



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Monitoramento de pontes e viadutos com uso de veículo aéreo não tripulado (VANT): estudos de caso

Leonardo José Silva do Vale¹, Alberto Casado Lordsleem Júnior², Bruno Fernandes³, Glauber Carvalho Costa⁴, Joaquin Humberto Aquino Rocha⁵

¹ Aluno de mestrado, Universidade de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil. E-mail: ljsv@poli.br. OrcID: <https://orcid.org/0000-0002-9808-9319> (autor correspondente). ² Professor, Universidade de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil. E-mail: acasado@poli.br. OrcID: <https://orcid.org/0000-0003-3276-0621>. ³ Professor, Universidade de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil. E-mail: bruno.fernandes@poli.br. OrcID: <https://orcid.org/0000-0002-6001-3925>. ⁴ Professor, Universidade de Pernambuco, Cidade, Estado, País. E-mail: glauber.carvalho@unicap.br. OrcID: <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>. ⁵ Aluno de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: joaquin.coc@ufrj.br. OrcID: <https://orcid.org/0000-0002-3383-6379>.

Artigo recebido em 16/06/2024 e aceito em 02/02/2025

RESUMO

A inspeção tradicional de pontes e viadutos é uma atividade desafiadora devido à segurança, acessibilidade e custo. Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) vêm ganhando cada vez mais relevância como um novo mecanismo de aquisição de dados e inspeções visuais, oferecendo métodos mais rápidos e seguros. O objetivo desta pesquisa é realizar uma análise exploratória da utilização da tecnologia VANT no exame visual de falhas em pontes e viadutos. A metodologia incluiu a pesquisa experimental de dois estudos de caso, desenvolvendo para esses fins o protocolo de atividades, onde foram contempladas as etapas de planejamento de voo, coleta e processamento de imagens. Os resultados demonstraram a viabilidade técnica e eficiência do processo de inspeção, possibilitando a geração de ativos visuais para detecção de falhas utilizando modelos obtidos através do software *Agisoft Metashape* destacando o melhor desempenho do modelo ortomosaico quando comparado às fotografias digitais e modelos 3D. A principal contribuição deste estudo é a validação do pacote tecnológico desenvolvido para auxiliar no diagnóstico de protocolo de falhas para inspeções de pontes e viadutos utilizando VANTs, bem como uma análise comparativa dos ativos visuais gerados.

Palavras-chave: ortomosaico, inspeção visual, manifestações patológicas, pontes, viadutos.

Monitoring of bridge and viaduct using Unmanned Aerial Vehicle (UAV): case studies

ABSTRACT

Traditional inspection of bridges and viaducts is a challenging activity due to concerns related to safety, accessibility, and cost. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are gaining increasing relevance as innovative tools for data acquisition and visual inspections, offering faster and safer methods. The objective of this research is to conduct an exploratory analysis of the utilization of UAV technology for visually examining flaws in bridges and viaducts. The methodology involved experimental research on two case studies, during which a protocol of activities was developed. This protocol included flight planning, image collection, and processing stages. The results demonstrated the technical feasibility and efficiency of the inspection process, enabling the generation of visual assets for flaw detection. Models obtained using *Agisoft MetaShape* software highlighted the superior performance of the orthomosaic model compared to digital photographs and 3D models. The main contribution of this study is the validation of a technological package designed to assist in flaw diagnosis protocols for bridge and viaduct inspections using UAVs. Additionally, a comparative analysis of the generated visual assets was conducted to further support the findings.

Keywords: orthomosaic, visual inspection, flaw detection, bridges, viaducts.

Introdução

Grandes estruturas de concreto, comuns no país, desempenham papel fundamental em diversos setores da economia brasileira. A degradação associada ao aumento dos riscos causados pela

falta de manutenção dessas estruturas, especialmente em obras de arte especiais como pontes e viadutos, é um problema devido à falta de estratégias focadas na sua conservação (Capacci et al., 2022).

As pontes e viadutos desempenham um papel essencial na infraestrutura global, conectando regiões e facilitando o transporte de pessoas e bens. No entanto, sua inspeção e manutenção enfrentam desafios consideráveis devido às limitações dos métodos tradicionais (Gadiraju et al., 2025). Esses métodos, apesar de amplamente utilizados, são subjetivos, demandam tempo e mão de obra qualificada, além de envolverem riscos para os inspetores ao realizar trabalhos em altura. A falta de tecnologias mais eficazes compromete a durabilidade dessas estruturas e eleva os custos de manutenção e reabilitação (Lima & Costa, 2022). Nesse contexto, surge a necessidade de explorar tecnologias inovadoras, como Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), que prometem superar essas limitações e redefinir os padrões de inspeção estrutural.

A estabilidade estrutural e a segurança pública estão diretamente ligadas à execução de manutenções, tornando indispensável a realização de inspeções em pontes e viadutos para análise de suas condições (Jung et al., 2019; Kaewunruen et al., 2021). As atividades de inspeção de pontes e viadutos são fundamentais para avaliar seu estado de conservação, pois essas estruturas podem ser afetadas por diversos tipos de manifestações patológicas, como fissuras, corrosão, eflorescência, fragmentação e armaduras expostas ao longo de sua vida útil (Huh et al., 2023; Rocha et al., 2024).

Além dos desafios técnicos e logísticos, a ausência de estratégias eficientes de inspeção pode levar ao agravamento das condições estruturais das pontes e viadutos, aumentando os custos de reabilitação e comprometendo a segurança pública. A falta de manutenção preventiva adequada não apenas resulta em falhas estruturais mais severas, mas também causa interrupções significativas no tráfego, impactando diretamente a economia e a mobilidade urbana (Hassani & Dackermann, 2023).

O tipo de inspeção de ponte mais utilizado é a inspeção visual, sendo também o método mais antigo (Isailović et al., 2020; Ameli et al., 2022). No entanto, este método é subjetivo (depende da experiência dos inspetores), demorado, trabalhoso, caro e inseguro, o que pode levar a resultados inconsistentes (Mansuri & Patel, 2020). Esse método convencional pode exigir equipamentos especiais como caminhões de inspeção posicionados sob a ponte, além de profissionais qualificados (Tao et al., 2021; Ruiz et al., 2022).

Mais recentemente, estudos como Rey & Costa (2021) tem demonstrado um interesse significativo na utilização de VANTs em diversas áreas, e a inspeção de pontes não é exceção. Esta

tecnologia tem ganhado considerável interesse entre os inspetores de estruturas elevadas devido aos custos e às práticas ineficientes associadas aos atuais métodos de inspeção de pontes e viadutos (Duque et al., 2018; Aliyari et al., 2022; Ruiz et al., 2022). Segundo Feroz e Abu Dabous (2021), o uso de VANTs oferece vantagens para inspeção de pontes, enfatizando a precisão dos resultados, facilidade de coleta de dados e compatibilidade com plataformas de modelagem. No entanto, é necessária uma exploração mais aprofundada para compreender completamente as capacidades deste equipamento. Ameli et al. (2022) concluíram que o uso de VANTs é altamente eficaz para inspecionar pontes e infraestruturas. Além disso, enfatizaram o potencial dos VANTs em termos de hardware e software, sugerindo novos métodos para inspecionar essas estruturas.

Por outro lado, os VANTs são responsáveis por gerar capacidades únicas, incluindo a capacidade de realizar voos próximos a locais de pontes com acessibilidade limitada, portando câmeras de alta resolução e incorporando sensores que ajudam a superar as limitações de acesso às estruturas (Seo et al., 2018; Yiğit & Uysal, 2025).

Os VANTs são capazes de gerar dados e imagens de forma muito eficaz. Da mesma forma, a utilização desta ferramenta elimina o risco associado ao trabalho em altura. Sem dúvida, as inspeções utilizando VANTs provavelmente serão mais seguras, visto que, em caso de queda de um drone, ele poderá ser substituído sem perturbações significativas, ao contrário da vida humana em cenários de trabalho em grandes altitudes (Ruiz et al., 2022; He et al., 2024). Isso ressalta a importância dos VANTs como uma valiosa ferramenta de apoio na gestão da segurança (Lima & Costa, 2022). Assim, este estudo tem como objetivo investigar a utilização de VANTs como ferramenta visual para inspeção de pontes e viadutos. Isso envolve a utilização da aeronave, câmeras digitais a bordo e software de processamento de imagem para identificar problemas estruturais. Além disso, mostra a eficácia da tecnologia utilizada na detecção de falhas em pontes e viadutos, ao mesmo tempo que compara os tempos de processamento nos estudos de caso realizados.

Uma ponte, como qualquer outro tipo de estrutura, começa a deteriorar-se a partir do momento em que é colocada em operação, iniciando o seu ciclo de vida (Lantsoght, 2024). Essa vida útil dependerá de diversos fatores relacionados às condições de uso e conservação ao longo do tempo, visando garantir segurança, funcionalidade e durabilidade ao menor custo

possível. Particularmente, existem muitas causas complexas de deterioração de pontes, sendo as principais: projeto ou construção inadequada, ambientes agressivos, sobrecargas, impactos acidentais, falta de manutenção e envelhecimento. As pontes estão sujeitas a impactos agressivos causados pelo tráfego e efeitos ambientais, como ciclos de molhagem e secagem, evidenciando a necessidade de manutenção (Zhang et al., 2022). Como resultado, o custo de manutenção dos elementos da ponte torna-se bastante significativo. (Moomen et al., 2016; Nasr, 2021; Gajanayake et al., 2021).

Uma parcela considerável destes problemas poderia ser evitada durante a fase de projeto, reduzindo significativamente os custos de reabilitação (Shah et al., 2023). A análise da degradação estrutural não pode progredir sem considerar as características das manifestações patológicas e sua correspondente fase ou estágio de ocorrência, tornando-se condições necessárias para alcançar maior eficiência no diagnóstico e segurança na execução dessas estruturas (Zhang et al., 2022; Jung et al., 2022).

