



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E  
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO

IGOR PIRES LEITE DE MELO

**UTILIZAÇÃO DA FOTOGRAMETRIA POR RPA NA INSPEÇÃO DA  
SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA NO SISTEMA DE TRANSPORTE  
METROPOLITANO DE PASSAGEIROS**

Recife

2024

IGOR PIRES LEITE DE MELO

**UTILIZAÇÃO DA FOTOGRAMETRIA POR RPA NA INSPEÇÃO DA  
SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA NO SISTEMA DE TRANSPORTE  
METROPOLITANO DE PASSAGEIROS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação.

Área de concentração: Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Andrea Flávia Tenório Carneiro.

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Simone Sayuri Sato.

Recife

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Melo, Igor Pires Leite de.

Utilização da fotogrametria por RPA na inspeção da superestrutura ferroviária no sistema de transporte metropolitano de passageiros / Igor Pires Leite de Melo. - Recife, 2024.

82f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2024.

Orientação: Andrea Flávia Tenório Carneiro.

Coorientação: Simone Sayuri Sato.

Inclui referências, apêndices e anexo.

1. VANT; 2. RPA; 3. Superestrutura ferroviária; 4. Inspeção visual. I. Carneiro, Andrea Flávia Tenório. II. Sato, Simone Sayuri. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

Aos meus pais, Linda e Nilson (*in memoriam*). Aos meus irmãos, Ingrid e Nilson.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Linda e Nilson (*in memoriam*), aos meus irmãos, Nilson e Ingrid e a Renata Cartaxo que foram compreensíveis com a minha forma de ver e encarar o mundo. A todos os professores e mestres que participaram da minha trajetória de aprendizado, Colégio Sagrado Coração, Universidade Católica de Pernambuco e a Universidade Federal de Pernambuco. Sou grato aos meus companheiros de trabalho na Companhia Brasileira de Trens Urbanos por todo conhecimento técnico repassado.

Em especial, à minha orientadora Dr<sup>a</sup>. Andrea Flávia Tenório Carneiro e a coorientadora Dr<sup>a</sup>. Simone Sayuri Sato, por sua mentoria, paciência e por ensinar pelo exemplo de dedicação na área de pesquisa, com o Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação e a docência.

“Assimilado ao processo de produção do capital, o meio de trabalho passa por diversas metamorfoses das quais a última é a máquina ou, melhor dizendo, um sistema automático de maquinaria” (Marx, Grundrisse, 1939).

## RESUMO

O surgimento da ferrovia ocorreu no século XIX, e hoje é de grande importância para garantir o transporte em massa de passageiros em regiões metropolitanas. Para subsidiar as equipes de manutenção ferroviária, são realizadas inspeções visuais periódicas nos elementos da superestrutura ferroviária. Estas inspeções podem expor os funcionários a diversos riscos. Este trabalho propôs a adoção de levantamentos fotogramétricos por aeronaves pilotadas remotamente (RPA) para a realização destas atividades de inspeção da superestrutura ferroviária. Para a sua execução, foram identificados os elementos da superestrutura ferroviária que necessitam de monitoramento e que podem ser obtidos por fotogrametria e a realização de uma pesquisa acadêmica para identificar o estado da arte da fotogrametria na inspeção da superestrutura. Com estes dados foi possível elaborar um procedimento para a realização da inspeção visual a partir de um levantamento por RPA. Para validar o método, foram realizados dois levantamentos. O primeiro experimento foi realizado sobre uma via férrea de bitola métrica sobre dormentes bi-bloco. O segundo experimento foi realizado em uma via dupla de bitola larga com dormentes monoblocos de concreto. Os resultados obtidos nos experimentos demonstram que a utilização deste procedimento é viável para manutenção e seguro para os funcionários que realizam a inspeção. O levantamento foi realizado por um RPA Phantom 4 Advanced e RPA DJI MAVIC 3E, ambos da DJI, com velocidade de 2 m/s e altura de voo de 30 metros e 25 metros, respectivamente. O GSD obtido nos levantamentos foram próximos a 1 cm/pixel, demonstrando uma resolução compatível com o objetivo de identificar visualmente os desgastes no trilho, o estado dos dormentes, as condições do lastro. Com esta análise sendo realizada em escritório e com acesso ao “*as built*”, o responsável pela inspeção poderá analisar cada trecho ferroviário e informar a manutenção do quilômetro exato de cada defeito identificado.

**Palavras-chave:** VANT, RPA. Superestrutura ferroviária. Inspeção visual.

## ABSTRACT

The advent of railroads occurred in the 19th century, and today they have a great importance to ensure the mass passenger transport in metropolitan areas. To support railway maintenance teams, periodic visual inspections of railway superstructure elements are conducted. However, these inspections can expose employees to various risks. This study proposed the adoption of photogrammetric surveys using remotely piloted aircraft (RPA) to carry out these railway superstructure inspection activities. For its execution, the railway superstructure elements requiring monitoring and capable of being captured through photogrammetry were identified. Additionally, an academic review was conducted to determine the proceeding in photogrammetry for superstructure inspection. Based on this information, a procedure was developed for performing visual inspections using RPA surveys. To validate the method, two surveys were conducted. The first experiment was carried out on a metric gauge railway with bi-block sleepers. The second experiment was conducted on a broad-gauge double railway with monoblock concrete sleepers. The results of the experiments demonstrated that this procedure is viable for maintenance purposes and safe for employees conducting the inspections. The surveys were conducted using a Phantom 4 Advanced RPA and a DJI MAVIC 3E RPA, both from DJI, at a speed of 2 m/s and flight altitudes of 30 meters and 25 meters, respectively. The Ground Sampling Distance (GSD) obtained in the surveys was approximately 1 cm/pixel, demonstrating a resolution suitable for visually identifying rail wear, sleeper conditions, and ballast state. By performing this analysis in an office environment and with access to the “as-built” documentation, the inspector can analyze each railway section and report the exact kilometer of any identified defects to the maintenance team.

**Keywords:** UAV, RPA. Railway superstructure. Visual inspection.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Seção transversal da plataforma ferroviária	11
Figura 2 –	Lastro	12
Figura 3 –	Dormente monobloco de concreto protendido	13
Figura 4 –	Dormente de madeira	14
Figura 5 –	Dormente bi-bloco de concreto	14
Figura 6 –	Sistema de fixação do tipo e-clip	16
Figura 7 –	Trilho do tipo TR-37	17
Figura 8 –	Tala de junção	18
Figura 9 –	AMV	19
Figura 10 –	Auto de Linha	26
Figura 11 –	Publicações por ano	28
Figura 12 –	Palavras-chave por ano	29
Figura 13 –	Fluxograma	33
Figura 14 –	Lastro contaminado	35
Figura 15 –	Dormente inservível	36
Figura 16 –	Ausência de fixação	36
Figura 17 –	Trilho desgastado	37
Figura 18 –	Mapa do levantamento para o primeiro experimento	40
Figura 19 –	Distribuição dos pontos de controle e verificação do primeiro experimento	41
Figura 20 –	Planejamento do voo do primeiro experimento	41
Figura 21 –	Ortofoto do primeiro experimento	43
Figura 22 –	Mapa do levantamento para o segundo experimento	43
Figura 23 –	Distribuição dos pontos de controle e verificação do segundo experimento	44
Figura 24 –	Planejamento do voo do segundo experimento	44
Figura 25 –	Trecho com defeitos na superestrutura	48
Figura 26 –	Coração do AMV	49
Figura 27 –	Região da ponta de agulha do AMV	50
Figura 28 –	Ausência de elementos do sistema de fixação	51
Figura 29 –	Autodesk Civil 3D com as ortofotos georreferenciadas	54

Figura 30 –	Procedimento padronizado de inspeção ferroviária por fotogrametria	
	Com RPA	55
Figura 31 –	Sobreposição do <i>as built</i> com o ortomosaico	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Classificação do trilho de acordo com a massa nominal por metro de Trilho	16
Tabela 2 –	Extensão das malhas ferroviárias destinadas ao transporte de passageiros no Brasil	26

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMV	Aparelho de Mudança de Via
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestre
AREMA	American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association
BH	Belo Horizonte
CAD	Computer Aided-Design
CB	Comitê Brasileiro
CBTU	Companhia Brasileira de Trens Urbanos
CCO	Centro de Controle Operacional
CCR	CCR Sociedade Anônima
CPTM	Companhia Paulista de Trens Metropolitanos
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DF	Distrito Federal
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
DOC	Document
E	Escala da foto
EMTU	Empresa Metropolitana de Transporte Urbanos
EMVP	Especificações de Material de Via Permanente
f	Distância focal
GB	Great British Railways
GNSS	Global Navigation Satellite System)
GSD	Distância entre os centros dos pixels representados na imagem
H	Altura do voo
ICAO	International Civil Aviation Organization
JIS	Japanese Industrial Standards
LiDAR	Light Detection and Ranging
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície

MDT	Modelo Digital de Terreno
Metrô BH	Metrô BH Sociedade Anônima
Metrô DF	Companhia do Metropolitano do Distrito Federal Metrô DF
Metrô Rio	Concessão Metroviária do Rio de Janeiro
Metrô SP	Companhia do Metropolitano de São Paulo
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
N-Trip	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
OAC	Obras de Arte Corrente
OACI	Organização da Aviação Civil Internacional
OAE	Obras de Arte Especiais
PCS	Pontos de Controle de Solo
PV	Pontos de Verificação
RBAC	Regulamento Brasileiro da Aviação Civil
RFFSA	Rede Ferroviária Federal Sociedade Anônima
RMS	Root Mean Square
RPA	Remotely Piloted Aircraft
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
Sfm	Structure from Motion
SuperVia	Supervia Trens Urbanos
tam_pixel	Tamanho do pixel
TR	Trilho
Trensurb	Empresa de Trens Urbanos de Porto Alegre
UAV	Unmanned Aerial Vehicles
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UIC	International Union Railways
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
Via Mobilidade	Concessionária das linhas 5 e 17 do Metrô de São Paulo S.A.
Via Quatro	Via Quatro Transportes LTDA.
VLT	Veículo Leve sobre Trilhos
VLT Carioca	Concessionária do VLT Carioca Sociedade Anônima

