, H. J.; A new image-quality evaluating and enhancing methodology for bridge inspection using an unmanned aerial vehicle. **Smart Structures and Systems**, Vol. 27, No. 2 (2021) 209-226. Korea,2021.

LIBERATI, A.; ALTMAN, D.G.; TETZLAFF, J. **The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate healthcare interventions: explanation and elaboration**. *BMJ* 2009; 339: b2700.

Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., e Chipman, J.W., 2015, **Remote Sensing and Image Interpretation**. 7th edn.,Wiley, 736 p.

Lin, Jacob J. and Ibrahim, Amir and Sarwade, Shubham and Golparvar-Fard, Mani and Nitta, Yasushi and Moirkawa, Hirokuni and Fukuchi, Yoshihiko. **Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction**, ISARC 2020.

Linder, W., 2016, **Digital photogrammetry: A practical course**. 4th edn., Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Liu, Yu-Fei and Nie, Xin and Fan, Jian-Sheng and Liu, Xiao-Gang. Image-based crack assessment of bridge piers using unmanned aerial vehicles and three-dimensional scene reconstruction. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**,2020.

Luis Duque, S.; Junwon Seo, P.E.; and James Wacker; Bridge Deterioration Quantification Protocol Using UAV. **Journal of Bridge Engineering**, 2018, 23(10).

MADER, D.; BLASKOW, R.; WESTFELD, P.; WELLER, C. Potential of UAV-Based laser scanner and multispectral camera data in building inspection. International Archives of the Photogrammetry, **Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**. Vol.2016-, pp.1135-1142. Praga, 2016.

Manfreda, S., Dvorak, P., Mullerova, J., Herban, S., Vuono, P., Justel, J.J.A., e Perks, M., 2019, **Assessing the Accuracy of Digital Surface Models Derived from Optical Imagery Acquired with Unmanned Systems: Drones**, v. 3, no. 15, p. 1-14, doi? 10.3390/drones3010015

MARCHETTI, Osvaldemar. **Pontes de concreto armado**. Editora Blucher, 2018.

MATTJE, A.; PADARATZ, I. J. **Durabilidade de pontes em concreto do sistema rodoviário de Santa Catarina**. IBRACON- construções em concreto, v.2, p. 728-742.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 4 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELO JR, C. M., **Metodologia para geração de mapas de danos de fachadas a partir de fotografias obtidas por veículo aéreo não tripulado e processamento digital de imagens**. Brasília, 2016. 408p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

MELO JÚNIOR, C. M.; EVANGELISTA JUNIOR, F.; SILVA, L. S. da; NEPOMUCENO, A. A. Geração de mapas de danos de fachadas de edifícios por processamento digital de imagens capturadas por Vant e uso de fotogrametria digital. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 211-226, jul./set. 2018.

MELO, R. R. S. **Diretrizes para inspeção de segurança em canteiros de obra por meio de imageamento com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT)**. Salvador,2016. 160p. Dissertação (mestrado)

MENDES, P. T. C. **Contribuições para um modelo de gestão de pontes de concreto aplicado à rede de rodovias brasileiras**. 2009, 235 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

MILITITSKY, Jarbas; CONSOLI, Nilo Cesar; SCHNAID, Fernando. **Patologia das fundações**. 1 ed. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2008. 207 p.

MOOMEN, A. W.; BERTOLOTTI, M.; LACROIX, P.; JENSEN, D. Landscape assessment for sustainable resettlement of potentially displaced communities in Ghana's emerging northwest gold province. **Journal of Cleaner Production**. 2016, v.133(1). Pp 701-711.

MORGENTHAL, G; HALLERMANN, N. Quality Assessment of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Based Visual Inspection of Structures. **Journal of Advances in Structural Engineering**. Mar 2014, Vol.17(3), pp.289-302. Weimar, 2014.

NAKAO, M. ;

HASEGAWA, E.; KUDO, T.; SAWASAKI N. Development of a Bridge Inspection Support Robot System Using Two-Wheeled Multicopters. *Journal of Robotics and Mechatronics* Vol.31 No.6,2019.