Segundo a literatura (Rehman et al., 2016; Rocha et al., 2021; Golewski, 2023; Junior et al., 2024), as manifestações patológicas mais comuns em estruturas de concreto armado, como pontes, são: fissuras, ataques químicos, ataques físicos, corrosão de armaduras, mofo e bolor.

As pontes são estruturas com elevados custos de construção, reparação e reabilitação. Quando a intervenção é necessária, pode levar a perturbações sociais e econômicas significativas, uma vez que a circulação dos utilizadores destas pontes e viadutos é interrompida. Os cuidados adequados na preservação dessas construções garantem proteção contra a agressividade ambiental, diretamente relacionada à durabilidade da estrutura (Qu et al., 2021; Abdel-Monem et al., 2022). Portanto, pelos fatores discutidos, destaca-se a importância das fiscalizações técnicas em pontes e viadutos visando a sua preservação, tema que será abordado a seguir.

Segundo Angelov (2012), a classificação dos VANTs pode ser estabelecida com base em características aerodinâmicas, como configurações de asa fixa, asa rotativa. O VANT de asa rotativa realiza decolagem e pouso vertical, oferecendo vantagens como a capacidade de manter a estabilidade no ar e alta manobrabilidade. Essas características têm impulsionado o crescimento de aplicações utilizando aeronaves desta classificação (Groetelaars & Amorim, 2012).

O VANT torna-se uma ferramenta crucial para detecção e avaliação não destrutiva em inspeções de pontes, oferecendo uma abordagem

mais segura, rápida, econômica e confiável, sem interromper o tráfego (Jung et al., 2019). Devido a essas vantagens potenciais, a inspeção de pontes utilizando VANTs demonstra alta adequação conforme apresentado em alguns estudos que, por outro lado, não fornecem comparação de tempo de processamento, mapa de danos, comparação de diferentes VANTs utilizados como apresentado neste (Feroz & Abu Dabous, 2021).

Outra etapa de fundamental importância é o processamento computacional de fotografias digitais, que é realizado por meio de softwares de fotogrametria digital, associados a VANTs e câmeras digitais, formando o pacote tecnológico. O princípio de funcionamento de muitas ferramentas de software é a técnica *Dense Stereo Matching* (DSM), utilizada para extrair nuvens de pontos por meio de processamento digital de imagens (Rahnama et al., 2018).

Segundo Carrivick et al. (2016) e Viana (2021), o DSM é uma técnica de levantamento topográfico digital que surgiu da combinação da fotogrametria com os avanços da visão computacional. Comparado à fotogrametria tradicional, este método oferece a vantagem de que cada ponto da cena é determinado a partir de um grande número de imagens, garantindo alta qualidade dos dados.

Este estudo parte da hipótese de que o uso de VANTs, aliado a softwares avançados de processamento de imagens, pode proporcionar uma abordagem mais segura, econômica e precisa para a inspeção de pontes e viadutos (Toriumi et al., 2022). Acredita-se que a adoção dessa tecnologia permita não apenas a identificação detalhada de falhas estruturais, mas também uma redução significativa nos tempos de processamento e nos custos operacionais, ao mesmo tempo que aumenta a segurança dos trabalhadores envolvidos (Kao et al., 2022; Lee et al., 2023). Além disso, o estudo busca comparar diferentes ferramentas tecnológicas utilizadas nesse contexto, avaliando sua eficácia em estudos de caso.

Assim, as principais contribuições deste estudo incluem a validação do pacote tecnológico criado para apoiar a identificação de falhas durante inspeções de pontes e viadutos utilizando VANTs. Além disso, foi realizada uma comparação dos produtos visuais produzidos (modelo ortomosaico, fotografias digitais e modelos 3D), identificando o mais adequado para este estudo, e foi feita uma análise dos tempos de processamento dos estudos de caso nas diversas etapas, permitindo para uma comparação entre eles.

Material e métodos

A metodologia adotada neste estudo foi um estudo de caso experimental envolvendo duas pontes e viadutos de concreto armado, avaliando o desempenho do VANT, câmera digital e software de fotogrametria digital como ferramentas para inspeção de falhas.

O protocolo de inspeção de falhas em pontes foi estruturado conforme apresentado na

Figura 1, abrangendo a etapa de pré-inspeção, relacionada às atividades de planejamento; a etapa de fiscalização, relativa à coleta de dados fotográficos; e a etapa de pós-inspeção, relacionada ao processamento das imagens e posterior análise dos recursos visuais obtidos para detecção de falhas.



Figura 1. Protocolo de atividades.

O protocolo desenvolvido consiste em formulários e checklists definidos com base nas necessidades do procedimento de inspeção.

Portanto, auxiliam no planejamento, coleta e processamento de dados durante o serviço de fiscalização utilizando VANTs. O objetivo é estruturar e orientar os processos de fiscalização de pontes e viadutos utilizando VANTs, garantindo a coleta de dados de campo para posterior processamento de dados laboratoriais.

O checklist da missão do VANT foi empregado durante a etapa de inspeção da vistoria para as operações de preparação, controle, decolagem e pouso do voo. Seu objetivo foi estruturar o procedimento de inspeção de campo e aumentar a eficiência do fluxo de trabalho de captura de imagens, considerando requisitos de segurança e uso adequado dos equipamentos (Ruiz et al., 2022).

A metodologia foi estruturada em três etapas principais: pré-inspeção, inspeção e pós-inspeção, envolvendo duas estruturas de concreto armado (uma ponte e um viaduto). Na pré-inspeção, foram realizadas análises do entorno para identificar pontos de decolagem e pouso do VANT, além de condições climáticas e de iluminação. Durante a etapa de inspeção, os dados foram coletados utilizando drones *DJI Phantom 4 Pro V 2.0* e *DJI Mavic 2 Pro*, equipados com câmeras de alta resolução e controlados por aplicativos específicos (*Drone Deploy* e *Pix4D Capture*). As imagens capturadas (vistas superiores e laterais) seguiram critérios de sobreposição mínima de

75%, garantindo precisão no alinhamento das fotografias. Na etapa de pós-inspeção, os dados foram processados no software *Agisoft Metashape Pro*, com geração de modelos tridimensionais, ortomosaicos e nuvens de pontos densas. Os dados obtidos foram analisados visualmente para identificar manifestações patológicas e posteriormente organizados em mapas de danos. As análises estatísticas descritivas foram realizadas para avaliar os tempos de processamento e a eficiência dos modelos digitais gerados, comparando os resultados obtidos em diferentes cenários.

Etapa de pré-inspeção

O primeiro estudo de caso envolveu uma ponte com estrutura de concreto armado que atravessa o Rio Capibaribe no município de Paudalho, Estado de Pernambuco, Brasil (Figura 2a). A ponte está situada às margens da rodovia BR-408, com coordenadas de latitude -7.89260 (sul) e longitude -35.17451 (oeste). Mede 112 metros de comprimento e 12 metros de largura, com pilares de 8 metros de altura. O segundo estudo de caso focou em um viaduto construído em concreto armado (Figura 2b) localizado no município de Goiana, Estado de Pernambuco, Brasil, especificamente ao longo da rodovia BR-101. Esta estrutura possui coordenadas geográficas de latitude -7,53685 (sul) e longitude -34.99145 (oeste). Possui 66 metros de comprimento, 21,5 metros de largura e pilares de 7 metros de altura.



Figura 2. Seleção dos locais de pouso/decolagem: (a) estudo de caso A e (b) estudo de caso B.

Os locais foram analisados antes da realização das vistorias, para melhor compreensão do entorno onde estavam situadas a ponte e o viaduto. Isso envolveu avaliar os pontos de acesso da equipe, identificar pontos de apoio ao operador do VANT, encontrar locais adequados para decolagens com a aeronave e identificar pontos para otimização do trabalho e coleta de imagens. Além disso, foram levados em consideração fatores como condições de risco, clima, características geográficas e áreas vizinhas.

Em relação à iluminação e sombras durante a captura das imagens, recomenda-se que seja realizado um levantamento fotográfico completo sem alterar as condições de iluminação

(Duque et al., 2018). Conseqüentemente, o levantamento da vista analisada deve ser realizado dentro de um curto período de tempo sob iluminação solar consistente. No caso de gravações aéreas com VANTs, é importante considerar a ocorrência de grandes sombras em dias muito ensolarados. Assim, as inspeções devem ser realizadas quando o sol está alto no céu (Coelho e Brito, 2007). A inspeção foi realizada seguindo essas recomendações.

O equipamento selecionado para a realização da pesquisa foi o *DJI Phantom 4 Pro V 2.0* (estudo de caso A) e o *DJI Mavic 2 Pro* (estudo de caso B), conforme mostra a Figura 3.

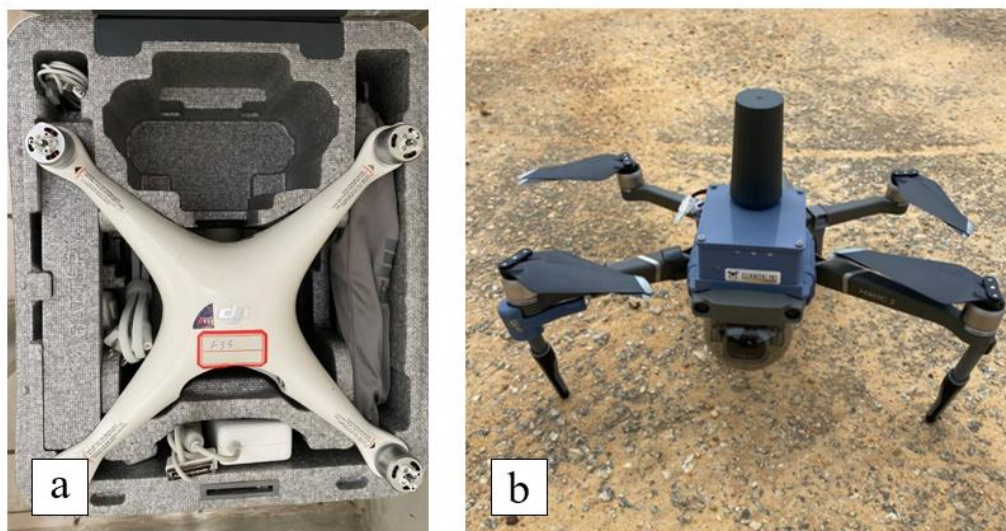


Figura 3. (a) *Phantom 4 Pro V.2* e (b) *Mavic 2 Pro*.