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>07</b>
1.1	Justificativa	08
1.2	Objetivos	10
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral</b>	<b>10</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>11</b>
2.1	Especificações técnicas dos elementos da superestrutura	11
2.1.1	<i>Lastro</i>	12
2.1.2	<i>Dormentes</i>	13
2.1.3	<i>Fixação</i>	15
2.1.4	<i>Trilho</i>	16
2.1.5	<i>Juntas</i>	17
2.1.6	<i>AMV</i>	18
2.1.7	<i>Outros elementos das ferrovias</i>	19
<b>2.2</b>	<b>Fotogrametria</b>	<b>19</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Tipos de resoluções</b>	<b>22</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Tipos de operação</b>	<b>22</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Pontos de controle e pontos de verificação</b>	<b>23</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Processamento digital de imagens</b>	<b>24</b>
2.3	Inspeção de ferrovias por RPAS	26
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>33</b>
3.1	Normas e manuais aplicáveis	33
3.2	Identificação dos elementos da superestrutura ferroviária para a inspeção por RPA	35
3.3	Investigação da utilização de RPAs na inspeção	38
<b>3.3.1</b>	<b>Recursos tecnológicos</b>	<b>38</b>
3.3.2	<i>Monitoramento com RPAs em trechos da superestrutura do metrô em Pernambuco</i>	39
3.3.2.1	<i>Experimento 1: Pátio ferroviário da Estação Cabo, em Cabo de Santo Agostinho – PE</i>	40

3.3.2.2	<i>Experimento 2: Trecho entre as estações Tejipió e Coqueiral, em Recife-PE</i>	43
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	46
5	<b>PROCEDIMENTO DE FISCALIZAÇÃO DA SUPERESTRUTURA FERROVIA COM UTILIZAÇÃO DE FOTOGRAMETRIA POR RPA</b>	55
	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	59
	<b>REFERÊNCIAS</b>	61
	<b>APÊNDICE A</b>	67
	<b>APÊNDICE B</b>	73
	<b>ANEXO 1</b>	74

## 1 INTRODUÇÃO

A ferrovia surgiu com a utilização de vigas de ferro, trilhos, para direcionar o tráfego de veículos. No início do século XIX, com a utilização de locomotivas a vapor para a tração dos comboios ferroviários, a ferrovia consolidou-se como um importante modal terrestre, seja para o transporte em massa de cargas ou de pessoas. A superestrutura ferroviária é responsável por suportar os esforços decorrentes do tráfego dos veículos e transmiti-los para a infraestrutura, constituída da terraplenagem e das obras abaixo do greide de terraplenagem (Brina, 1979).

Os principais elementos da superestrutura ferroviária são o lastro, os dormentes, os trilhos e os componentes de ligação e do sistema de fixação. Estes elementos necessitam de inspeções periódicas, detalhadas e confiáveis para que possam verificar se a ferrovia mantém as configurações adequadas e seguras para a circulação dos veículos. Estas inspeções podem ser realizadas com a utilização de equipamentos ferroviários móveis, que, a depender dos equipamentos utilizados, atuam nos elementos da ferrovia realizando correções quando os valores aferidos são divergentes do projetado.

A inspeção ferroviária também é realizada de forma visual, e pode ter o auxílio de levantamentos topográficos. A inspeção visual expõe a equipe de campo a diversos riscos como os de atropelamento, queda, ataque de animais e de descarga elétrica, nos casos das vias eletrificadas. Nos sistemas ferroviários urbanos destinados ao transporte de passageiros, os intervalos entre as viagens dos trens são de alguns minutos, o que se torna um agravante na execução desta inspeção.

Conforme o estado de degradação da ferrovia, tanto a inspeção como as intervenções para a recuperação podem ocasionar uma interdição da via, trazendo possíveis prejuízos à operação comercial, ocasionando impacto na receita operacional da operadora responsável. Para reduzir o impacto na operação comercial, o Centro de Controle Operacional (CCO) da operadora permite que alguns serviços de manutenção sejam realizados durante a madrugada, período em que as operadoras não oferecem atividade comercial, com a entrada de máquinas de manutenção da via permanente.

A paralisação da operação comercial durante a madrugada diminui o risco de atropelamento, mas, devido à baixa luminosidade, os riscos de quedas, acidentes e ataque de animais aumentam para a equipe responsável pela realização da inspeção

visual do trecho, além de dificultar, ou impossibilitar, a capacidade de análise visual dos elementos ferroviários do trecho.

Com a popularização das Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA, sigla de *Remotely Piloted Aircraft*) e dos softwares fotogramétricos para processamento das imagens, o uso desta tecnologia está mais acessível para levantamentos em campo. Esta metodologia permite a sua utilização para a realização de levantamento fotogramétrico com a elaboração de ortofotos que podem ser utilizadas em diversas áreas da engenharia.

A qualidade de um levantamento fotogramétrico depende de alguns fatores, incluindo os critérios pré-estabelecidos no planejamento do voo (altura de voo, resolução espacial, sobreposições entre imagens, velocidade de voo, parâmetros internos da câmara) e a serem estabelecidos como o apoio terrestre que consiste no levantamento de referenciais geodésicos, baseados em Pontos de Controle de Solo, conhecidos atualmente como *Ground Control Point* (GCP), sendo adotado como (PCS) e em Pontos de Verificação (PV), para atestar a acurácia.

Esta pesquisa propõe uma metodologia de inspeção da superestrutura ferroviária de um sistema metropolitano de transporte de passageiros que possibilite a aquisição de dados e informações visuais do estado da ferrovia durante o período diurno, horário comercial, e de forma remota sem a interdição do trecho e reduzindo a exposição dos trabalhadores de campo a risco de acidentes, com a utilização da fotogrametria por RPA.

## 1.1 Justificativa

As ferrovias são obras de engenharia com características longitudinais devido a sua extensão, destinadas ao transporte em massa de cargas e de pessoas, sendo importante para o desenvolvimento de uma região. A malha ferroviária brasileira começou a ser implantada em 1854 e chegou a 37.000 km na década de 1950, quando foi criada a Rede Ferroviária Federal (RFFSA) que operou por mais de 40 anos.

Com as concessões, as ferrovias destinadas ao transporte de cargas passaram a ser operadas por empresas privadas e o patrimônio da estatal foi transferido para o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT), de acordo com a Lei nº 10.233 de 2001 que criou a Autarquia Federal (Brasil, 2001).

Esta mesma lei também criou a Agência Nacional de Transportes Terrestres

(ANTT) para regular, supervisionar e fiscalizar as atividades de prestação de serviços e de exploração da infraestrutura de transporte exercidas por terceiros visando harmonizar o interesse dos usuários com os das empresas que operam essa infraestrutura.

Na década de 80, através do Decreto-Lei nº 89.396 (Brasil, 1984), foi constituída a Companhia Brasileira de Trens Urbanos – CBTU, Empresa Pública Federal responsável pelo transporte ferroviário de passageiros das linhas que eram de competência da RFFSA que estava em processo de liquidação.

A superestrutura ferroviária é uma área crítica para a ferrovia, por suportar diretamente e distribuir os esforços oriundos do tráfego dos veículos, a inspeção de seus elementos de forma periódica e confiável é crucial para possibilitar o tráfego dos veículos com segurança. As inspeções ferroviárias são realizadas para conferir se os elementos da superestrutura apresentam condições de tráfego, ou seja, se apresentam desgastes acentuados ou patologias que subsidiem a atuação das equipes de manutenção.

O auto de linha é um veículo ferroviário que pode ser utilizado na locomoção da equipe responsável para a realização da inspeção visual da ferrovia. Este método permite uma inspeção mais rápida, quando comparada a inspeção realizada por trabalhadores que caminham pela ferrovia, mas, por ocupar a ferrovia, pode impactar na prestação de serviço comercial e, por ocorrer em movimento, não permite uma inspeção detalhada e criteriosa de todos os elementos da superestrutura ferroviária.

A inspeção visual realizada por trabalhadores percorrendo a ferrovia a pé possibilita uma inspeção mais detalhada da superestrutura e permite a anotação de dados relevantes, como a estaca dos pontos de interesse, e a realização de fotografias sem impactar na operação comercial. O principal aspecto negativo dessa metodologia é a exposição dos trabalhadores envolvidos a riscos de acidentes, e, se realizada durante a noite, a capacidade de identificação de desgastes acentuados e de patologias é afetada pela baixa luminosidade.

A fotogrametria com utilização de RPA e receptores de GNSS (*Global Navigation Satellite System*) podem auxiliar com inspeções de qualidade e sem a interdição da via-férrea e reduzindo a exposição dos empregados responsáveis pelas inspeções e medições a riscos de acidentes e permitindo o levantamento em áreas de difícil acesso. Os dados obtidos pela fotogrametria por RPA são exportados para softwares que geram um produto capaz de subsidiar o profissional responsável pela

inspeção na tomada de decisões de otimização da equipe de manutenção.

É de competência das operadoras e das entidades que fiscalizam os serviços de transporte elaborar normas ou manuais que apresentem as diretrizes e orientações para a realização das atividades que desempenham. Os manuais e normas elaborados pela CBTU, pelo DNIT, pela ANTT e pelas operadoras privadas devem estar em concordância com as normas federais da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT-NBR), que possui um comitê específico para o tema, o Comitê Brasileiro 006 (ABNT-CB-006). O não alinhamento com o estabelecido pela ABNT é possível nos casos que se demonstre tecnicamente que o descumprimento é em prol da segurança do tráfego ou nos casos que não existir norma da ABNT sobre o tema.

Esta proposta justifica-se, pois, o emprego de RPA e de receptores de Dados GNSS como maquinários no processo de levantamento fotogramétrico na elaboração de um produto, ortofotos, aplicados na inspeção da superestrutura ferroviária, demonstra-se como uma tecnologia capaz de melhorar as condições de trabalho das equipes envolvidas.

