

## Artigo Técnico

# Drones para inspeção de mon trilhos

*Drone-based monorail inspection*

Caio Pompeu Cavallieri<sup>a\*</sup>, Eduardo Moreira<sup>b</sup>,  
José Antonio dos Santos<sup>b</sup>, Rodolfo Szmidke<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Pesquisas  
Tecnológicas do Estado  
de São Paulo S.A. (IPT),  
São Paulo-SP, Brasil.

<sup>b</sup> Companhia do Metropolitano  
de São Paulo (Metrô-SP),  
São Paulo-SP, Brasil.

Palavras-chave: drone; metrô; mon trilho; termografia.

Keywords: drone; metro; monorail; thermography.

\* e-mail: caiopc@ipt.br

## Resumo

Este artigo reúne os resultados das atividades desenvolvidas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A. (IPT) em conjunto com a Companhia do Metropolitan de São Paulo (Metrô-SP) para avaliar as potencialidades e limitações relacionadas ao uso de drones em inspeções de monotrilhos. Com o propósito de localizar elementos de destaque em estruturas de concreto e evidenciar características relacionadas ao padrão construtivo, dois modelos de drone foram testados, um deles com câmeras convencional e termográfica (*DJI Mavic 2 Enterprise Advanced*) e o outro apenas com uma câmera convencional (*DJI Mini 4 Pro*). Os experimentos foram conduzidos em seis trechos dos monotrilhos do Metrô-SP, quatro deles na linha 15-Prata e os outros dois na linha 17-Ouro. No geral, os resultados indicaram que os drones têm um importante papel na inspeção não destrutiva dos monotrilhos do Metrô-SP. Embora as imagens da câmera termográfica não tenham evidenciado satisfatoriamente nenhuma característica esperada, os registros feitos pela câmera convencional possibilitaram a rápida identificação de características importantes – como o estado de conservação dos *finger plates* – e ainda permitiram a construção de ortomosaicos. Mesmo sem contar com pontos de apoio, os ortomosaicos viabilizaram verificações qualitativas relacionadas à geometria de vias construídas e a elementos como edificações, pavimentação, guias e calçadas. Por fim, comparando-se os dois drones, a operação do *DJI Mini 4 Pro* mostrou-se mais segura e confortável quanto à aproximação de alvos e à prevenção de colisão.

## Abstract

*This article presents the results of activities carried out by the Institute for Technological Research of the State of São Paulo (IPT), in collaboration with the São Paulo Metropolitan Company (Metrô-SP), to assess the potential and limitations of using drones in monorail inspections. Aiming to detect notable elements in concrete structures and highlight features related to construction patterns, two drone models were tested: one equipped with both conventional and thermal cameras (DJI Mavic 2 Enterprise Advanced), and the other with only a conventional camera (DJI Mini 4 Pro). The experiments were conducted along six sections of Metrô-SP's monorails — four of them on Line 15-Silver and two on Line 17-Gold. Overall, the results indicated that drones play an important role in the non-destructive inspection of Metrô-SP's monorails. Although the thermal camera did not satisfactorily reveal any expected features, the conventional camera successfully enabled the rapid identification of key characteristics – such as visual data on the condition of finger plates – and made it possible to generate orthomosaics. Even*

*without ground control points, the orthomosaics allowed for qualitative assessments of the geometry of constructed tracks and elements such as buildings, pavement, curbs, and sidewalks. Finally, when comparing the two drones, the DJI Mini 4 Pro proved to be safer and more comfortable to operate, especially in terms of approaching targets and preventing collisions.*

## 1 Introdução

A proposta deste artigo é apresentar as atividades desenvolvidas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A. (IPT) e pela Companhia do Metropolitano de São Paulo (Metrô-SP) que, de maneira geral, tiveram o objetivo de avaliar de que forma drones podem ser usados em inspeções de monotrilhos.

As atividades realizadas foram motivadas pelo fato de que, em setores como o da construção civil, o uso de drones para aquisição de imagens convencionais (RGB, isto é, com as cores *red*, *green* e *blue* combinadas entre si em diferentes intensidades) e termais tem se destacado por permitir a coleta de dados de forma rápida e sem danificar as propriedades do material inspecionado (SANTOS; BECERE; CAVALHIERI, 2024). Imagens assim têm sido úteis para, por exemplo, detectar patologias em fachadas (ANDRADE, 2020; TONDELO; BARTH, 2019) e estruturas de concreto (DING *et al.*, 2023; FUNAHASHI FILHO *et al.*, 2024), além de complementar procedimentos convencionais como testes a percussão e ensaios com arrancamento de amostras. Complementarmente, câmeras embarcadas em drones podem conferir agilidade e segurança a atividades de inspeção em empreendimentos que tradicionalmente oferecem algum tipo de restrição de acesso (ARAÚJO *et al.*, 2020), como no caso de obras de arte especiais (FEROZ; DABOUS, 2021) e vias elevadas.

Particularmente em empreendimentos lineares elevados (como vias expressas e monotrilhos), a avaliação do estado de conservação das porções visíveis da obra por métodos convencionais costuma ter sua dinâmica prejudicada pela própria geometria das estruturas. De fato, o tamanho dos vãos entre os pilares e a altura livre do empreendimento podem tornar desafiadora a visualização de elementos importantes como, por exemplo, fissuras, bolhas, aparelhos de apoio e *finger plates*<sup>1</sup>. Além disso, há que se considerar ao menos outras duas características que tornam singulares obras assim. São elas: as particularidades da faixa de domínio e do entorno desses

**1** Dispositivos metálicos com placas dentadas instaladas nas juntas de dilatação da via permanente para o tráfego do trem em condições de conforto.

empreendimentos e suas especificidades construtivas e operacionais como aquelas relacionadas ao tráfego de veículos (carros, caminhões e os próprios trens).

