CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE NOVA GAMELEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

EDUARDA RIBEIRO DE MELO

MONITORAMENTO DE INFRAESTRUTURAS CRÍTICAS E BARRAGENS COM DRONES: UMA ABORDAGEM VOLTADA À GESTÃO DE RISCOS PARA A ENGENHARIA CIVIL

BELO HORIZONTE – MG
2026

EDUARDA RIBEIRO DE MELO

MONITORAMENTO DE INFRAESTRUTURAS CRÍTICAS E BARRAGENS COM DRONES: UMA ABORDAGEM VOLTADA À GESTÃO DE RISCOS PARA A ENGENHARIA CIVIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. André Henrique Campos Teixeira

BELO HORIZONTE – MG

2026

Melo, Eduarda Ribeiro
M528m Monitoramento de infraestruturas críticas e barragens com drones: uma abordagem voltada à gestão de riscos para a Engenharia Civil / Eduarda Ribeiro Melo. – 2026.
64 f. : il., fotos.

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de graduação do Programa de Graduação em Engenharia Civil.
Orientador: André Henrique Campos Teixeira.
Bibliografia: f. 60-64.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil.

1. Gestão industrial – Teses. 2. Engenharia civil – Avaliação de riscos – Teses. 3. Monitoramento da integridade estrutural – Teses. 4. Drone – Sistemas de controle – Teses. 5. Veículos remotamente pilotados – Teses. I. Teixeira, André Henrique Campos. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD 629.8

Elaboração da ficha catalográfica pela bibliotecária Jane Marangon Ðuarte, CRB 6ª 1592 / Cefet/MG

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL - NG

FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC Nº 1/2026 - DEC (11.56.07)

Nº do Protocolo: 23062.034078/2026-46

Belo Horizonte-MG, 01 de julho de 2026.

EDUARDA RIBEIRO DE MELO

MONITORAMENTO DE INFRAESTRUTURAS CRÍTICAS E BARRAGENS COM DRONES: UMA ABORDAGEM VOLTADA À GESTÃO DE RISCOS PARA A ENGENHARIA CIVIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, do Campus Nova Gameleira, como parte do requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 16 de junho de 2026

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Henrique Campos Teixeira - Orientador
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Profa. Dra. Flávia Spitale Jacques Poggiali
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Thiago Luiz Coelho Morandini
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

BELO HORIZONTE
2026

(Assinado digitalmente em 06/07/2026 21:49)
ANDRE HENRIQUE CAMPOS TEIXEIRA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DET (11.55.11)
Matrícula: ###894#8

(Assinado digitalmente em 01/07/2026 20:33)
FLAVIA SPITALE JACQUES POGGIALI
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEC (11.56.07)
Matrícula: ###908#6

(Assinado digitalmente em 02/07/2026 08:30)
THIAGO LUIZ COELHO MORANDINI
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEC (11.56.07)
Matrícula: ###172#6

(Assinado digitalmente em 01/07/2026 17:55)
EDUARDA RIBEIRO DE MELO
DISCENTE
Matrícula: 2019######8

Visualize o documento original em https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp informando seu número: **1**, ano: **2026**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão: **01/07/2026** e o código de verificação: **1ab0f0b0c2**

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
Av. Amazonas, 7675 – Bairro Nova Gameleira – Belo Horizonte - MG
Departamento de Engenharia Civil - Prédio 12 - Telefone: (31) 3319-6810 – secretaria@civil.cefetmg.br

TERMO DE ACEITE FINAL - ORIENTADOR

Titulo do TCC:	MONITORAMENTO DE INFRAESTRUTURAS CRÍTICAS E BARRAGENS COM DRONES: UMA ABORDAGEM VOLTADA À GESTÃO DE RISCOS PARA A ENGENHARIA CIVIL
Data defesa:	16/06/2026
Discente:	Eduarda Ribeiro de Melo
Orientador:	André Henrique Campos Teixeira

Eu, Eduarda Ribeiro de Melo declaro que todas as sugestões de correção e melhoria indicadas pela banca de avaliação de meu Trabalho de Conclusão de Curso e acordadas com meu Prof. Orientador foram implementadas no texto e entregues ao mesmo, Prof. André Henrique Campos Teixeira para validação final.

gov.br Documento assinado digitalmente
EDUARDA RIBEIRO DE MELO
Data: 23/06/2026 09:20:36-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

De acordo: Belo Horizonte, 22 de junho de 2026,

Assinatura do Discente

Declaro ter recebido e conferido a versão final do texto e que as sugestões de correção e melhorias indicadas pela banca e acatadas por mim foram implementadas.

gov.br Documento assinado digitalmente
ANDRE HENRIQUE CAMPOS TEIXEIRA
Data: 22/06/2026 15:08:38-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

De acordo: Belo Horizonte, 22 de junho de 2026,

Assinatura do Orientador

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo apoio incondicional, pela confiança e pelo incentivo ao longo de toda a minha trajetória.Obrigada por serem o meu porto seguro, por acreditarem nos meus sonhos, por não me deixarem desistir e por sustentarem a minha caminhada até aqui.

Dedico também ao CEFET-MG, que é praticamente a minha segunda casa há mais de dez anos, desde o ensino técnico. As vivências que tive aqui, a profissão que eu escolhi trilhar, os colegas que fiz e a oportunidade de ter feito um intercâmbio pela instituição me fizerem um ser humano melhor. Obrigada pela formação – acadêmica, profissional e pessoal.

Não posso deixar de agradecer ao professor André Henrique, que acompanha a minha jornada desde os meus primeiros passos no curso técnico, que acreditou em mim, que me abriu a oportunidade para a realização do meu primeiro estágio na vida e que me levou para todo canto para fazermos topografia juntos. Você me abriu os olhos para um mundo cor de rosa, obrigada por ter esse coração tão bom e ajudar outras pessoas a trilharem um caminho do bem. Você foi luz.

AGRADECIMENTOS

Chegar ao fim desta etapa é ter a certeza de que ninguém cruza a linha de chegada sozinho. A jornada cursando engenharia no CEFET-MG foi longa e intensa, e este TCC só se tornou real porque tive uma verdadeira rede de apoio segurando a minha mão.

Aos meus pais, repito o que meu coração já disse na dedicatória: meu eterno obrigada por tudo. Vocês estiveram ao meu lado em cada crise. Nos dias que eu proferia “eu vou desistir”, vocês não deixaram a peteca cair, - como diz minha mãe - e seguraram a barra até que ficasse mais leve para mim. Obrigada por serem o meu refúgio quando o cansaço bateu. Essa conquista é tão minha quanto de vocês. Esse diploma é nosso. Amo vocês incondicionalmente.

Ao CEFET-MG, deixo a minha gratidão por toda a base que construiu a profissional que sou hoje. As oportunidades que a instituição e os docentes oferecem aos alunos refletem o carinho que cada um tem para tornar essa faculdade cada dia melhor.

Ao meu “para sempre” orientador, André Henrique, obrigada por deixar leve o que pareceu ser pesado demais. Passar pela última etapa da graduação com você foi encerrar o ciclo com quem eu iniciei lá atrás, no ensino médio. Me enche o coração de orgulho e alegria saber que eu cruzei a linha de partida com você e, ninguém melhor que você, para cruzar a linha de chegada comigo. Obrigada mais uma vez.

À Isadora, minha namorada, um agradecimento especial por ter sido a minha melhor companhia nessa reta final. Obrigada por ouvir minhas crises malucas de uma estudante de engenharia, por me levar e buscar no CEFET-MG sempre que deu, por esperar por 4 horas no estacionamento só para me fazer companhia no intervalo e deixar a rotina menos pesada. Você conseguiu entender e ter carinho pela minha rotina exaustiva de estudos e trabalho e ainda conseguiu ser minha companheira e deixar as semanas mais leves no vôlei da quarta-feira e nos nossos esportes de lazer. Te amo.

Agradeço também a cada amigo e colega de curso que dividiu comigo o desespero das provas e o alívio de cada etapa vencida: vocês deixaram essa história muito mais leve. Minha mais profunda gratidão a todos que fizeram parte desse percurso.

Gostaria de expressar meu agradecimento também à Flávia Spitale e Flávia Muller, que foram duas gratas surpresas nessa reta final do curso. Eu jamais imaginei que uma aula de

Gerenciamento de Obras, após 7 longos anos de CEFET, iria me fazer ir à instituição com tanto entusiasmo. A dinâmica de vocês em sala e a atenção despendida foram fundamentais. A energia que vocês deixam no ambiente é contagiante e vou levar para sempre comigo. Obrigada por toparem abrir uma turma extra de Gerenciamento de Obras e trazerem o melhor de vocês para a sala de aula, pode ter certeza de que o impacto foi grande por aqui. As duas Flávias maratonistas ficarão guardadas com carinho nessa etapa que é tão importante para mim. Abro aqui um parêntese especial, porque a Flávia Spitale topou fazer parte da minha banca e foi uma queridíssima comigo desde o início. Sua disposição e coragem me deram o gás final que eu precisava. Se você já tinha um coração enorme, energia e disposição sobrando, imagina agora, depois de caminhar até a Laguna Humantay e ficar a mais de 4.000 metros acima do mar, não há limites para a sua força e inspiração.

Ao Thiago Morandini, que sempre se fez presente e disposto a resolver toda e qualquer questão que chega para ele. Talvez você não saiba, mas é frequentemente elogiado nos grupos de alunos da engenharia. Obrigada por tornar a graduação mais fácil e menos burocrática. Apesar de termos tido poucos contatos pessoais, você foi e está sendo essencial para tornar a jornada mais leve para muitos de nós.

RESUMO

A fiscalização de infraestruturas críticas, a exemplo de barragens e obras de arte especiais, traz o desafio de garantir a segurança dos profissionais em campo sem comprometer a precisão dos diagnósticos em áreas de difícil acesso. Para superar essas limitações, este estudo analisa o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) como ferramentas estratégicas na Gestão de Riscos da Engenharia Civil. Trata-se de uma pesquisa de natureza exclusivamente bibliográfica e documental, que compara as vistorias visuais tradicionais com o mapeamento aerofotogramétrico. O levantamento engloba a análise das legislações aeroespaciais e de segurança vigentes, além da avaliação forense de casos históricos de colapso. A revisão da literatura evidencia que a tecnologia não substitui a expertise do inspetor humano, mas atua de forma complementar como uma ferramenta de varredura prévia e suporte diagnóstico detalhado. Com base nessa dinâmica, este estudo propõe teoricamente a adoção de um "Modelo Híbrido de Fiscalização". Nessa abordagem, o drone, equipado com sensores específicos, realiza o mapeamento preditivo para rastrear anomalias em estágio inicial, enquanto a equipe de engenharia é acionada a campo de forma direcionada para validar os pontos críticos identificados, mitigando a exposição ao perigo e otimizando a logística. Conclui-se que a integração dos dados aéreos com modelos BIM e Gêmeos Digitais impulsiona a transição para a Gestão de Ativos 4.0, apontando caminhos para um monitoramento mais preditivo, transparente e fundamentado em históricos auditáveis.

Palavras-chave: Engenharia Civil. Gestão de Ativos 4.0. Gestão de Riscos. Infraestruturas Críticas. VANT.

ABSTRACT

The inspection of critical infrastructures, such as dams and special engineering structures, brings the challenge of ensuring the safety of field professionals without compromising the accuracy of diagnoses in hard-to-reach areas. To overcome these limitations, this study analyzes the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) as strategic tools in Risk Management within Civil Engineering. This is an exclusively bibliographic and documentary research that compares traditional visual inspections with aerophotogrammetric mapping. The survey encompasses the analysis of current aerospace and safety legislation, as well as the forensic evaluation of historical collapse cases. The literature review shows that the technology does not replace the expertise of the human inspector, but acts in a complementary way as a preliminary scanning tool and detailed diagnostic support. Based on this dynamic, this study theoretically proposes the adoption of a "Hybrid Monitoring Model". In this approach, the drone, equipped with specific sensors, performs predictive mapping to track anomalies in their early stages, while the engineering team is deployed to the field in a targeted manner to validate the identified critical points, mitigating exposure to danger and optimizing logistics. It is concluded that integrating aerial data with BIM models and Digital Twins drives the transition to Asset Management 4.0, pointing towards a more predictive and transparent monitoring system based on auditable records.

Keywords: Asset Management 4.0. Civil Production Engineering. Critical Infrastructure. Risk Management. UAV.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Lei de evolução de custos (Lei de Sitter) nas fases de vida útil da estrutura. ..19
Figura 2 - Principais anomalias em estruturas de terra e concreto. 21
Figura 3 - Destruição de vegetação ciliar, incluindo áreas de preservação permanente. 23
Figura 4 - Comparativo da região da Mina Córrego do Feijão (a) antes e (b) após o rompimento. 25
Figura 5 - Interdição e danos estruturais no viaduto da Marginal Pinheiros em 2018. ..26
Figura 6 - Fluxograma de sincronização de dados: do ativo físico ao Gêmeo Digital......29
Figura 7 - Aplicação de ortomosaico e fotografias digitais na identificação de manifestações patológicas. 32
Figura 8 - Imagens de sensoriamento remoto de alta resolução de taludes de barragem capturadas por VANT......36
Figura 9 -VANT equipado com câmera térmica e termograma identificando anomalias na estrutura......37
Figura 10 - Nuvem de pontos e modelo geométrico gerado a partir de varredura LiDAR. 38
Figura 11 - O Tripé Regulatório para Operação de Drones no Brasil. 39
Figura 12 – Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa......45
Figura 13 - Eixos Analíticos da Engenharia Civil Aplicados ao Monitoramento por VANT......47
Figura 14 - Planejamento espacial autônomo (malha de voo) para captura fotogramétrica ao redor da infraestrutura. 54
Figura 15 – Macrofluxo Operacional: Diretrizes para Inspeção de Infraestruturas com VANTs. 56

LISTA DEQUADROS

Quadro 1 - Comparativo de estratégias de manutenção. 18
Quadro 2 - Níveis de maturidade tecnológica e seu impacto na gestão de riscos. 29
Quadro 3 - Progressão tecnológica e impactos nas estratégias de manutenção ao longo das revoluções industriais. 31
Quadro 4 - Comparativo metodológico: Inspeção Tradicional vs. Gestão de Ativos 4.0. 33
Quadro 5 - Principais produtos da fotogrametria aérea para monitoramento. 38
Quadro 6 – Matriz de Transição: Inspeção Tradicional vs. Modelo Híbrido. 50
Quadro 7 – Matriz de Resposta Tecnológica aos Casos de Falha. 52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANM	Agência Nacional de Mineração
BIM	Building InformationModeling (Modelagem da Informação da Construção)
CAD	Computer-Aided Design (Desenho Assistido por Computador)
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CAPEX	Capital Expenditure (Despesas de Capital / Investimento em Bens)
CBPE	Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas
CIMNE	Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CRI	Categoria de Risco
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DPA	Dano Potencial Associado
FRZ	FlightRestriction Zone (Zona de Restrição de Voo)
GCP	Ground Control Points (Pontos de Controle em Solo)
GISTM	Global Industry Standard onTailings Management (Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos)
GNSS	Global NavigationSatellite System (Sistema Global de Navegação por Satélite)
GPS	Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global)
GSD	Ground Sampling Distance (Distância de Amostragem do Solo)
IA	Inteligência Artificial
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ICA	Instrução do Comando da Aeronáutica
IoT	Internet of Things (Internet das Coisas)
LiDAR	Light DetectionandRanging (Detecção e Medição de Distância por Luz)
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
MPF	Ministério Público Federal
OAE	Obras de Arte Especiais
OPEX	OperationalExpenditure (Despesas Operacionais)
PAEBM	Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração

PGR	Plano de Gestão de Riscos
PMD	Peso Máximo de Decolagem
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
POP	Procedimento Operacional Padrão
PPK	Post-ProcessedKinematic (Cinemática Pós-Processada)
PSB	Plano de Segurança de Barragem
RBAC-E	Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial
RETA	Responsabilidade do Explorador e Transportador Aéreo (Seguro)
RGB	Red, Green, Blue (Vermelho, Verde, Azul - Sistema de Cores Visíveis)
ROI	Retorno sobre o Investimento
RTH	ReturnTo Home (Retorno ao Ponto de Partida)
RTK	Real Time Kinematic (Posicionamento Cinemático em Tempo Real)
SARPAS	Solicitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas
SciELO	ScientificElectronic Library Online
SfM	Structurefrom Motion (Estrutura a partir do Movimento)
SISANT	Sistema de Aeronaves Não Tripuladas
SISCEAB	Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
TQM	Total Quality Management (Gestão da Qualidade Total)
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VLOS	Visual LineofSight (Linha de Visada Visual)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
1.1 OBJETIVOS 14
1.1.1 Objetivo geral 14
1.1.2 Objetivos específicos 15
1.2 JUSTIFICATIVA 15
1.3 RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA 16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18
2.1 GESTÃO DE RISCOS E MANUTENÇÃO NA ENGENHARIA CIVIL 18
2.2 SEGURANÇA DE INFRAESTRUTURAS CRÍTICAS E O PANORAMA DAS BARRAGENS NO BRASIL 19
2.2.1 Estudos de caso: os desafios das infraestruturas críticas 22
2.2.1.1 Barragem de Fundão (Mariana/MG, 2015) 22
2.2.1.2 Barragem da Mina Córrego do Feijão (Brumadinho/MG, 2019) 24
2.2.1.3 Viaduto da Marginal Pinheiros (São Paulo/SP, 2018) 26
2.3 GÊMEOS DIGITAIS (DIGITAL TWINS) E INTEGRAÇÃO BIM NA INSPEÇÃO DE ATIVOS 27
2.3.1 A transformação dos dados de campo: modelagem BIM e Gêmeos Digitais 28
2.3.2 Gestão de ativos 4.0 e a rastreabilidade de patologias 30
2.4 VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS NA ENGENHARIA 33
2.4.1 Tecnologias de sensoriamento e produtos aerofotogramétricos 35
2.5 NORMATIZAÇÃO E SEGURANÇA OPERACIONAL DO ESPAÇO AÉREO 39
3 METODOLOGIA DA PESQUISA 43
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA 43
3.2 PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS 44
3.3 ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO 44
3.4 MÉTODO DE ANÁLISE DOS RESULTADOS 46
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 49
4.1 EFICIÊNCIA LOGÍSTICA E OPERACIONAL DO MODELO HÍBRIDO DE INSPEÇÃO 49
4.2 ENGENHARIA DIAGNÓSTICA APLICADA AOS CASOS DE FALHA: RESPOSTAS TECNOLÓGICAS 51
4.3 DIRETRIZES OPERACIONAIS PARA INSPEÇÃO COM VANTs 52

5 CONCLUSÃO **57**
5.1 CUMPRIMENTO DOS OBJETIVOS 57
5.2 O IMPACTO NA ENGENHARIA CIVIL 58
5.3 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 58
REFERÊNCIAS **60**

1 INTRODUÇÃO[1]

A segurança de grandes infraestruturas no Brasil, englobando desde pontes, viadutos e plantas industriais até barragens de rejeitos e de acumulação de água, tornou-se um dos temas mais críticos da engenharia moderna. O país possui hoje 28.085 barragens cadastradas no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), conforme balanço da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2025). Muitas dessas, assim como outras obras críticas, operam há décadas sob regimes de carga que nem sempre acompanharam o avanço das técnicas de monitoramento. Diante disso, o elevado número de barragens classificadas com alto Dano Potencial Associado (DPA), que reflete a gravidade dos impactos em caso de rompimento, e Categoria de Risco (CRI), que indica a capacidade de falha, exige um rigor de fiscalização constante (ANA, 2025). O colapso ou falha de estruturas desse porte não representa apenas uma falha técnica, mas pode resultar em desastres com severos impactos humanos, sociais e ambientais.

