



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA 3

INSPEÇÃO DE VIAS DO MONOTRILHO COM O USO DE DRONES

AUTORES

Caio Pompeu Cavalhieri

Eduardo Moreira da Silva

José Antonio dos Santos

Rodolfo Szmidke

INTRODUÇÃO

Em setores como o da construção civil, o uso de drones para aquisição de imagens convencionais (RGB) e termais tem se destacado por permitir a coleta de dados de forma rápida e sem danificar as propriedades do material inspecionado. Imagens assim são úteis para, por exemplo, detectar patologias em fachadas (ANDRADE, 2020; TONDELO; BARTH, 2019) e estruturas de concreto, além de complementar procedimentos convencionais como testes a percussão e ensaios com arrancamento de amostras. Complementarmente, câmeras embarcadas em drones podem conferir agilidade e



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

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; OMAR; NEHDI, 2017) e vias elevadas.

Particularmente em empreendimentos lineares elevados, como os monotrilhos, a avaliação do estado de conservação das porções visíveis da obra por métodos convencionais costuma ter sua dinâmica prejudicada pela própria geometria da mesoestrutura e superestrutura. 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, manifestações patológicas, aparelhos de apoio e *finger plates*. Além disso, há que se considerar ao menos outras duas características que tornam singulares obras assim: as particularidades da faixa de domínio e do entorno desses empreendimentos e suas especificidades construtivas e operacionais como aquelas relacionadas ao tráfego de veículos (carros, caminhões e os próprios trens).

Nessas questões cumpre destacar que as linhas de monotrilho da cidade de São Paulo se encontram em diferentes etapas de construção/operação, diferenciando assim as dificuldades encontradas, como a falta de equipamentos para a realização de inspeção manual (como plataformas elevatórias, veículos de via, etc.), nas obras em construção, enquanto que nos trechos em operação as dificuldades são relativas ao pouco tempo disponível para realizar as inspeções e interfaces com a via permanente energizada.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Sendo assim, a proposta deste trabalho foi explorar as potencialidades e limitações do uso de drones com câmeras visual e termal em dois empreendimentos lineares elevados do Metrô de São Paulo, tendo como foco a identificação de manifestações patológicas em estruturas de concreto. Conforme detalhado adiante, um drone de asa rotativa e pequeno porte foi testado como ferramenta de inspeção não destrutiva. Os testes tiveram como foco dois monotrilhos localizados em uma área densamente urbanizada e que se destacava pela dificuldade de identificação visual de patologias especialmente nas faces externas de suas vias.

DIAGNÓSTICO

Na primeira etapa deste trabalho, procurou-se identificar de que forma a literatura retrata o uso de drones como tecnologia não destrutiva para inspeção de empreendimentos lineares. Além disso, parte da revisão bibliográfica foi dedicada a buscar experiências de uso de câmeras (visual e termal) na identificação de patologias superficiais e subsuperficiais especificamente em estruturas de concreto. Os materiais encontrados durante essa fase, além de evidenciarem que os drones já são usados na construção civil de forma ampla e consistente, ainda ajudaram a estruturar a parte experimental desta pesquisa e compuseram as referências bibliográficas distribuídas ao longo do texto.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

Outro aspecto metodológico importante é que os testes deste trabalho foram motivados pelos desafios de inspeção vivenciados por duas linhas em monotrilho localizadas em São Paulo (SP), uma das regiões metropolitanas mais populosas do mundo. Assim, com o propósito de contribuir para o desenvolvimento de soluções para problemas enfrentados pelos empreendimentos em questão, os experimentos foram conduzidos tendo como alvo a mesoestrutura e superestrutura do próprio monotrilho e, ao mesmo tempo, utilizando-se um drone que já era operado para fins de segurança patrimonial em outras linhas do Metrô, conforme descrito a seguir.

1. Monotrilho como objeto de estudo

Inaugurada em 2014, a Linha 15 – Prata da Companhia do Metropolitano de São Paulo - Metrô 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 (Figura 1). 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 dispositivos metálicos denominados *finger plates*.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 1 – Vista geral de parte do monotrilho da Linha 15 - Prata
Fonte: Metrô-SP, 2023

Com previsão de inauguração para o ano de 2026, o monotrilho da Linha 17 – Ouro, em construção pela Companhia do Metropolitano de São Paulo - Metrô, terá uma extensão de 6,7 quilômetros e 8 estações, ligando o aeroporto de Congonhas à estação Morumbi da Linha 9 – Esmeralda de trens metropolitanos.

Nesta linha de monotrilho, além das dificuldades existentes para inspeção do lado “abismo” da via permanente, existe uma distância desta até as passarelas de serviço, o que dificulta a realização das inspeções nas vigas-guia e consolidações, só sendo possível a visualização geral das condições do concreto e dos *finger plates*. Para inspeções mais próximas, só é possível verificar as consolidações mediante a montagem de estrutura com linhas de vida, dificultado a realização da atividade.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Como os trechos de via permanente e estações do monotrilho da Linha 17 se encontram em construção, o acesso para a inspeção só podia ser realizado por meio de plataformas elevatórias até meados de 2021, e a partir deste momento foi possível iniciar a inspeção com o uso de veículos manuais (empurrados pelo esforço físico do operador), e veículos com motores a combustão e com motores elétricos alimentados por gerador a diesel (que são utilizados na instalação dos trilhos de energia na via). Mesmo estes veículos possuem limitação de atuação, tendo em vista que foram fabricados para outras finalidades e a atividade de inspeção de via depende da sua disponibilidade.



Figura 2 – Vista geral de parte do monotrilho da Linha 17 - Ouro
Fonte: IPT/Metrô-SP, 2024

Os trechos selecionados para a realização dos testes foram escolhidos por possuir elementos representativos de condições adversas ao uso de drones, tais como: (i)



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

obstáculos verticais como árvores, edificações, linhas de transmissão e veículos; (ii) elementos metálicos e subestação de energia com potencial para descalibrar equipamentos em voo e interferir na comunicação entre drone e rádio; (iii) fluxo de veículos e estruturas com configurações favoráveis à formação zonas de turbulência aérea; (iv) estruturas cujas geometrias pudessem instabilizar a recepção do sinal de satélite.

Ao todo foram selecionados dois trechos, um deles com aproximadamente 15 km de extensão e que se destacava por se encontrar em operação (Linha 15 – Prata), enquanto o outro trecho tinha aproximadamente 6 km e seu destaque devia-se ao fato de ainda se encontrar em construção (Linha 17 – Ouro). Durante a realização dos testes na Linha 15, o empreendimento foi mantido em operação em todos os trechos selecionados.

Além disso, a fase experimental também contou com testes preliminares realizados em pátios de fabricação de vigas e de estacionamento de trens dos empreendimentos. As imagens geradas nessa etapa foram feitas com o propósito inicial de identificar correlações entre as características das vigas pretendidas e os padrões termográficos.

2. Drone com câmeras visual e termal

Um dos drones utilizados nos testes foi o DJI Mavic 2 Enterprise Advanced (M2EA), um equipamento que já era empregado em outras atividades relativas à operação do monotrilho da Linha 15 - Prata. Trata-se de um aparelho de pequeno porte (909g), com



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

asa rotativa e câmeras visual (48MP) e termal (640 x 512px e cobertura espectral entre 8 e 14 μ m). As especificações completas desse equipamento estão disponíveis para consulta no site do fabricante [https://dl.djicdn.com/downloads/Mavic_2_Enterprise_Advanced/20210331/Mavic_2_Enterprise_Advanced_User_Manual_PTBR.pdf].

Durante a fase que antecedeu os testes, cogitou-se usar outros três modelos de drone que se encontravam à disposição. São eles: DJI Inspire 1 v2.0, o Parrot Anafi Thermal, e o DJI 4 Mini, onde dois deles encontravam-se à disposição para serem usados nos testes e um outro precisaria ser adquirido, sendo que o DJI Inspire 1 é um drone muito grande, e não permite registros visuais e termais de forma simultânea em um mesmo voo.