Sendo assim, este artigo discute diferentes aspectos do uso de drones com câmeras convencional e termográfica em dois empreendimentos elevados do Metrô-SP, tendo como foco identificar e avaliar elementos importantes (ex: estado de conservação das estruturas de concreto e geometria das vigas).

## 2 Objetivo

O objetivo deste artigo foi explorar as potencialidades e limitações relacionadas ao uso de drones em inspeções de empreendimentos lineares elevados do Metrô-SP. Para tanto, avaliou-se o desempenho de dois drones de asa rotativa e pequeno porte (um deles com câmera convencional e o outro com câmeras convencional e termográfica) em relação à identificação de elementos importantes (ex: integridade das estruturas de concreto e estado de conservação de *finger plates*) e à segurança e ao conforto durante a operação.

## 3 Procedimento metodológico

Para alcançar os objetivos propostos, inicialmente as atividades buscaram identificar experiências em que os drones já tivessem sido usados como tecnologia não destrutiva para inspeção de empreendimentos lineares. Houve ainda a busca por registros de uso de câmeras (convencional e termográfica) na identificação de patologias superficiais e subsuperficiais em estruturas de concreto, bem como por métodos de extração de patologias e análise de seus padrões (DIAS-DA-COSTA *et al.*, 2016; CHA; CHOI; SUH, 2017).

### 3.1 Ferramentas utilizadas

Para avaliar de forma concreta o desempenho dos drones<sup>2</sup> em inspeções de monotrilhos, o foco foi testar dois drones de asa rotativa e pequeno porte (classe 3) – DJI Mavic 2

---

<sup>2</sup> O termo drone foi usado como sinônimo de RPA (*Remotely Piloted Aircraft*), um tipo de aeronave não tripulada (*unmanned aircraft* – UA) que permite intervenção humana de forma remota a qualquer instante do voo.

*Enterprise Advanced* (M2EA)<sup>3</sup> e DJI Mini 4 Pro<sup>4</sup> – como ferramentas de inspeção não destrutiva. De maneira geral, foram priorizadas tomadas com orientação ortogonal, isto é, as lentes das câmeras eram – sempre que possível – posicionadas de forma perpendicular ao objeto de interesse, de modo que a superfície da estrutura pudesse ser visualizada sem as distorções espaciais características de tomadas oblíquas. Quanto à proximidade entre drones e monotrilha, a prioridade foi garantir que os equipamentos estivessem a uma distância segura contra condições adversas como zonas de turbulência e interferência de sinal.

Para os registros feitos com a câmera convencional (isto é, capaz de fazer registros em RGB) foi priorizado o uso do drone DJI Mini 4 Pro, buscando-se garantir uma iluminação adequada para que as imagens geradas possibilitassem a caracterização de eventuais anomalias superficiais. Já em relação à termografia, os registros foram feitos pelo drone DJI M2EA, sendo que cada captura feita por esse aparelho dava origem a dois registros simultaneamente: um convencional e outro termográfico. A técnica utilizada foi a da termografia passiva (isto é, sob efeito exclusivo da energia solar) e foram priorizadas situações em que as estruturas de concreto estivessem em processo de aquecimento ou resfriamento, buscando-se contrastes de temperatura que pudessem evidenciar alguma característica anômala.

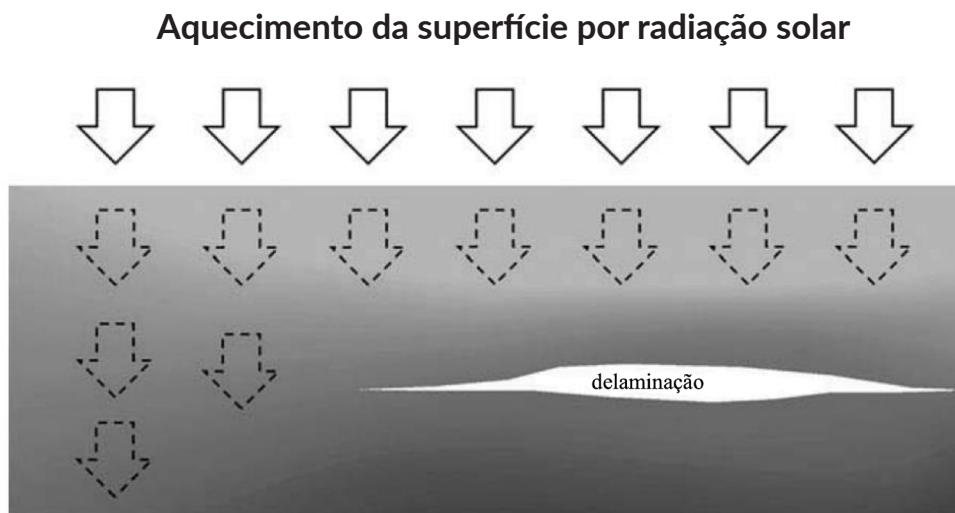
Isso se deve ao fato de que a temperatura na porção superficial de uma dada estrutura de concreto tende a variar de forma relativamente uniforme (seja em aquecimento ou resfriamento). Esse padrão só não é seguido em trechos em que a presença de patologias subsuperficiais (ex: delaminação) interrompe a via de condução do calor, favorecendo o surgimento de padrões distintos de temperatura (ELLENBERG *et al.*, 2016; SCOTT; KRUGER, 2014). Nesse sentido, caso exista alguma anomalia que represente uma descontinuidade subsuperficial no concreto, o fluxo de calor é interrompido e a superfície que cobre a patologia fica mais aquecida do que o restante da estrutura (**FIGURA 1**).

