

Uso De Vants Como Ferramenta Na Identificação De Ações Deletérias Em Obras De Arte Especiais

Michel Silva Lopes

Graduação em Engenharia Civil
Centro Universitário FIS, Serra Talhada, Brasil
michel_lopes@hotmail.com
0009-0000-8157-5753

Everson Silva

Mestrando em Engenharia Civil
Universidade de Pernambuco, Brasil
esa1@poli.br
0009-0004-9384-9552

Elisama Florentino

Graduada em Engenharia Civil
Universidade Católica de Pernambuco, Brasil
elisama.2020235158@unicap.br
0009-0006-8755-9377

Raimundo Silva Junior

Professor Mestre em Engenharia Civil
Centro Universitário FIS, Serra Talhada, Brasil
pl.junior.eng@gmail.com
0000-0001-7090-9525

Amâncio Filgueira Filho

Professor Mestre em Engenharia Civil
Centro Universitário FIS, Serra Talhada, Brasil
amanciofilgueira@hotmail.com
0000-0001-5231-3656

Uso De Vants Como Ferramenta Na Identificação De Ações Deletérias Em Obras De Arte Especiais

RESUMO

Objetivo - Avaliar a aplicabilidade de aeronaves remotamente pilotadas (drones) na identificação de manifestações deletérias em pontes de concreto armado, comparando a precisão do voo automático com a viabilidade operacional do voo manual em diferentes contextos ambientais do estado de Pernambuco.

Metodologia - O estudo adotou abordagem experimental e comparativa, com inspeções em cinco pontes de concreto. Foi realizado voo automático em uma ponte localizada na BR-116 (Salgueiro), com captura integral da fachada, e voos manuais em quatro pontes situadas na PE-615 (Arapipina). Os dados foram processados nos softwares DroneDeploy e Agisoft Metashape, visando à geração de ortofotos e análise das manifestações patológicas conforme a NBR 9452:2023.

Originalidade/relevância - A pesquisa se insere no gap relacionado à adaptação de metodologias de inspeção com drones em cenários reais, especialmente em ambientes com severas restrições operacionais, como presença de vegetação densa. O estudo contribui ao discutir os limites e potencialidades práticas do uso de drones na gestão da infraestrutura viária.

Resultados - O voo automático na ponte da BR-116 apresentou elevada precisão métrica, com ortofotos de alta resolução (GSD \approx 5 mm/pixel), atendendo aos critérios normativos de inspeção. Nas pontes da PE-615, a vegetação inviabilizou a automação, exigindo voo manual, que resultou apenas em registros visuais, sem possibilidade de mensuração precisa das anomalias. Foram identificadas armaduras expostas, corrosão, falhas construtivas e deterioração severa de elementos funcionais.

Contribuições teóricas/metodológicas - O estudo demonstra que a escolha da metodologia de inspeção com drones deve considerar as condições ambientais e operacionais, contribuindo para o aprimoramento de protocolos híbridos que conciliem precisão métrica e adaptabilidade em campo.

Contribuições sociais e ambientais - Os resultados reforçam o papel dos drones na manutenção preventiva e na gestão preditiva de pontes, promovendo maior segurança estrutural, redução de riscos à população e preservação do patrimônio viário, natural e paisagístico, alinhados aos princípios de sustentabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Drones. Fotogrametria. Inspeção de Pontes. Obras de Arte Especiais. Deletérias Estruturais.

Use of UAVs as a Tool in Identifying Detrimental Actions in Special Works of Art

ABSTRACT

Objective - To evaluate the applicability of remotely piloted aircraft (drones) in identifying deleterious manifestations in reinforced concrete bridges, comparing the accuracy of automatic flight with the operational feasibility of manual flight in different environmental contexts in the state of Pernambuco.

Methodology - The study adopted an experimental and comparative approach, with inspections on five concrete bridges. Automatic flight was performed on a bridge located on BR-116 (Salgueiro), with full facade capture, and manual flights on four bridges located on PE-615 (Arapipina). The data were processed using DroneDeploy and Agisoft Metashape software, aiming at the generation of orthophotos and analysis of pathological manifestations according to NBR 9452:2023.

Originality/relevance - The research fits into the gap related to the adaptation of drone inspection methodologies in real-world scenarios, especially in environments with severe operational restrictions, such as the presence of dense vegetation. The study contributes by discussing the practical limits and potential of using drones in road infrastructure management.

Results - The automated flight on the BR-116 bridge showed high metric accuracy, with high-resolution orthophotos (GSD \approx 5 mm/pixel), meeting the normative inspection criteria. On the PE-615 bridges, vegetation made automation unfeasible, requiring manual flight, which resulted only in visual records, without the possibility of precise measurement of anomalies. Exposed reinforcement, corrosion, construction defects, and severe deterioration of functional elements were identified.

Theoretical/methodological contributions - The study demonstrates that the choice of drone inspection methodology should consider environmental and operational conditions, contributing to the improvement of hybrid protocols that reconcile metric accuracy and adaptability in the field.

Social and environmental contributions - The results reinforce the role of drones in preventive maintenance and predictive management of bridges, promoting greater structural safety, reducing risks to the population and preserving road, natural and landscape heritage, aligned with the principles of sustainability.