Tabela 1 – Tipos de drones

	Inspire 1 v2.0	Anafi Thermal	M2EA	DJI 4 Mini
Fabricante	DJI	Parrot	DJI	DJI
Peso	3060g	315g	909g	249g
resolução da imagem	12MP	21MP	48MP	48MP
termal radiométrica	não	sim	sim	não
resolução da termal	336 x 256px	160 x 120px	640 x 512px	-
espectro da termal	7,5 a 13,5 μ m	8 a 14 μ m	8 a 14 μ m	-
visual/termal integradas	não	sim	sim	-



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

3. Registros das câmeras visual e termal

Tendo em vista as configurações das câmeras embarcadas no drone M2EA, cada captura que foi feita em durante o voo dava origem a dois registros simultaneamente: um visual e outro termal. Foram priorizadas tomadas com direcionamento ortogonal, ou seja, sempre que possível, as lentes das câmeras eram 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 o drone e o monotrilho variou bastante, o critério predominante foi garantir que o aparelho estivesse a uma distância segura em relação a condições adversas como zonas de turbulência e interferência de sinal.

Considerando-se os registros feitos por câmera visual, a proposta foi gerar imagens com iluminação suficientes para garantir a visualização de manifestações patológicas superficiais.

Já em relação às imagens termais, utilizou-se a técnica de termografia passiva e foram priorizadas situações em que as temperaturas mais altas das estruturas de concreto ainda estivessem em processo de aquecimento e/ou resfriamento devido ao efeito da energia solar, apresentando contrastes de temperatura em relação à queda da temperatura ambiente do ar. A razão para essa escolha é que a temperatura na maior parte da superfície da estrutura do empreendimento tende a variar se aquecendo ou se

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

resfriando de maneira relativamente uniforme, com exceção de trechos em que a presença de patologias subsuperficiais como delaminação interrompem a via de condução do calor e acabam assumindo temperaturas com padrão diferente.

De maneira geral, esse é o princípio que norteia os procedimentos de inspeção termográfica passiva em estruturas de concreto. Quando há o aquecimento da estrutura por influência do sol e da própria temperatura do ar, o calor da superfície é transferido para o interior da estrutura por meio do concreto onde a temperatura ainda está mais baixa. Assim, caso exista alguma manifestação patológica subsuperficial que represente uma descontinuidade nessa estrutura de concreto, esse fluxo de calor é interrompido e a superfície que cobre a manifestação patológica acaba ficando mais aquecida do que o restante da estrutura (Figura 3).

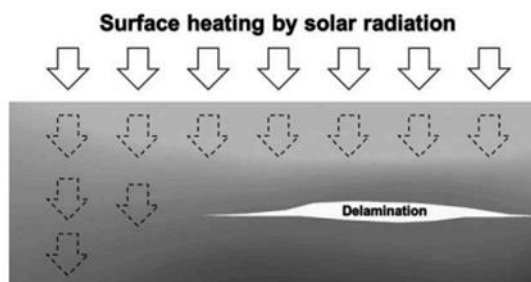


Figure 1. Illustration of the heat flow through the concrete body as it is heated by a source applied on its surface. Areas above delaminations will heat more than adjacent areas that do not have such defects.

Figura 3 – Distribuição do fluxo de calor em estrutura de concreto

Fonte: <https://publicationslist.org/data/thomas.oommen/ref-71/Escobar-wolf%20et%20al%202017.pdf> (Acesso em 05/08/2024)

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

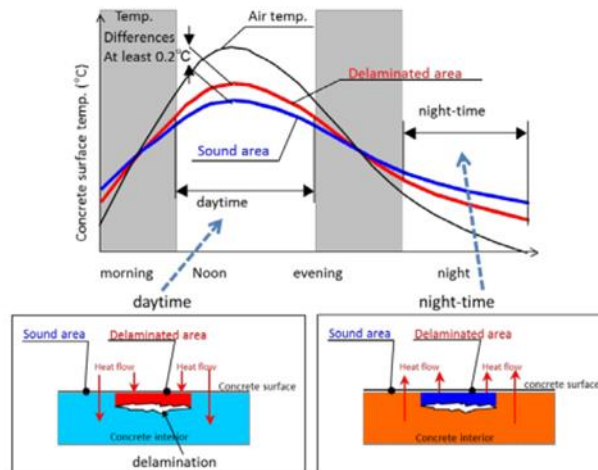


Figure 9: Concept of infrared inspection by temperature differential

Figura 4 – Concepção de inspeção térmica devido às diferenças de temperatura

Fonte: <https://www.w-nexco-usa.com/assets/documents/Vol.2%20On-Site%20Test.pdf> (acesso em 05/08/2024)

As diferentes temperaturas na superfície do concreto assumem padrões distintos nos termogramas criados a partir de sobreposição com as imagens aéreas. A análise desses termogramas teve um caráter qualitativo e foi feita com o DJI Thermal Analysis Tool 3, software gratuito que está disponível para download no site do fabricante.

4. Visitas

Foi estabelecido um cronograma de visitas aos empreendimentos para avaliação de diferentes características:

Tabela 2 – Programação de testes

Dia 1	Teste em fábrica de vigas (L15), avaliação de fotos comuns e térmicas
Dia 2	Teste em via desenergizada e pátio de estacionamento de trens (L17), avaliação interferência passarela metálica
Dia 3	Teste em via energizada (L15), avaliação de interferência do trilho de energia, passagem do trem e de linha de alta tensão



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Para a realização das visitas, se fez necessário um planejamento de voo para a utilização dos drones, sendo necessária a obtenção de autorização de voo em cada local previsto, com as informações das condições de voo e operação.

A autorização de voo requer a emissão de documentações, conforme segue:

- Seguro RETA – seguro para possíveis danos causados por acidente com o drone a terceiros;
- Cadastro ANAC – cadastro da aeronave e do piloto. Do piloto em casos específicos de voo;
- Cadastro ANATEL – o drone deve ser homologado no órgão federal, tendo em vista ser um equipamento que emite radiofrequência;
- Autorização DECEA – no “Sarpas”, sistema de autorização de liberação do espaço aéreo, há a necessidade de cadastro do piloto e vínculo com a ANATEL para solicitação de liberação do voo.

a. Dia 1 (05/02/24)

A visita foi realizada no pátio de fabricação de vigas-guia da Linha 15 – Prata, localizada na Avenida Jacú-Pêssego. No local existem diversas vigas fabricadas estocadas para o futuro trecho entre as estações Jardim Colonial e Jacú-Pêssego. Os voos foram realizados em dois horários (11h40 a 12h36 e 14h57 a 15h52) com a seguinte localização

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

aproximada: 352417 E / 7392122 S (23 K / WGS84)

<https://maps.app.goo.gl/zx1yj41C3m7MQP9x8>.

No mesmo local, existem duas vigas-guia que foram fabricadas e acabaram por ser condenadas devido a seu quadro fissuratório pós desforma. Estas vigas atualmente são utilizadas como vigas teste para a aplicação de produtos e avaliação de características de fabricação.

Como as vigas se encontram estocadas ao nível do terreno, inicialmente foram realizados testes com o drone sem que este esteja em voo, apenas segurando o aparelho e realizando os registros fotográficos com a câmera comum e a câmera térmica. Foi utilizada uma distância média aproximada de 2m para a realização deste teste.