---

3 Especificações em: <https://enterprise.dji.com/mavic-2-enterprise-advanced/specs> (Acesso em: 30 jul. 2025).

4 Especificações em: <https://www.dji.com/br/mini-4-pro> (Acesso em: 30 jul. 2025).

Figura 1 - Representação de uma estrutura de concreto em que o aquecimento sobre a área da delaminação é superior ao do restante da peça.



Fonte: adaptado de Escobar-Wolf et al. (2017).

As diferentes temperaturas na superfície do concreto assumem padrões distintos nos termogramas criados a partir de imagens aéreas. O tratamento e a análise desses termogramas foram feitos com o DJI *Thermal Analysis Tool 3*<sup>5</sup>, um software gratuito que possibilita a captura de dados de temperatura e a delimitação de áreas críticas. Além disso, procederam-se análises com o Pix4DMapper. Trata-se de um *software* pago dedicado ao processamento de imagens ortogonais para geração de modelos digitais e ortomosaicos (em .TIF) no datum WGS84 / UTM 23S a partir da técnica de fotogrametria por *Structure-from-Motion Multi-view Stereopsis* (SfM-MVS) para consulta em *softwares* de geoprocessamento como o gratuito QGIS.

Particularmente em relação aos ortomosaicos, esses materiais resultaram do processamento de imagens geradas a partir de voos manuais e sem pontos de apoio (isto é, sem dispor de pontos com coordenadas conhecidas para o processamento das imagens aéreas e a análise da qualidade dos ortomosaicos). Embora a fotogrametria por SfM-MVS se beneficie de validações com pontos de apoio, assumiu-se que a qualidade posicional de produtos gerados exclusivamente com metadados das imagens aéreas seria suficiente para possibilitar alguns tipos de verificação que não fossem da ordem de milímetros.

<sup>5</sup> Em: <https://www.dji.com/downloads/softwares/dji-dtat3> (Acesso em: 30 jul. 2025).

Ainda que existam trabalhos que tratem especificamente sobre critérios para geração de produtos cartográficos por drone sem o uso de pontos de apoio (SOPCHAKI *et al.*, 2018; FORLANI *et al.*, 2018; GUTIÉRREZ *et al.*, 2024), entende-se que a ausência desse tipo de recurso é uma limitação metodológica deste trabalho. De qualquer forma, não foram utilizados pontos de apoio principalmente porque os trabalhos de campo contavam com intervalos de tempo relativamente curtos, de modo que a coleta de pontos de apoio não seria viável.

### 3.2 Áreas de estudo

Com o propósito de contribuir para o desenvolvimento e a validação de soluções relevantes, os testes com drones foram conduzidos em seis trechos dos monotrilhos do Metrô-SP (CAVALHIERI *et al.*, 2024), quatro deles na linha 15-Prata (em operação desde 2014) e os outros dois na linha 17-Ouro (em construção).

A Linha 15 – Prata conta com quase 15 km de extensão, 11 estações e via permanente dupla em vigas de concreto. Embora a inspeção visual das faces interna e superior das suas vias esteja relativamente bem resolvida por ser feita a partir de passarelas metálicas de serviço existentes entre as duas vias, o processo de diagnóstico das faces externas ainda se mostra desafiador. A porção externa das vias, também conhecida como abismo, não dispõe de acesso para verificação visual de eventuais manifestações patológicas e a condição de fixação dos parafusos dos *finger plates*.

Com previsão de inauguração para o ano de 2026, o monotrilho da Linha 17 – Ouro terá uma extensão de quase 7 km e conta com oito estações, ligando o aeroporto de Congonhas à estação Morumbi da Linha 9 – Esmeralda de trens metropolitanos. Nesta linha, além das dificuldades existentes para inspeção do abismo, há uma distância significativa entre a via permanente e as passarelas de serviço que dificulta a realização das inspeções, só sendo possível a visualização geral das condições do concreto e *finger plates*. Para inspeções mais próximas e precisas, a verificação das consolidações<sup>6</sup> somente é possível mediante a montagem de estrutura provisória com linhas de vida, sendo esta a motivação para buscar alternativas para se realizar avaliações com drones em estruturas com essas características.

---

**6** Trecho de via permanente concretado in loco após o lançamento de vigas-guia adjacentes com comprimento usual de 120 a 165cm sobre os pilares.

Os seis trechos selecionados para a realização dos testes foram escolhidos por possuírem elementos representativos de condições adversas ao uso de drones, tais como: (i) obstáculos verticais como árvores, edificações, linhas de transmissão e veículos; (ii) elementos metálicos e subestação de energia com potencial para descalibrar sensores em voo e interferir na comunicação entre drone e rádio; (iii) fluxo de veículos e estruturas com configurações favoráveis à formação de zonas de turbulência aérea (OMAR; NEHDI, 2017); (iv) estruturas cujas geometrias pudessem instabilizar a recepção do sinal de satélite.

## 4 Resultados e discussão

Durante as buscas por experiências anteriores, os materiais encontrados evidenciaram que os drones já são usados na construção civil nacional e internacional de forma ampla e consistente como tecnologia de inspeção não destrutiva. Ainda que nenhum dos artigos e relatórios consultados faça menção direta ao uso de drones em monotrilhos, esses materiais reúnem experiências com esse tipo de ferramenta em obras de arte especiais de empreendimentos lineares (como pontes e viadutos de rodovias) e também em fachadas de edifícios. Também foram encontrados registros sobre o uso de câmeras (convencional e termográfica) na identificação de patologias superficiais e subsuperficiais em estruturas de concreto. Esses materiais foram referenciados ao longo deste artigo e ainda ajudaram a estruturar as atividades que resultaram nas visitas técnicas deste trabalho.