## 1.2 Objetivos

Esta seção apresenta os objetivos gerais e específicos da pesquisa.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Propor e validar um procedimento da aplicação da fotogrametria por RPA na inspeção de superestrutura ferroviária.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Definir os elementos da superestrutura ferroviária que necessitam de monitoramento e podem ser obtidos por fotogrametria;
- Identificar o estado da arte da fotogrametria na inspeção de superestrutura ferroviária;
- Propor um procedimento para a inspeção de superestrutura ferroviária a partir do levantamento fotogramétrico por RPA;
- Validar o procedimento com base nos dados obtidos no estudo de caso.

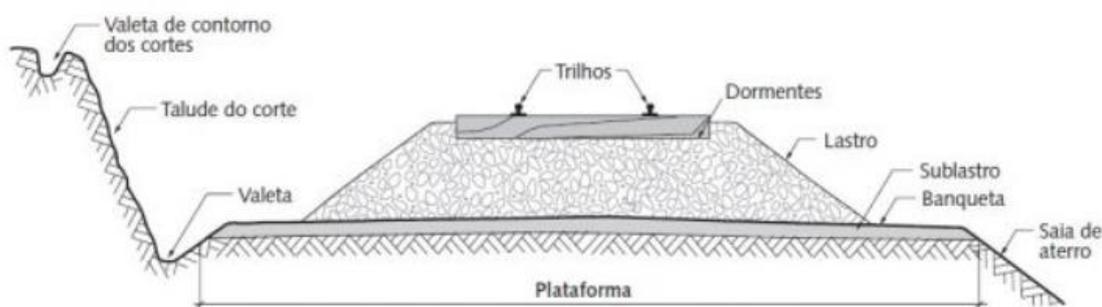
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta a revisão da literatura utilizada, com a caracterização do objeto de estudo, a superestrutura ferroviária, e os princípios da fotogrametria e o estado da arte da sua aplicação em monitoramento de ferrovias.

### 2.1 Especificações técnicas dos elementos da superestrutura

Nabais (2014), no Manual Básico de Engenharia Ferroviária, conceitua a ferrovia como um sistema de transporte terrestre onde o material rodante é guiado pelo contato do rodeiro dos veículos com o trilho. Na superestrutura comumente utilizada, Figura 1, os dormentes são os apoios dos trilhos e são posicionados com um espaçamento regular e repousados sobre um colchão de material granular denominado lastro que absorve e transmite as pressões do tráfego para a infraestrutura, camada abaixo do greide de terraplenagem.

**Figura 1** – Seção transversal da plataforma ferroviária



Fonte: Brina, 1979.

O conhecimento, identificação e verificação de cada um dos componentes da superestrutura ferroviária é de fundamental importância para uma operação e manutenção do sistema ferroviário. O Apêndice A apresenta uma adaptação do Glossário dos Termos Ferroviários do DNIT, Brasil (2016), com os principais termos utilizados neste trabalho.

Esta seção apresenta a especificação técnica dos principais elementos da superestrutura ferroviária.

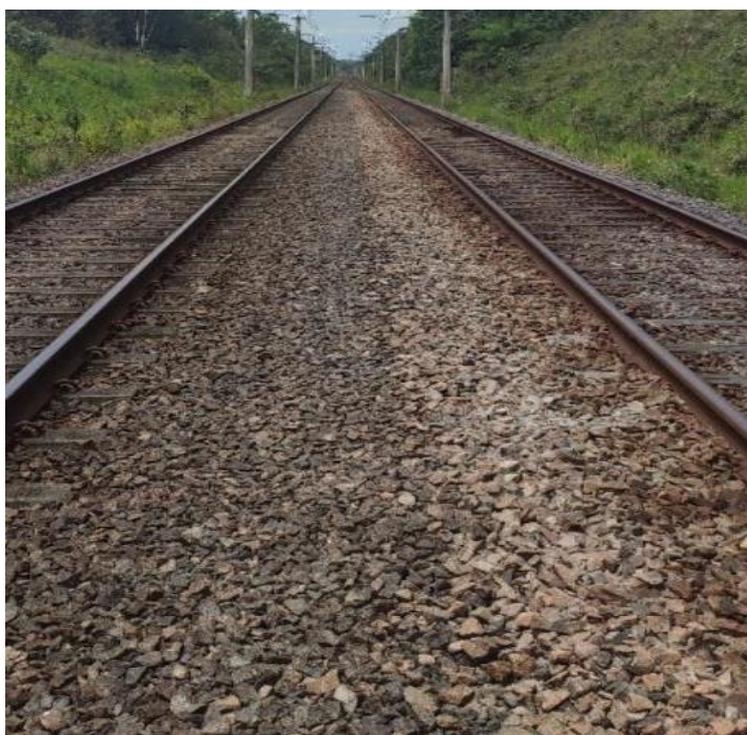
### 2.1.1 Lastro

Lastro, Figura 2, é a camada situada entre os dormentes e o sublastro, geralmente composta de pedra britada com granulometria homogênea, resistente a abrasão e de formato angular (CBTU, [s.d.]). O lastro tem as seguintes funções de acordo com Brina (1979).

- Distribuir de forma uniforme sobre a plataforma os esforços resultantes das cargas dos veículos, produzindo uma taxa de trabalho adequado na plataforma;
- Impedir os deslocamentos dos dormentes, tanto vertical como horizontalmente;
- Formar um suporte, até certo limite de forma elástica, atenuando as trepidações resultantes da passagem dos veículos rodantes;
- Sobrepondo-se a plataforma, suprimir suas irregularidades, formando uma superfície contínua e uniforme para os dormentes e trilhos;
- Facilitar a drenagem da superestrutura.

Nos casos especiais de plataforma rígida de concreto armado é dispensável o uso de lastro.

**Figura 2** – Lastro



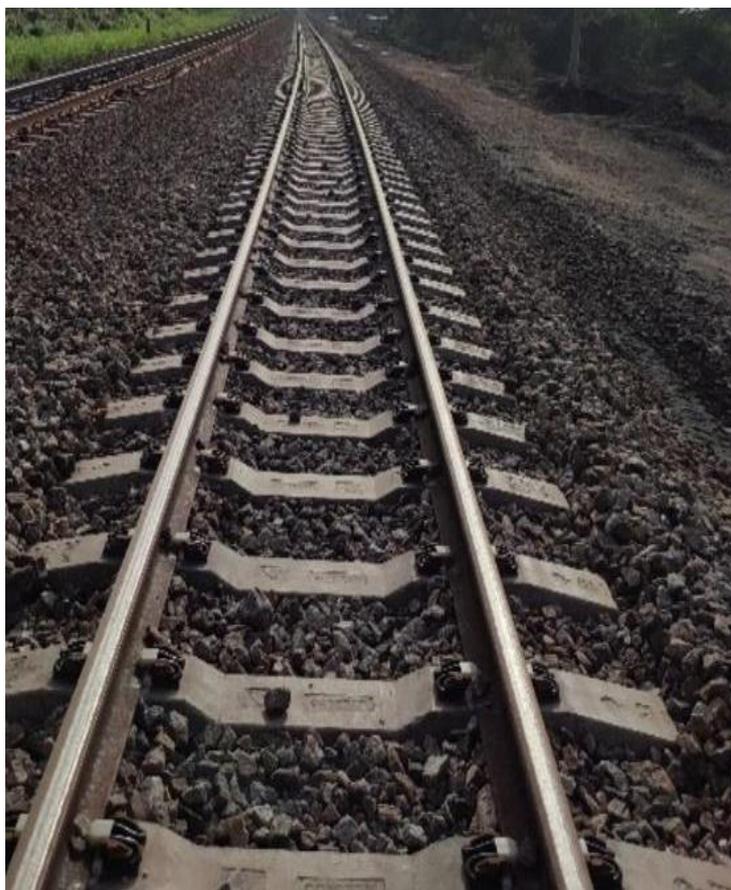
Fonte: Acervo próprio, 2024

### 2.1.2 Dormentes

Os dormentes são elementos da superestrutura da ferrovia que tem por função receber e transmitir ao lastro os esforços produzidos pelas cargas dos veículos ferroviários, servindo de suporte dos trilhos, permitindo a sua fixação e mantendo invariável a distância entre eles (bitola). Os dormentes mais utilizados são os de madeira e os de concreto. De acordo com as Especificações de Material de Via Permanente, EMVP 10, EMVP 15 e EMVP 17 (CBTU, 2019, 2005a, 2005b), os principais tipos de dormente são:

- Concreto protendido monobloco, Figura 3;

**Figura 3** – Dormente monobloco de concreto protendido



Fonte: Acervo próprio, 2024.

- Dormente de madeira, Figura 4; e

**Figura 4** – Dormente de madeira



Fonte: Acervo próprio, 2024

- Concreto armado bi-bloco (aço na estrutura de ligação dos blocos), Figura 5.

**Figura 5** – Dormente bi-bloco de concreto



Fonte: Acervo próprio, 2024.

Assim como o lastro, em alguns casos especiais, os dormentes podem ser

substituídos por uma plataforma de concreto que terá dispositivos para auxiliar no trabalho da estrutura decorrente do tráfego. Outros materiais também são utilizados na fabricação de dormentes, mas são pouco utilizados, como o dormente de aço e o dormente polimérico.

As dimensões dos dormentes dependem de fatores como a bitola, raio mínimo, rampa máxima, superelevação, velocidades máximas, carga máxima por eixo, espaçamento dos dormentes e das características físicas do tipo de dormente a ser utilizado. O dimensionamento é realizado para o trecho mais crítico será utilizado para toda a extensão da linha, sofrendo adaptações nos AMVs, Obras de Arte Especiais e em casos específicos.