PATRIOTA,

R. C. **Mapeamento de fachadas usando aeronave remotamente pilotada**. Curitiba, 2017. Monografia (Especialização) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

PECHARROMAN, J.,VEIGA, R. **Estudo sobre a indústria brasileira e européia de veículos**

aéreos não tripulados. Diálogos Setoriais União Européia – Brasil, Brasil, 2017.

PIERROT-DESEILLIGNY, M.; DE LUCA, L.; REMONDINO, F. Automated image-based procedures for accurate artifacts 3D modeling and orthoimage generation. **Geoinformatics CTU FCE**. 2011. Disponível em: . Acesso em: 10 mai. 2021.

PURI, A. **A Survey of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for Traffic Surveillance.** Department of computer science and engineering, University of South Florida, 2005. – Universidade Federal da Bahia.

PUSHPAKUMARA, B. H. J.; SILVA, S.; SILVA, G. H. M. J. S. Visual inspection and nondestructive tests-based rating method for concrete bridges. **International Journal of Structural Engineering**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 74-91, 2017.

REAGAN, D; SABATO, A; NIEZRECKI, C. Feasibility of using digital image correlation for unmanned aerial vehicle structural health monitoring of bridges Structural Health Monitoring, October 2017, **SAGE Publishing**, Vol.17(3), pp.289-302. Massachusetts, 2017.

REHMAN, S. K. U. et al. Nondestructive test methods for concrete bridges: A review. **Construction and building materials**, Edimburgo, v. 107, p. 58-86, 2016.

Reven, A. and Fritsche, C. and Chen, G. Unmanned aerial and traversing robot as mobile platform for bridge inspections. **9th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure: Transferring Research into Practice, SHMII 2019 - Conference Proceedings**

RUIZ, R. D. B. **Inspeção de manifestações patológicas de fachadas utilizando veículo aéreo não tripulado (VANT): estudo exploratório.** Recife, 2020. 2019 p. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco.

SALES, A. *et al.* **Corrosão e degradação em estruturas de concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção.** 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

SANTOS, Daniel Rodrigues. **Fotogrametria I** (1ª. ed. 2009) última atualização 2014 Departamento de Geomática UFPR. Curitiba, 2014.

SCHREIBER, L., OSTIARI, E. **Game of drones: do civilian applications harbour opportunities for sustainable development.** Mirova Responsible Investing. Paris/FR: mai. 2014. [On Line]. Disponível em: Acesso em: 24 de outubro 2021.

Seo, J., J. Wacker, and L. Duque. 2018b. “Evaluation of unmanned aircraft systems as a bridge inspection tool.” Madison, WI: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Forthcoming. Guerrero; Bestaoui 2013.

SGUISSARDI, G. **INSPEÇÃO DE OBRAS DE ARTE UTILIZANDO VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO – VANT.** Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC. 2019.

SILVA, A. F. **Manifestações patológicas em fachadas com revestimentos argamassados: estudo de caso em edifícios em Florianópolis.** Florianópolis, 2007. 190p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina.

SILVA, C. J. G.; MONTEIRO, E. C. B.; VITÓRIO J. P. A. Condições estruturais e funcionais de pontes e viadutos das rodovias federais de Pernambuco. **Revista ALCONPAT**, Mérida Yucatán, v. 8, n. 1, p. 79-93, jan./abr. 2018. Disponível em: <https://www.revistaalconpat.org/>

index.php/RA/article/view/199. Acesso em: 25 de set. de 2021.

SIMÕES, Luiz F.; RODRIGUES, Pablo F.; PINHEIRO, Débora CC. Análise crítica dos métodos de inspeção da ABNT NBR 9452: 2019. In: XII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, 1., 2021. Digital. **Anais [...]**. ABPE, 2021.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1998. 262 p.

TAVANI, S.; GRANADO, P.; CORRADETTI, A.; GIRUNDO, M.; IANNACE, A.; Arbués, P.; MUÑOZ, J.A.; MAZZOLI, S. Building a virtual outcrop, extracting geological information from it, and sharing the results in Google Earth via OpenPlot and Photoscan: An example from the Khaviz Anticline (Iran). **Computers & Geosciences**. V. 63; 2014; 44–53.