Em relação às atividades com drones, as avaliações foram todas conduzidas em estruturas ligadas às linhas 15-Prata e 17-Ouro. A proposta era que o Metrô-SP pudesse ter uma experiência direta com esse tipo de ferramenta. Foram três visitas de campo ao todo, a saber:

- 05/02/24:
  - pátio de vigas da linha 15-Prata
  - horários dos voos: 11h40 a 12h36 / 14h57 a 15h52
  - localização aproximada:
    - 352417 E / 7392122 S (23 K / WGS84)
  
- 18/03/24:
  - dois trechos das obras da linha 17-Ouro
  - horários dos voos: 10h02 a 10h45 / 11h21 a 12h32

- localização aproximada do primeiro trecho:
  - 326925 E / 7387535 S (23 K / WGS84)
- localização aproximada do trecho com pátio de vigas:
  - 330229 E / 7384984 S (23 K / WGS84)
- 19/04/24:
  - três trechos da linha 15-Prata
  - horários dos voos: 10h21 a 11h46 / 13h51 a 14h26 / 14h40 a 14h48
  - localização aproximada do primeiro trecho:
    - 343026 E / 7389776 S (23 K / WGS84)
  - localização aproximada do segundo trecho:
    - 341030 E / 7391167 S (23 K / WGS84)
  - localização aproximada do terceiro trecho:
    - 341124 E / 7390635 S (23 K / WGS84)

A primeira visita de campo ocorreu no pátio de vigas da linha 15-Prata (**FIGURA 2**) por ser uma área que conta com vigas estocadas ao nível do terreno, onde existem duas unidades que, devido ao seu quadro fissuratório pós desforma, foram condenadas e transformadas em vigas teste, sendo submetidas a diversos ensaios. Por se tratar de um ambiente controlado, a proposta nesta etapa foi investigar a qualidade com que essas características eram registradas pelas câmeras convencional e termográfica do drone DJI M2EA.

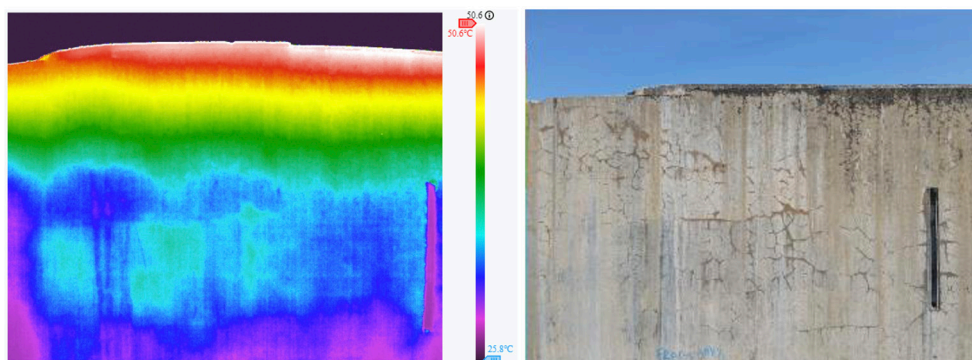
**Figura 2 – Vista geral do pátio de vigas da linha 15-Prata. Registro oblíquo convencional feito por drone na visita técnica de 05/02/24.**



Fonte: elaborado pelos autores.

No geral, as imagens obtidas com a câmera termográfica foram feitas sem que o drone estivesse em voo e a uma distância de aproximadamente 2 m, não resultando em nada que fosse diferente daquilo já registrado pela câmera convencional. Além disso, a interação com a câmera termográfica mostrou que nem sempre esse equipamento contava com o contraste de temperatura necessário para evidenciar elementos superficiais que eram detectados com nitidez pela câmera convencional (FIGURA 3). Esses dois aspectos mostraram-se suficientes para que os trabalhos de campo seguintes passassem a contar também com o drone DJI Mini 4 Pro (isto é, equipamento que conta apenas com uma câmera convencional sem o recurso termográfico). Esse drone, em comparação com o modelo com câmera termográfica, dispõe de um sistema de detecção de obstáculos mais sofisticado, além de ser mais barato se comparado com o modelo de duas câmeras.

**Figura 3 – Exemplo de fissuras em vigas teste que não foram evidenciadas na imagem da câmera termográfica (à esquerda) e são detectadas com nitidez pela câmera convencional (à direita). Registros feitos por drone na visita técnica de 05/02/24.**



**Fonte: elaborado pelos autores.**

O fato das fissuras nem sempre ficarem evidentes nos registros com câmera termográfica pode estar relacionado com os horários em que os voos foram realizados. O ideal teria sido dar prioridade a situações em que as estruturas de concreto estivessem em processo de aquecimento ou resfriamento por efeito da energia solar (NEXCO-WEST USA, 2014), algo que varia função das estações do ano e das condições meteorológicas de cada dia. No entanto, como os voos sempre foram feitos a partir das 10h00, provavelmente as estruturas de concreto e suas fissuras já estavam com temperaturas relativamente homogêneas, não havendo contraste suficiente para que esses elementos distintos se destacassem no registro termográfico.