### *2.1.3 Fixação*

Os acessórios de fixação são elementos que têm como função manter o trilho na posição projetada, garantindo a bitola da via, oferecendo resistência ao deslocamento longitudinal e transversal do trilho, provocando por variação de temperatura ou frenagem dos veículos. Para tanto as cargas horizontais e verticais devem ser transferidas para os dormentes sem prejudicar o sistema de fixação.

Os acessórios de fixação podem ser classificados por fixação rígida, tirefões e pregos asa-de-barata, ou fixação elásticas, Figura 6, que possibilitam o trabalho do sistema de fixação. A definição do tipo de fixação está relacionada ao tipo de dormente e ao tráfego. No caso das Obras de Arte Especiais e AMVs, as fixações são alteradas.

**Figura 6** – Sistema de fixação do tipo e-clip.



Fonte: Pandrol, 2024.

#### 2.1.4 Trilho

Os trilhos são elementos da superestrutura da ferrovia que guiam o veículo e dão sustentação ao mesmo, funcionando como uma viga contínua e transferindo as solicitações das rodas para os dormentes. O trilho mais utilizado é do tipo VIGNOLE, Figura 7, sendo composto de três partes, boleto, alma e patim, é normalmente produzido nos comprimentos padrão de 12, 18, 24 ou 36 metros.

A ABNT NBR 7590:2012, Trilho Vignole – Requisitos (ABNT, 2012), estabelece os requisitos para os trilhos Vignole e padroniza a classificação dos trilhos como a relação da massa nominal por metro de trilho, conforme a Tabela 1. O trilho é designado por TR.

**Tabela 1** – Classificação do Trilho de acordo com a massa nominal por metro de trilho.

<b>Tipo de trilho</b>	<b>Massa nominal por metro (kg/m)</b>
TR37	37,10
TR45	44,64

TR50	50,35
TR57	56,90
TR60	60,64
TR68	67,56
TR70	69,90

Fonte: ABNT NBR 7590:2012, adaptado

**Figura 7** – Trilho do tipo TR-,,37



Fonte: Acervo próprio, 2024.

### 2.1.5 Juntas

As talas de junção são elementos que atuam na emenda mecânica dos trilhos, sendo a junta feita por duas talas de junção justapostas, Figura 8, montadas na alma do trilho e apertadas com quatro ou seis parafusos de alta resistência com um torque pré-estabelecido.

Os acessórios de ligação são complementados por parafusos porcas e arruelas de pressão de características técnicas específicas, que tem por função apertar as talas de junção contra os trilhos e devem estar de acordo com a ABNT NBR 16741:2019 (ABNT, 2019).

**Figura 8** – Tala de junção



Fonte: Acervo próprio, 2024

A junção longitudinal dos trilhos também pode ocorrer por solda, aluminotérmica ou elétrica. Este tipo de junção permite a transformação de trilhos curtos, de 12 a 36 metros, em trilhos longos soldados, normalmente de 120 metros ou em trilhos contínuos, com dimensão de acordo com o projeto de cada ferrovia.

#### 2.1.6 AMV

A Instrução de Serviços Ferroviários 215 (DNIT, 2016) define AMV como os aparelhos de mudança de via e devem ser assentados sobre plataforma perfeitamente nivelada, drenada com lastro e com jogos de dormentes especiais de madeira, serrados, padronizados e, se possível, tratados, sendo que o uso de placa de apoio e/ou de deslizamento é obrigatório em toda extensão do AMV.

O AMV, Figura 9, compõe-se das seguintes partes principais:

- Chave;
- Agulhas;
- Contra-agulha;
- Aparelho de manobra;
- Trilhos de enlace;
- Coice;
- “Coração” ou “jacaré”;
- Calços;
- Coxins; e
- Contratrilhos.

**Figura 9 – AMV**

Fonte: Acervo próprio, 2024.

### 2.1.7 Outros elementos das ferrovias

Além dos elementos que constituem a superestrutura ferroviária, existem elementos necessários para a segurança do tráfego. Exemplos destes elementos são a rede de postamento e pórticos nas vias de trens alimentados por catenárias, o terceiro trilho, os muros de vedação e os dispositivos de drenagem, Obras de Arte Corrente (OAC), Obras de Arte Especiais (OAE) e passarelas.

## 2.2 Fotogrametria

McGlone no *Manual of Photogrammetry* (2004), descreve que a fotogrametria é uma tecnologia de observação e medição de objetos físicos e que avança constantemente desde a invenção da fotografia em meados do século XIX, e a define como a arte, ciência e tecnologia de obter informações confiáveis sobre objetos físicos

e o meio ambiente por meio do processo de registro, medição e interpretação de padrões fotográficos.

Para Kraus (1993), os resultados das medições fotogramétricas podem ser: números, expressos em coordenadas dos pontos de objetos em um sistema de coordenadas tridimensional (captura digital de dados); plotagens, mapas e plantas com detalhes planialtimétricos (com curvas de nível), incluindo representações de objetos; imagens, especialmente as ortofotos e todos os tipos de mapas derivados desta fonte de dados. Ressalta que o significado do conteúdo das fotografias é menos importante do que a reconstrução geométrica dos objetos sem tocá-los.

Neste sentido, o principal instrumento da fotogrametria é a câmera fotográfica e, quando embarcada em aeronaves tripuladas ou não tripuladas que sobrevoam a área a ser levantada, é denominada de aerofotogrametria. Os levantamentos aerofotogramétricos que utilizam, aeronaves de classe 3, de 250 gramas até 25 quilogramas, permitem, entre outras vantagens, uma redução dos custos de obtenção de fotografias aéreas, maior flexibilidade de resolução temporal e de execução de missões sem o risco de vida, Longhitano (2010), contudo, uma das desvantagens é a limitação da altura máxima de voo (conforme legislação, ICA 100-40, e baterias, dificultando levantamentos para grandes áreas.

O levantamento fotogramétrico deve ser cuidadosamente planejado para que os objetivos do levantamento sejam atingidos e executado fielmente de acordo com o plano de voo que geralmente consiste no mapa do voo e nas especificações como câmera, escala, altura de voo, sobreposição frontal e lateral, etc (Wolf, 1983).

A área a ser levantada é planejada para conter uma série de faixas de voo sobrepostas. A sobreposição frontal é o percentual da área contida em fotos consecutivas em uma mesma linha de voo, na sobreposição lateral o percentual é em relação a área em comum obtida por fotos em linhas de voo adjacentes. A sobreposição, frontal e lateral, será fundamental para poder possibilitar a conexão entre as fotos e assim, após o processamento, se obter o ortomosaico, por exemplo.

A escala da foto é uma das mais importantes variáveis que são definidas durante o planejamento do voo. A escala a ser adotada para levantamentos que buscam a elaboração de ortomosaicos e a realização de fotointerpretação deve ser planejada de forma que permita que os menores objetos de interesse sejam identificados e passíveis de análise.

Com a definição da câmera a ser utilizada e da escala da foto necessária, a

altura do voo em relação ao solo é estabelecida de acordo com a equação a seguir, onde  $E$  é a escala da foto,  $f$  a distância focal e  $H$  a altura do voo.

$$E = \frac{f}{H}$$

A cobertura do solo por foto para fotografia de alta altitude é maior do que para fotografia de baixa altitude, porém, as fotos em alta altitude apresentam menos detalhes que as obtidas em baixa altitude. Desta forma a altura de voo deve ser definida de forma otimizada considerando o nível de detalhe necessário e os insumos que serão utilizados, como tempo e bateria.

Para as câmeras digitais, a resolução das fotos está relacionada à distância entre os centros dos pixels representados na imagem (GSD, *Ground Sample Distance*) e a altura do voo. O tamanho do pixel ( $tam\_pixel$ ) e a distância focal ( $f$ ) é definida pela câmera. O cálculo para a obtenção do GSD é definido de acordo com a fórmula apresentada abaixo:

$$\frac{H}{f} = \frac{GSD}{tam\_pixel}$$

A câmera a ser utilizada precisa ser calibrada para a obtenção da distância focal, coordenadas do ponto principal e os coeficientes para correção das distorções, acompanhados dos respectivos desvios-padrão. A calibração é importante para o cálculo da altura e para a qualidade dos produtos gerados.

As condições climáticas devem ser consideradas no planejamento do voo, pois aspectos ambientais como vento e chuvas interferem e podem impossibilitar a realização do voo. Além destas informações, se faz necessário o conhecimento da regulação sobre a utilização de RPA e como impactam na região a ser levantada.

O Regulamento Brasileiro da Aviação Civil RBAC-E N°94 de 2023 exige que a RPA seja homologada pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) para garantir que os equipamentos operem em frequência compatíveis com a regulamentação brasileira, cadastrar a RPA na Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) que é responsável pelos processos de certificação, fiscalização, normatização e representação institucional.

O Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) é o responsável por planejar, gerenciar e controlar as atividades de controle do espaço aéreo, à proteção ao voo, ao serviço de busca e salvamento e às telecomunicações do Comando da Aeronáutica. O piloto deve possuir registro no DECEA, pois é obrigatório o

agendamento e a solicitação dos voos no sistema de Solicitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas).

### **2.2.1 Tipos de resoluções**

As imagens fotogramétricas digitais possuem quatro tipos de resolução: espacial, radiométrica, espectral e temporal. A resolução espacial está relacionada ao tamanho do pixel na imagem, quanto menor o tamanho do pixel, maior a resolução espacial da imagem digital. Desta forma, se houver uma mesma área com uma elevada resolução espacial, aumenta proporcionalmente a necessidade de processamento das imagens.

A capacidade de distinguir e quantificar a reflectância dos objetos dentro de uma banda do espectro eletromagnético, quanto maior for a capacidade de discernir os tons, maior será a resolução radiométrica (Silva, 1998). É expressa pela quantidade de bits, em um sistema binário, está relacionada a uma potência de 2.

A resolução espectral está relacionada às faixas do espectro eletromagnético que podem ser registradas. As imagens coloridas são compostas por três imagens, vermelho, verde e azul. As bandas do espectro eletromagnético vão de azul ao infravermelho termal.