KEYWORDS: Drones. Photogrammetry. Bridge Inspection. Special Engineering Structures. Structural Damage.

Uso de vehículos aéreos no tripulados como herramienta para identificar acciones perjudiciales en obras de arte especiales

RESUMEN

Objetivo: Evaluar la aplicabilidad de aeronaves pilotadas remotamente (drones) en la identificación de manifestaciones nocivas en puentes de hormigón armado, comparando la precisión del vuelo automático con la viabilidad operativa del vuelo manual en diferentes contextos ambientales del estado de Pernambuco.

Metodología: El estudio adoptó un enfoque experimental y comparativo, con inspecciones en cinco puentes de hormigón. El vuelo automático se realizó en un puente ubicado en la BR-116 (Salgueiro), con captura completa de la fachada, y los vuelos manuales en cuatro puentes ubicados en la PE-615 (Araripina). Los datos se procesaron mediante los softwares DroneDeploy y Agisoft Metashape, con el objetivo de generar ortofotos y analizar manifestaciones patológicas según la norma NBR 9452:2023.

Originalidad/relevancia: La investigación aborda la necesidad de adaptar las metodologías de inspección con drones a escenarios reales, especialmente en entornos con severas restricciones operativas, como la presencia de vegetación densa. El estudio contribuye analizando los límites prácticos y el potencial del uso de drones en la gestión de infraestructuras viales.

Resultados: El vuelo automatizado en el puente BR-116 mostró una alta precisión métrica, con ortofotos de alta resolución (GSD \approx 5 mm/píxel), cumpliendo con los criterios normativos de inspección. En los puentes PE-615, la vegetación impidió la automatización, requiriendo el vuelo manual, lo que resultó únicamente en registros visuales, sin posibilidad de medición precisa de anomalías. Se identificaron armaduras expuestas, corrosión, defectos de construcción y un grave deterioro de elementos funcionales.

Contribuciones teóricas/metodológicas: El estudio demuestra que la elección de la metodología de inspección con drones debe considerar las condiciones ambientales y operativas, contribuyendo a la mejora de protocolos híbridos que concilien la precisión métrica y la adaptabilidad en campo.

Contribuciones sociales y ambientales: Los resultados refuerzan el papel de los drones en el mantenimiento preventivo y la gestión predictiva de puentes, promoviendo una mayor seguridad estructural, reduciendo los riesgos para la población y preservando el patrimonio vial, natural y paisajístico, en línea con los principios de sostenibilidad.

PALABRAS CLAVE: Drones. Fotogrametría. Inspección de puentes. Estructuras especiales de ingeniería. Daños estructurales.

1. INTRODUÇÃO

As Obras de Arte Especiais (OAEs), como pontes e viadutos, desempenham papel estratégico na infraestrutura viária, garantindo a mobilidade urbana e interurbana, preservar o patrimônio natural, cultural, paisagístico e além de contribuir diretamente para o desenvolvimento econômico e social. Entretanto, a durabilidade dessas estruturas depende de inspeções e manutenções periódicas que assegurem seu desempenho ao longo do tempo (Vasconcelos Fernandes *et al.*, 2021).

Os métodos tradicionais de inspeção, ao dependerem de observação direta, são não apenas demorados, onerosos e com limitações de precisão, mas também podem gerar resultados inconsistentes devido à subjetividade e dependência da experiência dos inspetores. Além disso, a necessidade de interdição parcial das vias para uso de equipamentos como caminhões de inspeção posicionados sob a ponte, andaimes ou alpinismo industrial, causa grandes transtornos ao tráfego e à sociedade, aumentando os custos e os riscos de acidentes de trabalho.

Com os avanços tecnológicos, os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), popularmente conhecidos como drones, têm surgido como uma alternativa promissora. Eles se destacam pelo baixo custo, alta mobilidade, segurança aprimorada e velocidade na aquisição e transferência de dados (Mishra *et al.*, 2023). Em contrapartida, o uso de drones nas inspeções tem se mostrado uma alternativa eficiente, com potencial para reduzir o tempo de vistoria em até 33,3% e os custos operacionais em até 70%, além de aumentar a segurança ao minimizar a exposição humana a situações de risco. Outro diferencial importante é a capacidade de detectar manifestações deletérias não visíveis a partir do solo, garantindo uma avaliação mais precisa e abrangente das estruturas.

No contexto brasileiro, a situação é particularmente crítica: grande parte das pontes brasileiras tem mais de 40 anos e necessita de inspeções sistemáticas, o que aumenta o risco de falhas estruturais (Simões; Rodrigues; Pinheiro, 2021). Estima-se que até 30% das pontes apresentem algum nível de deterioração que requer atenção técnica (DNIT, 2023). Destacando o impacto econômico e social da falta de manutenção preventiva. A falta de manutenção preventiva é um problema crônico, com apenas 13% das 113.168 pontes cadastradas no Brasil tendo histórico de inspeção documentado (PANORAMA DAS PONTES, 2023). Essa lacuna compromete a gestão da infraestrutura e aumenta o risco de falhas graves, evidenciando a necessidade de inserção tecnológica nos processos de inspeção para garantir a estabilidade estrutural e a segurança pública.