O segundo campo foi feito em dois trechos das obras da linha 17-Ouro. Em ambos os casos, registros de drone contemplaram imagens de vigas pré-moldadas que já haviam

sido içadas e consolidadas. Além de imagens oblíquas, também foram feitas tomadas ortogonais em RGB para dar origem a um ortomosaico de uma área pré-determinada e produzindo também dois vídeos.

As imagens ortogonais foram registradas a partir de um voo feito em modo manual, ou seja, não se seguiu a abordagem convencional de se traçar um plano de voo em aplicativo específico para que o drone fizesse a varredura da área de forma automática. A opção pelo modo de registro manual justifica-se pelo fato de que drones de modelos mais simples (como é o caso do DJI Mini 4 Pro) geralmente não permitem a realização de voos voltados especificamente para aerofotogrametria. Nesse sentido, a proposta foi justamente avaliar o resultado de um ortomosaico gerado a partir de um voo manual e sem pontos de apoio.

A qualidade do material gerado demonstrou ser suficiente para que se compare, por exemplo, a geometria da via construída com aquela prevista em projeto, além de possibilitar verificações relacionadas a edificações, pavimentação, guias e calçadas (**Figuras 4 e 5**).

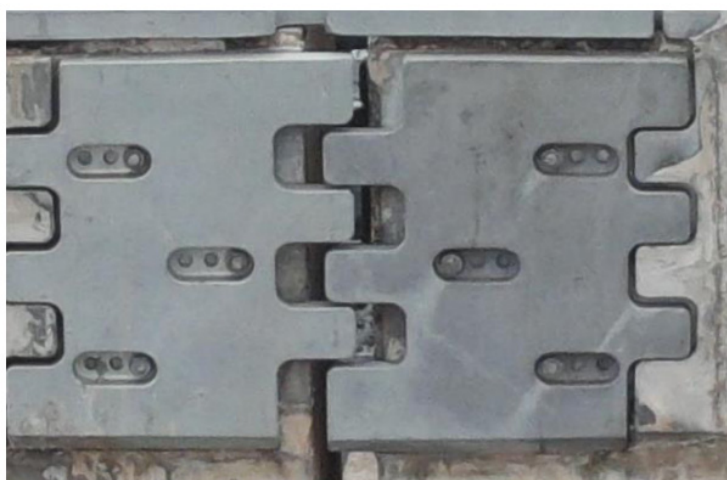
**Figuras 4 e 5 - Ortomosaico do primeiro trecho visitado na linha 17-Ouro em 18/03/24 (acima) e sua versão sobreposta por dados de projeto (abaixo) . Dados gerados por drone em voo manual.**



Fonte: elaborado pelos autores.

Já as imagens oblíquas e os vídeos<sup>7</sup> foram feitos em diferentes ângulos. Os registros obtidos com a câmera convencional possibilitaram a rápida identificação de elementos como fissuras superficiais e finger-plates. Particularmente no caso dos finger-plates, o maior interesse era avaliar as condições em que se encontravam os parafusos usados na fixação desse dispositivo (FIGURA 6). Essas tomadas também foram utilizadas na verificação geométrica qualitativa das vigas instaladas (FIGURA 7).

**Figura 6 – Detalhe de um dos finger-plates existentes no segundo trecho visitado da linha 17-Ouro em 18/03/24. Registro feito por drone.**



Fonte: elaborado pelos autores.

**Figura 7 – Exemplo de registro oblíquo feito para a caracterização geométrica das vigas. Registro feito por drone no segundo trecho visitado da linha 17-Ouro em 18/03/24.**

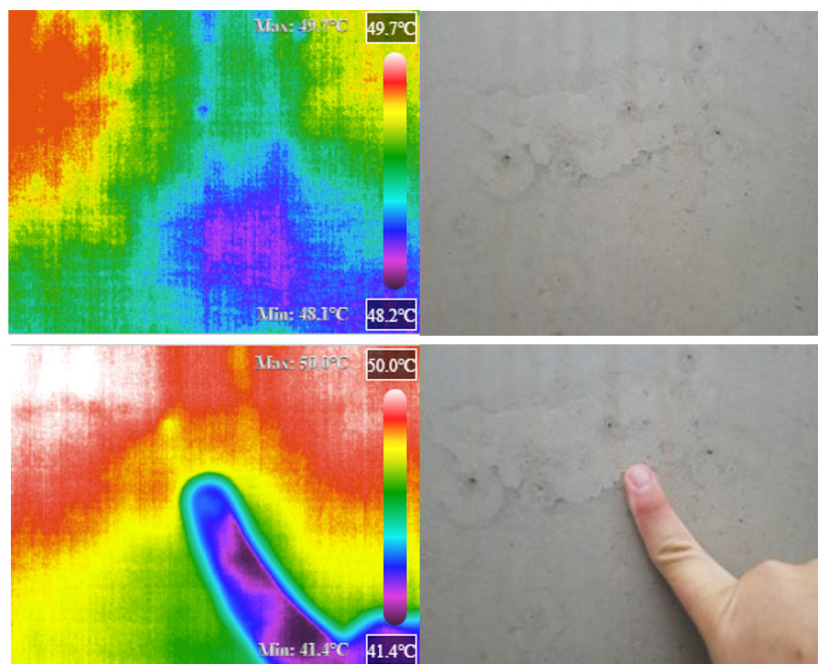


Fonte: elaborado pelos autores.

7 Em <https://youtu.be/ISA33SdzvZM> e [https://youtu.be/xxD\\_BO2bmLk](https://youtu.be/xxD_BO2bmLk) (Acesso em: 30 jul. 2025).