A escolha baseia-se na confiabilidade e nos resultados positivos demonstrados na experiência piloto de diversos autores, além de buscar estabelecer uma comparação no desempenho dos modelos utilizados, utilizando equipamentos

idênticos ou semelhantes do mesmo fabricante (Lee et al., 2021; Aliyari et al., 2021).

Estas aeronaves possuem bateria inteligente com consumo eficiente de energia, proporcionando autonomia máxima de voo de 31 minutos. Ele é controlado por meio de um controle

remoto integrado a um smartphone, e está conectado a dois aplicativos de captura de voo: *Drone Deploy* (para capturar imagens de vista superior da ponte e do viaduto) e *Pix4D capture* (para capturar imagens de as vistas laterais da ponte e viaduto), pois foi percebida a necessidade de dois aplicativos por atenderem melhor as necessidades de forma associada, pois o *Drone Deploy* limita o uso do aplicativo à vista superior enquanto o *Pix4D* permite esta função. Isso permitiu analisar ambas as visões. A câmera possui resolução de 20 megapixels, permitindo capturar fotos nos formatos JPEG e DNG, além de vídeos no formato MP4.

Quanto à legalidade do procedimento de captura de imagens, é fundamental destacar a importância da obtenção da autorização de voo do Departamento de Controle do Espaço Aéreo do Brasil (DECEA) por meio do sistema brasileiro SARPAS (*Remotely Piloted Aircraft Access Request*). Além disso, são estabelecidos requisitos gerais pela Agência Nacional de Aviação Civil (2017), como a idade do piloto e dos observadores, que deve ser maior de 18 anos, a posse do manual de voo durante a operação, a concessão de operação autônoma, as exigências de seguros que cubram danos a terceiros, a proibição de cruzar fronteiras com o VANT.

Estas tarefas permitiram que o processo de captação de imagens fosse conduzido de acordo com as normas de segurança exigidas, garantindo proteção contra eventuais imprevistos que pudessem surgir.

Para o processamento de imagens, entre as opções de software que atendem à exigência de utilização de mosaicos ortorretificados, essenciais para detecção de manifestações patológicas – foco deste trabalho – estão os estudos de Viana (2021), Zollini et al. (2020), Ruiz et al. (2022) e Duque et

al. (2018) enfatizaram as vantagens do *Agisoft Metashape* (antigo *PhotoScan*). Este software tem se mostrado uma ferramenta intuitiva e de baixo custo que fornece modelos digitais com boa qualidade visual.

Após a definição do pacote tecnológico, o plano de voo foi determinado para atender aos critérios mínimos de mapeamento para as vistas analisadas, conforme exigido pela fotogrametria digital.

Segundo Melo Jr. (2016) e Ruiz et al. (2022), a principal característica do posicionamento da câmera para tomadas fotográficas é o seu alinhamento paralelo, com tolerância de até 10 graus, devendo ser sempre perpendicular ao plano do objeto de interesse.

A sequência de captura proposta para a pesquisa foi horizontal e vertical, realizadas de forma independente para cada vista da ponte e do viaduto. Este foi selecionado com base em critérios de conforto do piloto, considerações de manobrabilidade do VANT, análise da geometria da estrutura e obstáculos de campo (Irizarry e Costa 2016; Mader et al., 2016).

A sobreposição entre cada fotografia é outro aspecto essencial na coleta de imagens do objeto estudado, desempenhando um papel crucial na maximização dos procedimentos relacionados às correlações automáticas dentro do software de fotogrametria digital pela técnica DSM. Segundo Nakao et al. (2019) e Ruiz et al. (2022), é importante garantir uma sobreposição mínima de 75-80% de uma fotografia para outra, tanto nas vistas laterais (Figura 4) quanto na vista superior (Figura 5). Isso garante a detecção automática de pontos homólogos em imagens digitais e posteriormente auxilia na orientação da imagem.

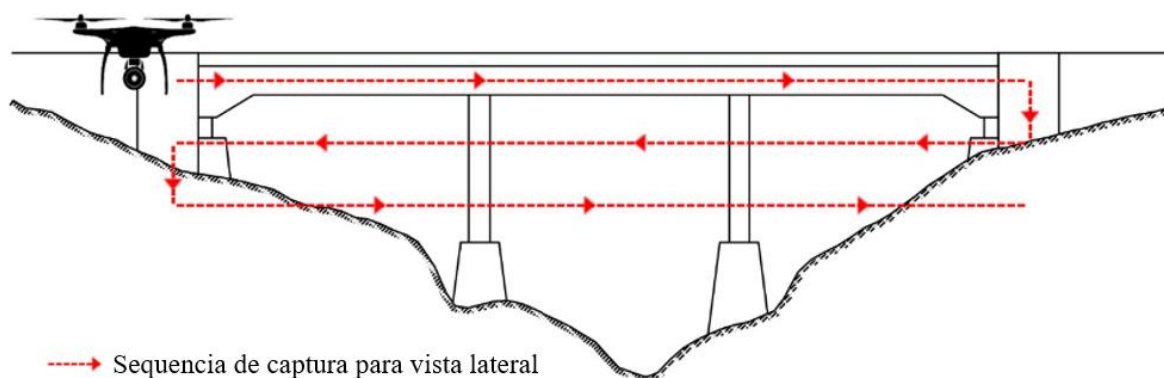


Figura 4. Sequência de captura de imagens para vista lateral

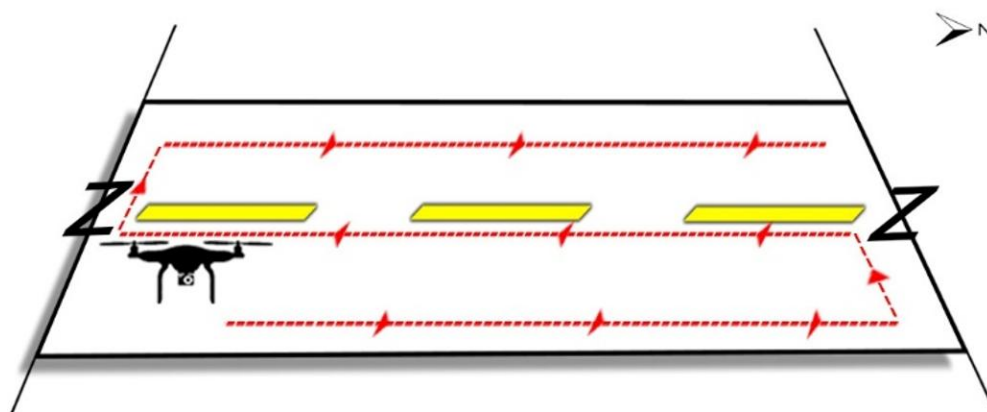


Figura 5. Sequência de captura de imagens para vista superior.

Além disso, outro aspecto fundamental é a importância de se manter uma relação adequada entre a posição das estações (ponto onde a foto é coletada) na tomada fotográfica e a distância das estações à vista que se pretende fotografar, além da Coleta ser realizada com a formação de um ângulo de 90° entre a câmera e o plano analisado (Figura 6), devido às exigências do software utilizado conforme Verhoeven (2011).

Portanto, recomenda-se que esta relação, que garante a sobreposição entre as fotografias, seja mantida na faixa inferior de 0,1 e na faixa superior de 0,5. Se este valor for muito pequeno, a correlação automática de pontos é facilitada, mas a precisão geométrica na reconstrução 3D fica comprometida. Por outro lado, se o valor dessa relação for muito elevado, ocorre o efeito contrário (Pierrot-Deseilligny et al., 2011).

Da mesma forma, a distância da estação até a vista lateral foi de 8 metros e a distância entre as estações no plano fotográfico durante a captura fotográfica foi de 1,8 metros, o que representa 25% do valor de cobertura vertical da foto capturada pela câmera da aeronave. e 3,2 metros na horizontal por motivo semelhante entre estações durante a captura fotográfica, garantindo a sobreposição desejada de 75% e um *Ground Sampling Distance* (GSD) de 0,229. Para a vista superior, a distância foi de 60 metros no estudo de caso A, resultando em um GSD de 1,69 e de 40 metros no estudo de caso B com um GSD de 1,130, possibilitando uma relação de distâncias dentro das faixas citadas.