O tempo de revisita da câmera ao local do levantamento define a resolução temporal. Os levantamentos que necessitam de um acompanhamento em relação ao tempo devem considerar a resolução temporal na sua execução. A utilização de RPAs permite uma redução e mais controle em relação à resolução temporal.

### **2.2.2 Tipos de operação**

O Regulamento Brasileiro da Aviação Civil, RBAC-E N°94 de 2023, estabelece os requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil e define 5 tipos diferentes de operação remota.

Operação em Linha de Visada Visual (VLOS, Visual Line of Sight) significa que o piloto mantém o contato direto com a RPA sem o auxílio de observadores, lentes ou outros equipamentos. O piloto assume a responsabilidade de evitar colisões com aeronaves e obstáculos, mantendo distância segurança de outras aeronaves. A Operação em Linha de Visada Visual Estendida (EVLOS, Extended Visual Line of

Sight) ocorrer de maneira similar ao VLOS, porém necessita do auxílio de observadores de RPA, mas sem o auxílio de lentes e outros equipamentos, para evitar as colisões e garantir a segurança do voo.

No caso em que as condições de voo definida para uma operação VLOS ou EVLOS não são atendidos, são denominados Operação Além da Linha de Visada Visual (BVLOS, Beyond Visual Line of Sight). Quando não for possível a intervenção do piloto durante o voo ou tarde dele, é considerada Operação Autônoma de RPA. A Operação Remotamente Pilotada quando a intervenção do piloto durante o voo é possível, sendo possível a operação de forma autônoma nos casos de falha do enlace de comando e controle.

### **2.2.3 Pontos de controle e pontos de verificação**

Os pontos de controle são placas ou marcações que são distribuídas na área a ser levantada e possuem coordenadas conhecidas obtidas com a utilização de receptores de GNSS e são utilizados durante um levantamento por RPA para possibilitar correlação entre as imagens e estes pontos através de aerotriangulação. A distribuição destes pontos nas áreas de sobreposição das imagens torna possível a orientação dos modelos fotogramétricos e a geração de ortofotos (Fontes, 2005).

Pontos de verificação são utilizados em diversos processos e atividades para garantir que tudo está funcionando corretamente e conforme as especificações desejadas. Os pontos de verificação apresentam as mesmas características dos pontos de controle, a diferença é a sua utilização. Enquanto os pontos de controle são utilizados no processamento do bloco fotogramétrico, os pontos de verificação são utilizados apenas para verificação do produto final. A utilização de pontos de verificação ajuda a mensurar os erros e avaliar a ocorrência de falhas durante o processo, permitindo que os responsáveis possam verificar se tudo está em conformidade antes de seguir adiante (Stott, 2020).

A quantidade de Pontos de Controle e Pontos de Verificação são definidas de acordo com a necessidade de cada projeto. Também podem ser utilizados como pontos de controle as feições fixas previamente estabelecidas por serem identificáveis nas imagens obtidas.

## 2.2.4 Processamento digital de imagens

Técnicas fotogramétricas baseadas em RPA, como *Structure from Motion* - SfM, rapidamente se tornaram populares porque se tornaram métodos bem estabelecidos e validados; eles também são resistentes a alguns dos problemas associados ao sensoriamento remoto por RPA, como a estimativa de pose. Isso se deve à robustez da extração da pose da câmera a partir de uma série de imagens em métodos métricos de fotograma e à confiabilidade dos algoritmos de detecção de características desenvolvidos para visão computacional e processamento de imagens (Lowe, 2004).

Novos métodos de processamento de imagens foram desenvolvidos ou expandidos com base na coleta de imagens baseadas em RPA. Jahanshahi *et al.* (2017) abordaram a questão de imprecisões posicionais e os pontos gerados que não fazem parte do objeto a ser levantado no SfM, desenvolvendo um algoritmo para melhorar a reconstrução 3D quando existem recursos mal associados nos dados SfM.

No caso do sistema RPA, o processamento do bloco de imagens é realizado com a aplicação de algoritmos, mais especificamente do tipo *Structure from Motion* - SfM, a partir dos quais se obtêm os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera fotográfica. Isto implica que a reconstrução tridimensional é realizada inicialmente no espaço imagem e apenas na fase final, quando são introduzidos os pontos de controle ou informações dos centros ópticos, obtidos das informações GNSS, se realiza o georreferenciamento do bloco em função das coordenadas da referência geodésica. Esse procedimento é semelhante ao ajustamento de blocos por modelos independentes utilizado na fotogrametria convencional.

Os algoritmos SfM, fundamentalmente, são desenvolvidos com o objetivo de determinar os parâmetros de orientação individuais de cada imagem de um bloco de imagens e as coordenadas tridimensionais de um grupo de pontos homólogos visíveis nesse bloco. Ao ponto de coordenadas 3D reconstruídas e suas respectivas coordenadas 2D homólogas, dá-se o nome de track.

De forma similar aos procedimentos da fotogrametria tradicional, os algoritmos SfM possuem o seguinte fluxo operacional:

- Estabelecimento de pontos de controle sobre a área a ser mapeada por intermédio de medições topográficas.
- Aquisição das imagens.

- Identificação automática das feições qualificáveis em cada uma das imagens e estabelecimento dos pontos de interesse. A quantidade de pontos em cada imagem dependerá da textura e da resolução da imagem.
- Aplicação de algoritmos de correlação de imagens para detectar os pontos homólogos de cada ponto entre as imagens.
- Construção dos *tracks* 2D em função dos pontos homólogos selecionados. A quantidade de *tracks* selecionados nesta fase é a mínima suficiente para a determinação preliminar dos parâmetros de orientação da cena.
- Aplicação de algoritmo SfM sobre os *tracks* 2D e determinação dos parâmetros preliminares de orientação das imagens e as coordenadas 3D relativas a cada *track*.
- Identificação manual da localização dos pontos de controle.
- Refinamento do modelo SfM aplicando um ajustamento de bloco sobre o modelo preliminar reconstruído em conjunto com os pontos de controle. O resultado desta etapa é a determinação definitiva dos parâmetros de orientação e as coordenadas 3D de uma malha densa de pontos.

Igualmente ao processamento fotogramétrico convencional, pode haver variantes das etapas citadas que combinam o uso de pontos de controle com informações da plataforma GNSS/IMU para o ajustamento de bloco.

Para que o processo possa ser aplicado eficientemente deve-se garantir que o recobrimento entre as imagens adjacentes seja o máximo possível e que se tenha um recobrimento global da área a ser mapeada.

Para melhorar a eficiência dos algoritmos de correlação de imagens, os algoritmos SfM, em geral, utilizam a geometria epipolar para restringir a busca 2D em uma busca 1D. A qualidade do resultado dessa busca é o fator preponderante para a acurácia dos parâmetros de orientação das imagens e, conseqüentemente, da posição dos elementos geográficos nos produtos gerados com os sistemas de mapeamento por RPA.

De acordo com o manual do Agisoft Metashape (AGISOFT, 2024), o processamento de dados para um projeto de processamento de fotogrametria na constituição de uma superfície 3D e um ortomosaico consiste em três etapas principais, alinhamento, geração de uma superfície e a criação do ortomosaico. No alinhamento, o software responsável pelo processamento procura pontos

característicos nas imagens e os combina entre as imagens em pontos de ligação. O programa encontra a posição da câmera para cada imagem e refina os parâmetros de calibração da câmera, estimando os parâmetros de orientação interna e externa. A nuvem de pontos de ligação representa os resultados do alinhamento da imagem.

A segunda etapa é a geração de uma superfície que pode ser texturizada para representação digital fotorrealística tanto para fluxos de trabalho de CAD quanto de modelagem 3D. Se o Modelo Digital de Elevação (MDE) for gerado com base na nuvem de pontos, poderá incluir o terreno e todos os objetos acima do solo, Modelo Digital de Superfície (MDS) ou mostrar somente o Modelo Digital do Terreno (MDT).

A última etapa é a criação do ortomosaico, que pode ser georreferenciado. O ortomosaico é gerado projetando as imagens de acordo com seus dados de orientação externa e orientação interna da câmera em uma superfície estabelecida pelo usuário.

### 2.3 Inspeção de ferrovias por RPAS

As ferrovias destinadas ao transporte urbano de passageiros necessitam de inspeções rigorosas por transportarem pessoas a uma alta velocidade. As malhas ferroviárias de passageiros estão presentes em 15 cidades brasileiras, sendo 12 em Regiões Metropolitanas de capitais, na década de 2020.

**Tabela 02** – Extensão das malhas ferroviárias destinadas ao transporte de passageiros no Brasil

<b>Operadora</b>	<b>Cidade</b>	<b>Extensão (km)</b>
Companhia Brasileira de Trens Urbanos	Natal	77,5
Companhia Brasileira de Trens Urbanos	Recife	71,0
Companhia Brasileira de Trens Urbanos	Maceió	34,7
Companhia Brasileira de Trens Urbanos	João Pessoa	30,0
Metrofor	Fortaleza	56,8
Metrofor	Sobral	13,9
Metrofor	Juazeiro do Norte	13,6
CPTM	São Paulo	196,0
Metrô SP	São Paulo	104,4
Via Mobilidade	São Paulo	99,0
Via Quatro	São Paulo	12,8
SuperVia	Rio de Janeiro	270,0
Metrô Rio	Rio de Janeiro	55,0

VLT Carioca	Rio de Janeiro	28,0
Trensurb	Porto Alegre	43,8
Metrô DF	Brasília	42,0
CCR	Salvador	33,0
Metrô BH	Belo Horizonte	28,1
Companhia Ferroviária e de Logística do PI	Teresina	13,5
EMTU	Santos	11,5

Fonte: Elaborado a partir de dados dos sites oficiais das operadoras CBTU, Metrofor, CPTM, Metrô SP, Via Mobilidade, Via Quatro, Supervia, Metrô Rio, VLT Carioca, Trensurb, Metro DF, CCR, Metrô BH CFL PI e EMTU (2024).