Historicamente, o monitoramento dessas áreas depende de instrumentação local, como marcos superficiais topográficos, piezômetros e medidores de vazão, e de vistorias visuais periódicas realizadas por geólogos e engenheiros. O problema é que essas inspeções convencionais podem ser demoradas, por vezes subjetivas e fortemente limitadas pela dificuldade de acesso físico a certas regiões da estrutura, como destacam Funahashi Júnior *et al*. (2024). Em um cenário de risco iminente, a detecção precoce de anomalias é o fator que separa a prevenção da tragédia.

A Engenharia Civil entra com foco na gestão de riscos e na continuidade operacional, alinhando-se tanto a normativas industriais de excelência quanto às exigências da Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 14.066/2020 (BRASIL, 2020)). Para Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018), uma operação resiliente e confiável é aquela capaz de identificar prováveis fontes de risco, prevenir falhas e minimizar seus efeitos. No ambiente industrial e de infraestrutura, onde a paralisação para manutenção corretiva custa milhões, a antecipação de falhas por meio de dados precisos é um fator importante para a viabilidade econômica do empreendimento.

---

[1]Cumpre ressaltar, em observância aos princípios de transparência e ética na pesquisa científica, que as etapas de revisão gramatical, refinamento sintático e estruturação visual deste documento contaram com o suporte de ferramentas baseadas em Inteligência Artificial Generativa, especificamente o Google e, o Google Gemini e o OpenAI ChatGPT. Enfatiza-se, contudo, que a definição do problema de pesquisa, a curadoria das fontes bibliográficas e documentais, a análise crítica dos resultados e a autoria intelectual das diretrizes propostas são de inteira e exclusiva responsabilidade da autora.

A introdução dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), ou drones, mudou o patamar dessa vigilância. Em vez de enviar técnicos para escalar taludes instáveis, estruturas de pontes muito elevadas ou navegar em áreas de rejeitos, o drone possibilita mapeamentos precisos. Como apontam Funahashi Júnior *et al.* (2024), o uso de drones associado ao processamento de imagens permite identificar fissuras submilimétricas e anomalias estruturais de forma rápida e segura. Além disso, a capacidade de gerar ortomosaicos e modelos 3D permite comparar o estado estrutural ao longo do tempo, criando uma linha de evolução visual importante para auditorias e monitoramento contínuo.

Operar drones em ambientes industriais complexos traz desafios logísticos. É preciso lidar com interferências eletromagnéticas, ventos em grandes altitudes e uma regulação rigorosa estabelecida pelaAgência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), especialmente em áreas de exclusão aérea próximas a infraestruturas críticas. Do ponto de vista da gestão, a implementação dessa tecnologia exige mais do que a compra do equipamento:requer uma equipe bem treinada e um fluxo de processamento de dados robusto, que transforme as imagens em relatórios técnicos para subsidiar a tomada de decisão.

Diante da necessidade de aumentar a resiliência e fiscalização das infraestruturas, este trabalho analisa como o uso de drones pode ser integrado aos planos de segurança de barragens e instalações críticas equivalentes. O foco recai não apenas na ferramenta tecnológica em si, mas em como ela auxilia a Engenharia Civil na mitigação de desastres, atuando como um recurso que complementa, e não substitui, a inspeção tradicional.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho busca analisar como a integração de VANTs potencializa o monitoramento de estruturas críticas e áreas de risco, auxiliando na tomada de decisão estratégica e contribuindo para a mitigação de desastres industriais, ambientais e humanos.

1.1.1 Objetivo geral

Analisar, com base na literatura, as contribuições do uso de VANTs no monitoramento de barragens e infraestruturas críticas, buscando compreender como essa tecnologia atua na eficiência operacional, na otimização de recursos e na robustez da gestão de riscos sob a ótica da Engenharia Civil.

1.1.2 Objetivos específicos

Para viabilizar o alcance do objetivo geral, a pesquisa foi estruturada a partir de metas específicas que conectam os requisitos técnicos e normativos do setor ao potencial de aplicação dos VANTs na rotina de inspeções, conforme detalhado a seguir:

- Contextualizar o panorama normativo e técnico do monitoramento de barragens no Brasil, identificando os gargalos logísticos e de segurança dos métodos de inspeção convencionais;
- Analisar a capacidade do sensoriamento remoto aéreo na detecção de anomalias estruturais, correlacionando-as aos requisitos técnicos da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB);
- Verificar, com base na literatura, os impactos de produtividade e condições de segurança do trabalho proporcionados pela substituição ou complementação de métodos de acesso tradicionais pela operação de drones;
- Analisar o potencial de integração de modelos 3D e ortomosaicos georreferenciados aos sistemas de gestão de ativos e planos de manutenção preditiva;
- Propor um fluxo de diretrizes para a estruturação do monitoramento aéreo, considerando as variáveis técnicas, climáticas e regulatórias pertinentes ao ambiente industrial.

1.2 JUSTIFICATIVA

O monitoramento de infraestruturas críticas e áreas de risco geológico é uma medida essencial para a segurança pública e para a continuidade operacional de ativos de engenharia. No Brasil, o histórico de colapsos em barragens de rejeitos evidencia que falhas ou atrasos no acompanhamento dessas estruturas resultam em perdas humanas, sociais e ambientais irreversíveis. Portanto, a garantia da integridade estrutural desses ativos é um pilar estratégico de gestão de riscos e governança socioambiental.

Os métodos tradicionais de vistoria, como levantamentos topográficos convencionais e inspeções visuais em taludes íngremes ou cristas, esbarram em severas limitações logísticas e operacionais. Realizar a avaliação de manifestações patológicas exclusivamente por inspeção visual e com instrumentos manuais pode ser um processo lento, oneroso e, por vezes, subjetivo. Além disso, tais métodos exigem a mobilização de grandes equipes, expõem os profissionais a riscos iminentes de queda e soterramento, e frequentemente demandam paradas operacionais complexas que impactam a produtividade.

Essa abordagem essencialmente reativa ou de baixa periodicidade conflita com as demandas modernas da Engenharia de Segurança, que preconiza a eficiência e a mitigação antecipada de falhas. De acordo com Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018), o custo de corrigir uma falha operacional de forma emergencial supera amplamente o de intervenções planejadas, tornando a antecipação de problemas uma estratégia importante na otimização de recursos. Transpondo esse princípio para a segurança de barragens, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2025) destaca que o monitoramento contínuo e ágil é uma fonte vital de informações, garantindo respostas tempestivas e a transição decisiva para um modelo preditivo de manutenção.

A utilização de VANTs justifica-se como uma alternativa tecnológica de alto rendimento e aderente às necessidades de otimização de processos. A coleta de dados aéreos favorece reduções significativas de custo e de tempo, permitindo aumentar a frequência das medições se comparada às vistorias manuais (Ballesteros; Rodríguez, 2020). Voando a distâncias seguras da estrutura, o uso de drones reduz a exposição direta dos trabalhadores ao risco e permite capturar imagens digitais em alta precisão, capazes de subsidiar o mapeamento de quadros fissuratórios e anomalias submilimétricas, antecipando o diagnóstico antes que os danos se agravem.

Esta pesquisa alinha as inovações em inspeção remota com as exigências da Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 14.066/2020 (BRASIL, 2020)), cujo objetivo central é fomentar a prevenção e a mitigação de desastres. O estudo propõe-se a responder à seguinte questão de pesquisa: Quais são os ganhos operacionais e as diretrizes necessárias para a viabilização de VANTs no monitoramento estrutural e na mitigação de riscos de barragens na perspectiva da Engenharia Civil?

1.3 RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Este trabalho possui uma natureza estritamente teórica, estruturando-se como uma pesquisa bibliográfica e documental. Sendo assim, a principal limitação do estudo é a ausência de coleta de dados primários em campo. Em nenhum momento houve a mobilização de equipes, a pilotagem física de aeronaves remotas ou a realização de testes práticos em barragens para atestar o funcionamento das tecnologias propostas. Todas as afirmações relacionadas à capacidade técnica dos VANTs e à precisão da detecção de patologias apoiam-se em publicações de autores da área, na revisão de estudos de caso e em relatórios oficiais da

engenharia. O foco da pesquisa é compreender e discutir as possibilidades da ferramenta apontadas pela literatura, e não validar o seu uso por meio de experimentos próprios.

Uma segunda restrição importante diz respeito à avaliação econômica da manutenção. Embora o texto destaque a redução de custos operacionais e o ganho logístico como grandes vantagens na adoção do mapeamento aéreo, essas constatações são teóricas. O estudo não elaborou planilhas orçamentárias de uma empresa real, não fez cotações de equipamentos no mercado e nem calculou métricas financeiras, como o Retorno sobre o Investimento (ROI) da operação. As discussões sobre o impacto financeiro refletem o consenso bibliográfico da área, servindo como uma orientação gerencial para a Engenharia Civil, mas não se configuram como um estudo de viabilidade econômica exato.

Adicionalmente, as diretrizes operacionais e o fluxo de inspeção propostos foram desenhados com exclusividade para o cenário brasileiro. Como as leis de navegação e de segurança estrutural variam ao redor do mundo, as recomendações deste TCC limitam-se ao que é exigido pela PNSB e pelas normativas de aviação vigentes no Brasil. Todo o planejamento de voo e mitigação de riscos sugerido fundamenta-se estritamente nas regras da ANAC e do DECEA, não sendo aplicável de forma direta a outras jurisdições internacionais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta o embasamento teórico necessário para a compreensão dos conceitos que fundamentam a pesquisa. Serão abordados os princípios da gestão de riscos na engenharia, o panorama de segurança de infraestruturas críticas e o papel tecnológico dos drones como ferramenta de monitoramento e inspeção.

2.1 GESTÃO DE RISCOS E MANUTENÇÃO NA ENGENHARIA CIVIL

A gestão de ativos em infraestruturas de grande porte aponta para a necessidade de substituir as abordagens puramente reativas por modelos fundamentados na antecipação de falhas. Na Engenharia Civil, o foco recai sobre a confiabilidade dos sistemas. Conforme definem Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018), a confiabilidade é a probabilidade de um processo, produto ou serviço continuar a operar conforme o planejado ao longo do tempo. No caso de barragens e plantas industriais, qualquer desvio nessa probabilidade pode representar um risco catastrófico.

A manutenção, portanto, não é um gasto operacional, mas sim um investimento em segurança. Segundo os preceitos da engenharia de manutenção, consolidados por autores como Kardec e Nascif (2013), essas estratégias evoluíram para englobar vertentes operacionais, conforme ilustrado no Quadro 1.

Quadro 1 - Comparativo de estratégias de manutenção.

Categoria de Manutenção	Foco Operacional	Impacto na Gestão de Riscos
Corretiva	Atuação após a ocorrência da falha ou colapso.	Alto risco; custos elevados com reparos emergenciais.
Preventiva	Intervenções baseadas em cronogramas fixos de tempo.	Risco moderado; pode gerar paradas desnecessárias.
Preditiva	Monitoramento contínuo do estado real do ativo.	Baixo risco; foco na detecção precoce de anomalias.

Fonte: Adaptado de Kardec e Nascif (2013).

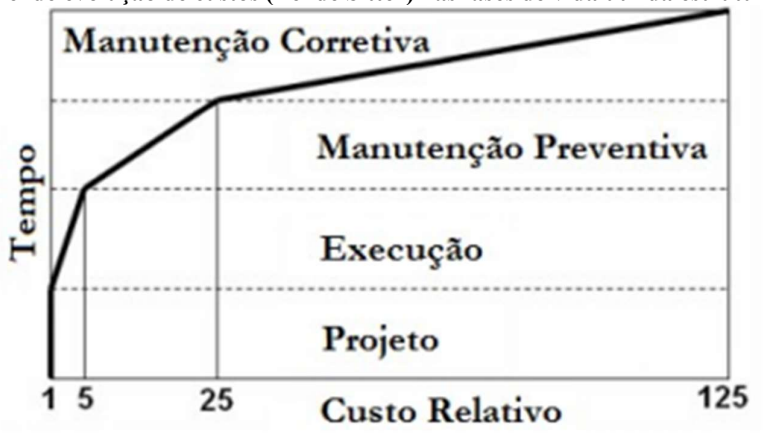
Diante desses diferentes cenários de manutenção, o diagnóstico precoce das patologias estruturais consolida-se como etapa primordial para uma boa gestão de riscos. Nesse contexto, Lichtenstein (1985) ressalta que a avaliação de falhas não deve limitar-se à constatação de sintomas aparentes, exigindo uma investigação aprofundada de suas causas raízes para garantir a eficácia das intervenções e a segurança contínua da estrutura.

Para a gestão de operações, a utilização de drones para alimentar a manutenção preditiva é uma estratégia de otimização de processos. Ao conferir maior agilidade e precisão à coleta de dados, a tecnologia reduz a subjetividade humana e amplia significativamente a capacidade de amostragem da inspeção. Segundo a norma da Associação Brasileira de

Normas Técnicas (ABNT) NBR ISO 31000 (ABNT, 2018), o processo de gestão de riscos deve ser dinâmico e iterativo. Isso significa que o monitoramento não pode ser um evento anual isolado, mas sim um fluxo contínuo de dados que permita ao gestor antecipar cenários de ruptura, especialmente em estruturas onde o "Dano Potencial Associado" é elevado.

A urgência na transição para métodos preditivos é justificada economicamente pela "Lei de Evolução de Custos" ou "Lei de Sitter" (Sitter, 1984). Segundo esse princípio, os custos de intervenção e reparo estrutural crescem em uma progressão geométrica de razão cinco à medida que se avança das fases de projeto e prevenção para a fase de manutenção corretiva. Conforme ilustra a Figura 1, a morosidade no diagnóstico torna as obras de recuperação exponencialmente mais complexas e onerosas, reforçando a premissa de que a detecção precoce de anomalias é a estratégia mais econômica para a gestão de ativos.

Figura 1- Lei de evolução de custos (Lei de Sitter) nas fases de vida útil da estrutura.



Fonte: Sitter (1984).

Portanto, a interpretação da progressão geométrica proposta por Sitter (1984) evidencia que a viabilidade econômica de uma infraestrutura depende diretamente da agilidade no diagnóstico. É justamente para evitar a escalada exponencial desses custos corretivos que a adoção de tecnologias de monitoramento dinâmicas se torna uma exigência financeira.

2.2 SEGURANÇA DE INFRAESTRUTURAS CRÍTICAS E O PANORAMA DAS BARRAGENS NO BRASIL

A segurança do setor de mineração é regida por um rigoroso arcabouço normativo, consolidado pela Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334/2010, atualizada pela Lei nº 14.066/2020) (BRASIL, 2010; BRASIL, 2020). A legislação define a responsabilidade exclusiva do empreendedor sobre a integridade da obra, exigindo a

atualização contínua do Plano de Segurança de Barragem (PSB) e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM).

De forma complementar, e para assegurar o rigor dessa gestão, as estruturas são classificadas com base na Resolução CNRH nº 241 (BRASIL, 2024). O normativo utiliza a Categoria de Risco (CRI), para avaliar as características técnicas e o estado de conservação, e o Dano Potencial Associado (DPA), focado nas perdas humanas, socioeconômicas e ambientais em caso de eventual colapso.

Para atestar na prática que a estrutura se mantém dentro dos limites seguros exigidos por essa classificação, a rotina operacional demanda um ciclo contínuo de monitoramento geotécnico. Conforme as exigências da Resolução ANM nº 95/2022 (BRASIL, 2022), o empreendedor é obrigado a realizar Inspeções de Segurança Regulares e Especiais, que culminam na emissão periódica da Declaração de Condição de Estabilidade (DCE). Todo esse escopo de fiscalização e a instrumentação residente devem seguir rigorosamente os parâmetros de projeto definidos pela ABNT NBR 13028 (ABNT, 2017), garantindo a rastreabilidade e a conformidade necessárias para a prevenção ativa de desastres.