Também foram feitos registros com a câmera termográfica no pátio de vigas da linha 17-Ouro. Novamente as imagens dessa câmera não evidenciaram características que apareceram de forma nítida nos registros da câmera convencional. Na temperatura e no horário em que ocorreu a visita técnica, não foi possível registrar de forma nítida nenhuma alteração com a câmera termográfica nem mesmo quando se adicionou à cena a mão do operador de drone por ser capaz de promover contraste de temperatura, efeito que foi obtido com a temperatura corporal (Figuras 8 e 9). Mais uma vez o resultado obtido com a câmera convencional contava com uma nitidez superior. Além disso, os registros termográficos atribuíram à temperatura corporal valores entre 41,4°C e 42,5°C, algo que não correspondia à realidade.

**Figuras 8 e 9 – Registros sem e com contraste de temperatura na visita ao pátio de vigas da linha 17-Ouro. Notar que a temperatura corporal promove o contraste termográfico em relação à superfície do concreto. Registro feito com o drone em mãos em 18/03/24.**



**Fonte: elaborado pelos autores.**

O terceiro e último campo contemplou três trechos da linha 15-Prata. Nesse caso, além de imagens oblíquas e registros ortogonais em RGB para dar origem ao ortomosaico (FIGURA 10), a proposta dessa etapa foi realizar voos em meio a condições adversas representadas pela presença de: (i) obstáculos verticais com edifícios, árvores e linha de transmissão (FIGURA 11); (ii) elementos metálicos e subestação de energia; e (iii) zonas de turbulência

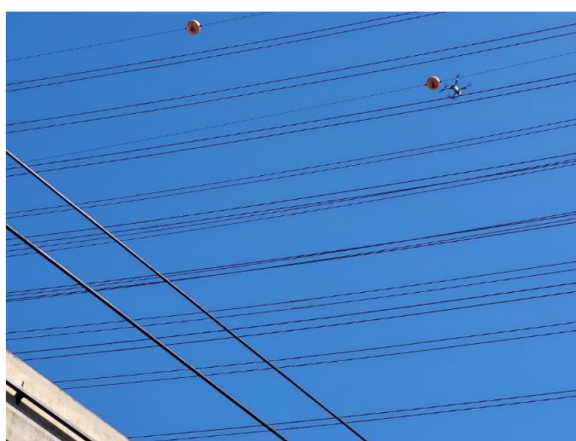
aérea com a passagem de trens (FIGURA 12). No geral, os dois drones não apresentaram quaisquer sinais de instabilidade e nenhuma anormalidade foi detectada durante os voos feitos nessas condições desfavoráveis. Ainda assim, o fato do drone DJI Mini 4 Pro contar com um sistema de detecção de obstáculos de qualidade superior ao do drone DJI M2EA tornou a sua operação mais segura e confortável, inclusive favorecendo uma maior aproximação em relação aos alvos.

**Figura 10 – Ortomosaico do primeiro do trecho visitado na linha 15-Prata (estação Camilo Haddad) em 19/04/24. Dados gerados por drone em voo manual.**



Fonte: elaborado pelos autores.

**Figura 11 – Registro durante teste dedicado a identificar eventuais interferências que a linha de transmissão de alta tensão poderia causar no voo do drone. Registro feito por drone em 19/04/24 no primeiro trecho visitado da linha 15-Prata.**



Fonte: elaborado pelos autores.

**Figura 12 – Registro durante teste dedicado a identificar eventuais interferências que a passagem de trem poderia causar no voo do drone. Registro feito por drone em 19/04/24 no primeiro trecho visitado da linha 15-Prata.**



**Fonte: elaborado pelos autores.**

## 5 Conclusões

Este artigo apresentou os resultados das atividades desenvolvidas pelo IPT e pelo Metrô-SP, reunindo considerações sobre as potencialidades e limitações relacionadas ao uso de dois drones DJI M2EA e DJI Mini 4 Pro em inspeções não destrutivas de seis trechos dos mon trilhos do Metrô-SP, quatro deles na linha 15-Prata e os outros dois na linha 17-Ouro. No geral, os resultados são suficientes para se afirmar que drones constituem uma importante ferramenta para a inspeção de empreendimentos lineares desse tipo.

Trata-se de um equipamento que, por meio dos registros com suas câmeras convencional e termográfica, permite a aquisição de dados de forma rápida, segura para os operadores e sem comprometer a integridade dos materiais inspecionados. Além disso, sua versatilidade possibilita a identificação de características relevantes (especialmente na fase construtiva)

e avaliação do estado de conservação das estruturas (mais comum na fase de operação), o que vale inclusive para trechos em que a visualização de elementos importantes costuma ficar prejudicada pela geometria das próprias estruturas e/ou pela existência de obstáculos.

Em relação aos dois drones testados, constatou-se que as imagens feitas com a câmera termográfica não detectaram nenhum elemento diferente daqueles registrados pela câmera convencional. Além disso, muitas vezes os registros da câmera termográfica não apresentam nitidez suficiente para evidenciar características distintas que, em contrapartida, apareceram com clareza nos registros feitos na forma de imagem e vídeo com a câmera convencional.

Outro aspecto interessante é que as imagens ortogonais feitas com a câmera convencional mesmo sem pontos de apoio podem ser usadas para dar origem a ortomosaicos com qualidade suficiente para, por exemplo, que se compare a geometria da via construída com aquela prevista em projeto. Complementarmente, em comparação com o drone DJI M2EA, o drone DJI Mini 4 Pro mostrou-se mais seguro e confortável em relação à aproximação de alvos e à prevenção de colisão, algo que está diretamente associado à qualidade do sistema de detecção que esse modelo apresenta.