Essas limitações evidenciam a necessidade de soluções tecnológicas que integrem precisão, segurança e viabilidade operacional, como o uso de drones aplicados à engenharia de inspeções.

Diante desse cenário de desafios e da crescente necessidade de métodos de inspeção mais eficientes e seguros para as OAEs, este estudo tem como objetivo geral avaliar a aplicabilidade e a eficácia do uso de drones na identificação de ações deletérias em cinco pontes de concreto armado, localizadas em contextos geográficos distintos no estado de Pernambuco: uma na BR-116 (no município de Salgueiro) e quatro na Rodovia PE-615 (no município de Araripina). O estudo visa contrastar estruturas em diferentes padrões de conservação e, crucialmente, comparar a viabilidade da inspeção utilizando voo automático (planejado por

software) versus voo manual (pilotado) em função das condições ambientais e geográficas do local.

Para atingir este propósito, os objetivos específicos do presente trabalho incluem: realizar o cadastro e a inspeção preliminar das cinco OAEs; planejar e executar voos de inspeção aérea, adaptando a metodologia de aquisição entre voo automático e manual, justificando a escolha metodológica com base nas condições de campo; processar e analisar as imagens capturadas, gerando ortofotos quando aplicável; e, por fim, classificar as manifestações deletérias identificadas, destacando as vantagens e limitações de cada modalidade de voo no contexto da ABNT NBR 9452:2023.

A relevância deste estudo reside em sua contribuição prática para a engenharia de estruturas no contexto da infraestrutura e na preservação do patrimônio viário de Pernambuco, indo além da simples validação da tecnologia de drones. O trabalho fornece um comparativo metodológico crucial, contrastando a eficiência e a precisão do voo automático (ideal para a geração de produtos métricos como a ortofoto de alta resolução, demonstrado na BR-116) com a viabilidade e as limitações do voo manual em ambientes urbanos e rurais complexos, como as pontes da PE-615. Ao analisar o impacto de cada modalidade de voo na qualidade final dos dados (ortofoto versus foto normal), o estudo oferece insights práticos para gestores de infraestrutura e órgãos como o DER-PE e DNIT, orientando a escolha da técnica mais adequada para diferentes cenários de campo, restrições ambientais (vegetação) e necessidades de inspeção.

A aplicação de drones surge como uma ferramenta de grande relevância, proporcionando ganhos de tempo, uma economia de até 70% nos custos e maior segurança durante as operações, minimizando a exposição humana a situações de risco (Ballesteros; Lordsleem Junior, 2021; Vale *et al.*, 2025). A possibilidade de realizar levantamentos precisos com menor interferência operacional justifica a adoção dessa tecnologia, alinhando eficiência e inovação ao setor de infraestrutura.

Cientificamente, a pesquisa se insere em um contexto de crescente aplicação de drones em inspeções de infraestrutura, conforme apontado por estudos nacionais e internacionais que destacam o uso de técnicas de fotogrametria avançada e integração com inteligência artificial para reconhecimento automático de fissuras (Mishra *et al.*, 2023; Silva Filho, 2024). A metodologia proposta alinha-se à ABNT NBR 9452:2023, que é o principal referencial normativo brasileiro para inspeção de OAEs, estabelecendo diretrizes para os diferentes tipos de inspeção e recomendando a utilização de Tecnologia BIM (Building Information Modeling) como ferramenta complementar.

Os produtos gerados pelos drones, como ortomosaicos, nuvens de pontos e modelos 3D, podem alimentar um Plano de Execução BIM (PEB) para a criação de gêmeos digitais das estruturas inspecionadas. Essa abordagem, complementada pela integração de drones e Inteligência Artificial, contribui para uma gestão preventiva e preditiva das OAEs, otimizando a interpretação de dados e agilizando processos decisórios na gestão de construções e infraestruturas públicas.

A escolha do município de Salgueiro-PE, um polo logístico estratégico da BR-116 e do Eixo Norte da Transposição do Rio São Francisco, com a presença de pontes antigas, reforça a necessidade de métodos de inspeção mais eficazes. A inclusão das OAEs da PE-615 (em Araripina), importante polo de gesso da região, cujas estruturas estão submetidas aos esforços

do transporte industrial e representaram o cenário de maior desafio operacional devido a restrições ambientais que inviabilizaram o voo automático, confere ao estudo um caráter de aplicabilidade prática regional abrangente. Os resultados desta pesquisa não só fornecerão suporte técnico para a manutenção preditiva local, mas também um modelo tecnológico potencialmente replicável em outros municípios, consolidando a importância do presente estudo na modernização da gestão de OAEs no Brasil. Portanto, este estudo se justifica por sua relevância social, técnica e científica, ao propor o uso de novas tecnologias para aumentar a eficiência, segurança e rastreabilidade do processo de inspeção de OAEs.

Portanto, este estudo não apenas analisa a aplicabilidade dos drones em diferentes contextos operacionais, mas também contribui para o avanço da gestão inteligente de infraestrutura, propondo um modelo replicável de inspeção técnica com base em dados fotogramétricos e evidências normativas.