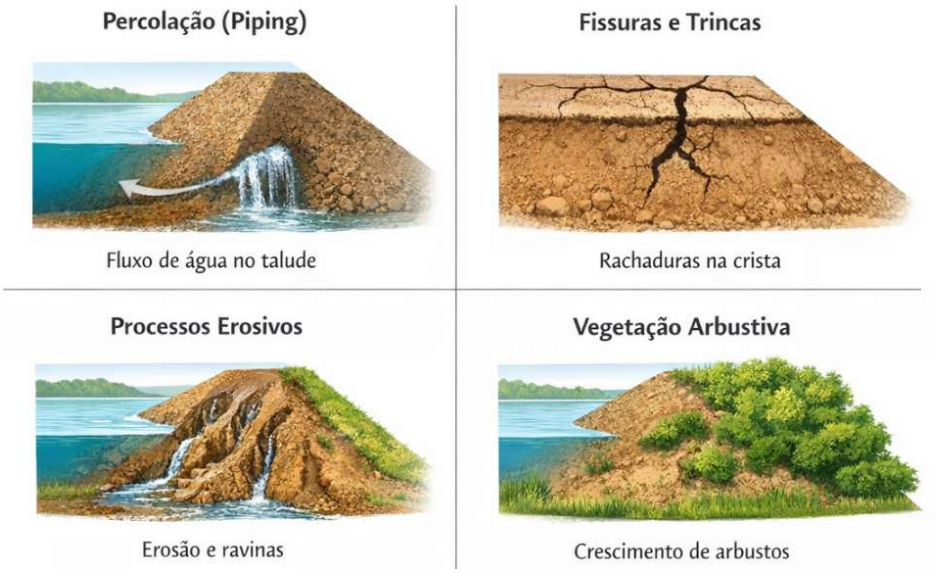
Nesse contexto, os autores Tolêdo e Pinheiro (2022) destacam que a identificação e o diagnóstico profissional contínuo de manifestações patológicas são essenciais para complementar a classificação de risco. A detecção precoce de anomalias permite a adoção de medidas mitigatórias que evitam o colapso, uma estratégia de monitoramento indispensável para garantir a estabilidade e a segurança de barramentos que apresentam alto DPA.

Além do rigor nas inspeções visuais, o atual panorama regulatório brasileiro passou a exigir uma postura de fiscalização ativa e preditiva. Conforme as diretrizes da Resolução da Agência Nacional de Mineração (ANM) nº 95/2022 (BRASIL, 2022), o empreendedor responsável por estruturas classificadas com DPA alto é obrigado a implementar sistemas de monitoramento automatizados, com acompanhamento em tempo real e em período integral. Essa obrigatoriedade legal evidencia a urgência em superar as limitações das vistorias convencionais, integrando tecnologias avançadas que garantam a rastreabilidade e a confiabilidade dos dados da barragem.

O agravamento do nível de risco de grandes obras decorre, frequentemente, do desenvolvimento de patologias que afetam diretamente a integridade da estrutura, tendo origem em fenômenos geotécnicos ou na deterioração da própria engenharia. O rastreamento contínuo dessas anomalias é um dos fatores que auxiliam para a efetividade dos planos de

manutenção. A Figura 2 detalha os processos patológicos mais recorrentes e que demandam atenção contínua das equipes de inspeção.

Figura 2 - Principais anomalias em estruturas de terra e concreto.



Fonte: Adaptado de ANA (2025).

Conforme detalha o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens do Ministério da Integração Nacional (BRASIL, 2002), a manifestação visual dessas patologias atua como um sintoma superficial de processos de degradação interna. O documento adverte que fissuras podem sinalizar recalques diferenciais e criar caminhos para a água, enquanto afundamentos podem evidenciar o processo de erosão interna (*piping*). Caso não sejam detectadas precocemente durante a inspeção, essas anomalias podem evoluir de forma silenciosa e comprometer a estabilidade global da estrutura.

A inspeção visual tradicional, embora obrigatória, apresenta limitações severas em estruturas de grande extensão ou com taludes íngremes. De acordo com o Relatório de Segurança de Barragens da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (BRASIL, 2025), a eficácia desse procedimento é sensivelmente afetada pelas condições de acessibilidade e pela visibilidade do inspetor no local. O documento ressalta que, em cenários de vegetação densa ou taludes de inclinação acentuada, anomalias críticas podem não ser identificadas, o que compromete a integridade da análise de segurança global da estrutura.

O monitoramento técnico evoluiu para a integração de dados multissensoriais. A transição para o uso de tecnologias remotas justifica-se pela necessidade de analisar a estrutura em sua totalidade, permitindo que o responsável gerencie o ativo com uma base maior de evidências digitais auditáveis.

2.2.1 Estudos de caso: os desafios das infraestruturas críticas

A análise histórica de desastres em infraestruturas brasileiras demonstra que, mesmo em estruturas submetidas a rotinas de inspeção e auditorias, as limitações técnicas dos métodos de avaliação convencionais na detecção precoce de patologias complexas foram fatores importantes para o colapso de estruturas de grande porte. Abaixo, destacam-se casos em que a incapacidade tecnológica de identificar anomalias internas ou evoluções de falhas em locais de difícil acesso, antes que atingissem um estado crítico de ruptura, resultou em consequências catastróficas.

2.2.1.1 Barragem de Fundão (Mariana/MG, 2015)

O colapso da barragem de Fundão, ocorrido em 5 de novembro de 2015, no município de Mariana (MG), representa um dos maiores desastres socioambientais do Brasil, resultando em 19 óbitos e extensa poluição hídrica que atingiu a Bacia do Rio Doce (Botelho *et al.*, 2021). Sob a ótica geotécnica, a ruptura iniciou-se no encosto esquerdo da estrutura por meio de um processo de liquefação estática, fenômeno no qual os rejeitos saturados perdem abruptamente sua resistência ao cisalhamento e fluem como um líquido pesado (Morgenstern *et al.*, 2016).

As investigações periciais demonstraram que a tragédia foi consequência de uma sucessão de decisões organizacionais, falhas construtivas e, sobretudo, graves deficiências de monitoramento. Segundo o painel de especialistas, um recuo no eixo da barragem permitiu que lamas (rejeitos finos e de baixa resistência) avançassem para áreas não previstas, ficando sob o aterro e sujeitas à carga vertical dos alteamentos subsequentes (Morgenstern *et al.*, 2016). Aliado a isso, Grossi e Souza (2018) constataram que a barragem operava sob um sistema gerencial "às cegas", caracterizado pela insuficiência crônica no monitoramento de sua geometria e da poropressão do dique principal, o que mascarou o comportamento frágil do maciço.

Figura 3 - Destruição de vegetação ciliar, incluindo áreas de preservação permanente.



Fonte: IBAMA (2015).

Além das alterações de projeto, relatórios de auditoria evidenciaram uma manutenção precária da estrutura ao longo de sua operação. Botelho *et al.* (2021) destacam a presença frequente de erosões nos taludes, vegetação arbustiva, canaletas trincadas ou assoreadas e falhas na cobertura vegetal. Essas anomalias comprometeram severamente a drenagem superficial e interna, permitindo a infiltração e o acúmulo de água de chuva nos diques, o que elevou o nível de saturação da estrutura a um ponto crítico antes do colapso (Botelho *et al.*, 2021).

O desastre de Mariana ilustra a quebra do ciclo de manutenção preditiva e a ineficiência das inspeções visuais convencionais em ativos de grande extensão territorial. É exatamente na mitigação dessas vulnerabilidades operacionais que a adoção de VANTs representa um avanço significativo para as rotinas de inspeção. A utilização de drones equipados com sensores *Red, Green, Blue* (RGB) de ultra-alta resolução permitiria o mapeamento rápido e frequente de toda a face da barragem, identificando precocemente as erosões, a degradação estrutural das canaletas e o crescimento de vegetação inadequada relatados por Botelho *et al.* (2021).

A integração da aerofotogrametria com a modelagem de Gêmeos Digitais (*Digital Twins*) - tecnologia que será aprofundada na Seção 3.3 deste trabalho - preencheria a lacuna do monitoramento 'às cegas' apontada pela perícia forense (Grossi; Souza, 2018). A geração contínua de ortomosaicos e Modelos Digitais de Superfície (MDS) garantiria a rastreabilidade milimétrica da geometria da barragem ao longo do tempo, evidenciando as deformações superficiais atípicas geradas pelo recuo do eixo.

Em paralelo a essa análise geométrica, a aplicação de sensores térmicos aéreos teria a capacidade de mapear o balanço hídrico da estrutura. Essa tecnologia pode indicar anomalias térmicas compatíveis com variações de umidade decorrentes das falhas de drenagem, fornecendo aos gestores dados quantitativos, visuais e em tempo real para a tomada de decisão preventiva.

2.2.1.2 Barragem da Mina Córrego do Feijão (Brumadinho/MG, 2019)

O rompimento da barragem B1 da Mina Córrego do Feijão, ocorrido em 25 de janeiro de 2019, no município de Brumadinho (MG), representa um dos eventos mais críticos da engenharia forense mundial devido à sua natureza abrupta e à falha global dos sistemas de alerta (Santos *et al.*, 2021). O colapso, que resultou em 270 fatalidades, ocorreu por liquefação estática, um fenômeno no qual rejeitos saturados, pesados e com comportamento extremamente frágil perdem subitamente sua resistência ao cisalhamento e escoam como um líquido denso (Botelho *et al.*, 2021).

No meio acadêmico e pericial, os gatilhos exatos da liquefação em Brumadinho ainda são objeto de intenso debate. O painel internacional de especialistas contratado pela mineradora apontou que a ruptura foi engatilhada por uma combinação de *creep* (deformações específicas contínuas no interior do maciço sob tensão constante) e perda de sucção devido à intensa precipitação no final de 2018 (Robertson *et al.*, 2019). Em contrapartida, estudos de modelagem computacional desenvolvidos pelo Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia (CIMNE), a pedido do Ministério Público Federal, descartaram o papel relevante do *creep* ou de abalos sísmicos, atribuindo a falha primordialmente ao comportamento inerentemente frágil não drenado do solo associado ao aumento da poropressão (MPF, 2021).

Apesar das divergências forenses sobre o gatilho micromecânico exato, há um consenso técnico absoluto sobre a incapacidade dos instrumentos convencionais (radares terrestres, inclinômetros e piezômetros) e das inspeções visuais em fornecerem precursores e alertas prévios do colapso (Santos *et al.*, 2021). O painel de especialistas concluiu que as deformações que antecederam a ruptura eram milimétricas (inferiores a 36 mm/ano), lentas e invisíveis a olho nu (Robertson *et al.*, 2019). Além disso, o monitoramento por radar terrestre foi severamente prejudicado pela interferência da vegetação na face da barragem, gerando "ruídos" que mascararam a detecção de deslocamentos reais, os quais só puderam ser

confirmados retrospectivamente por análises interferométricas de satélite (Barreto *et al.*, 2023).

Figura 4 - Comparativo da região da Mina Córrego do Feijão (a) antes e (b) após o rompimento.



Fonte: Altino e Azevedo (2024).

A tragédia de Brumadinho sugere que confiar exclusivamente em métodos de controle visuais e presenciais é insuficiente. Portanto, a tecnologia dos VANTs torna-se um suporte essencial para a segurança técnica das barragens.A aplicação de sensores *Light Detection and Ranging* (LiDAR) embarcados em drones contorna a limitação dos radares de solo convencionais, tecnologia que será aprofundada na Seção 3.4.1 deste trabalho, pois seus pulsos a laser possuem a capacidade de atravessar a vegetação densa e mapear o terreno real (*bareearth*), permitindo a detecção dos abatimentos milimétricos com altíssima precisão geométrica. Simultaneamente, o uso aéreo de sensores térmicos (infravermelho) possibilita o mapeamento da estrutura, detectando alterações de umidade ao longo de toda a extensão do talude por meio da diferença de temperaturas superficiais (Robertson *et al*., 2019; Lee, 2025).

Para que o volume massivo de dados capturados pelo drone seja efetivamente convertido em inteligência preditiva, faz-se necessária a transição para plataformas de gestão, o que fornece a base para a construção de Gêmeos Digitais. Ao integrar informações térmicas e topográficas a esse modelo tridimensional dinâmico, torna-se possível acompanhar a evolução das patologias ao longo do tempo e apoiar decisões fundamentadas em evidências rastreáveis.

2.2.1.3 Viaduto da Marginal Pinheiros (São Paulo/SP, 2018)

As Obras de Arte Especiais (OAEs), categoria infraestrutural que abrange pontes e viadutos, constituem estruturas críticas submetidas a carregamentos dinâmicos contínuos e à severa agressividade ambiental ao longo de seu ciclo de vida operacional (Vale *et al.*, 2025). A degradação dessas estruturas, quando desacompanhada de políticas rigorosas de manutenção preventiva, culmina no desenvolvimento de manifestações patológicas severas, tais como fissuras de cisalhamento, corrosão de armaduras e deterioração mecânica dos elementos de transição de carga (Silva; Santos, 2019).

Por consequência, a falha na identificação precoce dessas anomalias eleva exponencialmente a probabilidade de ruptura. Esse cenário altera a gestão do ativo para um modelo estritamente corretivo e altamente oneroso.

O colapso estrutural de um viaduto da via expressa Marginal Pinheiros, ocorrido em São Paulo (SP) em novembro de 2018, é um estudo de caso relevante das limitações inerentes aos métodos de monitoramento convencionais. O incidente caracterizou-se pelo rompimento das vinculações de apoio, resultando no abatimento abrupto do tabuleiro em aproximadamente dois metros de desnível sobre a via férrea subjacente (Controladoria Geral do Município, 2020). Avaliações periciais indicaram que o colapso foi provocado pelo esmagamento e falha dos aparelhos de apoio, motivado pelo subdimensionamento das placas frente às deformações exigidas, aliado a falhas crônicas de impermeabilização que aceleraram a degradação sistêmica do concreto na região do apoio (AECweb, 2018; Silva, 2023).

Figura 5 - Interdição e danos estruturais no viaduto da Marginal Pinheiros em 2018.



Fonte: Tavares (2018).

O aspecto mais crítico deste evento é que o viaduto havia sido submetido a vistorias visuais de rotina meses antes do rompimento, sem que o risco iminente de colapso fosse diagnosticado. A avaliação precisa do intradosso (fundo do tabuleiro), dos pilares e dos dentes *gerber* impõe uma logística complexa, exigindo a interdição de tráfego e o uso de plataformas elevatórias, o que onera a operação e invariavelmente cria "pontos cegos" na fiscalização da estrutura (Sguissardi, 2019).

Para mitigar tais vulnerabilidades, a aplicação de VANTs apresenta-se como uma evolução metodológica relevante à manutenção preditiva. A utilização de aeronaves remotamente pilotadas, equipadas com sensores RGB de alta resolução, permite o acesso aéreo e seguro a áreas de confinamento, viabilizando o mapeamento detalhado de anomalias superficiais, como a perda de cobrimento do concreto e falhas de posicionamento nos aparelhos de apoio, com elevada eficiência temporal (Vale *et al.*, 2025). A adoção dessa tecnologia elimina os riscos de acidentes de trabalho em altura e interrupções logísticas, convertendo inspeções morosas em processos mais ágeis e otimizados.

2.3 GÊMEOS DIGITAIS (DIGITAL TWINS) E INTEGRAÇÃO BIM NA INSPEÇÃO DE ATIVOS

A evolução do monitoramento de infraestruturas críticas, especialmente nos setores de mineração e de grandes obras, converge atualmente para a forte integração entre a metodologia *Building Information Modeling* (BIM) e a consolidação dos Gêmeos Digitais. O BIM atua como o alicerce tecnológico dessa mudança, fornecendo um banco de dados inteligente onde cada componente da estrutura (taludes, vertedouros, pilares ou juntas) se torna um objeto paramétrico carregado de informações técnicas (Sacks *et al.*, 2018).

A estruturação de um Gêmeo Digital viabiliza-se exatamente quando esse modelo BIM passa a ser retroalimentado de forma contínua com os dados reais capturados em campo, como as nuvens de pontos, os ortomosaicos e as imagens térmicas geradas pelos VANTs. Diferente de uma maquete eletrônica estática ou de um simples modelo 3D visual para apresentação, um Gêmeo Digital é definido como uma réplica virtual dinâmica que mantém uma conexão persistente de dados com o ativo físico, refletindo o seu desgaste, o clima e o seu comportamento mecânico ao longo do tempo (Grieve, 2023).

A integração entre o BIM e os Gêmeos Digitais é o que converte o mapeamento com drones em uma ferramenta analítica avançada para a gestão. Essa união de tecnologias possibilita que as empresas saiam de uma cultura de manutenção reativa, onde o conserto só

acontece após a falha ou colapso, para atuar com uma manutenção preditiva e prescritiva, baseada na rastreabilidade exata das patologias e na simulação segura de cenários de risco.