Tendo em vista a realização de eventuais estudos complementares a este, sugere-se que seja priorizada a realização de ensaios com a câmera termográfica em situações em que as estruturas de concreto estejam em processo de aquecimento ou resfriamento. Em condições assim, a temperatura na porção superficial irá variar de forma uniforme, com exceção de trechos em que a via de condução de calor seja interrompida pela presença de patologias subsuperficiais. Nesse sentido, outra sugestão é que parte dos ensaios seja conduzida em estruturas de concreto que contenham alguma anomalia (ex: delaminação). Contar com estruturas que disponham de anomalias subsuperficiais e acompanhá-las em situações de aquecimento ou resfriamento são duas condições que, se conciliadas simultaneamente, tendem a favorecer a avaliação do desempenho das câmeras termográficas. Por fim, em relação a casos que se proponham a elaborar ortomosaicos, sugere-se a utilização de um equipamento compatível com aplicativo que permita a elaboração de planos de voo, além do uso de pontos de apoio. Isso favorecerá a aquisição de imagens ortogonais com sobreposições adequadas que, ao serem processadas em software de fotogrametria ou na nuvem, darão origem a ortomosaicos com maior precisão e acurácia.

## 6 Agradecimentos

À geóloga Juliana Sabrina da Conceição Silva (FIPT), ao geólogo MSc. Lucas Henrique Sandre (FIPT), à engenheira ambiental Luciana Conceição Valentim (FIPT) e ao engenheiro civil MSc. Alexandre Cordeiro dos Santos (IPT) pelas participações nas coletas de dados em campo. À oceanógrafa MSc. Larissa Felicidade Werkhauser Demarco (IPT) e à pesquisadora Edna Baptista dos Santos Gubitoso (IPT) pelas contribuições nas etapas de revisão e referências.

## 6 Referências

ANDRADE, R. P. **Uso da termografia infravermelha embarcada em drone como ferramenta para a inspeção de patologias em revestimentos aderidos de fachada.** 2020. 237 f. Dissertação (Mestrado)- Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3153/tde-18112020-102555/publico/RenanPereiradeAndradeCORR20.pdf>. Acesso em: 25 maio 2024.

ARAÚJO, W.; GOMES, G. N. S.; LUCENA, A.; SOUZA, H.; RIBEIRO, I. Avaliação de manifestações patológicas com uso de drone. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIAS DAS CONSTRUÇÕES, 4., 2020, Fortaleza. **Anais [...]**. Porto Alegre: Alconpat, 2020. 8 p. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/343327398\\_AVALIACAO\\_DE\\_MANIFESTACOES\\_PATOLOGICAS\\_COM\\_USO\\_DE\\_DRONE](https://www.researchgate.net/publication/343327398_AVALIACAO_DE_MANIFESTACOES_PATOLOGICAS_COM_USO_DE_DRONE). Acesso em: 15 maio 2024.

CAVALHIERI, C. P.; SANTOS, J. A.; SILVA, E. M.; SZMIDKE, R. Monorail Track Inspection with the Use of Drones. In: ANNUAL CONFERENCE, MONORAILEX, 16., 2024, Berlin. **Proceedings [...]**. Berlin: International Monorail Association, 2024. v. 1. p. 1-18.

CHA, Y.; CHOI, W.; SUH, G. Autonomous Structural Visual Inspection Using Region-Based Deep Learning for Detecting Multiple Damage Types. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, n. 4, p.1-17, Nov. 2017.

DIAS-DA-COSTA, D.; VALENÇA, J.; JULIO, E. N. B. S.; ARAUJO, H. J. Crack propagation monitoring using an image deformation approach. **Structural Control and Health Monitoring**, v. 24, n. 10, p. 1-14, Dec. 2016. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/312921787\\_Crack\\_propagation\\_monitoring\\_using\\_an\\_image\\_deformation\\_approach](https://www.researchgate.net/publication/312921787_Crack_propagation_monitoring_using_an_image_deformation_approach). Acesso em: 02 jul. 2025.

DING, W.; YANG, H.; YU, K.; JIANGPENG, S. Crack detection and quantification for concrete structures using UAV and transformer. **Automation in Construction**, v. 152, art. 104929, Aug. 2023.

ELLENBERG, A.; KONTSOS, A.; MOON, F.; BARTOLI, I. Bridge deck delamination identification from unmanned aerial vehicle infrared imagery. **Automation in Construction**, v. 72, part 2, p. 155-165, Dec. 2016.

ESCOBAR-WOLF, R. OOMMEN, T.; BROOKS, C. N.; DOBSON, R. J.; AHLBORN, T. M. Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-Based Assessment of Concrete Bridge Deck Delamination Using Thermal and Visible Camera Sensors: A Preliminary Analysis. **Research in Nondestructive Evaluation**, v. 29, n. 4, p. 1-16, Apr. 2017. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/316173366\\_Unmanned\\_Aerial\\_Vehicle\\_UAV-Based\\_Assessment\\_of\\_Concrete\\_Bridge\\_Deck\\_Delamination\\_Using\\_Thermal\\_and\\_Visible\\_Camera\\_Sensors\\_A\\_Preliminary\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/316173366_Unmanned_Aerial_Vehicle_UAV-Based_Assessment_of_Concrete_Bridge_Deck_Delamination_Using_Thermal_and_Visible_Camera_Sensors_A_Preliminary_Analysis). Acesso em: 02 jul. 2025.

FEROZ, S.; DABOUS, S. A. UAV-based remote sensing applications for bridge condition assessment. **Remote Sensing**, v. 13, n. 91809, p. 1-38, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/9/1809>. Acesso em: 15 maio 2024.