2. METODOLOGIA

Esta seção detalha os procedimentos adotados para a inspeção das OAEs, desde o planejamento até o processamento dos dados. A metodologia foi desenvolvida para contrastar a eficiência do voo automático (software-driven) com a eficácia do voo manual (pilot-controlled) em ambientes com restrições operacionais.

A metodologia foi estruturada em quatro etapas principais:

1. Planejamento e seleção das OAEs;
2. Execução dos voos (automático e manual);
3. Processamento e análise dos dados;
4. Interpretação dos resultados e elaboração das fichas de inspeção.

2.1 Escopo Geográfico E Estruturas Inspecionadas

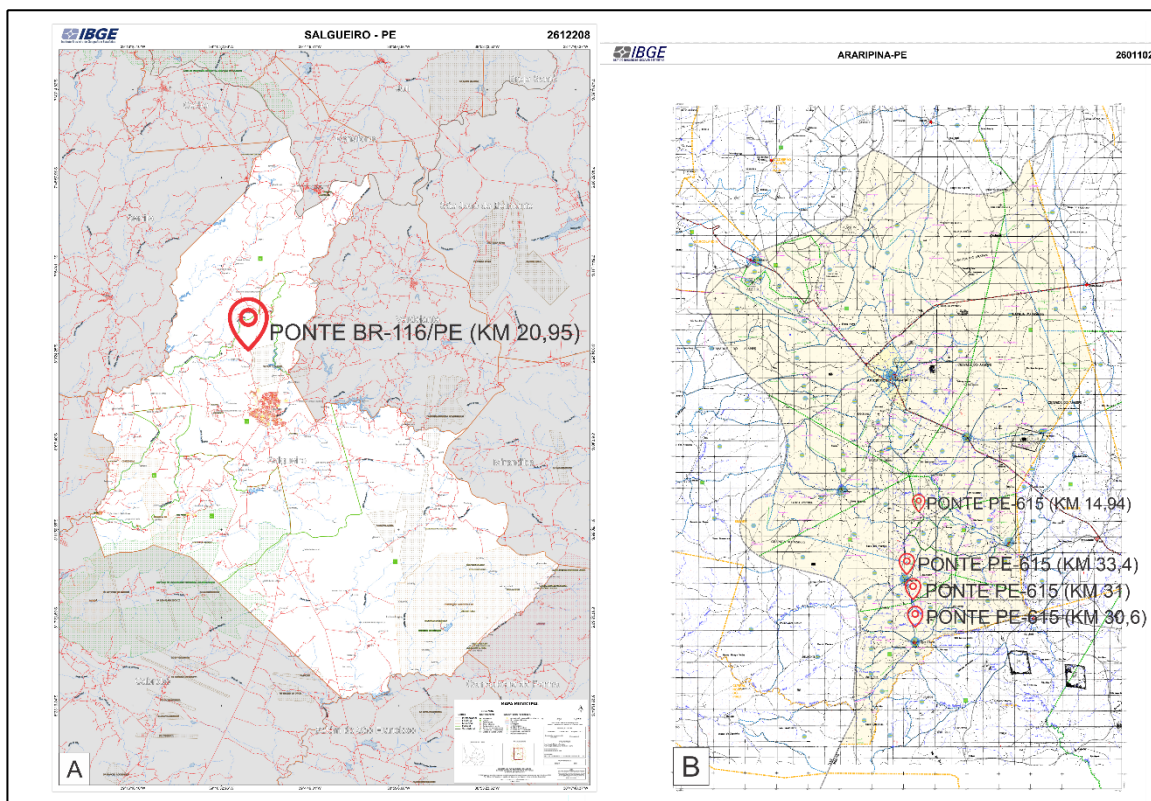
O estudo de caso foi expandido para incluir cinco OAEs em dois contextos geográficos distintos do estado de Pernambuco:

1. Ponte BR-116 (trecho em Salgueiro): Utilizada como prova de conceito para a aplicação integral do voo automático. Os dados cadastrais (Comprimento, Largura, Tipologia e etc.) foram extraídos diretamente da planta do projeto de engenharia da OAE.
2. Quatro Pontes na PE-615 (trecho em Araripina): Incluídas devido ao seu contexto industrial (Polo Gesseiro) e às restrições ambientais que impuseram a adoção do voo manual.

Os dados de cadastro e as informações detalhadas sobre a tipologia e o registro inicial das manifestações deletérias da OAE PE-615, foram documentados formalmente em Fichas de Inspeção Cadastral, elaboradas conforme o Anexo A da ABNT NBR 9452:2023, e estão anexadas ao final deste trabalho para referência.

A localização das cinco OAEs estudadas pode ser visualizada na Figura 1 (A e B), que apresenta a posição geográfica das pontes nos municípios de Salgueiro e Araripina.

Figura 1 – Mapas de localização das OAEs, A — Município de Salgueiro (BR-232),
B — Município de Araripina (PE-615)



Fonte: IBGE (2014; 2022).