2.3.1 A transformação dos dados de campo: modelagem BIM e Gêmeos Digitais

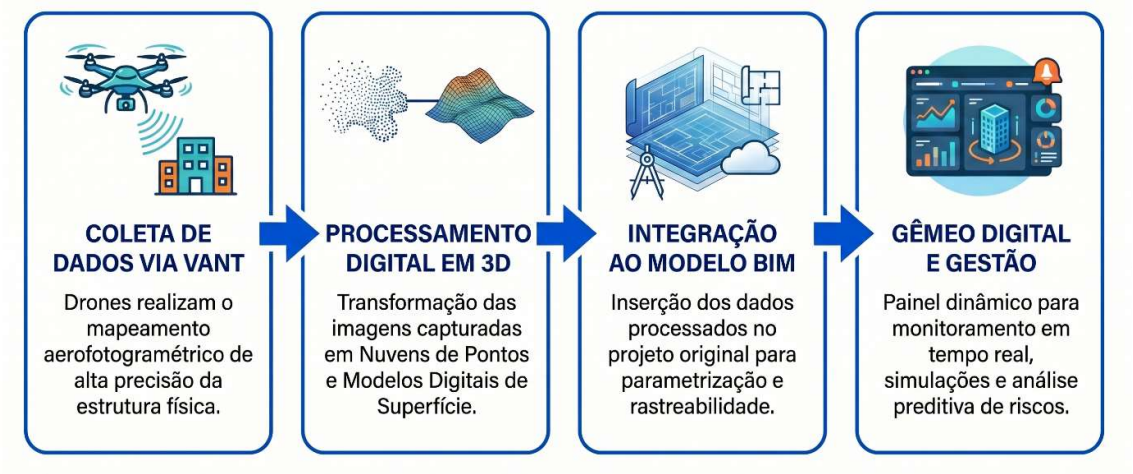
A aplicação de VANTs no monitoramento de infraestruturas gera um volume massivo de dados geoespaciais e visuais de alta resolução. A simples coleta dessas informações em campo não garante a mitigação de riscos se não houver um método estruturado para o seu processamento. Para que as nuvens de pontos e os ortomosaicos sejam efetivamente convertidos em inteligência preditiva, faz-se necessária a adoção de plataformas capazes de centralizar e analisar esses dados ao longo de todo o ciclo de vida da obra (Santos, 2021).

A metodologia BIM atua como o alicerce para a gestão da informação. O ambiente BIM favorece a consolidação de um modelo multidisciplinar, integrando a topografia capturada pelo drone com os dados originais de projeto, propriedades dos materiais e parâmetros da fundação (Vicentini; Silva, 2025). Quando essa modelagem é direcionada especificamente para o planejamento da manutenção e para a operação da estrutura, o processo atinge o nível de maturidade classificado na literatura técnica como "BIM 7D" (Galvão *et al.*, 2023).

A evolução natural dessa modelagem paramétrica consolida-se através dos Gêmeos Digitais. Enquanto um projeto em BIM convencional pode permanecer estático após a construção, o Gêmeo Digital atua como uma contraparte viva do ativo físico. Ele é caracterizado pela retroalimentação sistemática com dados reais coletados por VANTs e sensores geotécnicos, refletindo de forma fidedigna o desgaste temporal, os deslocamentos milimétricos e a resposta da estrutura aos eventos climáticos (Galvão *et al.*, 2023; Vicentini; Silva, 2025).

A Figura 6 sintetiza a lógica desse fluxo de integração tecnológica, demonstrando o caminho percorrido pelo dado desde a sua captura aerofotogramétrica até a sua conversão em um painel gerencial.

Figura 6 - Fluxograma de sincronização de dados: do ativo físico ao Gêmeo Digital.



Fonte: Elaborado pela autora com NotebookLM (2026).

A progressão entre os métodos de representação na engenharia também transformou a forma como as equipes se comunicam e avaliam os riscos. Em uma infraestrutura crítica, uma trinca grave não pode ser apenas um número anotado em uma prancheta de inspeção. As representações visuais assumiram esse papel integrador ao georreferenciar as manifestações patológicas no modelo da estrutura. Somada às fotografias originais e aos dados dos laudos técnicos, essa melhor visualização espacial reforça a confiabilidade do diagnóstico, auxiliando as equipes na avaliação assertiva dos pontos críticos.

O Quadro 2 ilustra as características e o impacto na segurança de cada um desses níveis de maturidade tecnológica.

Quadro 2 - Níveis de maturidade tecnológica e seu impacto na gestão de riscos.

Nível de Maturidade	Características Principais	Foco na Gestão de Riscos
1. Modelo 3D Clássico (CAD)	Representação puramente gráfica e geométrica do projeto. Não possui banco de dados integrado.	**Baixo.** Utilizado apenas para visualização do formato inicial da obra.
2. Modelo BIM Paramétrico	Geometria associada a especificações técnicas, materiais, custos e cronograma. Possui elevado volume de informações, porém de natureza predominantemente estática.	**Médio.** Contribui para a compatibilização de projetos e redução de erros de execução, mas não reflete as condições reais e atualizadas da estrutura em campo.
3. Gêmeo Digital (Digital Twins)	Modelo BIM dinâmico, continuamente atualizado e sincronizado com dados provenientes de VANTs, sensores geotécnicos e sistemas de monitoramento.	**Alto.** Permite monitoramento contínuo, simulação computacional de cenários de falha, emissão de alertas e planejamento preditivo de manutenção.

Fonte: Elaborado pela autora com NotebookLM (2026).

Do ponto de vista da gestão de ativos, a interoperabilidade entre a inspeção aérea e o Gêmeo Digital viabiliza a aplicação prática do *Structural Health Monitoring* (Monitoramento da Saúde Estrutural). O engenheiro civil adquire a capacidade não apenas de monitorar

anomalias precocemente, mas de realizar simulações computacionais de cenários críticos. É possível, por exemplo, avaliar virtualmente a resposta de uma barragem a volumes extremos de chuva e dimensionar com precisão os insumos necessários para uma manutenção antes mesmo do envio das equipes ao local (Galvão *et al.*, 2023).

Além dos ganhos operacionais de segurança e redução de custos, a adoção dessa arquitetura de monitoramento rastreável consolida-se como um bom requisito de governança. Atualmente, a manutenção contínua e embasada em dados fidedignos é a premissa tecnológica exigida para que as empresas de infraestrutura atendam a protocolos globais rigorosos, como o Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos (GISTM), elevando a confiabilidade das operações perante a sociedade e as agências reguladoras (Melo *et al.*, 2025; Vicentini; Silva, 2025).

2.3.2 Gestão de ativos 4.0 e a rastreabilidade de patologias

O advento da Indústria 4.0, frequentemente descrita na literatura como a Quarta Revolução Industrial, introduziu uma mudança na engenharia ao promover a integração contínua entre os ambientes físicos e cibernéticos. A digitalização dos processos manifesta-se através da incorporação de tecnologias como a Internet das Coisas (IoT), a Inteligência Artificial (IA) e, de maneira destacada, os Gêmeos Digitais, considerados um dos pilares mais promissores para a conectividade industrial atual (Galvão *et al.*, 2023). É exatamente essa infraestrutura tecnológica que fundamenta a transição da gestão convencional para a chamada Gestão de Ativos 4.0.

A evolução para esse modelo preditivo e digitalizado não ocorreu de forma abrupta, mas reflete o amadurecimento estratégico da engenharia ao longo das revoluções industriais. Segundo Santo (2025), a transição da Indústria 1.0 - caracterizada pela inspeção puramente visual e pela manutenção corretiva - para a Indústria 4.0 - baseada em integração cibernética, Gêmeos Digitais e análise preditiva na nuvem - permitiu saltos exponenciais na confiabilidade dos ativos. A incorporação tecnológica ao longo das décadas atuou diretamente na redução do tempo de inatividade e na antecipação de falhas, elevando a eficácia geral dos equipamentos de patamares críticos para a excelência operacional, conforme ilustrado no Quadro 3.

Quadro 3 - Progressão tecnológica e impactos nas estratégias de manutenção ao longo das revoluções industriais.

Revolução Industrial	Indústria 1.0	Indústria 2.0	Indústria 3.0	Indústria 4.0
Inovação tecnológica	Mecanização, energia a vapor	Produção em massa, energia elétrica	Automação, poder computacional	Soluções digitais, sistemas de IoT na nuvem
Política de manutenção	Manutenção reativa	Manutenção preventiva	Manutenção preventiva	Manutenção preditiva
Tecnologia	Inspeção visual	Inspeção instrumental	Monitoramento por sensores	Detecção de dados e funções analíticas preditivas
Eficácia geral dos equipamentos	50%	50%–70%	70%–90%	90%

Fonte: Adaptado de Santo (2025).

Observando essa evolução, a literatura sugere que a adoção das tecnologias 4.0 tem o potencial de elevar a eficácia da manutenção a patamares de até 90%. A diferença fundamental é que a engenharia para de seguir apenas cronogramas fixos de tempo e passa a acompanhar o ativo pela sua condição real, agindo antes que o problema se torne crítico.

A coleta aerofotogramétrica e a centralização dos dados no BIM resolvem a etapa logística da manutenção. No entanto, essas tecnologias mostram seu potencial quando os modelos virtuais passam a orientar a "Engenharia Diagnóstica", focada na detecção precoce de patologias e na transição rigorosa da manutenção reativa para a preditiva (Pereira *et al.*, 2025). Historicamente, as vistorias em pontes e barragens eram limitadas pela dificuldade de acesso e pela dependência quase exclusiva da avaliação visual e da memória do inspetor (Oring, 2021; Vale *et al.*, 2025). A Gestão de Ativos 4.0 surge para preencher essa lacuna, trazendo uma análise mais objetiva e fundamentada em dados numéricos.

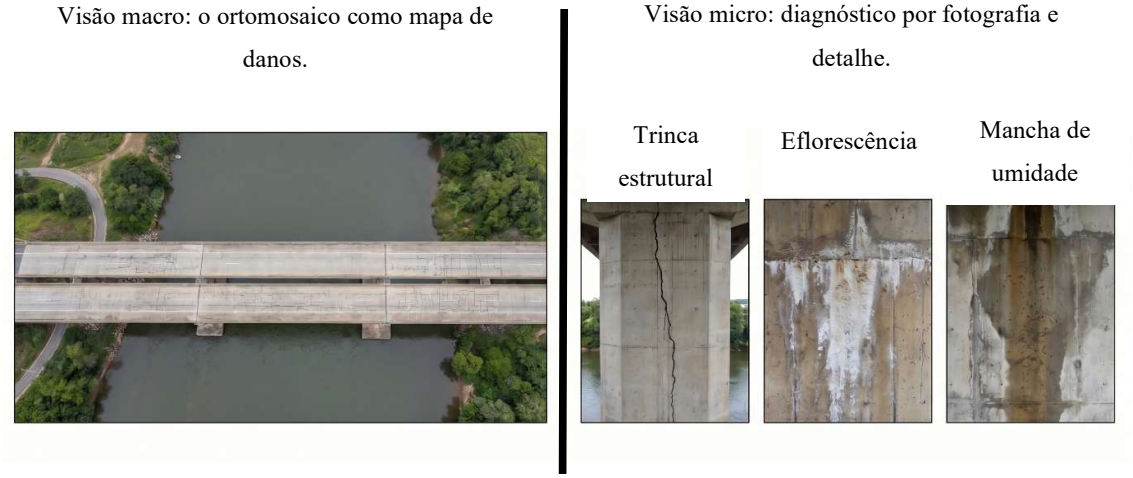
O volume massivo de imagens gerado pelos voos de VANTs exige as ferramentas de interpretação compatíveis com essa quarta revolução industrial. É neste ponto que a Inteligência Artificial e os algoritmos de *machine learning* (aprendizado de máquina) passam a integrar o fluxo operacional. Softwares especializados utilizam algoritmos para varrer automaticamente os modelos visuais e identificar falhas estruturais, como trincas, eflorescências e armaduras expostas (Mosaic Agrotech, 2025; Oring, 2021). A implementação dessa inteligência consegue identificar anomalias com precisão superior a 95%, reduzindo o tempo total de inspeção de grandes infraestruturas, que antes exigia de 3 a 15 dias, para apenas 1 a 3 dias de operação (Mosaic Agrotech, 2025).

Para que os algoritmos obtenham sucesso, a escolha do recurso visual gerado pelo drone é determinante. Estudos evidenciam que o ortomosaico é o produto de maior eficácia

espacial na detecção de manifestações patológicas, pois proporciona a visualização detalhada de áreas extensas em uma única imagem de alta resolução, enquanto as fotografias digitais originais atuam de forma complementar para confirmar visualmente os danos (Vale *et al.*, 2025).

A Figura 7 ilustra a aplicação conjunta dessas tecnologias na geração de um mapa de danos.

Figura 7 - Aplicação de ortomosaico e fotografias digitais na identificação de manifestações patológicas.



Fonte: Adaptado de Vale et al. (2025).

Mais do que apenas identificar o problema pontual, a grande contribuição da Indústria 4.0 para a engenharia é a rastreabilidade temporal. O Gêmeo Digital atua como uma contraparte viva da estrutura física, permitindo ao gestor sobrepor digitalmente os mapeamentos de diferentes meses e comparar o desempenho real com o projetado, antecipando cenários de instabilidade antes que o risco se materialize (Vicentini; Silva, 2025; Pereira *et al.*, 2025).

Essa capacidade preditiva exige, contudo, uma reestruturação completa na maneira como a engenharia conduz o diagnóstico em campo. O Quadro 4 ilustra essa evolução metodológica, evidenciando o contraste entre a inspeção tradicional e a Gestão de Ativos 4.0 nas etapas fundamentais de coleta, análise e decisão.

Quadro 4 - Comparativo metodológico: Inspeção Tradicional vs. Gestão de Ativos 4.0.

Etapa da Manutenção	Inspeção Tradicional	Gestão de Ativos 4.0 (VANTs + IA + Gêmeos Digitais)
Vistoria e Coleta de Dados	Processo predominantemente visual e manual, dependente de acesso físico à estrutura, sujeito à fadiga humana e à ocorrência de pontos cegos na inspeção.	Coleta por VANTs equipados com sensores RGB, térmicos e LiDAR, proporcionando cobertura integral da estrutura sem exposição da equipe a condições de risco no local.
Análise do Histórico de Degradação	Informações registradas por meio de fotografias isoladas e dependência de um técnico, dificultando a comparação temporal e a rastreabilidade dos danos.	Monitoramento contínuo por meio do Gêmeo Digital, permitindo a sobreposição de ortomosaicos, nuvens de pontos e dados de sensores para quantificação precisa da evolução das patologias.
Tomada de Decisão	Abordagem predominantemente reativa, baseada na experiência e percepção do inspetor durante a vistoria.	Abordagem preditiva e orientada por dados, utilizando algoritmos de inteligência artificial para avaliação de risco, priorização de intervenções e apoio ao planejamento de manutenção.

Fonte: Elaborado pela autora com NotebookLM (2026).

A adoção da Gestão de Ativos 4.0 sugere uma mudança na elaboração dos relatórios, tornando-os mais objetivos e pautados em evidências rastreáveis. A literatura aponta que, ao acompanhar o ritmo de desgaste da estrutura com dados mais precisos, a engenharia ganha a capacidade de priorizar as manutenções realmente urgentes. Essa abordagem tem o potencial de direcionar de forma muito mais inteligente tanto os recursos financeiros quanto o esforço da equipe em campo (Pereira *et al*., 2025; Vale *et al*., 2025).

Atuar com base em sistemas preditivos e documentação automatizada não é apenas um critério econômico. A rastreabilidade contínua tornou as infraestruturas virtualmente auditáveis, garantindo o cumprimento de exigências globais de transparência e governança, a exemplo do Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos (GISTM) (Melo *et al.*, 2025). A Engenharia Diagnóstica aliada às tecnologias 4.0 eleva o monitoramento, convertendo-o em um pilar inegociável de segurança e resiliência.

2.4 VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS NA ENGENHARIA

No escopo da construção civil e do monitoramento de infraestruturas, a aplicação prática dos VANTs exige, primeiramente, a compreensão de suas capacidades operacionais e aerodinâmicas. Segundo Angelov (2012), a classificação dessas aeronaves baseia-se em características físicas, dividindo-se primordialmente em modelos de asa fixa e de asa rotativa. Para as inspeções em pontes e grandes barragens, o VANT de asa rotativa (multirrotores) é o mais recomendado, pois realiza decolagens e pousos verticais, possuindo alta

manobrabilidade e a capacidade essencial de manter a estabilidade no ar através do voo pairado.

A operação dessa tecnologia em campo transcende o simples registro fotográfico, exigindo o cumprimento de um rigoroso protocolo de trabalho dividido em três etapas: pré-inspeção, inspeção e pós-inspeção. Na fase de planejamento (pré-inspeção), define-se o plano de voo, analisando minuciosamente o entorno para identificar pontos seguros e livres de obstáculos para a decolagem, além de avaliar a incidência solar no horário da coleta, a fim de evitar a formação de grandes sombras sobre o maciço da estrutura.

Durante a execução do voo (inspeção), interligar a tecnologia dos drones ao cronograma de manutenção auxilia que as equipes de engenharia alcancem alturas desejadas e distâncias longitudinais de difícil, ou até mesmo impossível, acesso físico. Ao exaltar os benefícios dessa prática frente aos métodos convencionais, Calheiros (2024) ressalta que as aeronaves viabilizam a vistoria de zonas críticas de forma segura, eliminando a exposição humana ao risco, além de promoverem uma redução substancial nos custos de operação.

A utilização de VANTs no ambiente de obras de arte especiais apresenta desafios logísticos severos que devem ser gerenciados pelo engenheiro responsável. Durante inspeções no intradorso de pontes ou em vales profundos de barragens, é comum que a aeronave enfrente a perda de sinal com os satélites de GPS e a quebra de comunicação com o rádio controle. Conforme alertam Vale *et al.* (2025), quando o número de satélites atinge um limite mínimo, a aeronave aciona automaticamente o modo de emergência conhecido como *Return To Home* (RTH), forçando o equipamento a subir em linha reta para uma altitude pré-programada. Esse movimento autônomo em áreas confinadas pode causar colisões fatais contra a própria estrutura, resultando na perda total do equipamento. Para mitigar esse risco estrutural, a literatura recomenda fortemente a utilização de drones dotados de blindagem *Real Time Kinematic* (RTK), tecnologia que permite alta estabilidade e evita a perda de sinal do controle mesmo em ambientes com grande interferência magnética.