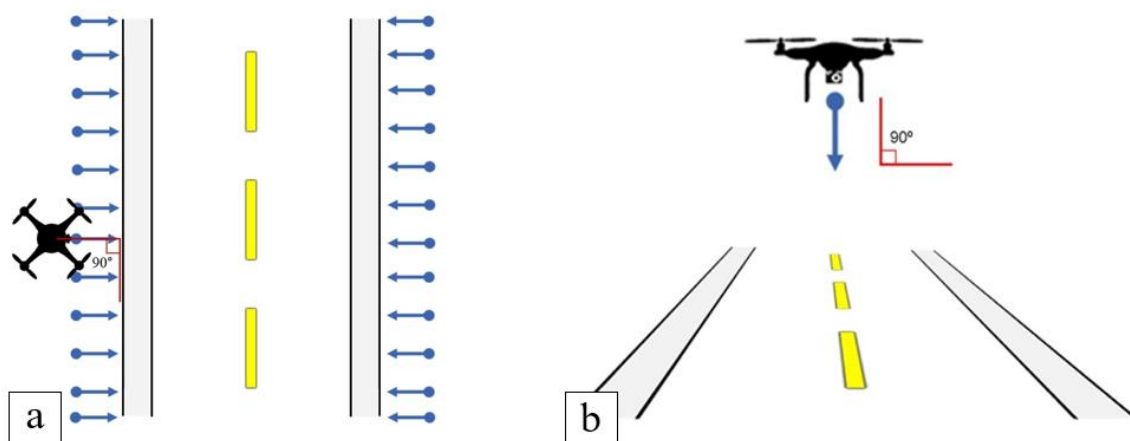


Figura 6. Posição para captura de imagens, vista lateral (a) e vista superior (b).

Etapa de inspeção

A captura de imagens foi realizada após o planejamento das missões por meio da execução de formulários de planejamento e avaliação das condições climáticas previstas, marcando o início da fase de inspeção. Foi estabelecido o ponto de decolagem e pouso mais adequado para as vistas da

ponte e viaduto analisados, e o VANT foi montado neste local.

Consequentemente, os dados foram coletados e posteriormente registrados, resumindo as informações do voo, o número de visualizações percorridas e a quantidade de imagens coletadas por bateria, utilizadas em cada voo.

Nos estudos de caso, a operação do VANT foi automatizada para a vista superior e manual para as vistas laterais. Sensores de proximidade na aeronave e auxílio de observadores foram utilizados para manter uma distância adequada dos obstáculos previamente identificados e garantindo uma distância segura entre a aeronave e a visão lateral da ponte.

Embora a operação do VANT para vistas laterais fosse manual, pilotando a aeronave, o processo de captura de imagens foi realizado automaticamente através do aplicativo *Pix4D Capture*. Foi utilizado o modo *free flight*, configurado para acionar a captura de imagens da câmera a cada 1 metro de deslocamento horizontal e 1 metro de deslocamento vertical. Embora a frequência de coleta de imagens pudesse ter sido reduzida para disparar a cada 2,2 metros de deslocamento vertical e 2,9 metros de deslocamento horizontal, decidiu-se reunir um conjunto maior de dados de imagens devido à disponibilidade do tempo de uso da bateria.

Após a coleta e agrupamento das imagens para cada vista analisada, esses recursos foram organizados e preparados para processamento computacional utilizando software de fotogrametria digital.

Etapa de pós-inspeção

Todas as informações sintetizadas são muito úteis para a realização do processamento computacional de imagens (Duque et al. 2018; Zollini et al., 2020; Liu et al., 2020; Lee et al., 2021). A versão específica do software *Agisoft Metashape* utilizada foi *Metashape Pro* para o sistema operacional Windows de 64 bits. Segue um fluxo de trabalho composto por etapas claras e objetivas. A sequência do fluxo de trabalho consiste em: alinhamento de imagem, geração de nuvem de pontos densos, criação de malha, aplicação de textura e geração de ortomosaico.

Estão disponíveis no mercado diversos softwares que facilitam a reconstrução digital, capazes de gerar uma nuvem de pontos que replica a geometria do objeto em análise a partir do processamento de fotografias digitais. Destacam-se entre eles *Pix4D*, *Drone Deploy*, *Agisoft Metashape* e *Autodesk Recap*, conforme citado por vários pesquisadores, incluindo Viana (2021), Zollini et al. (2020), Duque et al. (2018) e Melo Jr. Dentre os softwares que atendem ao requisito de exportação de mosaicos ortorretificados – essencial para detecção de defeitos, que é o objetivo deste trabalho – os estudos realizados por Viana (2021), Zollini et al. (2020), Duque et al. (2018) e Melo Jr. (2016) destacaram as vantagens do *Agisoft*

Metashape (antigo *PhotoScan*). Este software é reconhecido como uma ferramenta econômica e fácil de usar que produz modelos digitais de alta qualidade visual. Por estes motivos, o *Agisoft Metashape* foi selecionado para processamento de dados.

Alguns requisitos mínimos são necessários para usar o *Agisoft Metashape*, incluindo: sistema operacional *Windows XP* ou superior (32/64 bits), processador *Intel Core 2 Duo* ou equivalente e 4 GB de RAM. Quanto à configuração recomendada: *Windows 7 SP1* ou superior, processador *Intel Core i7* e 16 GB de RAM. Esta configuração permite processar até 300-400 fotografias, assumindo uma resolução fotográfica em torno de 10 megapixels (*Agisoft LLC*, 2018).

Foram processados um total de três modelos digitais, conforme Figuras 7 e 8. Esses modelos correspondem às vistas leste, oeste e superior, que geraram uma densa nuvem de pontos com 49 milhões de pontos e 10 milhões de faces construídas na malha. A partir da etapa de nuvem de pontos, o modelo pode ser exportado para outros softwares de geração de modelagem 3D, *Building Information Modeling* (BIM) e ortomosaicos. Este último foi gerado para todas as três vistas da ponte e do viaduto analisado. Nos estudos de caso, as fotografias foram parcialmente carregadas no software *Agisoft Metashape*. Cada visualização foi processada de forma independente, com cada grupo de fotografias carregado separadamente para cada processamento, resultando em modelos independentes para cada vista analisada. Esta abordagem permitiu a produção de ortomosaicos individuais para cada vista.

Modelar individualmente as vistas reduz o tempo de processamento devido ao menor número de imagens sendo processadas a cada iteração, considerando que os estudos de caso envolvem muitas fotografias. Os parâmetros de qualidade utilizados no processamento das imagens dentro do software são apresentados na Tabela 1, e as informações do voo são registradas na planilha de registro de voo na Tabela 2.

Outro aspecto importante observado foi o tempo necessário para realizar o processamento computacional no *Agisoft Metashape*, para que os modelos 3D fossem gerados com densificação e texturização.

Além disso, alguns reproprocessamentos foram necessários devido à presença de erros encontrados. Verificamos que a limpeza de pontos que não faziam parte da ponte e viaduto analisados e a fixação de marcadores foram essenciais na geração do modelo, além de reduzir o tempo total de processamento da imagem.

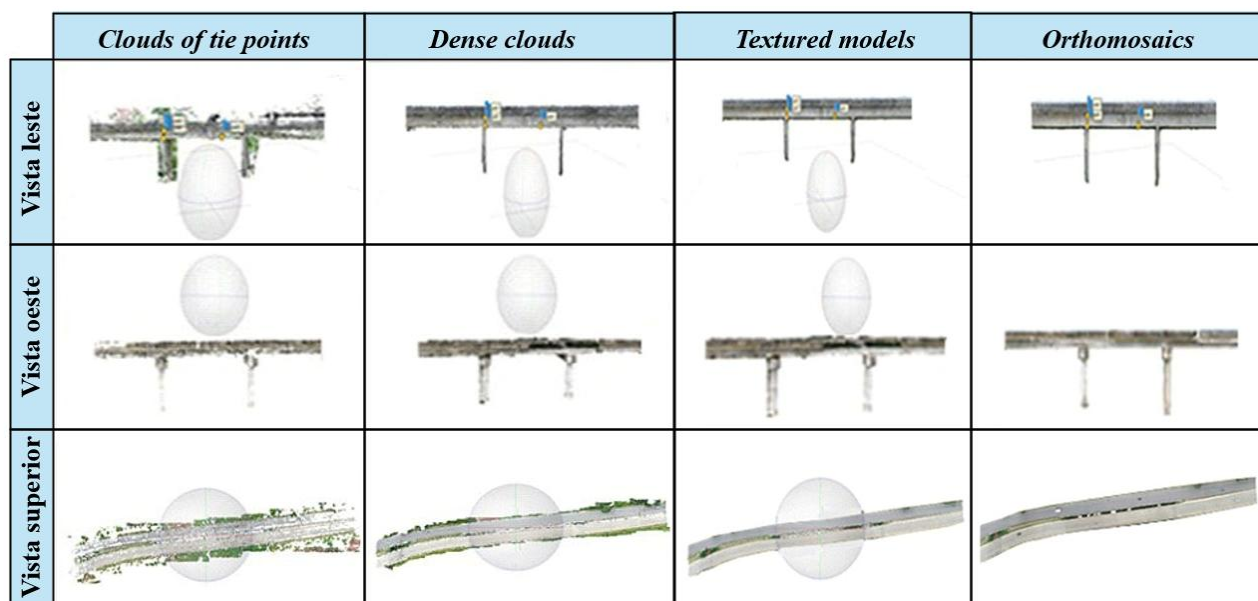


Figura 7. Sequência de processamento de modelos tridimensionais e ortomosaicos, estudo de caso A.