2.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Aeronave Remotamente Pilotada (ARP/Drone):

Para o levantamento fotográfico, utilizou-se um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), especificamente o modelo DJI Mavic 2 Zoom, equipado com câmera de alta resolução e zoom óptico de até 2x, GPS e capacidade de voo estabilizado. A operação foi realizada com controle remoto e dispositivos móveis.

Figura 2 – Drone Mavic 2 Zoom



Fonte: DJI (2019).

O notebook utilizado para o processamento fotogramétrico possuía as configurações adequadas para a geração de modelos tridimensionais, incluindo um processador Intel Core i7, 16 GB de memória RAM e placa de vídeo dedicada de 4 GB.

Software:

- Planejamento e Execução: DroneDeploy (aplicativo de planejamento de missão) para os voos automáticos (padrão e fachada). Foi essencial o uso de uma licença de teste (trial) para acessar o modo de inspeção de fachada, crucial para o mapeamento da BR-116.
- Processamento Fotogramétrico: Agisoft Metashape para a geração dos produtos métricos (nuvem de pontos e ortofotos) a partir das imagens de voo automático.
- Análise: Software de análise de imagens para a inspeção e mapeamento das fotos normais (voo manual).

2.3 Conformidade Legal E Regulamentação (ANAC/DECEA)

A execução dos voos foi integralmente pautada na legislação brasileira vigente para Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA). O drone DJI Mavic 2 Zoom utilizado enquadra-se na Classe 3 de RPA, com Peso Máximo de Decolagem (PMD) menor ou igual a 25 Kg.

As operações foram planejadas e executadas em conformidade com as diretrizes da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), especificamente o RBAC-E nº 94/2017, e do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), regidas pela ICA 100-40/2023.

Um aspecto crucial para a execução em campo foi a necessidade de autorização específica via SARPAS NG. Esta autorização foi necessária devido à proximidade das pontes (em Salgueiro) com o aeroporto local, o que configurou uma Zona de Voo Restrita (ZVR). O processo de liberação, embora burocraticamente complexo, reforça a conformidade com as diretrizes do DECEA e ANAC, sendo um passo legal obrigatório para todas as operações de RPA no espaço aéreo brasileiro. Adicionalmente, o operador é responsável pela observância das normas de outras autoridades, como ANATEL, MAPA e MD.

2.4 Métodos De Aquisição De Dados Aéreos

Esta modalidade de aquisição foi adaptada às condições de campo de cada ponte, conforme as restrições impostas após a obtenção da conformidade legal.

Voo Automático (Mapeamento por Software)

Esta modalidade representa o método ideal para a fotogrametria.

- Aplicação Integral: Executado com sucesso e em sua totalidade (rodovia e fachadas) na Ponte da BR-116, garantindo a sobreposição e a geometria ideais (método Fachada) para o processamento 3D.
- Aplicação Parcial: Limitado ao levantamento da rodovia (parte superior) da Ponte sobre o Riacho Pitombeira (PE-615).
- Vantagem: Gera produtos métricos (ortofotos e modelos 3D) de alta precisão (GSD \approx 5 mm/pix) e repetibilidade.

Voo Manual (Adaptação a Campo)

O voo manual foi o método predominante nas estruturas da PE-615 e representa a adaptação prática.

- **Motivação:** A transição metodológica foi forçada pela densa vegetação e obstáculos nas margens dos riachos da PE-615, que inviabilizaram a execução segura dos padrões de voo automáticos de fachada.
- **Execução:** O piloto assumiu o controle total (Pilot-Controlled Flight), realizando o registro fotográfico de forma adaptada e oblíqua para contornar os obstáculos.
- **Produto Final e Limitação:** Embora garanta o registro fotográfico visual necessário para a identificação de ações deletérias, o voo manual não fornece o rigor geométrico para a geração de ortofotos e modelos 3D utilizáveis para medições métricas. O produto final é uma coleção de fotos normais.

2.5 Processamento E Análise De Dados

Processamento Fotogramétrico (Dados Automáticos):

As imagens obtidas por voo automático (Ponte sobre o canal da transposição na BR-116 e ponte sobre o riacho Pitombeira na PE-615) foram processadas no Agisoft Metashape, seguindo as etapas tradicionais: Alinhamento das Fotos, Geração da Nuvem de Pontos Densa, e Geração do Ortomosaico. Os indicadores de qualidade (Erro de Reprojecção e GSD) foram usados para validar a precisão dos modelos.

Análise de Imagens (Todos os Dados):

Análise Métrica: Na Ponte sobre o canal da transposição na BR-116 e ponte sobre o riacho Pitombeira na PE-615, a análise de ações deletérias foi realizada diretamente sobre as ortofotos. As dimensões da estrutura para comparação e calibração foram obtidas a partir da planta do projeto de engenharia.

Análise Visual: Nas demais fachadas da PE-615 (voo manual), a identificação e classificação das deletérias foram baseadas no exame visual minucioso das fotos normais. A ausência de produtos métricos nessas estruturas limita a quantificação precisa, sendo um fator-chave para a discussão dos resultados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados da campanha de inspeção em cinco Obras de Arte Especiais (OAEs), distribuídas entre a BR-116 e a PE-615. A discussão contrasta a eficácia do método de voo automático (ideal para a fotogrametria e produtos métricos) com a viabilidade do voo manual (necessário devido às restrições de campo), validando a metodologia adaptativa do estudo.