Além da segurança da pilotagem, o sucesso da missão depende também dos parâmetros geométricos da captura. Para que as imagens coletadas gerem ortomosaicos sem distorções nas fases subsequentes de processamento, a literatura exige uma sobreposição (*overlap*) mínima de 75% a 80% entre as fotografias consecutivas (Nakao *et al.*, 2019; Ruiz *et al.*, 2022). Esse parâmetro é importante, pois permite a detecção automática de pontos homólogos e a precisão no alinhamento espacial dos pixels pelo software. Outro fator determinante no plano de voo é o *Ground Sampling Distance* (GSD), métrica que define a

resolução do pixel no terreno e dita a capacidade da câmera de capturar fissuras e eflorescências submilimétricas com exatidão (Vale *et al.*, 2025).

Compreendidas as exigências de segurança e os protocolos geométricos de voo, fica entendido que o VANTatua neste contexto primariamente como uma plataforma ágil de mobilidade e acesso aéreo. O êxito do monitoramento estrutural, no entanto, é de fato materializado pelos equipamentos de sensoriamento acoplados à aeronave, que são os reais responsáveis por capturar os dados físicos brutos. É a combinação entre o voo estável e a precisão das câmeras que contribui para transferir os dados reais da estrutura para os softwares de gestão com exatidão. Sendo assim, para que os rigorosos parâmetros de GSD e sobreposição se convertam em diagnósticos preditivos, torna-se essencial detalhar as tecnologias de captação disponíveis e os ativos fotogramétricos gerados por elas, elementos que fundamentam a próxima subseção.

2.4.1 Tecnologias de sensoriamento e produtos aerofotogramétricos

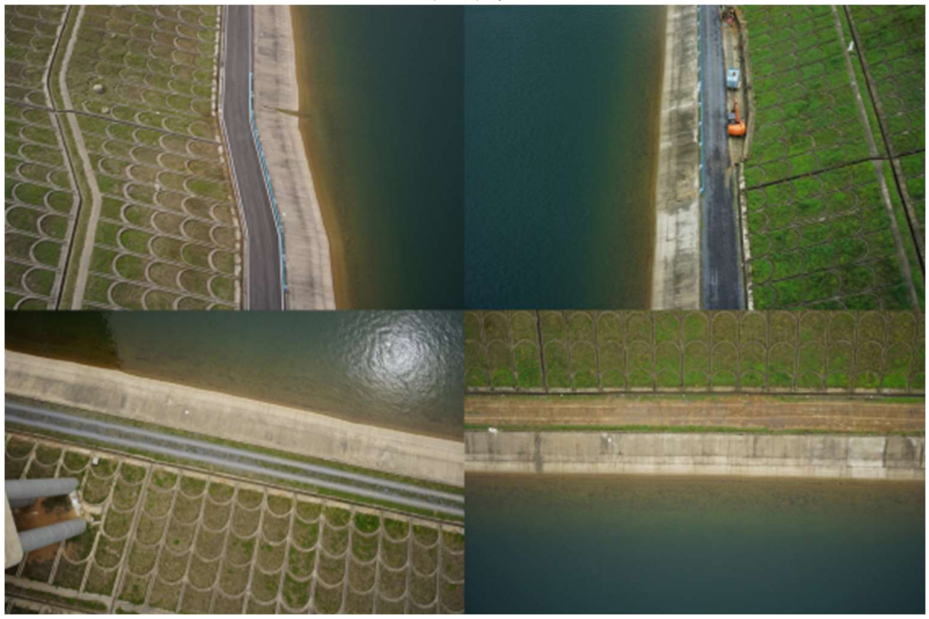
O verdadeiro diferencial do VANT na engenharia contemporânea não reside puramente na sua capacidade de voo, mas na sua versatilidade como plataforma portadora de sensores avançados. Em vez de atuar como um mero substituto para a visão humana em locais de difícil acesso, o equipamento opera como um laboratório móvel de coleta de dados.

A integração simultânea de múltiplas lentes a bordo cria um ecossistema de inspeção que supera as metodologias convencionais em todos os aspectos, garantindo resultados incomparavelmente superiores para a análise pericial (MOSAIC AGROTECH, 2025). Atualmente, as aeronaves podem ser equipadas simultaneamente com diferentes tecnologias de mapeamento, sendo algumas delas:

- **Sensores RGB (Visíveis):**Os sensores RGB são sistemas passivos que capturam a luz refletida no espectro visível, fornecendo imagens coloridas de ultra-alta definição. Diferente da visão humana ao nível do solo, esses sensores permitem mapear taludes íngremes e áreas extensas com ângulos nadirais (verticais) e oblíquos, facilitando a geração de ortomosaicos georreferenciados. Na engenharia de barragens, são essenciais para identificar patologias superficiais, como fissuras, erosões e instabilidades na crista. Conforme demonstram Dong *et al.* (2024), a utilização de sensores RGB embarcados em VANTs possibilita a captura de imagens com resoluções de até 6000x4000 pixels, permitindo o mapeamento de precisão de grandes

infraestruturas hídricas. A Figura 8 ilustra a nitidez técnica alcançada por esses sensores em inspeções de campo.

Figura 8 - Imagens de sensoriamento remoto de alta resolução de taludes de barragem capturadas por VANT.



Fonte: Dong et al. (2024).

- **Sensores Térmicos (Infravermelho):** Os sensores de termografia por infravermelho captam a radiação térmica emitida pelas superfícies, convertendo-a em termogramas que evidenciam o diferencial de calor da estrutura. Para a Engenharia Diagnóstica, a diferença na capacidade de absorver e reter calor entre a água, o solo e o concreto torna esta tecnologia vital para o rastreamento de anomalias invisíveis a olho nu, como zonas de umidade excessiva e surgências (formação de *piping*).

  De acordo com Huh *et al.* (2023) e Rocha *et al.* (2024), a termografia aérea embarcada em VANTs atinge alta eficácia na detecção de deteriorações e falhas internas, permitindo inspeções precisas de delaminações e infiltrações, mesmo operando em janelas de tempo com sombreamento ou limitações de iluminação. A Figura 9 ilustra o mapeamento termográfico identificando zonas de saturação.

Figura 9 -VANT equipado com câmera térmica e termograma identificando anomalias na estrutura.

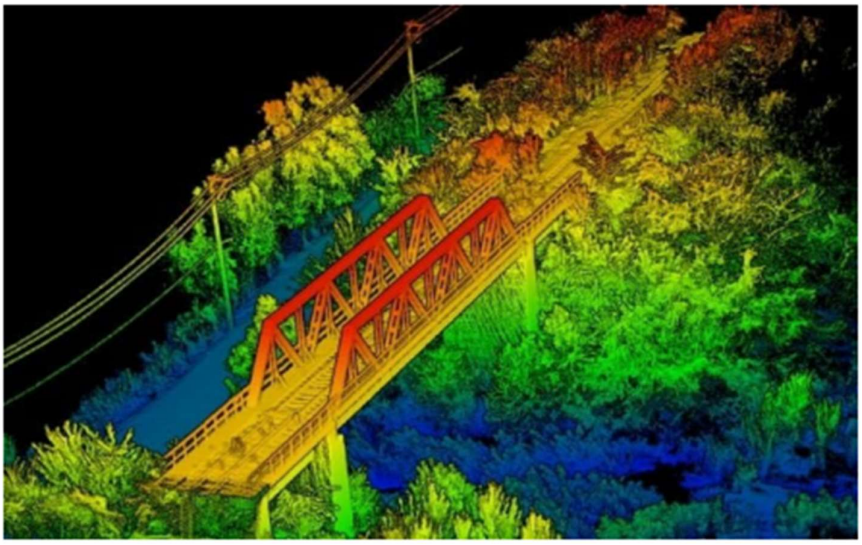


Fonte: Lee (2025).

- **Sensores LiDAR (*Light Detection and Ranging*):** O LiDAR é uma tecnologia de sensoriamento remoto ativo que emite centenas de milhares de pulsos de laser por segundo para mensurar com exatidão a distância entre a aeronave e o alvo. O seu maior diferencial no monitoramento de barragens e infraestruturas é a capacidade de os feixes de laser penetrarem as frestas de coberturas vegetais espessas, revelando a topografia real do terreno nu (*bareearth*).

  Nesse sentido, Kao *et al.* (2022) e Mader *et al.* (2016) apontam que a integração de módulos de varredura a laser em VANTs viabiliza o levantamento de modelos tridimensionais com precisão centimétrica. Trata-se de um recurso incomparável para a identificação de abatimentos, recalques sutis e deformações que passariam despercebidos na fotogrametria convencional. A Figura 10 demonstra o detalhamento alcançado pelo perfil a laser na modelagem da estrutura.

Figura 10 - Nuvem de pontos e modelo geométrico gerado a partir de varredura LiDAR.



Fonte: Lee (2025).

Cabe ressaltar que, embora o ecossistema de sensores embarcados inclua tecnologias multiespectrais e hiperespectrais, o escopo deste trabalho delimita-se às tecnologias RGB, Térmica e LiDAR, dada a sua relevância direta na identificação de manifestações patológicas e na precisão geométrica exigida pela Engenharia.

O processo que converte essas capturas em dados de engenharia é a Fotogrametria Digital. Através da sobreposição de imagens (*overlap*) e do uso de Pontos de Controle em Solo georreferenciados por GPS de precisão, o software reconstrói a geometria da estrutura. Segundo Calheiros (2024) e Santos, Scortegagna e Langaro (2026), essa técnica favorece a criação de modelos tridimensionais detalhados e a geração de produtos digitais de alto valor agregado, permitindo uma caracterização precisa da estrutura, conforme detalhado no Quadro 5.

Quadro 5 - Principais produtos da fotogrametria aérea para monitoramento.

Produto Gerado	Aplicação Técnica na Engenharia	Valor para a Gestão de Riscos
Ortomosaico	Mapa plano, métrico e georreferenciado da área, gerado a partir da junção de múltiplas imagens corrigidas.	Permite medir com precisão áreas degradadas, extensão de trincas e evolução de processos erosivos.
Nuvem de Pontos	Conjunto denso de pontos tridimensionais (coordenadas X, Y, Z) obtidos por processamento fotogramétrico.	Base para análises comparativas ao longo do tempo, possibilitando identificar deformações e deslocamentos estruturais.
MDT e MDS	Modelos Digitais de Terreno (MDT) e de Superfície (MDS), representando respectivamente o solo nu e os elementos sobre ele.	Permitem simulações de escoamento superficial, identificação de áreas de acúmulo de água e cálculo de volumes.
Modelo 3D (Mesh)	Representação tridimensional texturizada da estrutura, gerada a partir da nuvem de pontos.	Proporciona visualização realista para inspeções remotas, apoio à tomada de decisão e auditorias técnicas.

Fonte: Elaborado pela autora (2026), com base em Calheiros (2024) e Santos, Scortegagna e Langaro (2026).

Portanto, os estudos apontam que o VANT atua não como um substituto da equipe técnica, mas como um mecanismo complementar de aquisição de dados que confere maior segurança à operação. Nesse sentido, Gorkos (2022) ressalta que, ao contornar as limitações físicas da inspeção visual clássica, os drones permitem que as informações coletadas sejam avaliadas remotamente por uma equipe multidisciplinar, resultando em um diagnóstico mais detalhado.

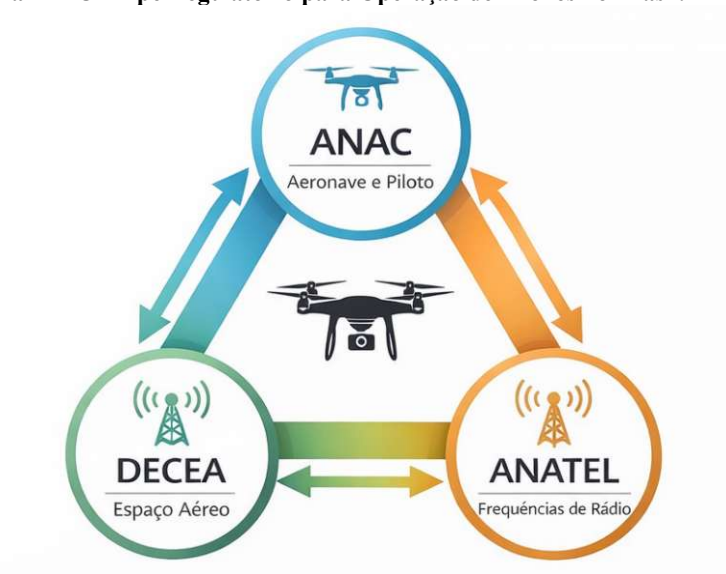
É essa coleta aerofotogramétrica que possui o potencial de alimentar os softwares de gestão de ativos, impulsionando práticas mais alinhadas à engenharia preventiva.

2.5 NORMATIZAÇÃO E SEGURANÇA OPERACIONAL DO ESPAÇO AÉREO

A operação de VANTs em ambientes de infraestrutura crítica ultrapassa a simples captura de imagens: trata-se de uma atividade de engenharia inserida no Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB). A conformidade normativa é, portanto, um requisito de gestão de riscos obrigatório. De acordo com o DECEA (BRASIL, 2023), qualquer voo realizado sem as devidas autorizações sujeita o operador e o contratante a sanções civis, administrativas e penais, incluindo a interrupção imediata das atividades de fiscalização.

A regulação no Brasil é fundamentada em um tripé institucional que viabiliza a segurança da navegação aérea e a integridade de terceiros no solo, conforme detalhado na Figura 11.

Figura 11 - O Tripé Regulatório para Operação de Drones no Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora com NotebookLM (2026).

Como ilustrado, o arcabouço legal brasileiro não centraliza a fiscalização dos drones em uma única entidade, mas estabelece um sistema interdependente de responsabilidades. A complexidade de inspecionar infraestruturas críticas, que frequentemente exige autorizações especiais para contornar restrições severas, como limites de altitude, zonas de exclusão aérea e a perda da linha de visada visual (VLOS) (Lee, 2025), obriga o engenheiro a atender aos requisitos de certificação aeronáutica, controle de tráfego e segurança de comunicação. Assim, para que o planejamento do voo seja juridicamente seguro e operacionalmente viável, é imperativo o cumprimento das diretrizes de cada órgão deste tripé:

- **ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil):** Por meio do Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial (RBAC-E) nº 94 (Brasil, 2017), a ANAC atua na certificação das aeronaves e na qualificação do explorador. Para mitigar riscos operacionais, a agência exige o registro obrigatório do equipamento no Sistema de Aeronaves Não Tripuladas (SISANT) para qualquer VANT utilizado comercialmente ou com Peso Máximo de Decolagem (PMD) superior a 250 gramas (Buzzo, 2026a). Adicionalmente, torna compulsória a contratação do Seguro RETA (Responsabilidade do Explorador e Transportador Aéreo), blindando juridicamente a operação contra eventuais danos materiais ou corporais causados a terceiros na superfície (Fraga, 2026). O rigor fiscalizatório da ANAC foi intensificado recentemente pelas Resoluções nº 761/2024 e nº 762/2024, que estabelecem sanções financeiras severas e até a apreensão do equipamento em caso de não conformidade normativa (Menezes, 2026).
- **DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo):** Regulamenta o uso e a partilha do espaço aéreo brasileiro, tendo suas diretrizes consolidadas pela Instrução do Comando da Aeronáutica (ICA) 100-40 (Brasil, 2023). A navegação de VANTs está submetida a estritas regras de aviação, que impõem limites de altitude e restrições severas em Zonas de Restrição de Voo (FRZ) – áreas próximas a aeródromos, helipontos ou infraestruturas críticas.

  Para garantir a separação segura em relação à aviação tripulada, o DECEA exige que cada missão seja submetida, analisada e autorizada individualmente por meio do sistema SARPAS (Solicitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas) (Buzzo, 2026b). Vale ressaltar que o sobrevoo irregular em espaços aéreos controlados transcende a infração administrativa, podendo configurar crime de atentado contra a segurança do transporte aéreo (Menezes, 2026).

- **ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações):** Responsável pela exigência do selo de homologação nos sistemas de radiocontrole e transmissão de dados da aeronave (Fraga, 2026). Considerando que as grandes massas de infraestrutura na engenharia civil (como os maciços de concreto armado das barragens) podem causar a obstrução e refração de sinais de satélite, comprometendo a navegação autônoma do drone (Lee, 2025), a certificação da ANATEL atua como uma barreira de segurança vital. Ela atesta que as radiofrequências utilizadas pelo equipamento são estáveis e seguras, evitando perdas de controle (*link loss*) ou interferências em sistemas de comunicação essenciais das instalações monitoradas.

No contexto de grandes riscos, a segurança operacional exige um planejamento logístico rigoroso. A operação em barragens pode apresentar desafios severos, como a limitação de teto de altitude, a possibilidade de intersecção com zonas de exclusão aérea (*no-fly zones*) e a perda de VLOS. Além disso, a operação em ambientes confinados ou próximos a grandes massas de infraestrutura frequentemente resulta na obstrução do sinal *Global Navigation Satellite System* (GNSS – GPS), comprometendo a navegação autônoma da aeronave e exigindo alta proficiência técnica da equipe. Nesse contexto de atenção, a ICA 100-40 (BRASIL, 2023) estabelece que o piloto em comando e o explorador assumem a responsabilidade por garantir que o voo não ofereça riscos a outras aeronaves, pessoas ou propriedades no solo, devendo respeitar às distâncias mínimas de segurança em relação às áreas críticas.