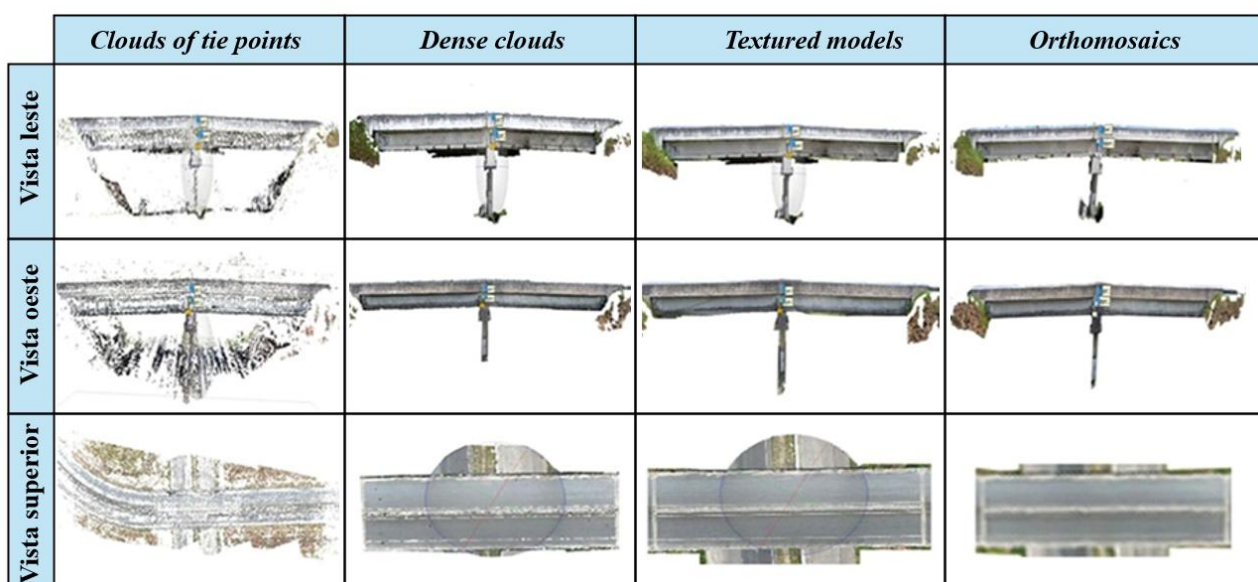


Figura 8. Sequência de processamento de modelos tridimensionais e ortomosaicos, estudo de caso B.

Tabela 1. Parâmetros de qualidade usados.

Etapa	Parâmetros	
<i>Align Photos</i>	<i>Accuracy</i>	<i>Highest</i>
	<i>Pair preselection</i>	<i>Generic</i>
	Nuvem Esparsa	Max
<i>Build Dense Cloud</i>	<i>Quality</i>	<i>High</i>
	<i>Depth filtering</i>	<i>Aggressive</i>
	Nuvem densa	Max
<i>Build mesh</i>	<i>Surface type</i>	<i>Arbitrary 3D</i>
	<i>Face count</i>	<i>High</i>
	<i>Faces</i>	Max
<i>Build texture</i>	<i>Mapping mode</i>	<i>Adaptive orthophoto</i>
	<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>
<i>Build Orthomosaic</i>	<i>Type</i>	<i>Planar</i>
	<i>Blending mode</i>	<i>Mosaic</i>

No processamento foi percebido que para todos os mapeamentos 3D dos estudos de caso, quanto maior o número de imagens utilizadas, maior será o tempo de processamento no software *Agisoft Metashape*. Portanto, optou-se pela geração de modelos por vista ao invés de um único

processamento com todas as imagens coletadas. Além disso, a Tabela 3 apresenta os tempos de cada etapa de processamento de todos os mapeamentos 3D gerados no software *Agisoft Metashape*, para os estudos de caso.

Tabela 2. Planilha *Flight log*.

Site	Vista	Data	Hora	Etapas do estudo	Nº de fotos	Altitude máxima (m)	Duração do voo (min)	Distância (m)
Estudo de caso A								
Paudalho	East	30/04/2022	10:30	Execução	150	12	16	8
Paudalho	West	30/04/2022	15:00	Execução	158	9	25	8
Paudalho	Upper	30/04/2022	14:26	Execução	250	60	16	8
Estudo de caso B								
Goiana	South	11/03/2023	9:44	Execução	160	9	18	8
Goiana	North	11/03/2023	10:20	Execução	111	10	15	8
Goiana	Upper	11/03/2023	10:50	Execução	106	40	13	8

Tabela 3. Tempo de processamento das vistas analisadas.

Etapas	Parâmetros	Caso A					
		Vista leste		Vista oeste		Vista superior	
		Opção	Tempo	Opção	Tempo	Opção	Tempo
Align Photos	Accuracy	Highest	4 min e 47 s	Highest	2 min e 54 s	Highest	4 min e 45 s
	Pair preselection	Generic		Generic		Generic	
	Sparse Cloud	46 838 pontos		31 354 pontos		45 607 pontos	
Build Dense Cloud	Quality	High	313 min	High	27 min e 47 s	High	37 min e 34 s
	Depth filtering	Aggressive		Aggressive		Aggressive	
	Dense cloud	9 736 916 pontos		24.147.579 points		15.786 513 pontos	
Build mesh	Surface type	Arbitrary 3D	4 min e 38 s	Arbitrary 3D	15 min e 5 s	Arbitrary 3D	4 min e 38 s
	Face count	High		High		High	
	Faces	1 947 385		4 829 514		3 157 302	
Build texture	Mapping mode	Adaptive orthophoto	2 min e 56 s	Adaptive orthophoto	4 min e 38 s	Adaptive orthophoto	8 min e 30 s
	Blending mode	Mosaic		Mosaic		Mosaic	
Build Orthomosaic	Type	Planar	1 min	Planar	3 min e 13 s	Planar	1 min e 47 s
	Blending mode	Mosaic		Mosaic		Mosaic	
Etapas	Parâmetros	Caso B					
		Vista leste		Vista oeste		Vista superior	
		Opção	Tempo	Opção	Tempo	Opção	Tempo
Align Photos	Accuracy	Highest	45 s	Highest	1 min e 47 s	Highest	1 min
	Pair preselection	Generic		Generic		Generic	
	Sparse Cloud	46 838 pontos		31 354 pontos		45 607 pontos	
Build Dense Cloud	Quality	High	45 min e 42 s	High	211 min	High	37 min e 34 s
	Depth filtering	Aggressive		Aggressive		Aggressive	
	Dense cloud	9 736 916 pontos		24 147 579 pontos		15 786 513 pontos	
Build mesh	Surface type	Arbitrary 3D	8 min e 28 s	Arbitrary 3D	15 min e 5 s	Arbitrary 3D	5 min e 8 s
	Face count	High		High		High	
	Faces	1 947 385		4 829 514		3 157 302	
Build texture	Mapping mode	Adaptive orthophoto	4 min and 56 s	Adaptive orthophoto	6 min e 38 s	Adaptive orthophoto	3 min e 25 s
	Blending mode	Mosaic		Mosaic		Mosaic	

Build Orthomosaic	Type	Planar	2 min and 28 s	Planar	3 min e 37 s	Planar	6 min e 3 s
	Blending mode	Mosaic		Mosaic		Mosaic	

Após a obtenção dos três recursos visuais produzidos, buscou-se detectar manifestações patológicas através da análise visual de cada produto obtido nas vistas analisadas. Quando detectada alguma manifestação patológica, ela era classificada e documentada para posterior geração de mapa de danos para cada vista.

Resultados e discussão

Após a conclusão do processo de inspeção e detecção de manifestações patológicas nos estudos de caso, foi realizada uma análise das fases de coleta de imagens, processamento computacional e do procedimento de detecção de manifestações patológicas, visando determinar o recurso visual mais adequado e expondo as diretrizes para procedimento de fiscalização de manifestações patológicas em pontes e viadutos.

Após a aplicação do pacote tecnológico, dentre as características obtidas com a geração dos três tipos de recursos, o modelo 3D apresentou resultados satisfatórios na sua reconstrução geométrica, principalmente na visualização espacial da ponte e viaduto. Porém, no estudo de caso realizado, apresentou a relação custo/benefício menos favorável para o objetivo específico de detecção de manifestações patológicas. Esta afirmação justifica-se pela presença de distorções nas imagens, o que dificultou a detecção de manifestações patológicas. Assim, esse recurso apresentou a menor efetividade na detecção de manifestações patológicas.

Por outro lado, os ortomosaicos, além de sua eficiente resolução espacial, apresentaram boas vistas ortogonais, apesar de algumas deficiências causadas pela falha do software em reconhecer imagens, como observado na vista Oeste. No entanto, contribuíram significativamente para a detecção global de manifestações patológicas nas visualizações.

Tal ferramenta torna-se mais eficaz quando aliada à verificação de pontos específicos das fotografias originais, pois permite a confirmação dos danos detectados. As próprias fotografias digitais originais geradas pelo VANT não permitem o mapeamento de manifestações patológicas, pois cada imagem individual representa apenas uma determinada fração da ponte e do viaduto. Requerem uma representação geométrica, seja em forma de plantas ou ortomosaicos, para possibilitar a localização espacial da manifestação patológica.

Os resultados deste estudo confirmam a eficácia dos ortomosaicos na detecção de manifestações patológicas em estruturas de concreto, destacando sua superioridade na análise de grandes áreas com alta resolução espacial. Essa técnica simplifica a identificação de danos, especialmente em regiões de difícil acesso, ao representar visualmente toda a estrutura em uma única imagem de alta qualidade (Zollini et al., 2020). Além disso, os achados estão alinhados com estudos anteriores que ressaltam a utilidade de VANTs na inspeção de pontes e outras infraestruturas civis (Shang & Shen, 2022).

Por fim, as fotografias digitais, por ser um produto que não sofreu alterações, apresentaram maior qualidade entre todos os recursos obtidos, gerando maior confiabilidade para inspeção visual.

Nos estudos de caso realizados foi possível detectar manifestações patológicas em todas as vistas analisadas na ponte e viaduto, incluindo eflorescências, fissuras, manchas de umidade, presença de vegetação e armaduras expostas. A localização espacial destes achados na vista ortogonal é apresentada nas Figuras 9, 10 e 11, sendo cada manifestação patológica representada no ortomosaico produzido no software *Agisoft Metashape* da ponte e viaduto. Cada achado foi então verificado usando o modelo ortomosaico e confirmado nas fotografias digitais originais.