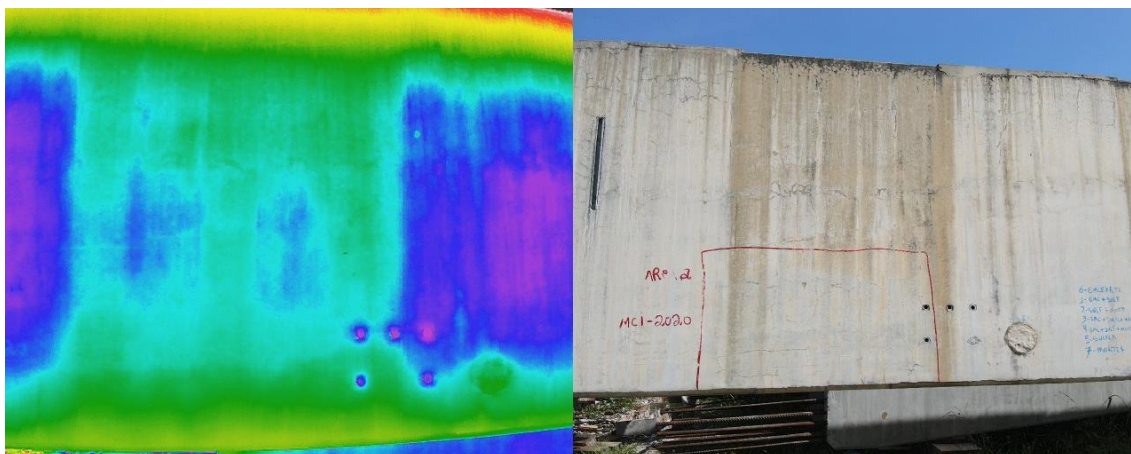


Figura 5 – Teste com a câmera térmica em viga teste
Fonte: IPT/Metrô-SP, 2024

Foram feitos registros de fissuras da viga-guia e de nichos de reparo executados com diferentes tipos de materiais. Nos registros com a câmera comum, devido à qualidade

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

de imagem resultante das fotos, foi possível identificar detalhes de fissuras com aberturas muito pequenas, bem como dos nichos e deslocamentos localizados.

Na verificação com a câmera térmica, as fotos resultantes não mostraram características mais específicas do que as apresentadas com a câmera comum, sendo inclusive menos detalhadas, devido à menor resolução de imagem que esta câmera possui.

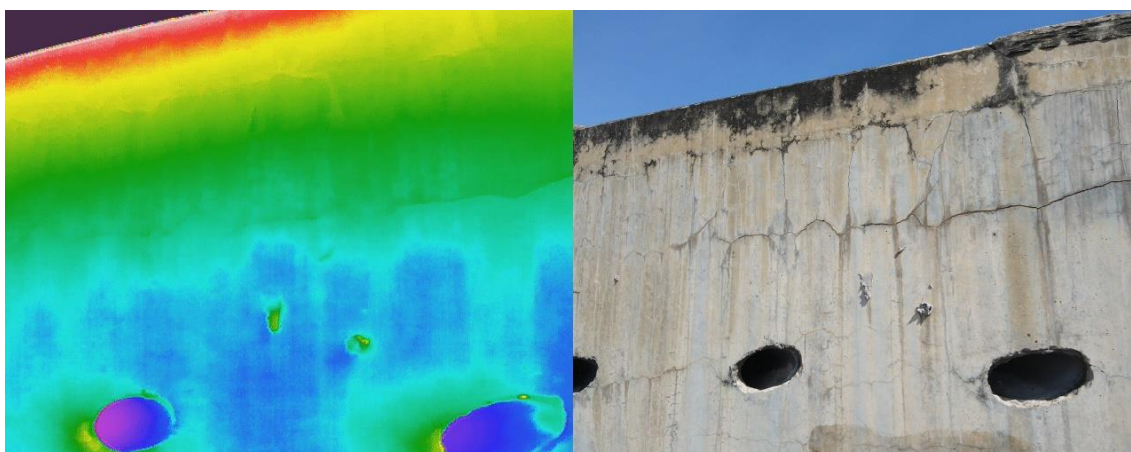


Figura 6 – Teste com a câmera térmica em viga teste para verificação de fissuras
Fonte: IPT/Metrô-SP

Foi realizado um experimento de lançar água sobre um dos nichos de reparo executados para avaliar os efeitos com a câmera térmica, contudo não foram observadas diferenças expressivas que pudessem levar à utilização deste tipo de dispositivo na inspeção.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

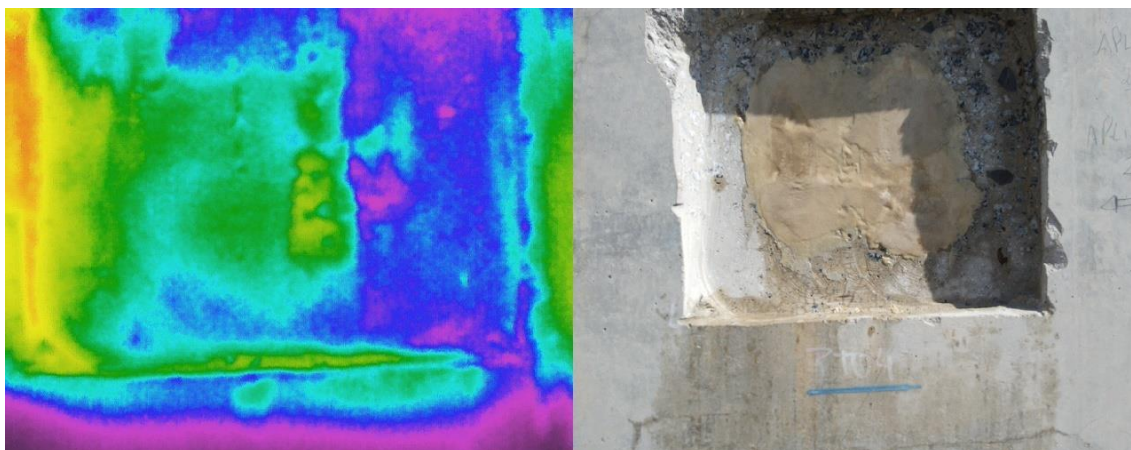


Figura 7 – Teste com a câmera térmica em viga teste com aplicação de água
Fonte: IPT/Metrô-SP

Na sequência, foram iniciados os testes de voo do drone, tendo sido feito o sobrevoo por cima do pátio de fabricação, registrando as diversas vigas-guia estocadas pelos dois modelos de câmera. Foi possível notar diferenças de temperatura nas vigas-guia estocadas por meio da câmera térmica, sendo que os motivos para as diferenças foram debatidos pelo grupo.

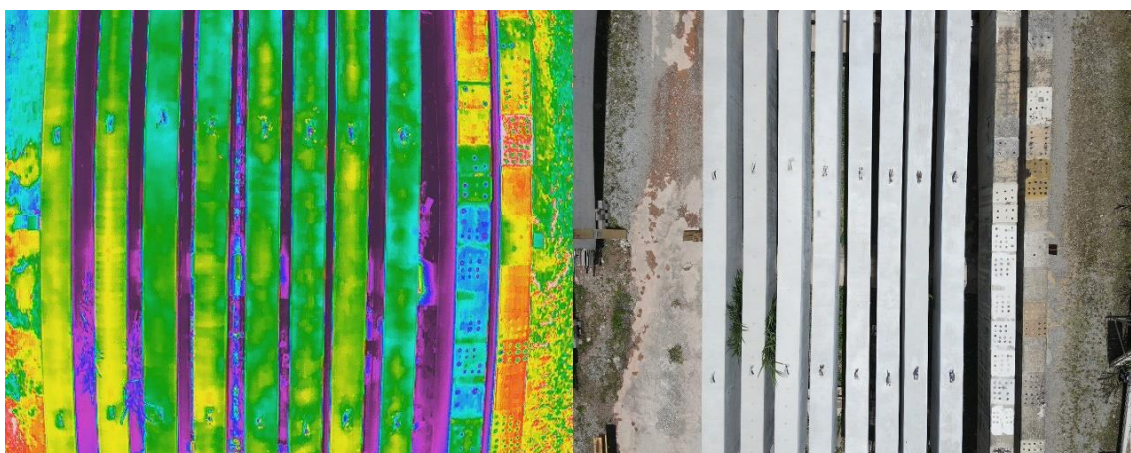


Figura 8 – Sobrevoo para avaliação de diferenças de temperatura
Fonte: IPT/Metrô-SP