Além das normas externas, a Engenharia deve integrar o uso de drones ao seu Plano de Gestão de Riscos (PGR). Isso envolve a criação de Procedimentos Operacionais Padrão (POPs) para voos, que incluam o monitoramento da restrita autonomia das baterias - que raramente ultrapassa 20 a 30 minutos por ciclo - e a análise rigorosa das condições meteorológicas (como velocidade do vento, precipitação, índice Kp e baixa luminosidade), fatores que podem reduzir drasticamente a estabilidade do voo e a janela viável de inspeção. Como aponta Lee (2025), a produtividade da inspeção aérea e a detecção precisa de anomalias estão diretamente ligadas ao planejamento preventivo para gerenciar esses limitantes de campo.

Finalizando o referencial teórico, a literatura indica que a convergência entre a utilização dos VANTs, a gestão de manutenção e o rigor normativo tende a criar um ambiente de monitoramento mais seguro e integrado. A transição para o monitoramento digital não

elimina a figura do inspetor, mas fornece a este, ferramentas de apoio geométrico e térmico que auxiliam na mitigação das incertezas diagnósticas em estruturas de alto dano potencial.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Este capítulo detalha a trajetória metodológica adotada para o desenvolvimento deste estudo, fundamentada na análise e síntese de informações técnicas, acadêmicas e regulatórias. O objetivo central é assegurar que a proposição do uso de Veículos Aéreos Não Tripulados no monitoramento de barragens e estruturas críticas esteja amparada por uma base rigorosa de dados secundários, viabilizando a formulação de diretrizes coerentes e aplicáveis à realidade da Engenharia Civil.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A estruturação metodológica deste trabalho foi projetada para sustentar uma análise técnica sobre a integração dos VANTs nos fluxos de fiscalização de engenharia. A pesquisa busca compreender como tais ferramentas podem ser absorvidas pelos gargalos operacionais da gestão de infraestruturas críticas.

Quanto à sua natureza, o estudo classifica-se como uma pesquisa teórica baseada em revisão bibliográfica e documental. Segundo a definição de Prodanov e Freitas (2013), esse tipo de investigação foca na produção de conhecimentos voltados à solução de problemas concretos por meio da análise de dados secundários. Essa aplicação se materializa tornando a teoria acadêmica em diretrizes para a rotina de manutenção e fiscalização.

Sob a ótica dos objetivos, a pesquisa assume um caráter exploratório e descritivo. A vertente exploratória justifica-se pela constante evolução dos sensores remotos e dos softwares de processamento, o que exige uma investigação contínua sobre as novas fronteiras da fotogrametria. Simultaneamente, o estudo é descritivo ao detalhar as variáveis técnicas, o arcabouço normativo da ANAC/DECEA e os impactos que o monitoramento aéreo exerce sobre a precisão dos diagnósticos estruturais. O intuito é documentar como o drone atua como um sensor de engenharia de alta fidelidade.

A abordagem do problema é predominantemente qualitativa. Segundo Gil (2002), pesquisas desse tipo não empregam ferramentas estatísticas pesadas para análise, mas sim a interpretação aprofundada das informações bibliográficas. Como estratégia metodológica, o trabalho adota a pesquisa bibliográfica e documental. Diferente de um estudo de caso prático em campo, a pesquisa documental baseou-se na análise de normas vigentes do DECEA e da ANAC (Marconi; Lakatos, 2003), enquanto a revisão bibliográfica permitiu confrontar os métodos convencionais com as tecnologias 4.0 propostas na literatura.

3.2 PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS

A estratégia de coleta de dados foi desenhada para garantir que o embasamento teórico deste TCC refletisse tanto o estado da arte acadêmico quanto o rigor normativo exigido pelo setor aeroespacial e de infraestrutura. O processo foi dividido em duas frentes de investigação: a pesquisa bibliográfica e a documental.

A pesquisa bibliográfica concentrou-se na busca por produções científicas consolidadas, utilizando como bases de dados o Google Acadêmico, a Scientific Electronic Library Online (SciELO) e o Portal de Periódicos da CAPES. O recorte temporal foi estabelecido entre os anos de 2010 e 2026, intervalo que compreende desde a promulgação da Política Nacional de Segurança de Barragens até os avanços mais recentes na tecnologia de sensores embarcados.

Para refinar essa busca, a seleção do material foi orientada pelo uso de descritores combinados (booleano AND), tais como: "Segurança de Barragens", "VANT na Engenharia Civil" e "Gestão de Ativos 4.0". O critério de inclusão priorizou artigos que apresentassem aplicações práticas ou estudos de caso, permitindo uma análise realista das limitações e potencialidades da tecnologia.

Paralelamente, realizou-se uma robusta pesquisa documental, etapa indispensável para dar sustentação jurídica e técnica às proposições deste trabalho. Diferente da bibliografia acadêmica, esta frente focou em documentos oficiais e normativas técnicas vigentes. Foram analisadas minuciosamente as Instruções do Comando da Aeronáutica (ICA) 100-40 do DECEA, o RBAC-E nº 94 da ANAC e o Relatório de Segurança de Barragens publicado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). O exame desses documentos permitiu fundamentar os requisitos legais de voo e os parâmetros de fiscalização exigidos pelos órgãos reguladores, garantindo que as diretrizes apresentadas neste TCC estejam em conformidade com a normativa brasileiro de 2026.

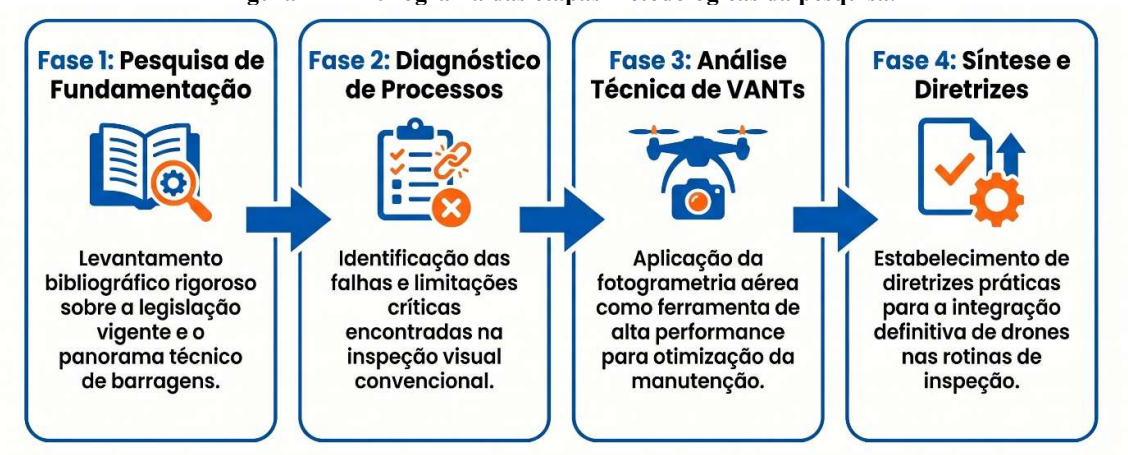
A sistematização dessas informações seguiu o método de análise comparativa, onde os dados técnicos extraídos da literatura foram confrontados com as exigências dos órgãos de controle, resultando na estrutura de monitoramento proposta nos capítulos subsequentes.

3.3 ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO

Para que o objetivo geral deste estudo fosse alcançado de maneira sistemática, o desenvolvimento da pesquisa foi estruturado em quatro etapas principais, conforme ilustrado na Figura 12. Cada fase foi desenhada para servir de alicerce à etapa seguinte, garantindo que

a proposta final de monitoramento estivesse amparada tanto pela teoria acadêmica quanto pela viabilidade operacional na engenharia.

Figura 12 – Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora com NotebookLM (2026).

A visualização desse fluxograma evidencia o caráter sistêmico da pesquisa. Ao adotar esse modelo em cascata, o estudo mimetiza o próprio raciocínio da Engenharia Civil na estruturação da melhoria contínua: parte-se da compreensão da base normativa (legislação), diagnostica-se a vulnerabilidade do método vigente (inspeção visual) e avalia-se uma ferramenta inovadora (VANTs) para, finalmente, padronizar a solução através de diretrizes operacionais. O desdobramento prático e as premissas analíticas de cada uma dessas etapas são descritos detalhadamente da Fase 1 à Fase 4.

A Fase 1, denominada Pesquisa de Fundamentação, consistiu na imersão teórica e normativa necessária para delimitar as fronteiras do estudo. Nesta etapa, o foco não foi apenas reunir bibliografia, mas sim compreender o rigor da legislação aérea brasileira e os pilares da Política Nacional de Segurança de Barragens. O entendimento das exigências de órgãos como ANAC e DECEA foi o ponto de partida para garantir que qualquer inovação tecnológica proposta estivesse em plena conformidade com o ordenamento jurídico vigente.

Dando continuidade, a Fase 2 dedicou-se ao Diagnóstico de Processos. Foi preciso identificar os gargalos e as limitações técnicas que a inspeção visual convencional enfrenta em estruturas de grande porte. Ao analisar criticamente o método tradicional, foi possível mapear os pontos de vulnerabilidade, tanto em termos de segurança do trabalho quanto de precisão diagnóstica, que justificam a necessidade de integração de ferramentas mais modernas.

Na Fase 3, intitulada Análise Técnica do Uso de VANTs, o trabalho concentrou-se no potencial tecnológico das ferramentas. Esta etapa envolveu o estudo aprofundado dos

sensores (RGB, Térmico e LiDAR) e da fotogrametria digital. A análise focou em como o processamento dessas imagens pode converter registros visuais em dados métricos e modelos 3D inteligentes, atuando como um elemento de otimização para a gestão da manutenção e para a detecção precoce de patologias estruturais.

A Fase 4 culminou na Síntese e Elaboração de Diretrizes. Com base nos diagnósticos e nas capacidades tecnológicas estudadas anteriormente, esta etapa final consistiu na estruturação de recomendações práticas. O objetivo foi propor um fluxo de trabalho que permita a integração orgânica dos drones no cronograma de inspeções, oferecendo uma ferramenta de apoio à decisão que une eficiência operacional, redução de custos e, prioritariamente, a mitigação de riscos humanos.

3.4 MÉTODO DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

A etapa de análise de resultados foi estruturada para transpor o campo teórico e oferecer uma visão crítica sobre a aplicabilidade dos VANTs no cotidiano da engenharia, utilizando dados secundários extraídos da literatura e de normas técnicas para fundamentar a comparação. Para isso, adotou-se o método de análise de conteúdo e triangulação de dados, onde as informações extraídas da revisão bibliográfica e da pesquisa documental foram utilizadas para interpretar as vulnerabilidades históricas do setor e propor diretrizes voltadas à rotina de manutenção e fiscalização.

A avaliação da viabilidade tecnológica e operacional não se limitou às especificações do equipamento em si, mas focou no seu impacto sistêmico para as organizações. Sendo assim, a análise foi pautada por três eixos analíticos fundamentais, que refletem os pilares clássicos da Engenharia Civil e gestão de ativos, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Eixos Analíticos da Engenharia Civil Aplicados ao Monitoramento por VANT.



Fonte: Elaborado pela autora com NotebookLM (2026).

A intersecção desses três eixos contribui para uma avaliação sistêmica da tecnologia, garantindo que a proposta de monitoramento seja tecnicamente robusta, economicamente viável e humanamente segura. A análise não isola os ganhos de produtividade da segurança operacional, mas sim os integra como requisitos indissociáveis para a excelência na gestão de infraestruturas críticas. A partir dessa correlação, os resultados foram avaliados sob as seguintes diretrizes:

- **Eficiência Operacional (Binômio Tempo e Custo):** A análise buscou identificar o impacto da tecnologia na produtividade das equipes. Este eixo está fundamentado nos princípios da Administração Científica, onde a otimização do tempo e a redução do desperdício são cruciais para a eficiência produtiva, conforme preconizado por Taylor (1990) e Fayol (1990). No contexto do TCC, com base em dados secundários levantados na literatura, analisou-se a estimativa de tempo médio de mobilização e execução das inspeções tradicionais frente à agilidade do mapeamento aéreo, visando a redução do custo operacional (*OPEX*).
- **Segurança do Trabalho e Gestão de Riscos:** Este eixo avaliou, através da revisão de estudos de caso documentados, a capacidade do método proposto em mitigar a exposição humana a situações de perigo. No levantamento bibliográfico, constata-se que a neutralização da presença humana em zonas de alta vulnerabilidade

estrutural,como o trabalho em altura, representa o maior avanço preventivo oferecido pelas inspeções remotas.

- **Qualidade e Confiabilidade do Diagnóstico:** Para além da economia e segurança, a pesquisa analisou, através de estudos de caso documentados, o valor técnico dos dados gerados pelas inspeções aéreas. Este pilar fundamenta-se nos preceitos da Gestão da Qualidade Total (TQM), defendida por autores como Deming (1982) e Juran (1951), onde a precisão da medição estrutural e a detecção precoce de anomalias são essenciais para decisões de engenharia assertivas e para evitar falhas sistêmicas.

A partir da triangulação desses eixos, foi possível estruturar uma síntese crítica de alto valor gerencial. Nota-se que a transição para a Gestão de Ativos 4.0 representa uma evolução viável, em que o mapeamento aéreo e a modelagem digital atuam como um forte suporte à tomada de decisão. Embora a implementação enfrente desafios operacionais, como a autonomia dos equipamentos e a necessidade de capacitação técnica, o uso dos VANTs proporciona um acervo de informações auditáveis que reduz as incertezas diagnósticas e otimiza a rotina de manutenção.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A proposta deste capítulo é traduzir o referencial teórico e normativo investigado ao longo da pesquisa e propor diretrizes que conectam as normas à rotina de inspeção. O intuito é mostrar que a adoção da Gestão de Ativos 4.0 pode ser aplicada de forma gradual e planejada. As matrizes apresentadas a seguir servem como um apoio teórico para ajudar o engenheiro a tomar decisões que sejam financeiramente sustentáveis e preventivas contra falhas críticas.

Para a correta interpretação dos modelos e processos propostos, é fundamental estabelecer uma premissa técnica clara: a aerofotogrametria atua de forma estritamente complementar aos métodos de avaliação convencionais. O uso de Veículos Aéreos Não Tripulados não anula a necessidade da instrumentação geotécnica residente - como piezômetros e inclinômetros - e, sobretudo, não substitui a *expertise* analítica do corpo de engenharia. A aeronave não atesta, por si só, a segurança de uma barragem; ela fornece o mapeamento georreferenciado e as evidências térmicas para que o especialista o faça.

Os resultados apresentados não sugerem uma oposição metodológica, mas sim uma divisão inteligente de esforços. A inovação tecnológica absorve a logística pesada de campo, otimizando o tempo de varredura e mitigando passivos de segurança, enquanto a engenharia clássica utiliza esses dados de alta fidelidade para garantir o rigor técnico e a rastreabilidade na tomada de decisão.

4.1 EFICIÊNCIA LOGÍSTICA E OPERACIONAL DO MODELO HÍBRIDO DE INSPEÇÃO

Os resultados desta pesquisa convergem para a implementação operacional do que se define como "Modelo Híbrido de Fiscalização". Nessa dinâmica, a aerofotogrametria não substitui a instrumentação residente, mas atua como uma ferramenta de rastreamento preliminar. A aeronave realiza varreduras rápidas para mapear anomalias em estágio inicial, acionando a intervenção humana apenas para a validação física e direcionada daquele local crítico.

Essa abordagem ajuda a contornar um dos maiores desafios logísticos das vistorias tradicionais: a necessidade de mobilizar as equipes fisicamente por toda a extensão da obra. Ao transferir a etapa de mapeamento inicial para o drone, a literatura indica que o modelo financeiro da manutenção ganha uma nova dinâmica. Gastos operacionais contínuos e muitas vezes imprevisíveis (OPEX), como o aluguel de andaimes, plataformas e o pagamento de

passivos de periculosidade, tendem a ser substituídos por um investimento tecnológico mais direcionado (CAPEX).

O processamento desses dados aéreos viabiliza a integração BIM 7D e a consolidação de um Gêmeo Digital. A estrutura física ganha uma contraparte virtual atualizada em tempo quase real, permitindo à engenharia simular cenários críticos (como a elevação do nível d'água) e auditar o histórico de patologias com rigor métrico.

Com base na triangulação dos dados bibliográficos e normativos analisados, propõe-se a matriz a seguir (Quadro 6), que sintetiza teoricamente a transição para o modelo híbrido, evidenciando de maneira simples como a adoção da tecnologia resolve antigas limitações do setor.

Quadro 6 – Matriz de Transição: Inspeção Tradicional vs. Modelo Híbrido.

Parâmetro Analítico	Inspeção Tradicional (100% Humana)	Modelo Híbrido Proposto (Drone Frequente + Humano Direcionado)
Frequência de Monitoramento	Moderada: devido à complexidade logística, as vistorias completas ocorrem de forma espaçada.	Alta: voos regulares contínuos, com a equipe física acionada pontualmente apenas para validação técnica de anomalias.
Estrutura de Custos (Dinheiro)	Foco em OPEX: gasto contínuo e imprevisível com diárias longas, aluguel de andaimes, plataformas e passivos trabalhistas.	Transição para CAPEX: investimento inicial amortizável (aquisição de VANTs e softwares BIM). O OPEX é significativamente reduzido devido à diminuição do tempo de campo.
Exposição ao Risco (Segurança)	Alta: profissionais expostos por vários dias em taludes instáveis, trabalhos em altura ou áreas de rejeito para inspecionar toda a estrutura.	Baixa (mitigada): o profissional acessa a área de risco apenas quando o mapeamento digital confirma a necessidade de intervenção física ou realização de ensaios complementares.
Mitigação de Falhas (Ex.: Rompimento de Barragens)	Vulnerável a processos patológicos silenciosos, como o *piping*, que podem evoluir rapidamente entre longos intervalos de inspeção visual.	Elevada capacidade preditiva: o monitoramento frequente permite detectar danos em estágio inicial (Lei de Sitter), possibilitando ações preventivas antes da ocorrência de falhas estruturais.