A inspeção ferroviária realizada de forma perene e minuciosa impacta diretamente na segurança, na eficiência operacional, na longevidade dos itens da superestrutura e no custo-benefício do sistema ferroviário de transporte de passageiros. A sua realização pode ser realizada com o auxílio de uma auto de linha, Figura 10, e por equipe especializada percorrendo o trecho a ser inspecionado.

**Figura 10** – Auto de Linha



Fonte: Empretec, 2024.

Os Trilhos, dormentes, pontes e outros componentes são expostos a tensões repetitivas, condições climáticas adversas e desgaste ao longo do tempo, assim, falhas em um desses componentes pode levar a acidentes graves, como descarrilamentos, colapsos de pontes ou colisões. Inspeções regulares permitem a identificação precoce de defeitos, como trincas, desalinhamentos e desgastes, possibilitando a correção antes que eles representem um risco significativo e ampliando a capacidade operacional da ferrovia (Askarzadeh *et al.*, 2023).

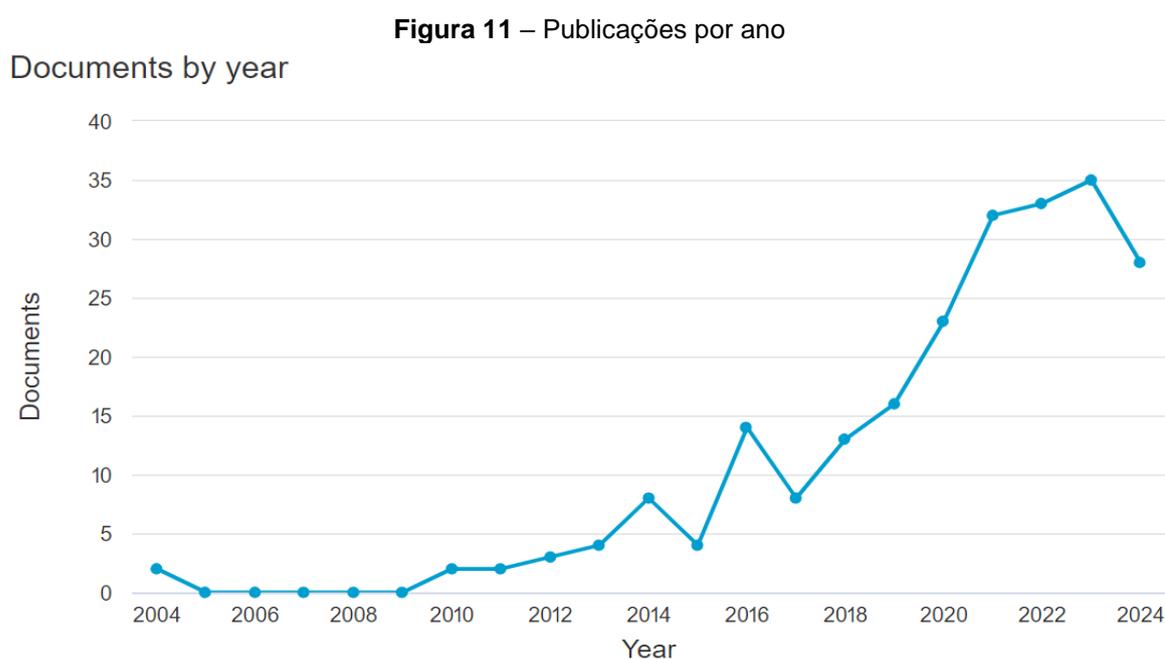
A manutenção preventiva baseada em inspeções frequentes é geralmente mais

econômica do que a reparação de danos severos ou a substituição de grandes seções da infraestrutura. Em muitos países, as ferrovias são reguladas por órgãos governamentais que exigem inspeções periódicas para garantir que as operações estejam dentro dos padrões de segurança estabelecidos. A literatura destaca AREMA (*American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association*), UIC (*International Union of Railways*), JIS (*Japanese Industrial Standards*) e GB (*Great British Railways*).

Neste sentido, a utilização de RPA para inspeção ferroviária pode vir a contribuir com a inspeção tradicional realizada apenas de forma humana/visual. As RPAs vêm se tornando uma ferramenta de inspeção e monitorização ferroviária, mas ainda falta informação sobre os benefícios, protocolos e normativas, além de custos específicos.

A base de dados da SCOPUS consta com 227 documentos relacionados a utilização de RPA para inspeção ou monitoramento de ferrovia. Entre as aplicações estão as inspeções de obras de arte, monitoramento de taludes, identificação de objetos sobre a via e inspeções de elementos específicos da superestrutura ferroviária.

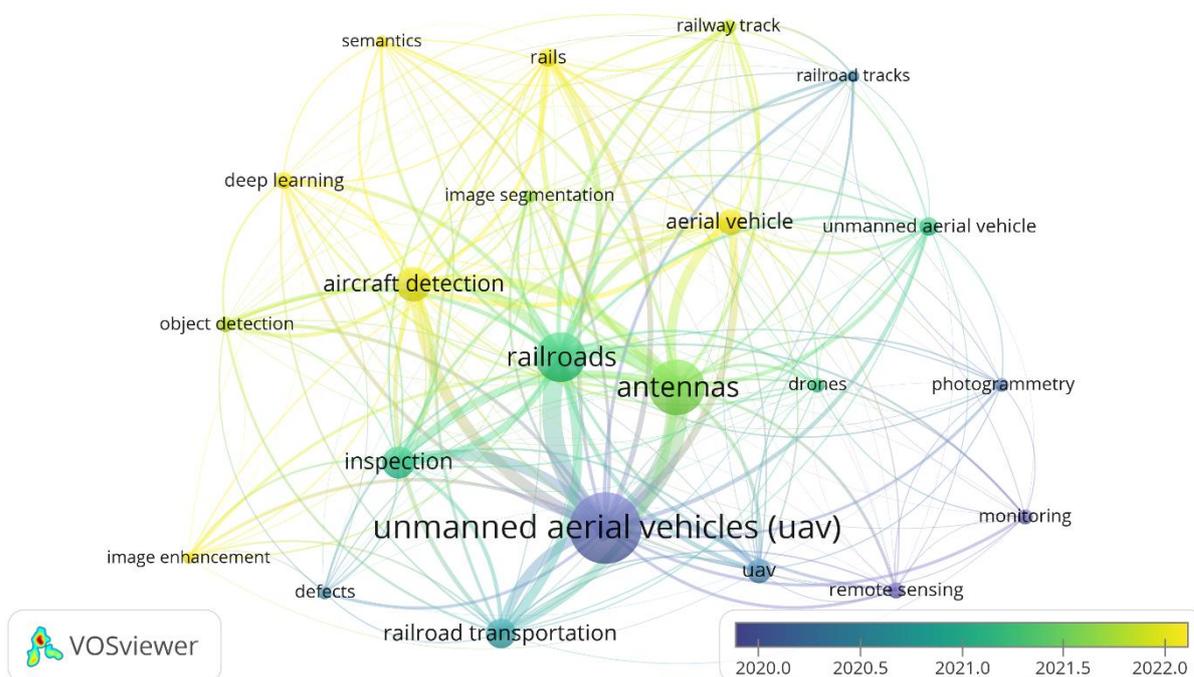
A Figura 11 demonstra o crescente aumento de publicações por ano. Os 10 países que mais produzem na área são: China, Estados Unidos, Alemanha, Índia, Austrália, Itália, Reino Unido, Turquia, Canadá e Dinamarca.



Fonte: Scopus, 2024

Conforme a tecnologia vai sendo mais desenvolvida, mais aplicações vão sendo encontradas. A Figura 12 ilustra o crescimento de novas palavras-chaves nas publicações mais recentes. A presença de *deep learning* demonstra como um caminho para os estudos que estão sendo desenvolvidos sobre o tema a adoção de redes neurais como ferramenta do aprendizado de máquina na inteligência artificial.

**Figura 12** – Palavras-chaves por ano



Fonte: Scopus, 2024.

Algumas publicações são focadas na inspeção ou monitoramento de alguns elementos ferroviários específico, como Thomas *et al.*, (2023) Cabral *et al.*, (2023) Stemmler *et al.*, (2022), e Potenza *et al.*, (2020) que estudaram o monitoramento dos elementos estruturais de pontes ferroviárias, e Li *et al.*, (2023) apresenta uma reconstrução tridimensional de uma ponte ferroviária com a de RPA e um Laser Scanner. Jian *et al.*, (2023), que propõe uma estratégia automática de detecção e análise dos dispositivos de suporte para a catenária, Tang *et al.*, (2024), que apresenta um plano de inspeção de trilhos numa região de porto de carga. No trabalho desenvolvido por Yang *et al.*, (2022) foi utilizado a RPA de forma autônoma para a inspeção dos trilhos.

O estudo desenvolvido por Cmielewski *et al.*, (2021) buscou a obtenção de

parâmetros geométricos dos trilhos com a utilização de RPA. Foram realizados voos com as alturas de 10, 15 e 20 metros e com sobreposição, frontal e lateral, de 80%. A Câmera utilizada, Sony A6300, possui uma distância focal de 20 mm. O trabalho permitiu confirmar a possibilidade do uso da fotogrametria em baixas altitudes com a utilização de RPA para determinar parâmetros geométricos dos trilhos com precisão de milímetros.

Yu *et al.*, (2024) utilizou RPA e um modelo de *deep learning* para detecção de defeitos nos sistemas de fixação de uma ferrovia. Wu *et al.*, (2018) desenvolveram formas de detecção de defeitos na superfície dos trilhos com um DJI Matrice 600 equipado com Zenmuse Z30 a uma altura de voo de 30 metros e velocidade de 2m/s.

Segundo a literatura, as principais motivações para a utilização de RPAs na inspeção são reduzir custos, melhorar a segurança, poupar tempo, melhorar a mobilidade, aumentar a flexibilidade e aumentar a confiabilidade (Banic, 2019; Cmielewski *et al.*, 2021; Askarzadeh *et al.*, 2024). A indústria ferroviária investe em estruturas, atividades de manutenção e fiscalizações para atender às crescentes demandas de transporte de cargas e passageiros. Manter a segurança e a eficiência ferroviária exige inspeções regulares dos trilhos.