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Também foi realizado o voo do equipamento ao longo da superfície lateral da viga-guia teste, com o intuito de verificar a estabilidade de voo do drone e a qualidade de imagem dos registros fotográficos. Ao mesmo tempo foram feitos registros por meio de vídeo, uma vez que o modelo de drone possui essa possibilidade de uso.

b. Dia 2 (18/03/2024)

A visita foi realizada nos trechos de via elevada do monotrilho da Linha 17 – Ouro, onde inicialmente foram realizados testes de voo do aparelho, e na sequência foi feito um registro fotográfico com a câmera comum e a câmera térmica da via elevada em trecho que ainda não possuía a passarela de manutenção e serviço (entre as estações Morumbi e Chucri Zaidan). As atividades se desenvolveram em dois horários distintos em locais diferentes, das 10h02 às 10h45 na localização 326925 E / 7387535 S (23 K / WGS84) - <https://maps.app.goo.gl/pHgamt7xsHXqPKj6>, e das 11h21 às 12h32 na seguinte localização 330229 E / 7384984 S (23 K / WGS84) - <https://maps.app.goo.gl/5Q3qZgGg6Vm9ZF7p7>.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

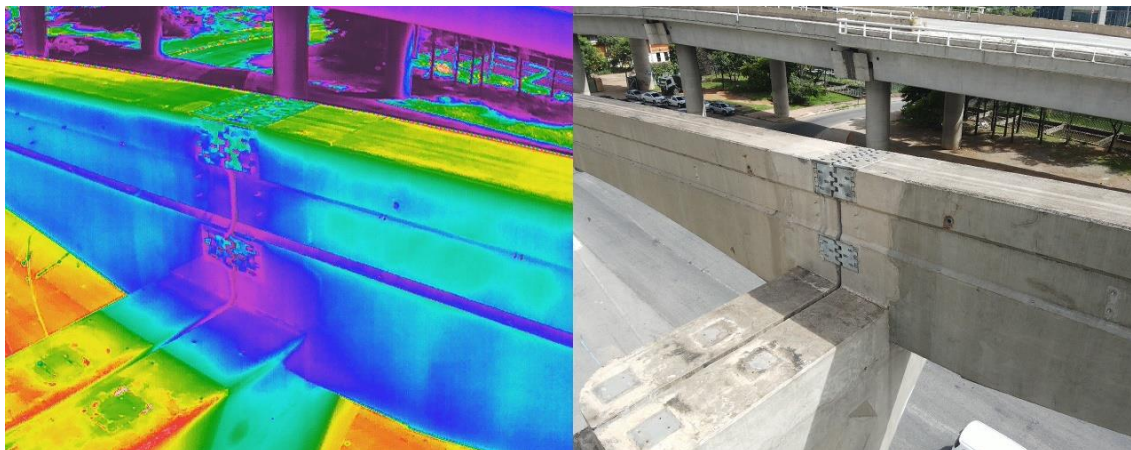


Figura 9 – Inspeção da via elevada da Linha 17 com a câmera térmica
Fonte: IPT/Metrô-SP

Foram feitas imagens de diversos ângulos da via permanente, avaliando a distância de aproximação possível das estruturas e a qualidade de imagem para cada tipo de câmera. Neste mesmo local foi feito um registro de rede de fotos para criar uma superfície de um ortomosaico para avaliação da possibilidade de uso do equipamento para verificação de alinhamento da via permanente do monotrilho.

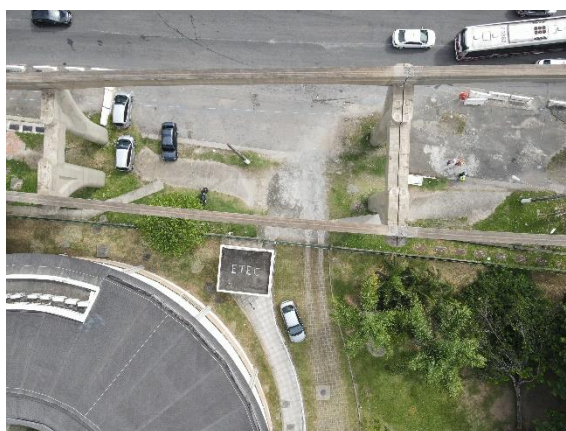


Figura 10 – Início de montagem do sistema ortomosaico com a câmera
Fonte: IPT/Metrô-SP



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Outro teste realizado foi na região do pátio de estacionamento e manutenção de trens Água Espriada, onde existem algumas vigas-guia posicionadas ao nível do terreno que aguardam a realização de seu lançamento. Neste local, foi feita a verificação fotográfica das vigas com ambas as câmeras sem que o equipamento estivesse em voo segurando-o pelas mãos e tirando as fotos.

Mais uma vez se observou pouca diferença entre os registros com a câmera térmica e a comum.

Foi realizado mais um voo na via permanente principal que se localiza paralela ao pátio de estacionamento de trens, onde foram realizados novos testes de verificação de qualidade de imagem por cima da via, com a tiragem de fotos tendo como alinhamento o eixo da via permanente, e as faces laterais onde as passarelas estão instaladas.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

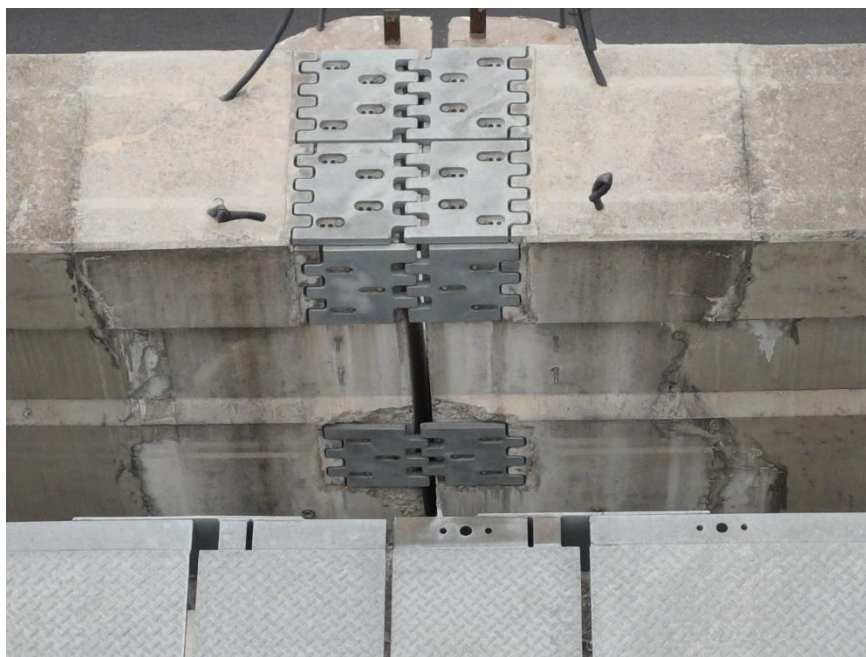


Figura 11 – Inspeção da via permanente em construção na Linha 17
Fonte: IPT/Metrô-SP

Ao mesmo tempo, foram feitos registros dos finger plates para verificação da possibilidade de identificação da classe de parafusos instalada, se é possível avaliar se o torque destes continua satisfatório, e se é possível atestar se os parafusos se encontram instalados.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 12 – Teste de inspeção de finger plates na Linha 17
Fonte: IPT/Metrô-SP

c. Dia 3 (19/04/2024)

Nesta visita foram realizados testes com o drone na Linha 15 – Prata, em trecho de via permanente que se encontra energizado e em operação. Desta forma, o intuito foi verificar as possíveis interferências que a energização da via e a passagem dos trens em circulação poderiam ter sobre a operação e estabilidade de voo do drone. Nesta visita os registros foram realizados em três horários distintos em diferentes trechos de via, sendo o primeiro das 10h21 às 11h46 na localização aproximada 343026 E / 7389776 S (23 K / WGS84) - <https://maps.app.goo.gl/NCCRcGXf9HTb3Ury5>, o segundo das 13h51 às 14h26 na localização aproximada 341030 E / 7391167 S (23 K / WGS84) - <https://maps.app.goo.gl/qWdyHNMP6pFjUpTb6>, e o terceiro das 14h40 às 14h48 na

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

localização aproximada 341124 E / 7390635 S (23 K / WGS84) -
<https://maps.app.goo.gl/hHpMJQXetWbUdEQ38>.