FORLANI, G.; DALL'ASTA, E.; DIOTRI, F.; MORRA DI CELLA, U.; RONCELLA, R.; SANTISE, M. Quality Assessment of DSMs Produced from UAV Flights Georeferenced with On-Board RTK Positioning. **Remote Sensing**, v. 10, n. 2, p. 1-22, Feb. 2018. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/323283344\\_Quality\\_Assessment\\_of\\_DSMs\\_Produced\\_from\\_UAV\\_Flights\\_Georeferenced\\_with\\_On-Board\\_RTK\\_Positioning](https://www.researchgate.net/publication/323283344_Quality_Assessment_of_DSMs_Produced_from_UAV_Flights_Georeferenced_with_On-Board_RTK_Positioning). Acesso em: 02 jul. 2025.

FUNAHASHI FILHO, E. I.; GAMBALE, P.; GUY, P-Y; KUPERMAN, S. C.; HASPAYK, N. P. Inspeção de estruturas de concreto afetadas por reações expansivas com o uso de drone. **Revista Concreto & Construções**, v. 52, p. 65-71, abr./jun. 2024. Disponível em: [https://ibracon.org.br/Site\\_revista/Concreto\\_Construcoes/pdfs/edicao114/Revista%20Concreto%20IBRACON%20114%20-%20Inspecao%20e%20manutencao%202.pdf](https://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/pdfs/edicao114/Revista%20Concreto%20IBRACON%20114%20-%20Inspecao%20e%20manutencao%202.pdf). Acesso em: 02 jul. 2025.

GUTIÉRREZ, A. G.; SANCHEZ-FERNANDEZ, M.; SANJOSE-BLASCO, J. J.; GUDINO-ELIZONDO, N.; LAVADO-CONTADOR, F. Is it possible to generate accurate 3D point clouds with UAS-LIDAR and UAS-RGB photogrammetry without GCPs? A case study on a beach and rocky Cliff. **Landscape Ecology**, v. 39, n. 11, p. 1-24, Nov. 2024. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/385594771\\_Is\\_it\\_possible\\_to\\_generate\\_accurate\\_3D\\_point\\_clouds\\_with\\_UAS-LIDAR\\_and\\_UAS-RGB\\_photogrammetry\\_without\\_GCPs\\_A\\_case\\_study\\_on\\_a\\_beach\\_and\\_rocky\\_cliff](https://www.researchgate.net/publication/385594771_Is_it_possible_to_generate_accurate_3D_point_clouds_with_UAS-LIDAR_and_UAS-RGB_photogrammetry_without_GCPs_A_case_study_on_a_beach_and_rocky_cliff). Acesso em: 02 jul. 2025.

NEXCO-WEST USA. **Comparison of Infrared Cameras for Concrete Bridge Deck Scanning**: vol. 2 Field Test at Haymarket Bridge. Washington, DC, Nexco-West, 2014. v. 2, 19 p. Disponível em: <https://www.w-nexco-usa.com/assets/documents/Vol.2%20On-Site%20Test.pdf>. Acesso em: 15 maio 2024.

OMAR, T.; NEHDI, M. L. Remote sensing of concrete bridge decks using unmanned aerial vehicle infrared thermography. **Automation in Construction**, v. 83, p. 360-371, Nov. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580517301139>. Acesso em: 15 maio 2024.

SANTOS, A. C.; BECERE, O. H.; CAVALHIERI, C. P. Tecnologias digitais: inspeção de fachadas com drone acoplado com câmera convencional ou termográfica. **Revista Concreto & Construções**, v. 52, n. 114, p. 29-31, abr./jun. 2024. Disponível em: <https://site.ibracon.org.br/revista-concreto-construcoes-edicao-114/>. Acesso em: 02 jul. 2025.

SCOTT, M.; KRUGER, D. Infrared thermography as a diagnostic tool for subsurface assessments of concrete structures. In: EKOLU, S. T.; DUNDU, M.; GAO, X. **Construction Materials and Structures**. Amsterdam: IOS Press Books, 2014. p. 904 – 909. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/389248109\\_Infrared\\_thermography\\_as\\_a\\_diagnostic\\_tool\\_for\\_subsurface\\_assessments\\_of\\_concrete\\_structures#:~:text=Infrared%20thermography%2C%20as%20a%20diagnostic,techniques%20used%20for%20delamination%20surveys](https://www.researchgate.net/publication/389248109_Infrared_thermography_as_a_diagnostic_tool_for_subsurface_assessments_of_concrete_structures#:~:text=Infrared%20thermography%2C%20as%20a%20diagnostic,techniques%20used%20for%20delamination%20surveys). Acesso em: 02 jul. 2025.

SOPCHAKI, C. H.; PAZ, O. L. S.; GRAÇA, N. L. S. S.; SAMPAIO, T. V. M. Verificação da qualidade de ortomosaicos produzidos a partir de imagens obtidas com aeronave remotamente pilotada sem o uso de pontos de apoio. **Revista Ra'e Ga**, Curitiba, v. 43, p. 200-214, fev. 2018. (Temático de Geotecnologias). Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/56564/34905>. Acesso em: 02 jul. 2025.

TONDELO, P. G.; BARTH, F. Análise das manifestações patológicas em fachadas por meio de inspeção com VANT. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 10, p. e019009, fev. 2019. ISSN 1980-6809. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8652817>. Acesso em: 15 maio 2024. Doi: <https://doi.org/10.20396/parc.v10i0.8652817>.

10.29327/2774886.9.29-1