3.1 Dados Cadastrais E Metodologia Aplicada Nas OAEs

O estudo de caso abrange cinco OAEs em dois contextos geográficos distintos. A Tabela 1 detalha as características cadastrais e o método de inspeção predominante para cada

estrutura, evidenciando a adaptação da metodologia em campo. Os dados de comprimento e largura das pontes da PE-615 foram coletados manualmente em campo.

Tabela 1. Metodologia de Inspeção aplicada nas OAEs da BR-116 e PE-615.

OAE	Rodovia/Município	km	Comprimento (m)	Largura (m)	Metodologia Predominante	Status Ortofoto
Ponte BR-116	BR-116, Salgueiro-PE	20,95	50	13	Automático (Total)	Total (Tabuleiro + Fachadas)
Riacho Pitombeira	PE-615, Araripina-PE	33,4	18,3	8,05	Misto (Automático Pista / Manual Fachadas)	Parcial (Apenas Tabuleiro)
Riacho São José	PE-615, Araripina-PE	14,94	31,5	7,9	Manual (Total)	Não aplicável
Riacho Barriguda	PE-615, Araripina-PE	30,6	22,2	14,7	Manual (Total)	Não aplicável
Transnordestina	PE-615, Araripina-PE	31	14	8,4	Manual (Total)	Não aplicável

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.2 Estudo De Caso 1: Ponte Na Br-116 (Techo Em Salgueiro) - Voo Automático

A Ponte na BR-116 serviu como o caso de sucesso da aplicação completa do voo automático, validando a precisão métrica ideal. A Tabela 2 resume os dados de captação e processamento desta OAE.

Tabela 2. Detalhamento de Captação e Processamento na Ponte BR-116 (Voo Automático).

Indicador	Leste (Fachada)	Oeste (Fachada)	Tabuleiro
Duração do Voo (m:s)	13:00	10:30	10:00
Número de Fotos	197	151	72
Número de Pontos de Amarração	111.800	146.657	51.349
Erro de Reprojeção	1,31 pix	1,05 pix	0,582 pix
Resolução do Solo (GSD)	4,83 mm/pix	6,20 mm/pix	2,28 cm/pix

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os baixos valores de Erro de Reprojeção (próximos a 1 pix) e a alta Resolução do Solo (GSD \approx 5 mm/pix} nas fachadas) confirmam que o voo automático produz ortofotos

com precisão geométrica importantes para uma inspeção mais detalhada. O resultado do processamento integral da Ponte na BR-116 é demonstrado na Figura 3.

Figura 3 – Ortofoto composta da Ponte 1 (A: Vista Longitudinal Leste; B: Vista Longitudinal Oeste; C: Vista do Tabuleiro e D: Vista Isométrica).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.3 Dificuldades Operacionais Em Zona De Voo Restrita (ZVR)

Apesar da autorização de voo via SARPAS NG, a Ponte BR-116, por estar em uma Zona de Voo Restrita (ZVR), exigiu verificação geo-fence em tempo real. A intermitência do sinal de internet no local impediu essa comunicação inicial, sendo resolvida apenas com a substituição do aparelho móvel de controle. Este incidente reforça que, em ZVR, o sucesso da missão depende não só da autorização legal, mas também da garantia de conectividade estável para o desbloqueio do software.

3.4 Estudo De Caso 2: Pontes PE-615 - Adaptação Ao Voo Manual

A inspeção das pontes da PE-615 foi marcada pela transição metodológica para o voo manual. A principal causa foi a densa vegetação e árvores próximas às estruturas, que impediram a execução segura e completa das missões automáticas de fachada.

Tabela 3. Indicadores de Processamento e Produtos Finais das Pontes da PE-615.

Indicador	Riacho Pitombeira (Pista - Automático)	Fachadas (Manual)	Riacho São José (Total Manual)	Riacho Barriguda (Total Manual)
Número de Fotos	78	Registro fotográfico	Registro fotográfico	Registro fotográfico
Número de Pontos de Amarração	71.512	Não Aplicável	Não Aplicável	Não Aplicável
Erro de Reprojeção	0,533 pix	Não Aplicável	Não Aplicável	Não Aplicável
Resolução do Solo (GSD)	1,40 cm/pix	Não Aplicável	Não Aplicável	Não Aplicável
Tempo de Processamento (Geração da Nuvem)	28 min 50 seg	Não Aplicável	Não Aplicável	Não Aplicável

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os dados estruturais básicos (Comprimento e Largura) e o registro inicial das manifestações deletérias das OAEs da PE-615 foram extraídos e compilados das respectivas Fichas de Inspeção Cadastral, que servem como documentação oficial do levantamento e estão anexadas ao artigo.

A Figura 4 ilustra o contraste metodológico: o produto de alta precisão obtido automaticamente (ortofoto da pista) e o tipo de imagem utilizada para a inspeção nas fachadas (foto normal de voo manual).