Figura 13 – Teste do drone em trecho de via energizada e próximo à rede de alta tensão
Fonte: IPT/Metrô-SP, 2024

Para esta visita, foram utilizados dois drones, o Mavic 2 Enterprise Advanced e o Mini 4 Pro, com o intuito de comparar a qualidade das imagens obtidas e a diferença de impacto das redes energizadas sobre os equipamentos.

O primeiro trecho de testes foi entre as estações São Lucas e Camilo Haddad, onde se localiza a subestação primária São Lucas e a rede de alta tensão que alimenta esta subestação.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 14 – Aproximação do drone da via energizada
Fonte: IPT/Metrô-SP, 2024

Foram realizadas aproximações com o drone próximo à via permanente com a menor distância possível para avaliar a qualidade de imagem para a inspeção das estruturas de concreto e *finger plate* da via permanente. Também foi realizado um teste com o uso do zoom do equipamento para avaliação da eventual perda de qualidade de imagem.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 15 – Aproximação do drone com a via energizada
Fonte: IPT/Metrô-SP, 2024

Na sequência, foi realizado o voo do drone em volta e por cima da linha de alta tensão, e foi realizado um sobrevoo por cima da cobertura da plataforma central da estação Camilo Haddad, realizando mais um teste de levantamento de ortomosaico.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

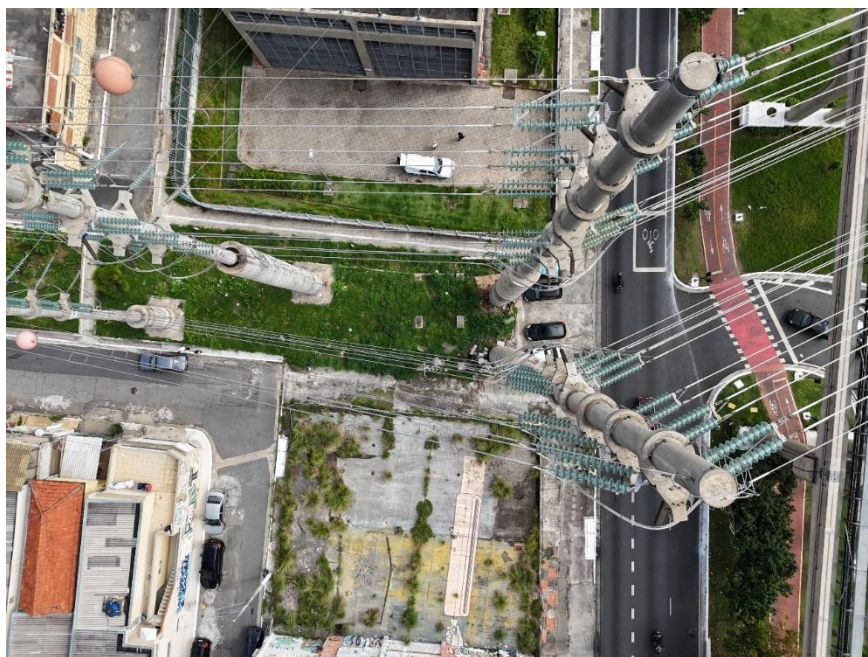


Figura 16 – Aproximação do drone da rede de alta tensão
Fonte: IPT/Metrô-SP, 2024

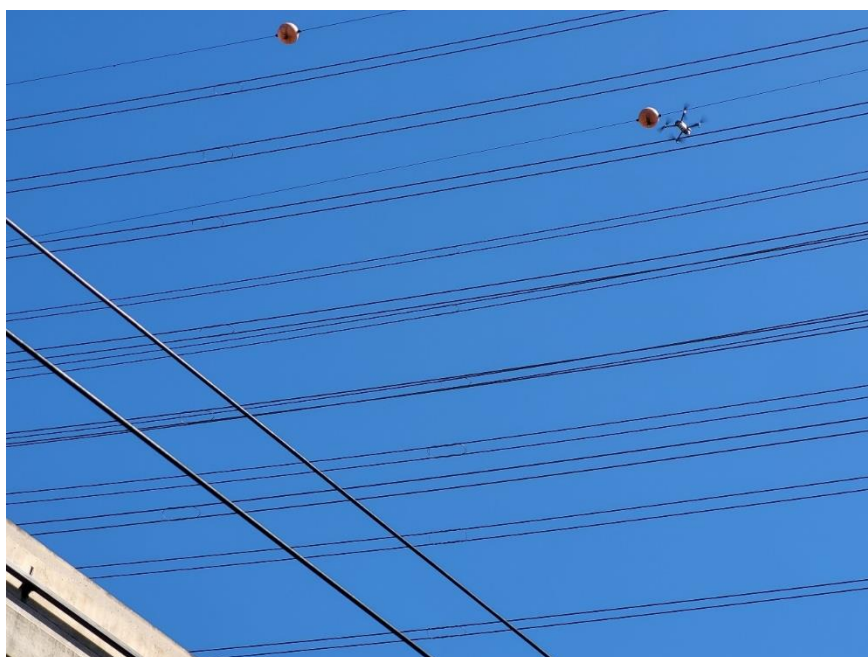


Figura 17 – Vista do drone sobrevoando a rede de alta tensão
Fonte: IPT/Metrô-SP, 2024

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

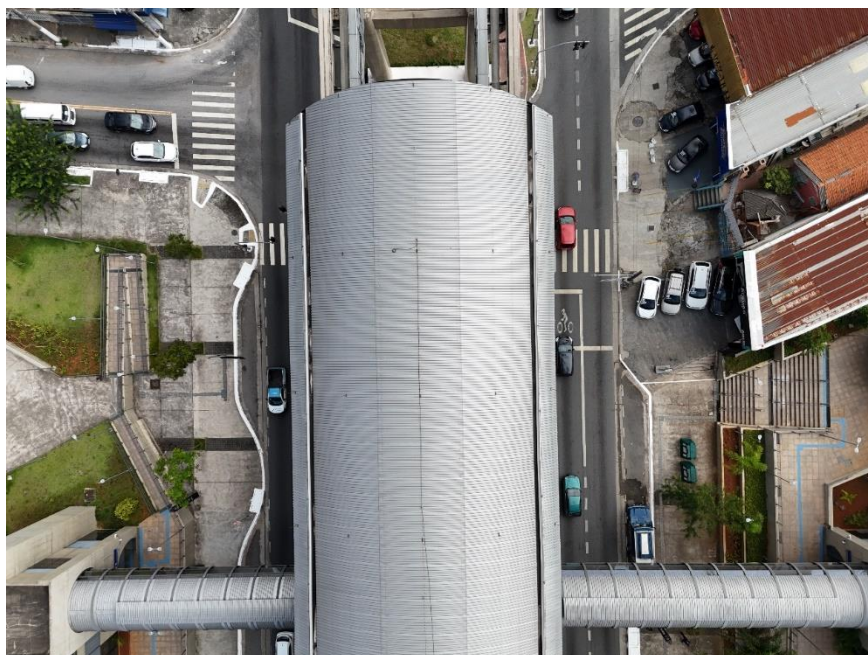


Figura 18 – Sobrevoos de cobertura de estação e elaboração de ortomosaico
Fonte: IPT/Metrô-SP, 2024