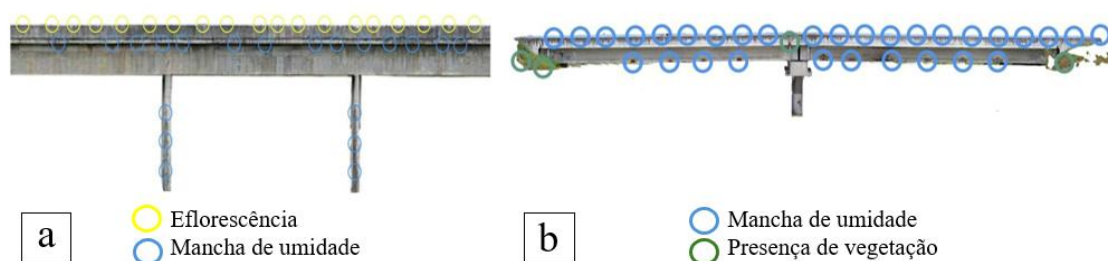


Figura 9. Mapa de danos para vista leste na (a) ponte e (b) viaduto.

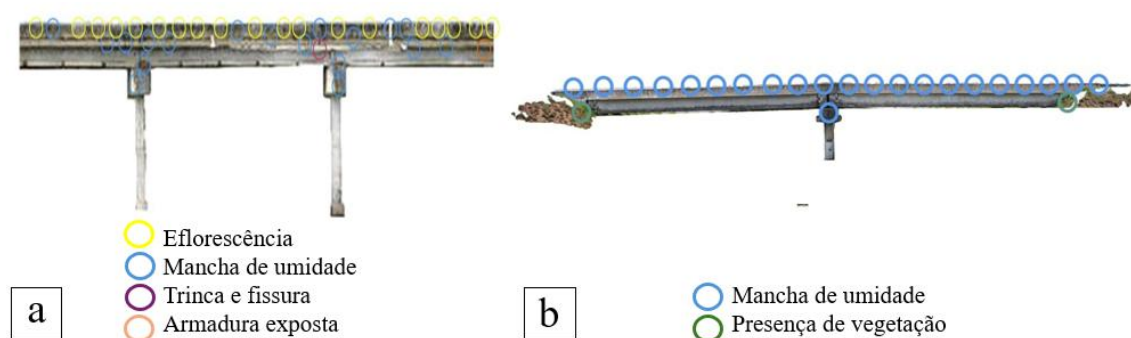


Figura 10. Mapa de danos para vista (a) oeste na ponte e (b) sul no viaducto.

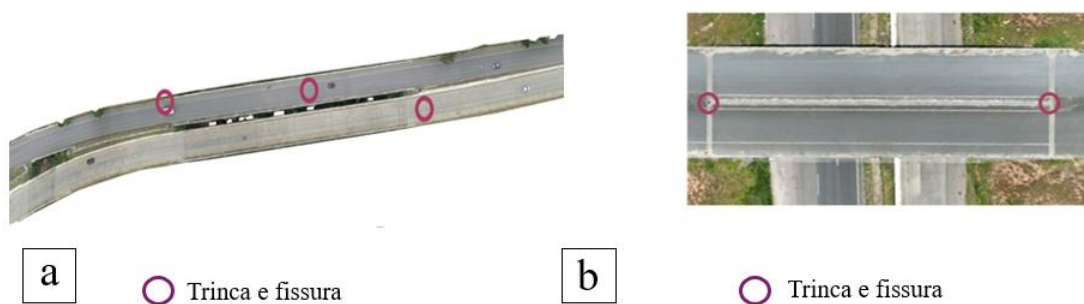


Figura 11. Mapa de danos da vista superior na (a) ponte e (b) viaduto.

Quanto à eficiência dos recursos visuais, o ortomosaico mostrou-se eficaz na detecção de manifestações patológicas, pois permite a análise

de toda a estrutura em apenas uma imagem, conforme mostra a Figura 12.



Figura 12. Detalhe das manifestações patológicas detectada através do modelo ortomosaico na vista oeste.

Após análise abrangente das manifestações patológicas, identificou-se que as manifestações patológicas mais frequentemente observadas nos estudos de caso foram manchas de umidade e eflorescências. Porém, também foram detectadas trincas, fissuras, presença de vegetação e armaduras expostas.

Assim, os mapas de danos podem auxiliar na produção de laudos técnicos, proporcionando uma apresentação clara da localização e tipologia das manifestações patológicas detectadas, que

acabarão por subsidiar o processo de manutenção ou restauração da ponte analisada. Além disso, a Tabela 4 fornece um resumo dos estudos de caso realizados.

As fotografias digitais originais capturadas por VANTs mostraram-se essenciais para a confirmação visual de manifestações patológicas, proporcionando imagens de alta resolução que permitem uma inspeção detalhada de áreas específicas. Isso destaca a importância da integração entre tecnologias de fotogrametria e

inspeções manuais, garantindo maior confiabilidade no diagnóstico estrutural (Ruiz et al., 2022; Wang & Ueda, 2023). Dessa forma, reforça-se a necessidade de um pacote tecnológico

integrado capaz de atender às diversas demandas de inspeção estrutural, combinando precisão técnica com análises complementares realizadas in loco.

Tabela 4. Resumo dos estudos de caso realizados.

Elementos analisados	Estudo de caso A	Estudo de caso B
Imagens coletadas	558	377
Dificuldades na captura de imagens	Presença de árvores, presença do rio que dificulta o pouco em caso emergencial, ausência de sinal na parte inferior do tabuleiro.	Ausência de sinal na parte inferior do tabuleiro.
Manifestações patológicas identificadas	Eflorescência, presença de vegetação, manchas de umidade, armadura exposta, trincas e fissuras.	Manchas de umidade, presença de vegetação, trincas e fissuras.
Qualidade do modelo 3D	Insuficiente	Insuficiente
Qualidade do modelo ortomosaico	Satisfatória	Satisfatória
Tempo total de processamento	428 min	347 min
Tipo de VANT	<i>Mavic 2 Pro</i>	<i>Phantom 4 Pro</i>

Outro aspecto importante observado foi o tempo necessário para realizar o processamento computacional no *Agisoft Metashape*, para que os modelos 3D fossem gerados com densificação e texturização.

Além disso, alguns reproprocessamentos foram necessários devido à presença de erros encontrados. Verificou-se que a limpeza de pontos que não faziam parte da ponte e viaduto destacados (outliers) e a fixação de marcadores foram essenciais na geração do modelo, além de reduzir o tempo total de processamento da imagem.

Durante o processamento, percebeu-se que para todos os mapeamentos 3D dos estudos de caso, quanto maior o número de imagens utilizadas, maior será o tempo de processamento no software *Agisoft Metashape*. Portanto, optou-se por gerar modelos através de vistas individualizadas ao

invés de um único processamento com todas as imagens coletadas.

Embora os modelos 3D apresentem limitações na identificação detalhada de manifestações patológicas, eles são mais adequados para análises geométricas. Por outro lado, a integração de modelos 3D com ortomosaicos pode aprimorar significativamente a precisão das inspeções, especialmente em pontes e viadutos. Além disso, foi observado que modelos tridimensionais gerados a partir de imagens de VANTs podem sofrer distorções e apresentar resolução limitada nas texturas, o que compromete a detecção de danos superficiais em detalhes (Yoon et al., 2024).

Além disso, Figura 13 apresenta os tempos de cada etapa total de processamento gerada no software *Agisoft Metashape*, para os estudos de caso.

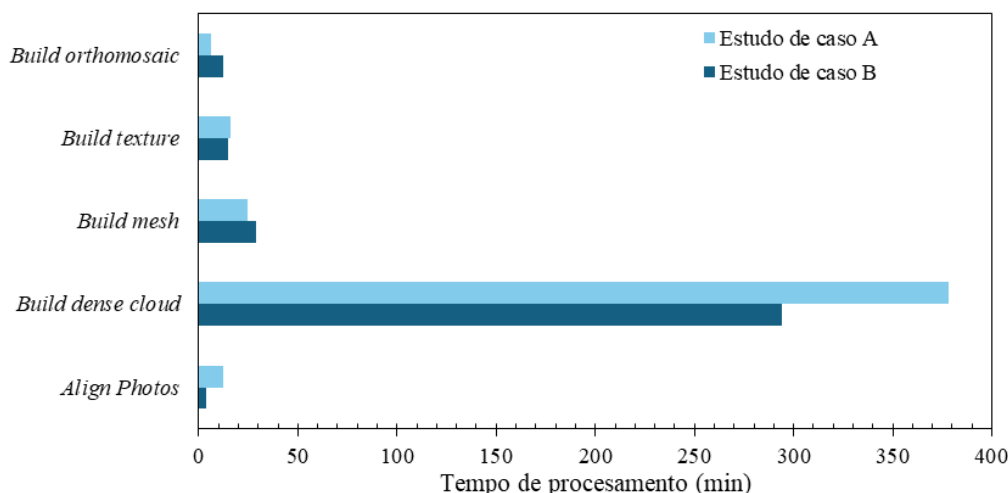


Figura 13. Tempo total de processamento.

Isto permite realizar uma análise comparativa do tempo de processamento em cada etapa dos estudos de caso realizados. Analisando individualmente as diferentes etapas de processamento, tanto para mapeamentos dos estudos de caso, a etapa que mais exigiu tempo foi a construção da nuvem densa de pontos (*build dense cloud*).

Os mapas de danos produzidos neste estudo oferecem uma abordagem visual clara para a localização de manifestações patológicas, alinhando-se às recomendações de Kerle et al. (2019), que destacaram a importância de ferramentas precisas na priorização de intervenções de manutenção preventiva e na redução de custos operacionais. A integração de ortomosaicos com fotografias digitais originais potencializa a criação de mapas detalhados, permitindo uma gestão mais eficiente e estratégica de infraestruturas, com foco na prevenção e na otimização de recursos.