Figura 4 – (A) Ortofoto da Ponte sobre o Riacho Pitombeira (voo automático); (B) Exemplo de foto normal obtida por voo manual na fachada, método adotado nas estruturas da PE-615.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.5 Análise E Mapeamento De Ações Deletérias

A análise de manifestações deletérias contrastou o produto métrico (Ponte na BR-116) com o produto visual (Pontes na PE-615).

3.5.1 Análise Da Ponte Na Br-116 (Produto Métrica)

Na Ponte na BR-116, não foram identificadas manifestações deletérias significativas que comprometessem a estabilidade da OAE, validando o levantamento de alta precisão como um registro de referência (baseline) para o futuro monitoramento.

3.5.2 Análise Das Pontes Na Pe-615 (Produto Visual)

Nas estruturas da PE-615, a identificação das manifestações deletérias foi realizada através do exame visual direto das fotos normais de alta resolução capturadas em voo manual (Figura 2B). A ausência de ortofotos limitou a quantificação métrica das anomalias, mas permitiu o seguinte mapeamento qualitativo:

- Ponte sobre o Riacho Pitombeira: Estruturalmente OK, mas elementos funcionais como Passeio (alto grau de deterioração do concreto) e Drenagem/Sinalização/Pintura (mal estado de conservação) foram encontrados.
- Ponte sobre o Riacho São José: Apresenta falhas na execução (leves nichos de concretagem na superestrutura e mesoestrutura). Observam-se manchas de umidade e pontos de corrosão próximos ao dreno. As extremidades da laje em balanço apresentam elevado grau de deterioração, com deslocamento e corrosão das armaduras, devido à ausência de pingadeiras e falta de manutenção. O Passeio e o Pavimento estão em mal estado de conservação.
- Ponte sobre o Riacho Barriguda: A Superestrutura apresenta nicho de concretagem que resultou em armaduras expostas com início de processo de corrosão. Os Aparelhos de Apoio (tipo chumbo) estão em fim de sua vida útil. Guarda-corpos e Passeio apresentam processo de corrosão e estão danificados. Há ainda o registro de carreamento de solo abaixo do leito da ponte.
- Ponte sobre a ferrovia transnordestina: Erosão em uma das cabeceiras.

A análise final do trabalho demonstra que o voo automático (Ponte na BR-116) oferece o rigor métrico ideal para a gestão preditiva, enquanto o registro visual do voo manual (Ponte na PE-615) é uma alternativa robusta e adaptativa, essencial para a inspeção qualitativa de OAEs em ambientes com severas restrições operacionais.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo alcançou o objetivo de avaliar a aplicabilidade do uso de aeronaves remotamente pilotadas na inspeção de Obras de Arte Especiais, estabelecendo um comparativo metodológico crucial entre o voo automático e o voo manual em diferentes contextos geográficos e operacionais.

Em relação à metodologia, o Voo Automático se confirmou como o método superior para a gestão preditiva de infraestrutura. Na Ponte na BR-116, a aplicação integral da técnica (fachada e padrão) resultou em produtos fotogramétricos de altíssima precisão, com erros de reprojeção entre 0,582 pix e 1,31 pix e resolução do solo (GSD) de aproximadamente 5 mm/pix nas fachadas. Estes resultados atendem e superam os critérios da ABNT NBR 9452:2023 para Inspeção. A ausência de ações deletérias significativas na ponte na BR-116, verificada nas ortofotos, valida o levantamento como um registro de referência métrico e rastreável.

Por outro lado, o estudo evidenciou a necessidade de adaptação metodológica como um fator crítico em ambientes reais. As OAEs da PE-615, localizadas no Polo Gesseiro de Pernambuco expostas à densa vegetação, inviabilizaram a execução das missões automáticas de fachada. Nesses casos, o Voo Manual provou ser a única solução viável e adaptativa para garantir a cobertura visual, embora seu produto se restrinja a fotos normais. Esta limitação prática impôs uma barreira: a identificação e classificação das manifestações deletérias foi possível, mas a quantificação métrica e rastreável dos defeitos ficou restrita, limitando a análise a um diagnóstico qualitativo.

Os resultados da inspeção em pontes na PE-615 revelaram manifestações deletérias estruturais e funcionais significativas:

- A Ponte sobre o Riacho São José e a Ponte sobre o Riacho Barriguda apresentam falhas de concretagem, armaduras expostas com corrosão e severa deterioração dos elementos funcionais (passeios, guarda-corpos), evidenciando a urgência de intervenção.
- A Ponte sobre o Riacho Barriguda também registra aparelhos de apoio em fim de vida útil, um fator crítico que demanda atenção imediata do DER-PE.
- A ponte sobre a transnordestina tinha problema de erosão em uma das cabeceiras.
- Um ponto que vale a pena salientar é a ausência da sinalização vertical, como também o desgaste do pavimento e da sinalização horizontal.

Em suma, a aplicação de VANTs é essencial para a inspeção de OAEs, contudo, a escolha da metodologia deve ser pragmática, balanceando a precisão métrica do voo automático (ideal) com a viabilidade e adaptabilidade do voo manual (necessário em campo).