A segunda parte da visita do dia foi realizada na região entre as estações Oratório e São Lucas, no trecho de via de acesso ao Pátio Oratório e no Pátio do monotrilho da Linha 15 – Prata. Foram realizadas verificações de voo para inspeção de estruturas complementares do monotrilho, como as estruturas de concreto dos aparelhos de mudança de via (chamados de Deck Switches), e as coberturas das edificações e vias do Pátio Oratório.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

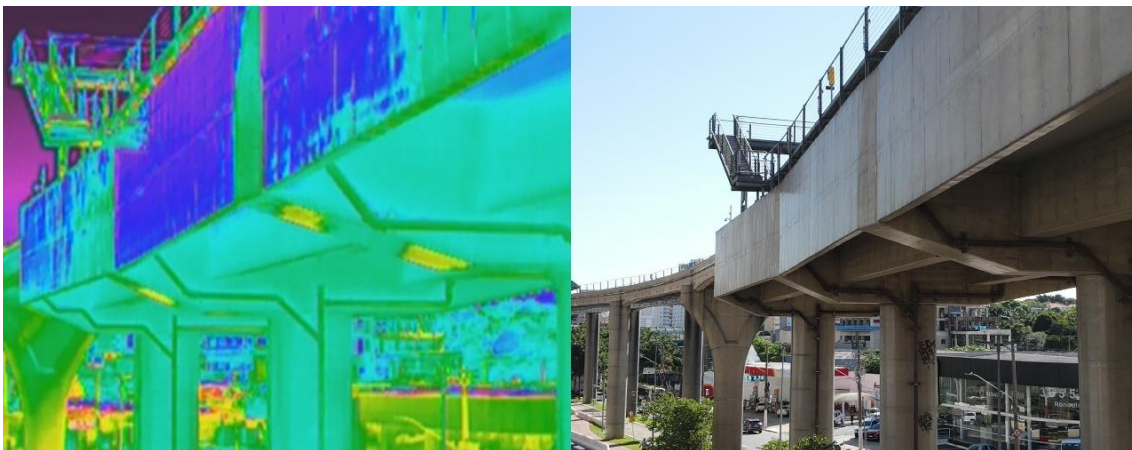


Figura 19 – Inspeção de lajes e estruturas de *deck switch*
Fonte: IPT/Metrô-SP, 2024

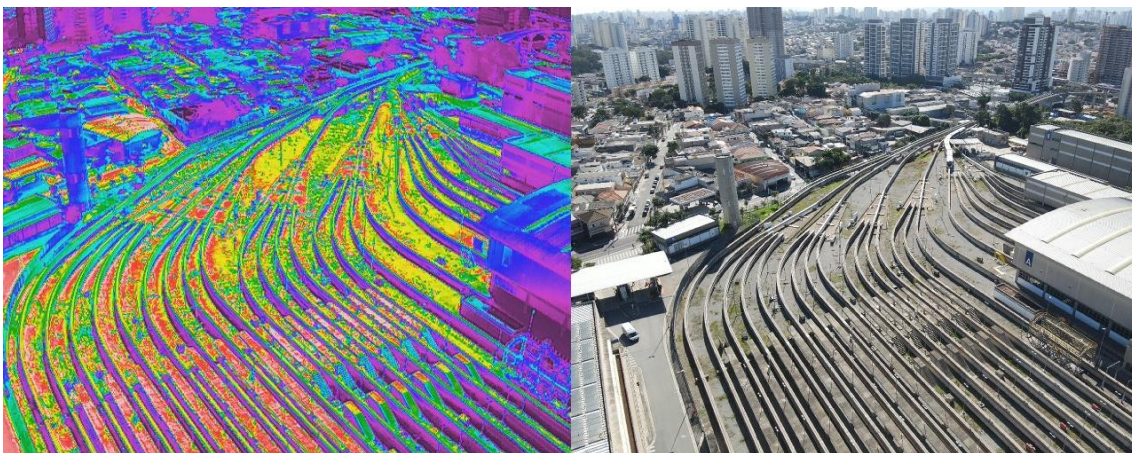


Figura 20 – Inspeção de vias do pátio Oratório
Fonte: IPT/Metrô-SP, 2024

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

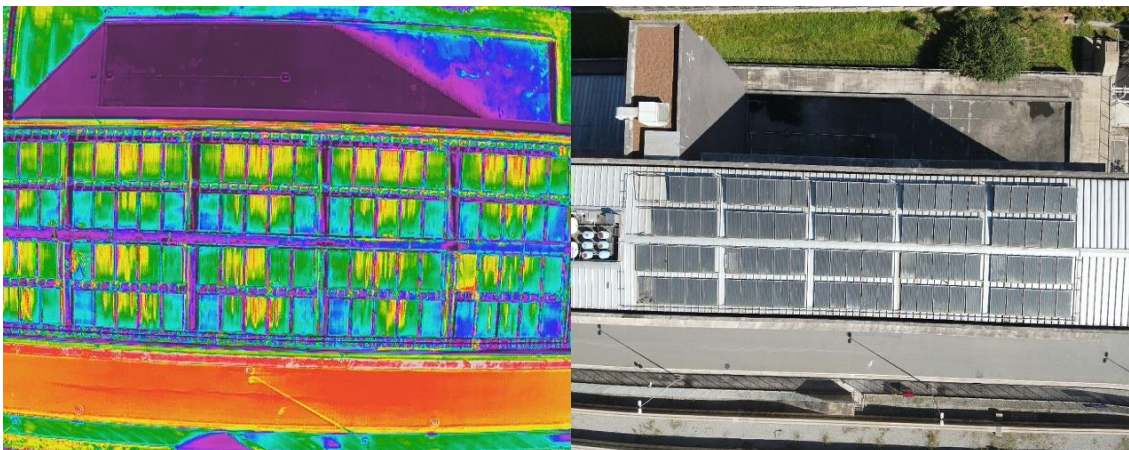


Figura 21 – Inspeção de cobertura de edificação no Pátio Oratório
Fonte: IPT/Metrô-SP, 2024

ANÁLISE DOS RESULTADOS

a. Qualidade de imagens

Diante das dificuldades que existem na inspeção das estruturas que compõem a via permanente dos monotrilhos das Linhas 15 – Prata e 17 – Ouro, existe a necessidade de se obter imagens com boa resolução ao tirar fotos com os equipamentos.

Nas inspeções realizadas por meio das passarelas da Linha 15 – Prata é possível se obter boas imagens das faces interna e superior das vias, uma vez que as passarelas se encontram próximas da via permanente, fato que não ocorre na Linha 17 – Ouro, uma vez que as passarelas de manutenção se encontram no eixo entre vias.

Ainda assim, em ambos os casos, as dificuldades de se obter imagens do lado externo da via são equivalentes. Deste modo, um dos principais objetivos do presente estudo foi avaliar a qualidade das imagens obtidas com os drones.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

Os testes se mostraram promissores, tendo em vista que a qualidade das imagens obtida com as câmeras permite a visualização de detalhes da via permanente como eventuais manifestações patológicas e as condições de fixação dos parafusos dos *finger plates*, com avaliação de eventual perda de torque ou falta de fixações.

Foram realizados testes com a gravação de vídeos, contudo a qualidade da imagem se mostrou inferior à da obtida com as câmeras fotográficas.

Além das inspeções de via, foram realizados voos por outras estruturas que compõem os mon trilhos, como as lajes de *deck switches*, as coberturas de estações e de blocos de edifícios do pátio de manutenção e estacionamento de trens.

No caso dos *deck switches*, foi possível visualizar as condições dos equipamentos de mudança de via, assim como as condições das tubulações e fixações do sistema de águas pluviais, além do estado do concreto de fundo da laje das estruturas, que só poderia ser verificado com o uso de equipamentos específicos, como plataformas elevatórias ou andaimes.