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A análise da matriz evidencia que a reestruturação da lógica de custos (a transição do OPEX para o CAPEX) é apenas um dos pilares dessa evolução. O verdadeiro diferencial do

modelo híbrido está no equilíbrio alcançado entre eficiência logística, segurança ocupacional e confiabilidade técnica. Ao substituir a vulnerabilidade das inspeções pontuais por um fluxo de varreduras aéreas frequentes, a engenharia passa a atuar de forma ainda mais ativa na prevenção de desastres.

4.2 ENGENHARIA DIAGNÓSTICA APLICADA AOS CASOS DE FALHA: RESPOSTAS TECNOLÓGICAS

A eficiência financeira do monitoramento por VANTs torna-se secundária frente ao seu impacto preventivo em infraestruturas de alto Dano Potencial Associado (DPA). A análise forense dos colapsos da Barragem de Fundão (Mariana) e da Mina Córrego do Feijão (Brumadinho) revela que a exclusividade da dependência humana na fiscalização visual falhou em identificar precursores críticos, como a saturação interna progressiva e os recalques sob densa cobertura vegetal. Essa limitação ocorre porque as anomalias precursoras da liquefação estática manifestam-se frequentemente através de deformações submilimétricas e lentas, indetectáveis a olho nu e mascaradas por interferências da vegetação nos radares terrestres convencionais.

Cabe ressaltar que a comprovação definitiva da capacidade analítica dos VANTs diante de deformações submilimétricas complexas ainda demanda validação empírica por meio de testes e ensaios em campo. Contudo, a literatura evidencia que a tecnologia é capaz de suprir lacunas operacionais críticas deixadas pelos métodos convencionais. Ao transpor barreiras de acesso e alcançar alguns pontos cegos da fiscalização terrestre, a aeronave atua não como um atestador autônomo de segurança, mas como um laboratório móvel de coleta de dados que fornece as evidências necessárias para a validação especializada da engenharia

O sensoriamento remoto aéreo supre exatamente essa lacuna diagnóstica. Conforme validado por Lee *et al.* (2023), a integração de sensores térmicos mapeia zonas de umidade anormais (potencial de *piping*) invisíveis a olho nu, enquanto a emissão de feixes LiDAR transpassa obstáculos físicos para extrair a geometria do terreno real (*bareearth*) com precisão centimétrica. Ao acoplar a interpretação humana com estes sensores digitais, os gestores passam a dispor de evidências mais seguras para a tomada de decisão estratégica.

Para sistematizar o valor preditivo dessa instrumentação e evidenciar a superação do modelo de monitoramento reativo, este estudo propõe o Quadro 7, o qual correlaciona os gargalos operacionais observados nos desastres de Mariana e Brumadinho e no incidente do Viaduto da Marginal Pinheiros com as alternativas de mitigação proporcionadas pelos sensores embarcados em VANTs, amparadas nas evidências do referencial teórico.

Quadro 7 – Matriz de Resposta Tecnológica aos Casos de Falha.

Desastre / Causa da Falha	Sensor VANT Aplicável	Resposta Preditiva / Ação
Barragem de Fundão (Mariana/MG, 2015) Liquefação estática resultante de falhas construtivas (recuo do eixo sobre rejeitos finos/lamas) combinada com a saturação excessiva do maciço, que foi agravada por manutenções precárias e deficiências crônicas na drenagem superficial.	**Termografia (Infravermelho) + RGB**	Os sensores RGB poderiam identificar erosões em canaletas e falhas na cobertura vegetal. Paralelamente, a câmera térmica mapeia zonas anômalas de umidade no maciço, permitindo a emissão de alertas de saturação antes do desencadeamento da liquefação estática.
Mina Córrego do Feijão (Brumadinho/MG, 2019) Liquefação estática (perda abrupta de resistência ao cisalhamento) de rejeitos com comportamento frágil não drenado. O colapso foi engatilhado por acúmulo de poropressão (perda de sucção devido às chuvas) e deformações internas contínuas (*creep*).	**Scanner LiDAR**	A emissão de pulsos laser permitiria atravessar a vegetação e modelar a superfície real do terreno (*bareearth*). A comparação temporal das nuvens de pontos possibilita identificar deslocamentos centimétricos de forma automatizada no ambiente do Gêmeo Digital.
Viaduto da Marginal Pinheiros (São Paulo/SP, 2018) Esmagamento e falha abrupta dos aparelhos de apoio em virtude de subdimensionamento frente às deformações exigidas, quadro agravado por falhas crônicas de impermeabilização que aceleraram a degradação sistêmica do concreto na região.	**Câmera RGB de Alta Resolução + Módulo RTK**	O VANT equipado com sistema RTK poderia realizar inspeções seguras no intradorso da estrutura, reduzindo a dependência do sinal GPS convencional e permitindo o mapeamento de fissuras e degradações dos apoios, subsidiando ações preventivas e eventual interdição antecipada da estrutura.

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A análise da matriz demonstra que a digitalização das vistorias não tem o intuito de substituir a engenharia clássica, mas sim de eliminar os seus pontos cegos. Ao empregar sensores que superam as limitações físicas e visuais do inspetor, como a capacidade do LiDAR de penetrar a vegetação ou da termografia de identificar umidade interna, a manutenção deixa de depender apenas de anomalias já agravadas. Na prática, essa transição oferece aos gestores as evidências precisas para agir de forma preventiva, evitando que falhas de monitoramento se acumulem até o ponto crítico de ruptura da estrutura.

4.3 DIRETRIZES OPERACIONAIS PARA INSPEÇÃO COM VANTs

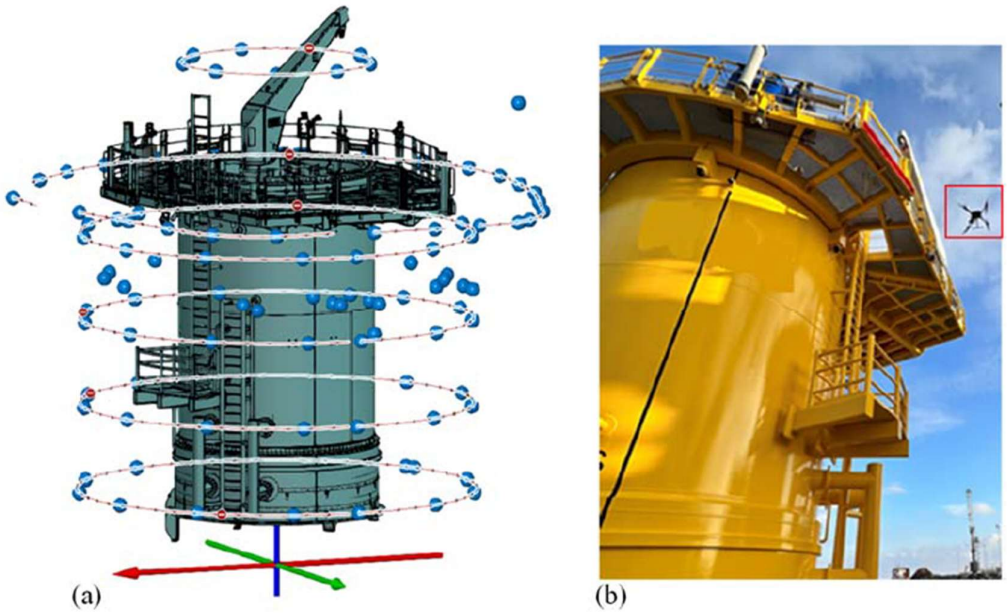
Para que os ganhos técnicos e financeiros debatidos anteriormente sejam efetivados sem a incidência de infrações aeronáuticas ou perda de integridade dos dados, a adoção dos drones exige padronização. Portanto, este estudo propõe um Procedimento Operacional

Padrão (POP) voltado especificamente para a inspeção aerofotogramétrica de infraestruturas críticas. O objetivo desse macrofluxo é guiar a equipe técnica de forma segura desde o planejamento legal do voo até a extração dos dados 3D, sendo estruturado em quatro macroetapas.

A primeira macroetapa consiste no Planejamento e Conformidade Regulatória (Pré-Voo). Essa fase preparatória é crítica para a mitigação de riscos operacionais e para a garantia da acurácia dos dados. Antes de qualquer mobilização de campo, a equipe técnica deve estruturar o fluxo de trabalho focado em três ações obrigatórias, as quais estão descritas nos próximos tópicos.

- Análise de Viabilidade do Espaço Aéreo: É obrigatória a submissão e aprovação do plano de voo junto ao DECEA via sistema SARPAS, em estrita observância à ICA 100-40 (BRASIL, 2023), garantindo o distanciamento de áreas críticas e rotas de aviação. Simultaneamente, a aeronave e o piloto devem possuir cadastro atualizado no SISANT (ANAC) e seguro RETA ativo, conforme o RBAC-E nº 94 (BRASIL, 2017).
- Parametrização Fotogramétrica: Definição da malha de voo com base na patologia a ser investigada. Para a detecção de microfissuras milimétricas em concreto, exige-se a configuração de um GSD inferior a 1 cm/pixel. Para garantir o alinhamento das imagens, o software de plano de voo deve ser configurado com sobreposição (overlap) frontal de no mínimo 80% e lateral de 70% (Calheiros, 2024; Santos; Scortegagna; Langaro, 2026). A título de exemplificação prática, a Figura 14 ilustra o design de uma malha de voo circular programada por Benzon *et al.* (2022) para o mapeamento de uma infraestrutura cilíndrica de grande porte, onde cada esfera azul representa uma coordenada espacial autônoma de captura de imagem.

Figura 14 - Planejamento espacial autônomo (malha de voo) para captura fotogramétrica ao redor da infraestrutura.



Fonte: Benzon et al. (2022).

- Avaliação de Fatores Limitantes: Verificação do Índice Kp (interferência geomagnética solar) para evitar perda de sinal GPS do VANT, além do monitoramento da velocidade do vento.

A segunda macroetapa abrange a Execução e Controle Geodésico (Voo). Durante a operação em campo, a Engenharia de Segurança e a Topografia devem atuar em conjunto para assegurar que a missão ocorra com precisão espacial e dentro dos limites visuais de segurança. Para que isso ocorra, o voo depende das diretrizes descritas nos próximos dois tópicos.

- Apoio Terrestre: Distribuição estratégica de Pontos de Controle em Solo (GCPs - *Ground Control Points*) ao longo da estrutura, coordenados com rastreadores GNSS utilizando correção RTK (*Real Time Kinematic*) ou PPK (*Post Processed Kinematic*). Esse passo é o que assegura que a nuvem de pontos final tenha precisão geodésica milimétrica, e não apenas proporções visuais relativas.
- Operação em VLOS: O voo deve ser executado preferencialmente em linha de visada visual (*Visual Line of Sight* - VLOS), garantindo que o piloto possa intervir em caso de aproximação de aves ou rajadas de vento inesperadas, conforme preconizado pelo DECEA (BRASIL, 2023) para mitigação de riscos ao solo.

A terceira macroetapa refere-se ao Processamento Fotogramétrico. Após a coleta, as imagens RGB e os termogramas ainda não possuem utilidade analítica imediata, necessitando de um processamento computacional intensivo para se converterem em dados geométricos. Essa conversão é realizada a partir dos passos descritos nos próximos dois tópicos.

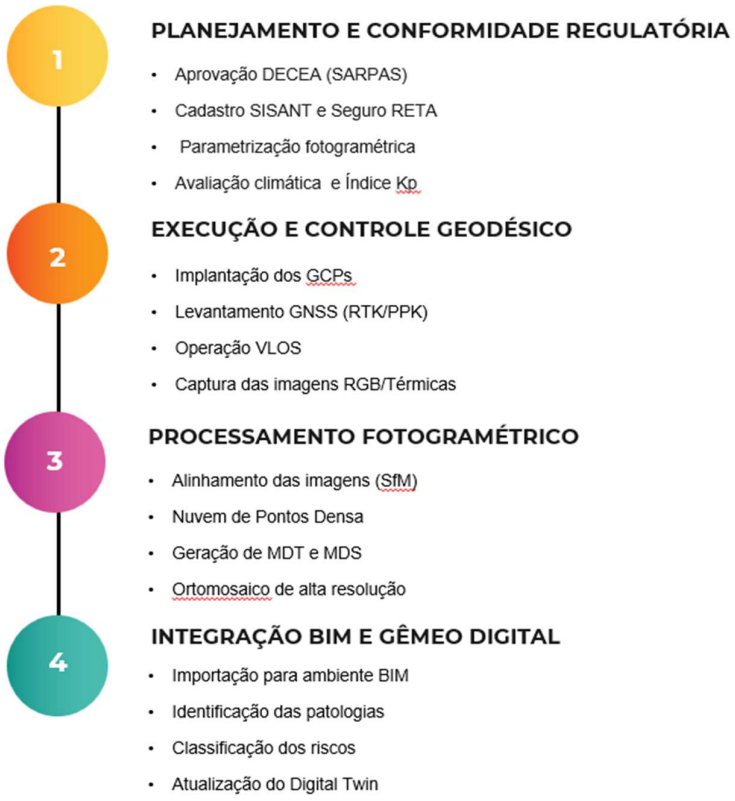
- Utilizando algoritmos de *Structure from Motion* (SfM), o conjunto de imagens sobrepostas é alinhado para a geração da Nuvem de Pontos Densa.
- A partir da nuvem, extraem-se os produtos topográficos: o Modelo Digital de Superfície (MDS), o Modelo Digital de Terreno (MDT) para avaliação de estabilidade de encostas e o Ortomosaico de alta resolução, que servirá de mapa-base para a vistoria técnica.

Por fim, a quarta macroetapa trata da Integração BIM e Consolidação do Gêmeo Digital. O diferencial da Indústria 4.0 é exatamente a capacidade de transformar as saídas topográficas em verdadeiras ferramentas de gestão e manutenção de ativos. Essa interoperabilidade se consolida por meio de:

- Os modelos tridimensionais devem ser exportados para ambientes de modelagem da informação (BIM).
- Conforme defendem Sacks *et al*. (2018), essa interoperabilidade permite o "tagueamento" de patologias. Cada anomalia térmica ou fissura mapeada é georreferenciada e classificada quanto ao seu grau de risco no software.
- Dessa forma, cria-se o "Gêmeo Digital", atuando como a memória técnica evolutiva da barragem (GRIEVE, 2023), que alimentará o ciclo de Manutenção Preditiva e fornecerá evidências rastreáveis para as auditorias da PNSB.

O fluxograma ilustrado na Figura 15 sintetiza visualmente a interdependência destas etapas, atuando como sugestão de guia executivo para a transição das empresas em direção à Gestão de Ativos 4.0.

Figura 15 – Macrofluxo Operacional: Diretrizes para Inspeção de Infraestruturas com VANTs.



Fonte: Elaborado pela autora com NotebookLM (2026).

A estruturação dessas quatro fases, desde o planejamento regulatório até a consolidação do Gêmeo Digital, sugere um caminho viável para alcançar a Gestão de Ativos 4.0. Ao propor um fluxo que une o cumprimento das exigências legais à precisão das imagens aéreas, o estudo aponta como o engenheiro pode tornar a tomada de decisão mais preditiva, auditável e segura perante as normas vigentes.

5 CONCLUSÃO

O referencial teórico levantado consolida o entendimento de que a integração de VANTs viabiliza uma otimização técnica e econômica em diversas aplicações práticas do setor. A bibliografia atesta que a redução no tempo de coleta desonera o corpo técnico de atividades de alto risco geotécnico. Além disso, a adoção dos princípios de Gêmeos Digitais e a integração BIM tornam dados visuais em históricos paramétricos auditáveis.

Diante desse cenário, conclui-se que o monitoramento aerofotogramétrico atua como um mitigador de falhas operacionais, assegurando maior confiabilidade diagnóstica, redução de custos e aderência estrita aos requisitos de segurança física e normativa.

5.1 CUMPRIMENTO DOS OBJETIVOS

Os objetivos estabelecidos para este estudo foram plenamente alcançados, com a pesquisa percorrendo desde o embasamento normativo até a proposição prática do uso de drones. O primeiro objetivo específico foi atendido ao longo da revisão bibliográfica, que contextualizou as diretrizes da PNSB e identificou os gargalos logísticos e as limitações de segurança inerentes às inspeções visuais tradicionais. Em relação ao segundo objetivo, o estudo demonstrou, por meio da análise de sensores (RGB, Térmico e LiDAR) e de casos forenses, a capacidade preditiva do monitoramento aéreo na detecção precoce de anomalias estruturais, alinhando-se aos rigorosos requisitos de fiscalização da legislação.

Avançando para a análise prática proposta pelo estudo, o terceiro objetivo foi cumprido ao constatar, com base na literatura, que a substituição ou complementação dos métodos de acesso tradicionais pela operação de drones otimiza a produtividade e eleva as condições de segurança do trabalho, uma vez que mitiga a exposição da equipe técnica a áreas de risco geológico e trabalho em altura. Quanto ao quarto objetivo, a pesquisa evidenciou a relevância de integrar nuvens de pontos e ortomosaicos a ambientes BIM e Gêmeos Digitais, fundamentando a transição para a Gestão de Ativos 4.0 e viabilizando a rastreabilidade necessária para a manutenção preditiva. Por fim, o quinto e último objetivo foi consolidado com a formulação de um macrofluxo de diretrizes operacionais, que sistematizou as etapas de planejamento regulatório (ANAC/DECEA), execução e processamento, entregando um POP para a engenharia.