TEJEDOR, Cristina Mayán; **Patologias, recuperação e reforço com protensão externa em estruturas de pontes**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Escola Politécnica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013. 139 p.

TINOCO, Jorge Eduardo Lucena. **Mapa de danos – Recomendações básicas**. Centro de estudos avançados da conservação integrada – CECI. Vol. 43. Olinda, Pernambuco, 2009.

TIRELLO, R. A.; CORREA, R. Sistema normativo para mapas de danos de edifícios históricos aplicados à Lidgerwood Manufacturing Company de Campinas. In: Colóquio latinoamericano sobre recuperação e preservação do patrimônio industrial. VI 2012. São Paulo. **Anais...** São Paulo: Centro Universitário belas Artes de São Paulo, 2012. V. 1. P. 44-26.

TOLENTINO, M.; GROETELAARS, N. **LEVANTAMENTO DA IGREJA DE NOSSA SENHORA DA CONCEIÇÃO DO BOQUEIRÃO ATRAVÉS DAS TÉCNICAS FOTOGRAMETRIA DIGITAL (STRICTO SENSO) E DENSE STEREO MATCHING (DSM)**. 1º Simpósio Científico ICOMOS. Brasil Belo Horizonte, 2017.

VAN AKEN, J.; BERENDS, H.; BIJ, H. V.D. Problems Solving in Organizations: a Methodological Handbook for Business and Management Students. 2 ed. New York: Cambridge University Press, 2012.

VERA, R. Medición de contaminación mediante UAV (Vehículo Aéreo no Tripulado). **Mundo FESC**. 2016, Vol.1(11), pp.16-26. Cucuta, 2016.

VERÇOSA, E.J. **Patologia das edificações**. Porto Alegre, Ed. Sagra, 1991.

VERHOEVEN, G. Taking computer vision aloft – archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with photoscan. **Archaeological Prospection**. V 18, nº 1; 2011, 67-73.

VIANA, C. D. **Fotogrametria multi-escala para aquisição de dados estruturais**, São Paulo, 2021. 258 p. tese (doutorado) - Instituto de geociência Universidade de São Paulo.

VITÓRIO, J. A. P. **Pontes Rodoviárias. Fundamentos, Conservação e Gestão**. Recife, 2002.

VITÓRIO, J. A. P. Vistorias, Conservação e Gestão de Pontes e Viadutos de Concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 48., 2006, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: IBRACON, 2006. Disponível em: http://vitorioemelo.com.br/publicacoes/Vistorias_Conservacao_Gestao_Pontes_Viadutos_Concreto.pdf. Acesso em: 26 ago. 2021

XIE, R. et al. Automatic multi-image stitching for concrete bridge inspection by combining point and line features. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 90, p. 265-280, 2018.

YAMADA, M. and Nakao, M. and Hada, Y. and Sawasaki, N. Development and field test of novel two-wheeled UAV for bridge inspections. **International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2017**.

YANG, XC; QIN, XB; WANG, J; WANG, JH; YE, X; QIN, Q. M. Building Facade Recognition Using Oblique Aerial Images, **Journal of Remote Sensing**, 2015 Aug, Vol.7(8), pp.10562-10588. Pequim, 2015.

YOON, S.; SPENCER, B. F. J.; LEE, S., JUNG, H.; KIM, I. A novel approach to assess the seismic performance of deteriorated bridge structures by employing UAV-based damage detection. **Struct Control Health Monit**. 2022.

Yunovich, M.; Thompson, N.G. Corrosion of Highway Bridges: Economic Impact and Control Methodologies. **Concrete International**.2003, v.25(1). Pp 52-57.

Zollini, S. and Alicandro, M. and Dominici, D. and Quaresima, R. and Giallonardo, M. UAV photogrammetry for concrete bridge inspection using object-based image analysis (OBIA). **Remote Sensing**,2020.