Nas coberturas das estações, a utilização do drone se mostra de grande utilidade para avaliação da condição das telhas da cobertura e, mais especificamente, das calhas, especialmente no que tange a possíveis acúmulos de água e entupimentos da rede causados por sujidades.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

b. Câmera térmica

Um dos objetivos dos estudos foi avaliar a viabilidade de utilização da câmera térmica que existe no drone para verificação de eventuais manifestações patológicas que poderiam não ser possíveis de visualizar a olho nu por meio da câmera comum.

Nos testes realizados na fábrica de vigas da Linha 15 – Prata nas vigas teste, que possuem diversas manifestações patológicas, aberturas e reparos de testes executados, não foi possível observar essa eventual funcionalidade, uma vez que as fissuras verificadas por meio da câmera térmica podem ser visualizadas com a câmera comum, e muitas vezes com maior detalhamento, devido à diferença de resolução entre as câmeras.

De modo a identificar possíveis métodos de verificação de manifestações patológicas com a câmera térmica, foi realizado um teste na face lateral da viga, que possui um nicho de teste de reparo com armação semi exposta, lançando água sobre a superfície e, como naquele momento havia incidência de luz solar naquela face, avaliar se seria possível detectar barras de aço com pouco cobrimento devido à diferença de tempo de absorção de calor entre uma área que possui apenas concreto de outra com as barras de aço quase expostas, e não foram observadas diferenças que pudessem atestar a utilização deste método.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Foram observadas diferenças de coloração da câmera térmica enquanto voava sobre as vigas estocadas no pátio de vigas, contudo essa variação pode ser devida à própria variação de tonalidade do concreto das vigas, onde em locais que a superfície esteja mais escura, acabe absorvendo mais calor que áreas mais claras.

Nas visitas realizadas na via permanente, foram realizados novos testes com a câmera térmica, tendo obtido os mesmos resultados. Pode-se inferir que devido ao concreto da via permanente ser um concreto de alto desempenho, com valores de resistência a compressão maiores do que 50 MPa, sua compactidade impede a detecção de variações de temperatura de armações ou eventuais fissuras.

Apenas na visita realizada na Linha 15 – Prata, se observou uma pequena diferença de temperatura na região de reparos de alças de içamento, que podem ter 3 possíveis causas: (a) a diferença de temperatura devido à variação da composição dos materiais, uma vez que o material de reparo das alças de içamento é diferente do concreto aplicado nas vigas-guia; (b) variação de coloração, que pode criar diferenças de temperatura devido à diferente absorção de calor por diferentes cores, tendo cores mais escuras a tendência de absorver mais calor e as cores mais claras de refletir; (c) um possível início de deslocamento do material de reparo, onde cria um bolsão de ar entre os materiais, criando a variação de temperatura.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Em visita complementar à Linha 15 – Prata foram feitos novos registros fotográficos com a câmera térmica, que acabaram por descartar a possibilidade de deslocamento do material de reparo das alças.

Outra verificação realizada com a câmera térmica foi a avaliação das redes de águas pluviais nas descidas das lajes dos *deck switches*, que pode indicar a existência de pontos de oxidação e vazamentos na rede, assim como a eventual falta de fixações.

Nas verificações das estruturas de concreto dos *deck switches*, uma vez que estas estruturas possuem acabamento com verniz, foi possível notar que o espelhamento das superfícies devido ao brilho do verniz impacta nas variações de cor da câmera térmica.

Além disso, foi feito um registro fotográfico com a câmera térmica de uma rede de painéis de aquecimento de água na cobertura de uma das edificações do pátio de manutenção e estacionamento de trens, que podem contribuir para a avaliação do funcionamento do sistema de aquecimento de água por painéis solares, criando condições de realização de manutenções preditivas neste tipo de sistema.

c. Ortomosaicos

Foram realizados testes com a criação de ortomosaicos sobre a via permanente das Linhas 15 – Prata e 17 – Ouro, onde foi possível organizar as imagens e gerar um levantamento de alinhamento da via permanente. O ortomosaico gerado, pode ser oriundo do processamento das fotos em um software comercial como o “Agisoft



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Metashape” ou o “Pix4d”, em ambos os casos, é possível analisar a qualidade do ortomosaico gerado pelo parâmetro GSD “*Ground Sample Distance*” ou seja é a distância entre dois centros de pixels consecutivos medidos no solo. Quanto maior o valor da GSD da imagem, menor a resolução espacial da imagem e menos detalhes são visíveis.

Para obtenção de melhores resultados de GSD, torna-se relevante a qualidade da câmera do Drone, altura do voo, e quantidade de fotos obtidas. Para tanto recomenda-se a realização de plano de voo da área a ser estudada, e aplicativos disponíveis facilitam a escolha do “grid” (malha de pontos, grade que irá orientar a posição do drone para a tomada das fotos) e do “overlap” (sobreposição) que as fotos serão obtidas.

Outro fator relevante na obtenção de melhor acurácia nos ortomosaicos obtidos através de drone são os pontos de controle, esses pontos são obtidos através de equipamentos GNSS que possuem maior precisão que os sensores embutidos nos drones. Utilizando-se dessa premissa e efetuando uma base de pontos de controle bem distribuída, é possível alcançar a acurácia em torno de 5 a 10cm.

Para estruturas como as da via permanente, este tipo de levantamento não possui uma precisão aplicável, tendo em vista que as tolerâncias de projeto são da ordem de milímetros, mas os levantamentos podem ser utilizados em outros tipos de verificação, tais como edificações, levantamento de pavimentação, guias e calças, entre outros.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 22 – Ortomosaico gerado na Linha 15 - Prata

Fonte: IPT/Metrô-SP, 2024



Figura 23 – Ortomosaico gerado na Linha 17 - Ouro

Fonte: IPT/Metrô-SP, 2024

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 24 – Aproximação de ortomosaico gerado na Linha 17 - Ouro
Fonte: IPT/Metrô-SP, 2024



Figura 25 – Aproximação de ortomosaico gerado na Linha 17 - Ouro
Fonte: IPT/Metrô-SP, 2024