A inspeção ferroviária muitas vezes envolve trabalhar em ambientes perigosos, em áreas de difícil acesso ou em condições adversas. O uso de RPAs pode diminuir a necessidade de expor os trabalhadores a esses riscos, pois podem ser operados remotamente para realizar inspeções detalhadas.

As empresas ferroviárias têm avaliado métodos de inspeção que utilizam RPAs que podem voar a uma altitude programada acima dos trilhos da ferrovia (Lebedev *et al.*, 2020). As RPAs também aumentam a segurança ao remover os humanos de situações potencialmente perigosas (Frederiksen *et al.*, 2019).

Askarzadeh, Bridgelall e Tolliver (2023) conduziram uma revisão sistemática da literatura sobre a utilização de RPA para o monitoramento das condições ferroviárias. Os autores destacam que seu uso é capaz de realizar inspeções detalhadas dos ativos ferroviários, como a geometria dos trilhos, a condição das estruturas e a identificação de defeitos, com uma precisão e eficiência superiores às técnicas tradicionais. Além disso, os RPAs oferecem uma abordagem não invasiva, minimizando a necessidade de interromper as operações ferroviárias durante as inspeções.

A utilização de RPA para monitorar a infraestrutura ferroviária para melhorar a segurança e a proteção aumentaria a eficiência das operações de monitorização,

enquanto libertaria os trabalhadores para realizarem tarefas mais valiosas (ESCAP, 2019). Craven (2017) demonstrou que a fotogrametria baseada por RPA pode ser eficaz a uma altura de 25 metros para evitar a interrupção das operações normais.

No contexto do controle de voo ao longo das ferrovias, Lebedev, Vasilev e Paulish (2023) investigaram o uso de visão técnica para orientar os RPAs em missões automatizadas. Essa abordagem permite que os RPAs mantenham uma trajetória precisa ao longo dos trilhos, essencial para a coleta de dados consistentes e para a realização de inspeções em áreas de difícil acesso. A automação do controle de voo também reduz a necessidade de intervenção humana, aumentando a eficiência e reduzindo os custos operacionais.

Zachar *et al.*, (2022) realizaram estudaram a influência da precisão da nuvem de pontos da correspondência de imagens na preparação automática de conjuntos de dados de treinamento para detecção de objetos em imagens de RPA onde os pórticos e postes da rede aérea de um sistema ferroviário foi utilizado para o estudo. A precisão desses dados é fundamental para o treinamento de modelos de detecção, que são aplicados em diversas tarefas de monitoramento ferroviário.

Foi realizada uma avaliação comparativa de modelos de redes neurais profundas para detecção de obstáculos em imagens aéreas de trilhos ferroviários em tempo real no estudo elaborado por Rampriya *et al.*, (2022). Os autores concluíram que houve uma maior precisão na detecção de obstáculos nos trilhos, incluindo a classificação de diferentes objetos e obstruções, além de garantir uma eficiência em diferentes condições de iluminação. Entretanto, os autores citados fazem um contraponto sobre precisão da detecção e a velocidade de processamento, uma vez que modelos oferecem alta precisão, eles podem ser mais lentos em termos de tempo de inferência, o que é crítico para aplicações em tempo real, como a detecção de obstáculos em ferrovias.

Sobre limitações, Frederiksen *et al.*, (2019) exploraram em seu estudo as barreiras e oportunidades associadas ao uso de RPA para a inspeção de infraestruturas. Eles pontuam que existem ainda desafios regulatórios e técnicos, como a necessidade de pilotos qualificados e a limitação da autonomia dos RPA.

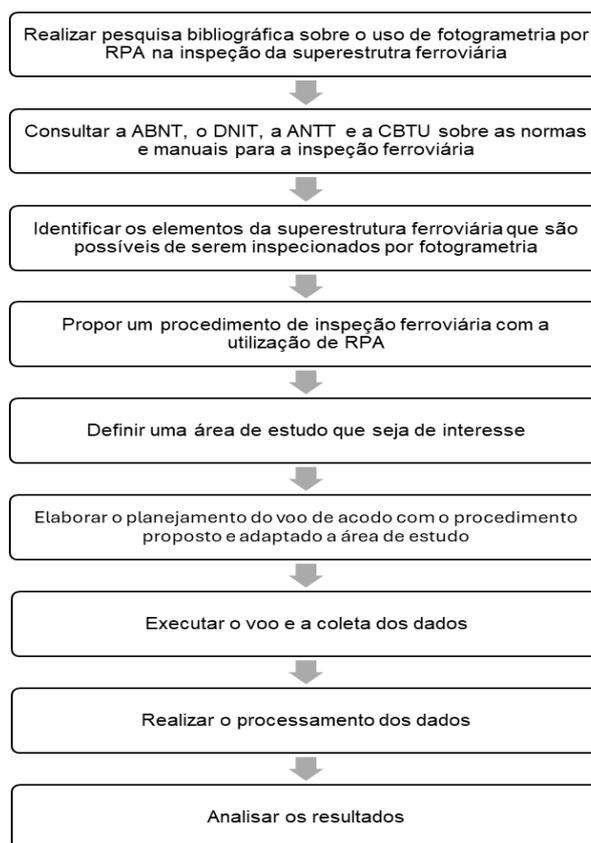
Estudar sobre a utilização de RPAs no monitoramento de elementos da superestrutura ferroviária representa um importante passo científico, com o potencial de transformar as práticas de inspeção e manutenção na realidade brasileira. A literatura existente sugere que a integração de tecnologias pode potencializar a

eficiência de inspeção, mas há que superar os desafios levantados, aprofundando o conhecimento sobre custo-benefício, normatizações e protocolos padrão para treinamento de pessoal e otimização das práticas laborais e de gestão ferroviária.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada na pesquisa foi aplicada de acordo com as etapas apresentadas na Figura 13.

**Figura 13 – Fluxograma**



Fonte: Elaboração própria, 2024.

#### 3.1 Normas e manuais aplicáveis

Para identificar os parâmetros e elementos que devem ser monitorados nas atividades de inspeções ferroviárias foi realizada uma pesquisa por normas e manuais nos sites da ABNT, DNIT, ANTT e CBTU.

A ABNT criou o comitê ABNT/CB-006 em 1968 que busca a normalização no campo metroferroviário compreendendo via permanente, material rodante, carro metropolitano, segurança e bilhetagem, no que se concerne a terminologia, requisitos, métodos de ensaios e generalidades. Mas não possui norma que aborda a inspeção de uma ferrovia, as inspeções tratadas nas normas do comitê são referentes ao recebimento de matérias ou das condições do material rodante.

Assim como a ABNT, o DNIT não possui normas ou manuais referentes à inspeção ferroviária. As instruções e procedimentos do DNIT abordam a elaboração de Estudo de Viabilidade Técnica Econômica e Ambiental, Especificações Técnicas de Materiais e Serviços Ferroviários, Instruções de Serviços Ferroviários, Parâmetros Indicadores de Intervenções em Áreas Urbanas que é focada em Passagens em Nível e Procedimentos para Inspeção, mas estes tratam de inspeções para o recebimento de materiais.

A CBTU possui diversos documentos técnicos que abordam a aquisição de materiais, instruções técnicas, especificação de material, especificação de serviços, manutenção preventiva, manual de instrução, projetos e manual de manutenção, porém não tratam de inspeção ferroviária, assim como a ABNT e o DNIT.

O único documento que trata de inspeções da superestrutura ferroviária é o Manual de Fiscalização do Transporte Ferroviário elaborado pela ANTT em 2021 (Miguel, 2021). O manual divide as atividades de fiscalização quanto à previsibilidade em regular, planejada, e eventual, agendadas. A metodologia de fiscalização da via permanente prevista no manual da ANTT norteia a sua fiscalização de forma presencial realizada por meio visual e com deslocamento contínuo ao longo da via permanente, em auto de linha, ou similar, em velocidade que seja compatível com a segurança.

A fiscalização da ANTT busca inspecionar a via permanente, mas não de identificar exaustivamente seus defeitos, consistindo no cadastro de anomalias relevantes uma qualificação preliminar do trecho inspecionado e verificar defeitos que possam ser considerados característicos de uma determinada linha caracterizando uma postergação dos trabalhos de manutenção ou a adoção de procedimentos inadequados. Evidentemente que os defeitos graves, que possam colocar em risco a segurança do tráfego de trens, mesmo que sejam constatados isoladamente, também devem ser considerados, inclusive com determinação de medidas corretivas imediatas e interdição do tráfego, caso necessário.

O manual prevê o preenchimento de uma ficha (Anexo 1) ou formulário digital com a relação de defeitos. Mas o fiscal não precisa se limitar ao seu preenchimento, devendo anotar o máximo de informações e impressões visíveis, a fim de facilitar posterior elaboração de um diagnóstico sobre a qualidade e adequação da manutenção da via permanente. A Ficha de Inspeção de Via Permanente apêndice do manual aborda 37 pontos, destes 26 fazem parte da superestrutura. Para cada

defeito observado deve ser informado o quilômetro e uma foto da ocorrência.

Este método de inspeção necessita de uma boa visibilidade, baixa velocidade, alta concentração e eventual necessidade de descer a via para a realização da foto e confirmação da quilometragem. Desta forma a sua execução em um sistema de transporte de passageiros sobre trilhos na região metropolitana ao ocorrer durante a madrugada prejudica a visibilidade e se durante o dia, a baixa velocidade do auto de linha e a sua possível parada ocasiona impactos operacionais negativos na oferta do serviço a população.