Como contribuição científica, este trabalho demonstra a aplicabilidade prática de metodologias baseadas em drones para inspeções estruturais conforme a NBR 9452:2023 e uma visão de conservação de patrimônio natural, cultural e paisagístico. Estudos futuros podem integrar Inteligência Artificial e BIM para reconhecimento automático de ações deletérias e criação de gêmeos digitais das OAEs, consolidando um sistema de gestão preventiva de pontes e viadutos no Brasil.

5. RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados e nas limitações encontradas, são propostas as seguintes recomendações:

- **Manutenção e Acessibilidade:** É fundamental que o órgão competente (DER-PE) realize a manutenção preventiva e a limpeza periódica da vegetação nas

margens e sob as OAEs. A presença de densa vegetação compromete a acessibilidade, inviabiliza o uso de métodos de inspeção automatizados de alta precisão e impede uma fiscalização visual completa e eficaz da mesoestrutura e infraestrutura, impactando diretamente a segurança e a rastreabilidade do processo de gestão.

- **Ação Imediata Terapêutica:** Recomenda-se que o DER-PE implemente medidas terapêuticas urgentes nas pontes sobre os Riachos São José e Barriguda, focando no tratamento das armaduras expostas e na substituição dos aparelhos de apoio críticos do Riacho Barriguda, conforme as fichas de inspeção.
- **Desenvolvimento de Software:** Investimento em softwares de planejamento de voo capazes de gerar rotas automáticas que contornem obstáculos (como vegetação densa) de forma inteligente, reduzindo a dependência da intervenção manual em ambientes rurais.
- **Extração Métrica de Fotos Normais:** Desenvolvimento ou utilização de algoritmos de processamento (Inteligência Artificial/Visão Computacional) para estimar dimensões de fissuras e ações deletérias diretamente das fotos normais obtidas por voo manual. Isso mitigaria a principal limitação imposta pela adaptação em campo.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 9452:2023 – Inspeção de pontes, viadutos e passarelas — Procedimento**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2023.

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil. **RBAC-E 94: Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial – Requisitos Gerais para Aeronaves não Tripuladas**. Brasília: ANAC, 2017.

BALLESTEROS, R. D.; LORDSLEEM JUNIOR, A. C. Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) para inspeção de manifestações patológicas em fachadas com revestimento cerâmico. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 119-137, jan./mar. 2021.

BERNARDO, F. **Uso de drones em inspeções estruturais**. Revista Brasileira de Engenharia Civil, v. 12, n. 3, p. 44-57, 2021.

DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **ICA 100-40: Aeronaves Não Tripuladas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro**. Brasília: DECEA, 2023.

DJI. **Mavic 2 Pro/Zoom: manual do usuário v1.2**. Shenzhen: DJI, 2019. Disponível em: https://dl.djicdn.com/downloads/Mavic_2/201911um/Mavic_2_Pro_Zoom_User_Manual_v1.2_br.pdf. Acesso em: 6 abr. 2026. (Informação externa ao material original).

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Panorama das Obras de Arte Especiais no Brasil**. Brasília: DNIT, 2023.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Araripina – PE: mapa municipal estatístico**. Rio de Janeiro: IBGE, 2014. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/mapas_municipais/estimativas_populacionais/2014/PE/araripina_2014_v1.pdf. Acesso em: 6 abr. 2026. (Informação externa ao material original).

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Salgueiro – PE: mapa municipal estatístico**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em:

https://geofpt.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/mapas_municipais/colecao_de_mapas_municipais/2022/PE/salgueiro/A0_2612208_MM.pdf. Acesso em: 6 abr. 2026. (Informação externa ao material original).

MISHRA, P. *et al.* Uncrewed aerial systems in water resource management and monitoring. **Advances in Civil Engineering**, v. 2023, p. 1-13, 2023.,

PINTO, C. **Manutenção e Diagnóstico de Pontes de Concreto**. Porto: FEUP, 2018.

POH, S. *et al.* Photogrammetry-Based Structural Assessment Using UAVs. **International Journal of Remote Sensing**, 2022.

RASHEED, A.; SAN, O.; KVAMSDAL, T. Digital twin: Values, challenges and enablers. **IEEE Access**, v. 8, p. 21980-22012, 2020.

SILVA FILHO, R. S. **Uso e aplicação de drone para inspeção de fachadas**. 2024. 113 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2024.

SIMÕES, J.; RODRIGUES, A.; PINHEIRO, C. Atualização da NBR 9452 e desafios nas inspeções de OAEs. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 14, n. 4, p. 22-37, 2021.

VALE, L. J. S. *et al.* Monitoramento de pontes e viadutos com uso de veículo aéreo não tripulado (VANT): estudos de caso. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 18, n. 4, p. 2864-2881, 2025.

VASCONCELOS FERNANDES, R. T. *et al.* Mapping of pathological manifestations in asphalt pavement through the use of drones. **Revista ALCONPAT**, v. 11, n. 1, p. 61-72, jan./abr. 2021.

VERLY, R. *et al.* Subjetividade nas inspeções de pontes no Brasil. **Engenharia Civil em Debate**, v. 5, n. 2, p. 115-128, 2020.,