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

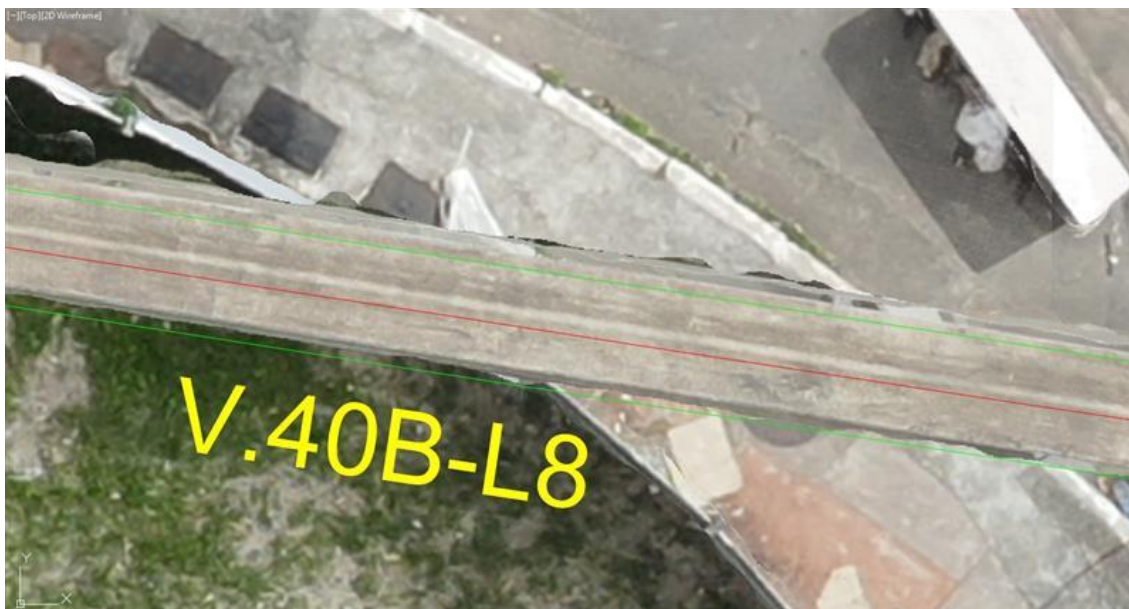


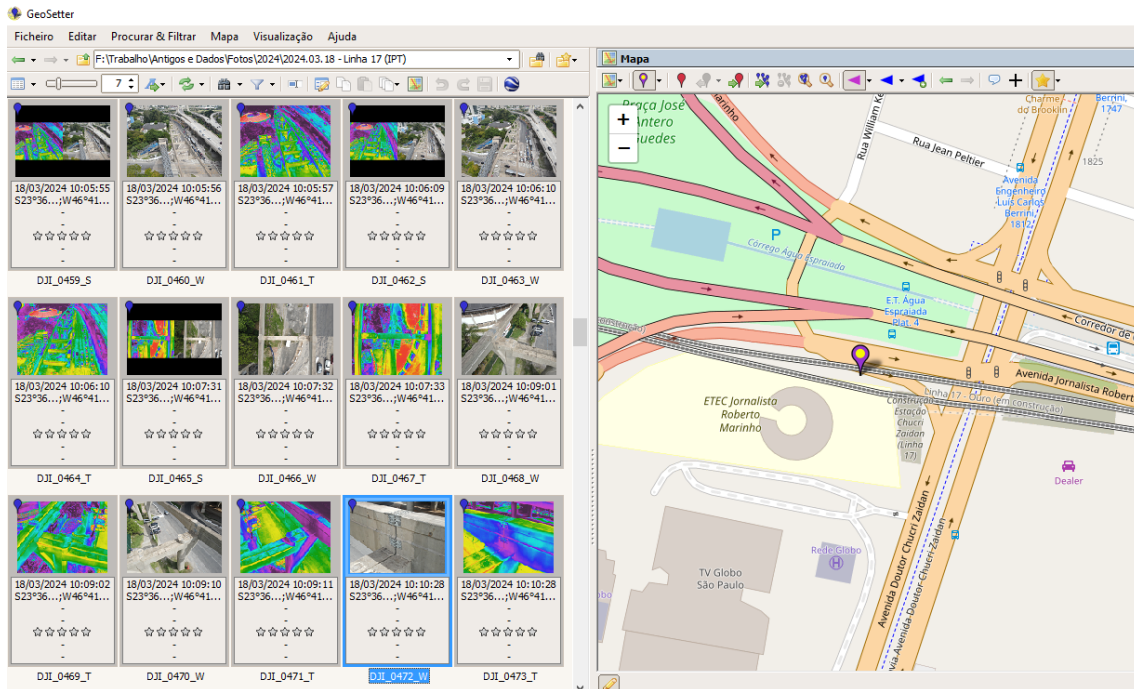
Figura 26 – Detalhe de ortomosaico gerado na Linha 17 - Ouro
Fonte: IPT/Metrô-SP, 2024

d. Localização das fotos

Estruturas de concreto armado como as que existem em uma linha de monotrilho, composta por pilares, capiteis e via permanente, são muito semelhantes em sua forma, o que pode dificultar uma identificação do local onde determinadas fotos foram tiradas.

De modo a facilitar a localização das imagens, as fotos tiradas pela câmera do equipamento possuem dados de localização com coordenadas cartográficas, podendo ser utilizadas para uma busca por meio do site Google Maps, ou podendo ser utilizado um programa chamado GeoSetter, onde são inseridas as imagens e é gerado um mapa do local com a localização de cada imagem.

30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



**Figura 27 – Localização das fotos geradas por meio do aplicativo GeoSetter
Fonte: IPT/Metrô-SP, 2024**

Esta metodologia foi aplicada nas fotos tiradas ao longo da via permanente dos monotrilhos, possibilitando assim a localização muito aproximada dos pontos onde as imagens foram tiradas, viabilizando uma atuação assertiva no local caso exista necessidade.

e. Interferência de redes energizadas

Nos voos realizados próximos às redes energizadas da via permanente do monotrilho, não foram observadas interferências que pudessem afetar o voo do equipamento.

Mesmo a proximidade com a rede de alta tensão não afetou a navegabilidade.



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Cumpra-se destacar que os voos foram realizados em uma distância segura da via permanente e da rede de energia, de modo a não gerar eventuais impactos com a operação do sistema.

A utilização de outros modelos de drone irá requerer que este tipo de avaliação seja refeito, identificando uma distância segura das redes que não afete a operação dos equipamentos.

CONCLUSÕES

A realização de inspeções em estruturas de concreto armado e metálicas tem como finalidade a avaliação das condições das estruturas ao longo do tempo, levando em consideração eventuais necessidades de manutenções e reparos. A periodicidade de manutenção é dada pelo Manual de Uso e Operação.

Devido às características da via permanente dos sistemas monotrilho, a realização de inspeções se torna um desafio, visto que são estruturas em altura elevada, com dificuldades de acesso e devido à energização da via para atendimento à necessidade de transporte da população, verificações por meio de passarelas ou plataformas elevatórias são possíveis apenas em um curto período de tempo durante a noite.

A utilização de drones para a realização das inspeções se mostrou como uma metodologia que consegue vencer as dificuldades relatadas, uma vez que é possível realizar a inspeção a qualquer horário do dia, com uma boa qualidade de imagem



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

especialmente da face externa da via permanente (local com a maior dificuldade de acesso), assim como da demais faces (ainda que a face interna possa ter interferências de visualização devido à presença das passarelas metálicas).

A comparação entre utilização de fotos e gravação de vídeo da via demonstrou que, apesar da viabilidade da utilização do vídeo, as fotos trazem uma melhor resolução de imagem, conseqüentemente um melhor detalhamento da inspeção.

Além da inspeção das vias, foi possível vislumbrar a viabilidade de uso do equipamento na inspeção de coberturas metálicas de estações e edifícios de pátio de manutenção, sobretudo calhas, para definição de rotina de limpeza e manutenção destas coberturas. Outro elemento que pode ser inspecionado é a estrutura dos *deck switches*, tanto a avaliação das condições das estruturas de concreto quanto das instalações de águas pluviais sob as lajes, e verificação geral dos equipamentos sobre as lajes.

A avaliação da viabilidade do uso da câmera térmica demonstrou que, ao menos para as estruturas de concreto com a homogeneidade que possuem as vias de monotrilho, sua aplicação pode não ser a mais ideal, embora seja possível utilizá-la na verificação de coberturas que utilizam painéis solares para aquecimento de água na verificação de funcionamento dos equipamentos.

Além da inspeção das estruturas de concreto, a utilização do drone permitiu a verificação de estruturas complementares, tais como os *finger plates* e as próprias



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

passarelas metálicas, no que tange à conformidade de torque de fixações e avaliação de eventuais pontos de oxidação.

Outra característica que pôde ser avaliada é a utilização do equipamento para avaliação das condições geométricas da via permanente, seja posicionando o drone no eixo da via e avaliando visualmente seu alinhamento, quanto a criação de ortomosaicos que podem gerar um levantamento dimensional geométrico da via.

Estudos complementares podem ser realizados para a geração de uma rota pré-definida que o drone irá seguir rotineiramente para a inspeção das estruturas de acordo com a periodicidade definida no Manual de Uso e Operação do empreendimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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. et al. **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:



30ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 11º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

https://www.researchgate.net/publication/343327398_AVALIACAO_DE_MANIFESTACOES_PATOLOGICAS_COM_USO_DE_DRONE. Acesso em: 15 maio 2024.

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. Doi: <https://doi.org/10.3390/rs13091809>.

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

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>.