5.2 O IMPACTO NA ENGENHARIA CIVIL

A contribuição central deste estudo para a Engenharia de Produção Civil está na proposição de uma nova dinâmica para as inspeções, ancorada na premissa de que a tecnologia atua como um recurso complementar, e não substitutivo, à engenharia clássica. A análise comparativa indica que a adoção de VANTs tem um enorme potencial para otimizar a manutenção. Ao reduzir o tempo de coleta de dados em campo e absorver a logística pesada de varredura, a tecnologia afasta os profissionais de etapas operacionais perigosas, fazendo com que a equipe humana ganhe espaço para concentrar seus esforços na validação dos diagnósticos e na tomada de decisão preditiva.

A introdução dos conceitos de Gêmeos Digitais e a Integração BIM reposicionou a discussão do monitoramento para o patamar da Indústria 4.0. Ficou demonstrado que a digitalização do ativo permite a criação de um ecossistema de informações auditáveis e georreferenciadas, garantindo a perenidade da memória técnica da estrutura. Esse fluxo impede a perda de dados críticos ao longo do ciclo de vida da barragem e assegura que as decisões de manutenção sejam pautadas em um histórico digital fidedigno, reduzindo as incertezas diagnósticas e os custos com intervenções emergenciais.

Para além dos ganhos operacionais, o impacto mais significativo da adoção dos VANTs reside na Engenharia de Segurança do Trabalho. A substituição do elemento humano em vistorias de áreas de risco geológico e taludes instáveis por plataformas aéreas atende diretamente à hierarquia de mitigação de riscos. Conclui-se, portanto, que a integração dessa tecnologia auxilia à Engenharia Civil resolver um de seus maiores passivos: alinhar a precisão e a eficiência da manutenção preventiva com a proteção efetiva da integridade física de suas equipes.

5.3 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Embora os resultados deste estudo sugerirem a viabilidade técnica e econômica dos VANTs, é preciso reconhecer as limitações operacionais que ainda permeiam o setor. A autonomia das baterias, por exemplo, permanece como um gargalo logístico significativo quando se trata de inspeções em ativos de escala quilométrica, exigindo um planejamento de voo fragmentado que pode impactar a produtividade em campo. Além disso, a transição para a Engenharia 4.0 impõe um desafio intelectual: a necessidade de profissionais capacitados não apenas para a pilotagem, mas para o tratamento e interpretação de grandes volumes de dados

(*Big Data*), garantindo que a tecnologia não gere apenas imagens, mas sim diagnósticos precisos.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a investigação de algoritmos de Inteligência Artificial (IA) e *Machine Learning* aplicados ao processamento de nuvens de pontos. O reconhecimento automatizado de fissuras e patologias estruturais é o próximo passo para reduzir ainda mais a subjetividade humana e acelerar o tempo de resposta das equipes de manutenção.

Sugere-se também que estudos futuros explorem a viabilidade de sensores LiDAR em áreas de mata fechada ou vegetação densa nos taludes, onde a fotogrametria passiva encontra limitações físicas de penetração, impedindo o mapeamento do solo real.

Ademais, considerando a natureza teórica desta pesquisa, sugere-se a realização de estudos de caso aplicados em campo para a validação quantitativa do modelo proposto. Recomenda-se a condução de um estudo comparativo direto, mensurando as horas de mobilização e execução das inspeções tradicionais frente ao mapeamento com VANTs. Em complemento, seria de grande relevância acompanhar o ciclo de manutenção dessas estruturas para atestar se a tecnologia garante, na prática, a detecção genuinamente precoce de anomalias e se essa antecipação fornece tempo hábil para intervenções corretivas antes da evolução para falhas críticas.

Este estudo indica que o uso de drones tem potencial para ser um aliado valioso na modernização das inspeções de engenharia. Ao sugerir essa integração entre a visão da produção e os sensores remotos, o trabalho aponta caminhos para uma gestão de ativos que busca ser mais transparente e segura. A intenção é mostrar que a inovação pode ser o suporte que faltava para cuidarmos melhor das nossas estruturas e, principalmente, da vida das pessoas.

REFERÊNCIAS

AECWEB. Recuperação estrutural de viaduto em São Paulo vai durar cinco meses. **Portal AECweb,** São Paulo, 17 dez. 2018. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/noticias/recuperacao-estrutural-de-viaduto-em-sao-paulo-vai-durar-cinco-meses/18278>. Acesso em: 9 jun. 2026.

ALTINO, Lucas; AZEVEDO, Luis Felipe. Desastre em Brumadinho: veja o antes e depois da região afetada pelo rompimento da barragem da Vale. **O Globo**, Rio de Janeiro, 25 jan. 2024. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/brasil/noticia/2024/01/25/desastre-em-brumadinho-veja-o-antes-e-depois-da-regiao-afetada-pelo-rompimento-da-barragem-da-vale.ghtml>. Acesso em: 01 mai. 2026.

ANGELOV, P. (Ed.). **Sense and avoid in UAS**: research and applications. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13028**: Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reserva de água – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 31000: Gestão de riscos: diretrizes**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

BALLESTEROS, J. C.; RODRÍGUEZ, H. R. Inspeção visual de fachadas com o uso de VANTs em edificações de média e grande altura. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 4, p. 135–153, 2020.

BARRETO, T. O.; CARVALHO, L. A. S. de; TEMPORIM, F. A.; RODRIGUES, T. G.; GUERRA, J.; OLIVEIRA, C. G. de. Avaliação do impacto do uso de diferentes modelos digitais de elevação no processamento DInSAR para detecção de movimentação de superfície: um estudo de caso na barragem I, Brumadinho, Minas Gerais, Brasil. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 20., 2023, Florianópolis. **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE, 2023.

BENZON, H.-H. *et al*. An Operational Image-Based Digital Twin for Large-Scale Structures. **Applied Sciences**, Basel, v. 12, n. 7, 3216, 2022.

BOTELHO, M. R.; FARIA, M. P. de; MAYR, C. T. R.; OLIVEIRA, L. M. G. de. Rompimento das barragens de Fundão e da Mina do Córrego do Feijão em Minas Gerais, Brasil: decisões organizacionais não tomadas e lições não aprendidas. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, São Paulo, v. 46, e16, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2317-6369000018519>.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **Relatório de Segurança de Barragens**. Brasília: ANA, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/ana>. Acesso em: 04 abr. 2026.

BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). **Resolução nº 419, de 2 de maio de 2017**. Aprova o Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial (RBAC-E) nº 94, intitulado "Requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil". Brasília, DF, 2017.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Resolução ANM nº 95, de 07 de fevereiro de 2022**. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 fev. 2022. Seção 1, p. 49. Disponível em: <https://www.anm.gov.br>. Acesso em: 10 jun. 2026.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). **Instrução do Comando da Aeronáutica (ICA) 100-40**: Aeronaves não tripuladas e o acesso ao espaço aéreo brasileiro. Rio de Janeiro, 2023.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Brasília, DF: Presidência da República, 2010.

BRASIL. **Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020**. Altera a Política Nacional de Segurança de Barragens. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 1 out. 2020.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Resolução CNRH nº 241, de 10 de setembro de 2024. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por dano potencial associado, por volume e por categoria de risco, em atendimento ao art. 7° da Lei n. 12.334, de 20 de setembro de 2010. **Diário Oficial da União**: seção 1, edição 204, Brasília, DF, p. 137, 21 out. 2024.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria de Infra-Estrutura Hídrica. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2002.

BUZZO, L. Como cadastrar drone no SISANT: passo a passo 2026. **PickDrones**, 14 mar. 2026a. Disponível em: <https://pickdrones.com>. Acesso em: 4 jun. 2026.

BUZZO, L. SARPAS: como solicitar autorização de voo de drone. **PickDrones**, 28 mar. 2026b. Disponível em: <https://pickdrones.com>. Acesso em: 4 jun. 2026.

CALHEIROS, Y. R. S. C. **Novas ferramentas e tecnologias para inspeção visual e acompanhamento de barragens de terra**. 2024. Artigo Científico (Especialização em Segurança de Barragens) – Universidade Federal da Bahia, Maceió, 2024.

CONTROLADORIA GERAL DO MUNICÍPIO (São Paulo). **Relatório de Auditoria**: Processo de contratação emergencial para recuperação do Viaduto sobre a CPTM – Marginal Pinheiros/Leste. São Paulo: Prefeitura de São Paulo, 2020.

DEMING, W. Edwards. **Out ofthe Crisis**. Cambridge: MIT Press, 1982.

DONG, H.; WANG, N.; FU, D.; WEI, F.; LIU, G.; LIU, B. Precision and Efficiency in Dam Crack Inspection: A Lightweight Object Detection Method Based on Joint Distillation for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). **Drones**, v. 8, n. 11, p. 692, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/drones8110692>. Acesso em: 17 maio 2026.

FAYOL, Henri. **Administração Industrial e Geral**. 10. ed. São Paulo: Atlas, 1990.

FRAGA, C. Seguro RETA drone é obrigatório? Entenda como contratar. **Mutuus Seguros**, 14 mai. 2026. Disponível em: https://www.mutuus.net. Acesso em: 4 jun. 2026.

FUNAHASHI JÚNIOR, Eduardo Issamu *et al*. Inspeção de estruturas de concreto afetadas por reações expansivas com o uso de drone. **Revista Concreto & Construções**, São Paulo, v. 52, n. 114, p. 65-71, abr./jun. 2024.

GALVÃO, G. A. de S.; CASTRO, H. G. de T.; COSTA, B. R. de B.; MICELI JUNIOR, G.; PELLANDA, P. C. Aplicação de Gêmeos Digitais em um Ambiente BIM de monitoramento de estruturas de edificações. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 4., 2023, Aracaju. **Anais** [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2023.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GRIEVE, M. Digital Twins: Past, Present, and Future. *In:***DIGITAL Twin Technologies and Smart Cities**. Cham: Springer, 2023. p. 1-28.

GROSSI, B. F.; SOUZA, L. M. de. A atuação da perícia criminal federal na investigação do rompimento da barragem de Fundão em Mariana/MG. **Revista Criminalística e Medicina Legal**, v. 3, p. 35-43, 2018.

HUH, J. *et al*. 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**, v. 138, 102871, 2023.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Laudo Técnico Preliminar**: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. Brasília: IBAMA, 2015.

JURAN, Joseph M. **Quality Control Handbook**. New York: McGraw-Hill, 1951.

KAO, S. P. *et al*. Bridge crack inspection efficiency of an unmanned aerial vehicle system with a laser ranging module. **Sensors**, v. 22, n. 12, 4469, 2022.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção**: função estratégica. 4. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2013.

LEE, J.; LEE, Y.; PARK, S.; HONG, C. Implementing a Digital Twin of an Underground Utility Tunnel for Geospatial Feature Extraction Using a Multimodal Image Sensor. **Applied Sciences**, Basel, v. 13, n. 16, 9137, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app13169137>. Acesso em: 05 jun. 2026.

LEE, N. **Drone-Based Bridge Health Monitoring and Inspection**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bachelor'sProgramme in Science and Technology) – AaltoUniversity, Espoo (Finlândia), 2025.

LICHTENSTEIN, N. B. **Patologia das construções**: procedimento para diagnóstico e recuperação. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1985. (Boletim Técnico).

MADER, D. *et al*. Potential of UAV-based laser scanner and multispectral camera data in building inspection. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, XLI-B1, p. 1135-1142, 2016.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MELO, M.; VEIGA, I.; MEDEIROS, J.; PELIZZOLI, L. N.; HALABI, A. L. **Gestão de Riscos em Barragens de Rejeitos**: Aplicação do Padrão Global da Indústria (GISTM) e Tecnologias de Digital Twins para Segurança e Monitoramento Eficiente. Nova Lima: Pimenta de Ávila Consultoria, 2025.

MENEZES, I. Multa por voar drone irregular: quanto custa em 2026. **Blog Irlen Menezes**, 25 abr. 2026. Disponível em: <https://drone.irlenmenezes.com.br>. Acesso em: 4 jun. 2026.

MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL (MPF). **Desastre da Vale**: relatório elaborado por universidade da Espanha aponta causas do rompimento da barragem em Brumadinho (MG). Belo Horizonte: Procuradoria da República em Minas Gerais, 4 out. 2021.

MORGENSTERN, N. R.; VICK, S. G.; VIOTTI, C. B.; WATTS, B. D. **Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam**. Fundão Tailings Dam Review Panel. Cleary Gottlieb Steen & Hamilton LLP, 2016.

MOSAIC AGROTECH. **Passo a passo da inspeção de pontes com drones e exemplos reais**. 2025. Disponível em: <https://mosaicagro.tech/passo-a-passo-da-inspecao-de-pontes-com-drones-e-exemplos-reais/#content>. Acessoem: 8 jun. 2026.

ORING, A. Fast and Robust Structural Damage Analysis of Civil Infrastructure Using UAV Imagery. **arXiv**, 2021.

PEREIRA, A. B. B. *et al*. **Engenharia Diagnóstica Aplicada à Segurança de Barragens**: Avanços Tecnológicos. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade FASEH, Vespasiano, 2025.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico**: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

ROBERTSON, P. K.; MELO, L. de; WILLIAMS, D. J.; WILSON, G. W. **Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Córrego do Feijão**. Brumadinho: Vale S.A., 2019.

ROCHA, J. H. A.; PÓVOAS, Y. V.; BEZERRA-BATISTA, P. I. Flaw recognition in reinforced concrete bridges using infrared thermography: A case study. **Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia**, n. 110, p. 99-109, 2024.

RUIZ, R. D. B.; LORDSLEEM JÚNIOR, A. C.; ROCHA, J. H. A.; IRIZARRY, J. Unmanned aerial vehicles (UAV) as a tool for visual inspection of building facades in AEC+ FM industry. **Construction Innovation**, v. 22, n. 4, p. 1155-1170, 2022.

SACKS, R.; EASTMAN, C.; LEE, G.; TEICHOLZ, P. **BIM Handbook**: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2018.

SANTO, R. C. do E. **Uma revisão bibliográfica sobre a aplicação de gêmeos digitais e aprendizado de máquina na manutenção preditiva de sistemas mecânicos**. 2025. 54 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2025.

SANTOS, A. R. **Desenvolvimento do gêmeo digital de barragens**. 2021. 88 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

SANTOS, C. A. dos; PELLEGRINI, I. de S.; SILVA, R. M. da; CALIGIORNE, S. M. Descrição dos Desastres em Mariana e Brumadinho Sob o Olhar da Perícia Criminal: Uma Revisão Sistemática. **Brazilian Journal of Forensic Sciences, Medical Law and Bioethics**, Ribeirão Preto, v. 10, n. 3, p. 350-375, 2021.

SANTOS, L. C. D.; SCORTEGAGNA, P. V.; LANGARO, E. A utilização de drones na inspeção de fachadas: integração entre plataformas aéreas, sensores e processamento fotogramétrico. **Lumen et Virtus**, São José dos Pinhais, v. 17, n. 56, p. 1-18, 2026.

SGUISSARDI, G. Inspeção de obras de arte utilizando veículo aéreo não tripulado - VANT. *In*: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA (CONTECC), 2019, Palmas. **Anais [...]**. Palmas: CONFEA, 2019.

SILVA, F. F. da. Patologias Consequentes de Falta ou Má Execução de Impermeabilização. **Revista Boletim do Gerenciamento**, v. 50, n. 34, p. 50-60, 2023.

SILVA, T. G.; SANTOS, D. F. A. Estudo das patologias da ponte sobre o rio Tocantins em Porto Nacional-TO. *In*: SEMANA DE ENGENHARIA CIVIL (SEC), 3., 2019, Marabá. **Anais [...]**. Marabá: FAPAC/ITPAC-PORTO, 2019.

SLACK, Nigel; BRANDON-JONES, Alistair; JOHNSTON, Robert. **Administração da produção**. Tradução de Daniel Vieira. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

SITTER, W. Costs for service life optimization. The Law of fives. *In*: International CEBRILEM workshop on durability of concrete structures. **Proceedings...** Copenhagen: CEBRILEM, 1984, p. 18-20.

TAVARES, Bruno. Peritos indicam que desabamento de viaduto pode ter sido provocado por problema no sistema de amortecimento. **G1**, São Paulo, 17 nov. 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2018/11/17/peritos-indicam-que-desabamento-de-viaduto-pode-ter-sido-provocado-por-problema-no-sistema-de-amortecimento.ghtml>. Acesso em: 8 jun. 2026.

TAYLOR, Frederick Winslow. **Princípios de Administração Científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 1990.

TOLÊDO, A. E. A.; PINHEIRO, T. M. Modelagem para classificação e avaliação do risco de patologias em barramentos. *In*: CONGRESSO TÉCNICO-CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA (CONTECC), 2022, Goiânia. **Anais [...]**. Goiânia: Conselho Federal de Engenharia e Agronomia (CONFEA), 2022.

VALE, L. J. S.; LORDSLEEM JÚNIOR, A. C.; FERNANDES, B.; COSTA, G. C.; ROCHA, J. H. A. Monitoramento de pontes e viadutos com uso de veículo aéreo não tripulado (VANT): estudos de caso. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 18, n. 04, p. 2864-2881, 2025.

VICENTINI, M.; SILVA, L. A. da. BIM, Gêmeos Digitais e a Gestão de Riscos para Resiliência em Projetos Geotécnicos de Mineração. **VinQ Geotecnia**, 19 set. 2025. Disponível em: <https://vinq.us/bim-gemeos-digitais-gestao-riscos-mineracao/>. Acesso em: 04 jun. 2026.