A hipótese deste estudo propõe que a utilização de VANTs, combinada com técnicas avançadas de processamento de imagens, oferece uma abordagem eficiente e precisa para a inspeção de pontes e viadutos. Estudos recentes corroboram essa premissa, demonstrando que VANTs equipados com sensores especializados podem realizar inspeções detalhadas de estruturas complexas, acessando áreas de difícil alcance e coletando dados de alta resolução (Sanchez-Cuevas et al., 2019).

Pesquisas indicam que métodos tradicionais de inspeção de pontes, como o uso de andaimes ou veículos especiais, apresentam limitações significativas em termos de segurança, custo e eficiência. Em contraste, a aplicação de VANTs permite a realização de inspeções mais rápidas e seguras, reduzindo a necessidade de

intervenções manuais e minimizando interrupções no tráfego. Além disso, a capacidade dos VANTs de capturar imagens de alta qualidade facilita a detecção precoce de defeitos, como fissuras e corrosão, contribuindo para a manutenção preventiva das estruturas (Melo & Costa, 2015).

A integração de VANTs com tecnologias avançadas de sensoriamento e algoritmos de processamento de dados tem aprimorado significativamente a precisão das inspeções. Por exemplo, sistemas que combinam VANTs com sensores *LiDAR* ou câmeras de alta resolução permitem a criação de modelos tridimensionais detalhados das estruturas, auxiliando na identificação de áreas críticas que necessitam de reparos. Essas abordagens têm se mostrado eficazes na detecção de defeitos superficiais e estruturais, proporcionando dados precisos para a tomada de decisões informadas sobre a manutenção de pontes e viadutos (Balestrieri et al., 2021).

Conclusões

Os resultados coletados nesta pesquisa demonstram a eficiência da utilização dos VANTs como ferramenta de coleta de imagens aéreas para fins de fiscalização, além de sua versatilidade na movimentação vertical e horizontal, bem como sua praticidade no alcance de regiões elevadas da infraestrutura. Isso permite o mapeamento fotográfico completo das vistas analisadas, atendendo aos requisitos de software que utiliza técnicas de DSM para reconstrução 3D e geração de ortomosaicos de alta resolução.

Com o estudo realizado foi possível estabelecer diretrizes para procedimentos de fiscalização em pontes e viadutos bem como as dificuldades existentes em cada um deles.

Além disso, foi possível determinar o consumo de tempo nas diversas etapas para processamento de imagens em cada estudo de caso, bem como os recursos visuais gerados pelos diferentes VANTs, comparando-os e diagnosticando as manifestações patológicas incidentes nos estudos de caso.

Como limitação do estudo, foram observados obstáculos como vegetação durante a coleta de imagens, e a impossibilidade dos VANTs utilizados acessarem a região inferior da ponte e viaduto, devido à perda de sinal das aeronaves nesta área.

Ressaltando a dificuldade de acesso à parte inferior de pontes e viadutos, pois o número de satélites responsáveis pelo sinal entre controle e aeronave atingiu o limite, após esse número mínimo de satélites foi iniciado o modo de emergência denominado *Return To Home* (RTH) no qual a aeronave subir 30 metros (ou altura programada) e retornar ao ponto de decolagem, tal subida faria com que o VANT colidisse com a ponte ou viaduto, resultando na perda do equipamento.

Recomenda-se utilizar outro modelo de aeronave com blindagem *Real Time Kinematic* (RTK), evitando perda de sinal entre controle e aeronave. Além disso, sendo utilizado software que processa apenas imagens coletadas a 90 graus em relação ao plano analisado, não permitindo a necessária rotação das câmeras presentes nos modelos de VANT analisados, recomenda-se, portanto, que uma câmera apropriada seja adaptada à aeronave permitindo tal rotação.

Dessa forma, a aeronave apresenta-se como uma alternativa conveniente para inspeções de pontes e viadutos, fornecendo imagens de qualidade satisfatória e agilizando processos. Permitindo comparar os dados obtidos com projetos existentes, possibilitando atualizações e monitoramento do estado da infraestrutura ao longo do tempo.

Além disso, os ortomosaicos emergiram como o recurso visual mais eficiente em um sentido geral. Eles foram utilizados para criar mapas de danos e, quando comparados às fotografias digitais – apesar da alta qualidade destas últimas – a falta de processamento destas últimas tornou a análise das manifestações patológicas bastante lenta, exigindo avaliação individual de cada foto e consequentemente prolongando a tarefa. . . Por outro lado, o recurso visual do modelo 3D mostrou-se bastante ineficiente para detecção de manifestações patológicas devido a distorções significativas.

Os resultados deste estudo comprovam a eficácia dos VANTs na coleta de imagens para inspeções de pontes e viadutos, destacando sua capacidade de acessar áreas de difícil alcance e sua eficiência na geração de ortomosaicos de alta resolução. Além disso, foram estabelecidas diretrizes claras para procedimentos de inspeção, abordando desafios técnicos, como a perda de sinal em regiões inferiores das estruturas, e propondo soluções práticas, como o uso de VANTs equipados com tecnologia RTK. Os recursos visuais gerados permitiram identificar manifestações patológicas, como fissuras e eflorescências, evidenciando o papel dos ortomosaicos em análises abrangentes e sua complementaridade com fotografias digitais para inspeções detalhadas. Assim, o estudo alcança seu objetivo ao oferecer uma solução prática e eficiente para o monitoramento e manutenção de infraestruturas críticas, contribuindo para a melhoria de práticas de fiscalização e gestão dessas estruturas.

Referências

- Abdel-Monem, M., Alshaer, K. T., & El-Dash, K. (2022). Assessing Risk Factors Affecting the Accuracy of Conceptual Cost Estimation in the Middle East. *Buildings* 2022, 12, 950. <https://doi.org/10.3390/buildings12070950>
- Agência Nacional de Aviação Civil. (2017). Resolução Nº 419, de 2 de maio de 2017.
- Agisoft LLC. (2021). Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.4 (187 p.). Agisoft.
- Aliyari, M., Ashrafi, B., & Ayele, Y. Z. (2021). Drone-based bridge inspection in harsh operating environment: Risks and safeguards. *International Journal of Transport Development and Integration*, 5(2), 118–135. <https://doi.org/10.2495/TDI-V5-N2-118-135>
- Aliyari, M., Ashrafi, B., & Ayele, Y. Z. (2022). Hazards identification and risk assessment for UAV-assisted bridge inspections. *Structure and Infrastructure Engineering*, 18(3), 412–428. <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1858878>
- Ameli, Z., Aremanda, Y., Friess, W. A., & Landis, E. N. (2022). Impact of UAV hardware options on bridge inspection mission capabilities. *Drones*, 6(3), 64. <https://doi.org/10.3390/drones6030064>
- Angelov, P. (Ed.). (2012). *Sense and avoid in UAS: Research and applications* (1st ed.). Wiley.
- Balestrieri, E., Daponte, P., De Vito, L., Picariello, F., & Tudosa, I. (2021). *Sensors and measurements for UAV safety: An overview*.

- Sensors, 21(24), 8253.
<https://doi.org/10.3390/s21248253>
- Capacci, L., Biondini, F., & Frangopol, D. M. (2022). Resilience of aging structures and infrastructure systems with emphasis on seismic resilience of bridges and road networks. *Resilient Cities and Structures*, 1(2), 23-41.
<https://doi.org/10.1016/j.rcns.2022.05.001>
- Carrivick, J. F., Smith, M. W., & Quincey, D. J. (2016). *Structure from motion in the geosciences*. John Wiley & Sons.
- Duque, L., Seo, J., & Wacker, J. (2018). Bridge deterioration quantification protocol using UAV. *Journal of Bridge Engineering*, 23(10), 04018080.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001289](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001289)
- Feroz, S., & Abu Dabous, S. (2021). Uav-based remote sensing applications for bridge condition assessment. *Remote Sensing*, 13(9), 1809. <https://doi.org/10.3390/rs13091809>
- Gadiraju, D. S., Azam, S. E., & Khazanchi, D. (2025). SHM-Traffic: DRL and Transfer Learning Based UAV Control for Structural Health Monitoring of Bridges With Traffic. *IEEE Access*, 13, 6166–6179.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3526193>
- Gajanayake, A., Khan, T., & Zhang, G. (2021). A decision-making tool to assess external costs of disaster induced bridge failure. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 64, 102506.
<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102506>
- Golewski, G. L. (2023). The phenomenon of cracking in cement concretes and reinforced concrete structures: the mechanism of cracks formation, causes of their initiation, types and places of occurrence, and methods of detection—a review. *Buildings*, 13(3), 765.
<https://doi.org/10.3390/buildings13030765>
- Hassani, S., & Dackermann, U. (2023). A systematic review of advanced sensor technologies for non-destructive testing and structural health monitoring. *Sensors*, 23(4), 2204. <https://doi.org/10.3390/s23042204>
- He, T., Chen, K., Jazizadeh, F., & Reichard, G. (2024). Unmanned aerial vehicle-based as-built surveys of buildings. *Automation in Construction*, 161, 105323.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105323>
- Huh, J., Doan, N. S., Ta, Q. T., & Haldar, A. (2023). Detection of deteriorations in both bottom and top of concrete bridge decks during blind time windows from thermographic inspections of shaded side. *NDT & E International*, 138, 102871.
<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102871>
- Irizarry, J., & Costa, D. B. (2016). Exploratory study of potential applications of unmanned aerial systems for construction management tasks. *Journal of Management in Engineering*, 32(3), 05016001.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000422](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000422)
- Isailović, D., Stojanovic, V., Trapp, M., Richter, R., Hajdin, R., & Döllner, J. (2020). Bridge damage: Detection, IFC-based semantic enrichment and visualization. *Automation in Construction*, 112, 103088.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103088>
- Jung, H. J. (2019). Bridge Inspection and condition assessment using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): Major challenges and solutions from a practical perspective. *Smart Structures and Systems, An International Journal*, 24(5), 669-681.
- Jung, J. S., Jeong, J. W., & Lee, K. S. (2022). Structural performance degradation of corrosion-damaged reinforced concrete beams based on finite element analysis. *Applied Sciences*, 12(4), 2090.
<https://doi.org/10.3390/app12042090>
- Junior, G. B., Nascimento, L. C., de Castro Xavier, G., Monteiro, S. N., Vieira, C. M. F., Marvila, M. T., & Alledi, C. T. D. B. (2024). Durability for coating mortars: Review of methodologies. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 657-671.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.020>
- Kaewunruen, S., Sresakoolchai, J., Ma, W., & Phil-Ebosie, O. (2021). Digital twin aided vulnerability assessment and risk-based maintenance planning of bridge infrastructures exposed to extreme conditions. *Sustainability*, 13(4), 2051.
<https://doi.org/10.3390/su13042051>
- Kao, S. P., Wang, F. L., Lin, J. S., Tsai, J., Chu, Y. D., & Hung, P. S. (2022). Bridge crack inspection efficiency of an unmanned aerial vehicle system with a laser ranging module. *Sensors*, 22(12), 4469.
<https://doi.org/10.3390/s22124469>
- Kerle, N., Nex, F., Gerke, M., Duarte, D., & Vetrivel, A. (2019). UAV-based structural damage mapping: A review. *ISPRS international journal of geo-information*, 9(1), 14. <https://doi.org/10.3390/ijgi9010014>
- Lantsoght, E. O. (2024). Assessment of existing concrete bridges by load testing: barriers to code implementation and proposed solutions. *Structure and Infrastructure Engineering*, 20(7-

- 8), 1002-1014.
<https://doi.org/10.1080/15732479.2023.2264825>
- Lee, J. H., Gwon, G. H., Kim, I. H., & Jung, H. J. (2023). A Motion Deblurring Network for Enhancing UAV Image Quality in Bridge Inspection. *Drones*, 7(11), 657.
<https://doi.org/10.3390/drones7110657>
- Lee, J. H., Yoon, S., Kim, B., Gwon, G. H., Kim, I. H., & Jung, H. J. (2021). A new image-quality evaluating and enhancing methodology for bridge inspection using an unmanned aerial vehicle. *Smart Structures and Systems*, 27(2), 209–226.
<https://doi.org/10.12989/sss.2021.27.2.209>
- Lima, M. I. S. C., & Costa, D. B. (2022). Recomendações e boas práticas para a integração do monitoramento da segurança com drone ao planejamento e controle da segurança de obras. *Ambiente Construído*, 23(1), 213-231.
<https://doi.org/10.1590/s1678-86212023000100659>
- Liu, Y.-F., Nie, X., Fan, J.-S., & Liu, X.-G. (2020). Image-based crack assessment of bridge piers using unmanned aerial vehicles and three-dimensional scene reconstruction. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 35(6), 567–581.
<https://doi.org/10.1111/mice.12510>
- Mader, D., Blaskow, R., Westfeld, P., & Weller, C. (2016). 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, XLI-B1*, 1135–1142. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B1-1135-2016>
- Mansuri, L. E., & Patel, D. A. (2022). Artificial intelligence-based automatic visual inspection system for built heritage. *Smart and Sustainable Built Environment*, 11(3), 622-646.
<http://dx.doi.org/10.1108/SASBE-09-2020-0139>
- Melo Jr., C. M. (2016). Metodologia para geração de mapas de danos de fachadas a partir de fotografias obtidas por veículo aéreo não tripulado e processamento digital de imagens (Tese de doutorado). Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- Melo, R. A., & Costa, D. B. (2015). Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) para inspeção de estruturas prediais: mapeamento e diagnóstico de manifestações patológicas. *Ambiente Construído*, 15(1), 147–163.
<https://doi.org/10.1590/s1678-86212015000100011>
- Moomen, A. W., Dewan, A., & Corner, R. (2016). Landscape assessment for sustainable resettlement of potentially displaced communities in Ghana's emerging northwest gold province. *Journal of Cleaner Production*, 133, 701-711.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.004>
- Nakao, M., Hasegawa, E., Kudo, T., & Sawasaki, N. (2019). Development of a bridge inspection support robot system using two-wheeled multicopters. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 31(6), 837–844.
<https://doi.org/10.20965/jrm.2019.p0837>
- Nasr, A., Björnsson, I., Honfi, D., Larsson Ivanov, O., Johansson, J., & Kjellström, E. (2021). A review of the potential impacts of climate change on the safety and performance of bridges. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 6(3-4), 192-212.
<https://doi.org/10.1080/23789689.2019.1593003>
- Pierrot-Deseilligny, M., De Luca, L., & Remondino, F. (2011). Automated image-based procedures for accurate artifacts 3D modeling and orthoimage generation. *Geoinformatics FCE CTU*, 6, 291–299.
<https://doi.org/10.14311/gi.6.36>
- Qu, F., Li, W., Dong, W., Tam, V. W., & Yu, T. (2021). Durability deterioration of concrete under marine environment from material to structure: A critical review. *Journal of Building Engineering*, 35, 102074.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102074>
- Rahnama, O., Frost, D., Miksik, O., & Torr, P. H. S. (2018). Real-Time Dense Stereo Matching With ELAS on FPGA Accelerated Embedded Devices. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(3), 2008–2015.
- Rehman, S. K. U., Ibrahim, Z., Memon, S. A., & Jameel, M. (2016). Nondestructive test methods for concrete bridges: A review. *Construction and building materials*, 107, 58-86.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.011>
- Rey, R. O., de Melo, R. R. S., & Costa, D. B. (2021). Design and implementation of a computerized safety inspection system for construction sites using UAS and digital checklists–Smart Inspects. *Safety science*, 143, 105430.
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105430>
- Rocha, J. H. A., & Ibarra-Villanueva, R. (2021). Identification and analysis of pathological defect appearance in superstructures of reinforced-concrete bridges in Chapare region,

- Bolivia. *Dyna*, 88(216), 15-21. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n216.88247>
- Rocha, J. H. A., Póvoas, Y. V., & Bezerra-Batista, P. I. (2024). Flaw recognition in reinforced concrete bridges using infrared thermography: A case study. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (110), 99-109. <http://dx.doi.org/10.17533/udea.redin.20230521>
- Ruiz, R. D. B., Lordsleem Jr, A. C., Rocha, J. H. A., & Irizarry, J. (2022). Unmanned aerial vehicles (UAV) as a tool for visual inspection of building facades in AEC+ FM industry. *Construction Innovation*, 22(4), 1155-1170. <https://doi.org/10.1108/CI-07-2021-0129>
- Sanchez-Cuevas, P. J., Ramon-Soria, P., Arrue, B., Ollero, A., & Heredia, G. (2019). Robotic system for inspection by contact of bridge beams using UAVs. *Sensors*, 19(2), 305. <https://doi.org/10.3390/s19020305>
- Seo, J., Wacker, J., & Duque, L. (2018). Evaluation of unmanned aircraft systems as a bridge inspection tool. Madison, WI: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Forthcoming.
- Shah, F. H., Bhatti, O. S., & Ahmed, S. (2023). A Review of the Effects of Project Management Practices on Cost Overrun in Construction Projects. *Engineering Proceedings*, 44(1), 1. <https://doi.org/10.3390/engproc2023044001>
- Shang, Z., & Shen, Z. (2022). Flight planning for survey-grade 3D reconstruction of truss bridges. *Remote Sensing*, 14(13), 3200. <https://doi.org/10.3390/rs14133200>
- Tao, W., Lin, P., & Wang, N. (2021). Optimum life-cycle maintenance strategies of deteriorating highway bridges subject to seismic hazard by a hybrid Markov decision process model. *Structural Safety*, 89, 102042. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2020.102042>
- Toriumi, F. Y., Bittencourt, T. N., & Futai, M. M. (2022). Inspeção de estruturas de pontes e túneis baseada em VANTs: uma revisão das aplicações. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 16, e16103. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952023000100003>
- Verhoeven, G. (2011). Taking computer vision aloft—Archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with Photoscan. *Archaeological Prospection*, 18(1), 67–73. <https://doi.org/10.1002/arp.399>
- Viana, C. D. (2021). Fotogrametria multi-escala para aquisição de dados estruturais (Tese de doutorado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Wang, J., & Ueda, T. (2023). A review study on unmanned aerial vehicle and mobile robot technologies on damage inspection of reinforced concrete structures. *Structural Concrete*, 24(1), 536-562. <https://doi.org/10.1002/suco.202200846>
- Yiğit, A. Y., & Uysal, M. (2025). Virtual reality visualisation of automatic crack detection for bridge inspection from 3D digital twin generated by UAV photogrammetry. *Measurement*, 242, 115931. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115931>
- Yoon, J., Shin, H., Kim, K., & Lee, S. (2024). CNN-and UAV-Based Automatic 3D Modeling Methods for Building Exterior Inspection. *Buildings*, 14(1), 5. <https://doi.org/10.3390/buildings14010005>
- Zhang, G., Liu, Y., Liu, J., Lan, S., & Yang, J. (2022). Causes and statistical characteristics of bridge failures: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(3), 388-406. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.12.003>
- Zollini, S., Alicandro, M., Dominici, D., Quaresima, R., & Giallonardo, M. (2020). UAV photogrammetry for concrete bridge inspection using object-based image analysis (OBIA). *Remote Sensing*, 12(19), 3180. <https://doi.org/10.3390/rs12193180>