### 3.2 Identificação dos elementos da superestrutura ferroviária para a inspeção por RPA

De com o Manual de Fiscalização da ANTT os principais defeitos que podem ser encontrados na fiscalização visual da superestrutura da via permanente são:

- Lastro contaminado, Figura 14, insuficiente ou fuga lateral;

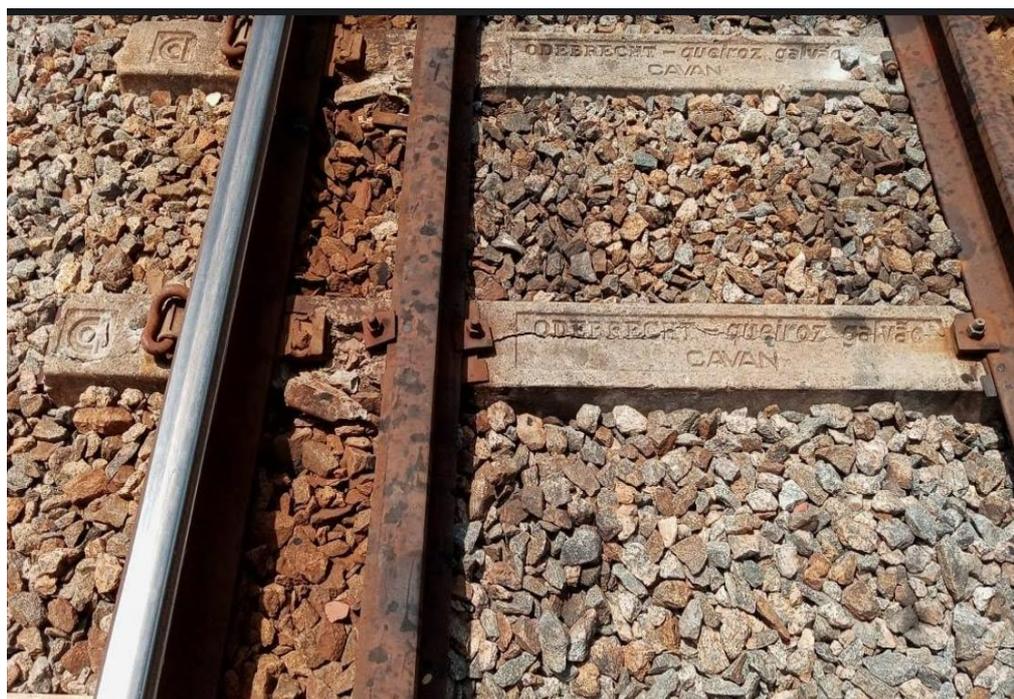
**Figura 14** – Lastro contaminado



Fonte: Acervo próprio, 2024.

- Dormente com taxa alta de inservíveis, Figura 15, ou inservíveis dispostos sequencialmente;

**Figura 15 – Dormente inservível**



Fonte: Acervo próprio, 2024.

- Ausência de fixação, Figura 16, ou fixações inservíveis sequencialmente;

**Figura 16 – Ausência de fixação**



Fonte: Acervo próprio, 2024.

- Trilho patinado, com boleto achatado, fino, desgastado, Figura 17, corrugado ou com outro defeito;

**Figura 17** – Trilho desgastado



Fonte: Acervo próprio, 2024.

- Defeito em solda de trilho;
- Nivelamento ou alinhamento precário;
- Flambagem da via;
- Sinais de caminhamento da via ou deficiência na retenção longitudinal dos trilhos;
- Junta laqueada, desnivelada, defeituosa, aberta desligada, fraudada ou faltando parafuso;
- Taco de trilho; e
- Problemas em Aparelho de Mudança de Via – AMV (agulha com ponta quebrada/desgastada, jacaré desgastado ou quebrado), cotas de salvaguardas inadequadas.

Com a identificação dos defeitos e da sua localização, o Manual da ANTT recomenda como principais serviços de manutenção e conservação da superestrutura da ferrovia conforme apresentado a seguir:

- Substituição de dormentes inservíveis que não assegurem o apoio suficiente do trilho e ultrapassem um limite percentual que pode ficar na linha sem comprometer o tráfego de trens, desde que não seja dormente vizinho de juntas de trilho;
- Nivelamento e puxamento da linha para correção do empeno da grade de trilhos, visando prevenir acidentes e o balanço do material rodante, preferencialmente realizando a correção geométrica mecanizada no absoluto;
- Quadramento e espaçamento dos dormentes;
- Correção de bitolas, verificação de inclinação dos trilhos e superelevação;
- Socaria e conformação do lastro em altura e ombros para prevenir danos na infraestrutura e flambagem da grade;
- Regulagem das juntas de dilatação, que exige rebatimento das barras de trilho, correção de deformação das extremidades das barras que sofrem impactos das rodas, nova furação de trilhos, se necessária, para a regulagem, reaperto dos parafusos e principalmente a constante lubrificação das talas de junção junto a sua superfície de deslizamento na alma dos trilhos;
- Substituição de materiais metálicos defeituosos ou desgastados (trilhos, placas e fixações identificados por prospecção a pé ou por equipamento adequado);
- Rebatimento ou reaperto de fixações rígidas e elásticas, e
- Verificação de tolerâncias, folgas, ajustes e apertos em AMVs.

### 3.3 Investigação da utilização de RPAs na inspeção

Para verificar e analisar a aplicação de RPAs na inspeção de elementos da infraestrutura ferroviária, foi realizado um estudo de caso em dois trechos de ferrovia do sistema de Recife, cujos procedimentos e resultados serão descritos a seguir.

#### 3.3.1 Recursos tecnológicos

- RPA modelo Phantom 4 Advanced da DJI e o modelo Mavic 3E com Módulo RTK, também da DJI, para realização do voo e captura das imagens e informações;

- Receptores de Dados GNSS Polaris S100 e CHC i73 para obtenção das coordenadas dos pontos de controle e pontos de verificação;
- Computador modelo HP EliteOne 800 G1 AiO, Processador Intel® Core™ i5-4590S CPU @ 3.00GHz, Memória RAM de 8,00GB, Sistema Operacional de 64 Bits, Windows 7 Professional para utilização dos softwares;
- Software Google Earth Pro para delimitação da área;
- Software DJI Flight Hub 2 para planejamento do voo;
- Software Drone Deploy V4.135.0;
- Software Agisoft Metashape Professional para realizar o processamento dos dados;
- Software Pix4dMapper para verificação dos resultados.
- Software Autodesk Civil 3D 2024 para compatibilização entre a ortofoto e o arquivo DWG com o “*as built*” da via permanente
- Software QGIS Desktop 3.34.5 para definição da poligonal que irá delimitar a área do levantamento
- Smartphone Xiaomi Redmi Note 10 Pro para orientar na localização dos pontos de controle e pontos de checagem e na realização de fotos do processo
- Pacote Office Word e Excel para a elaboração do relatório.

### 3.3.2 Monitoramento com RPAs em trechos da superestrutura do metrô em Pernambuco

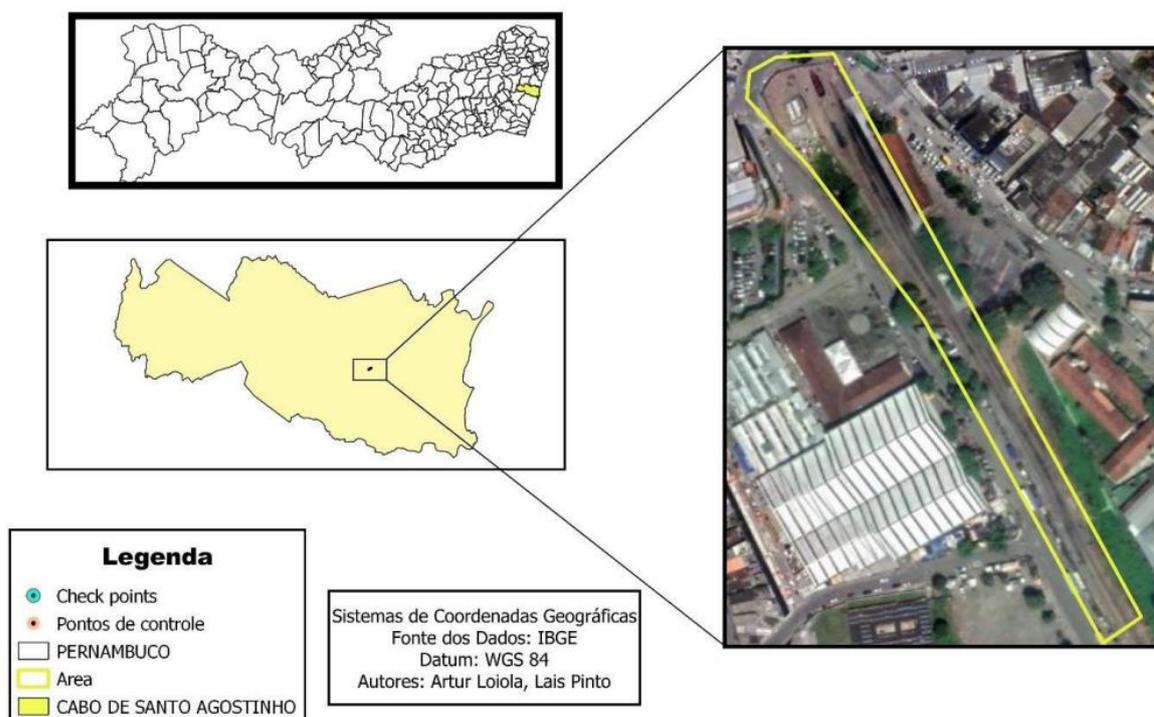
Foram definidas duas áreas de estudo, a fim de caracterizar diferentes combinações dos elementos da superestrutura ferroviária. O primeiro experimento foi realizado como atividade dos alunos de graduação das disciplinas de Fotogrametria 1 e 2, ministradas pela Professora Dr.<sup>a</sup> Simone Sato, com equipamentos da UFPE. O segundo experimento foi realizado pelo corpo técnico da CBTU da Superintendência de Recife com a utilização dos equipamentos da companhia.

O tipo de operação realizada nos experimentos foi a Operação em Linha de Visada Visual (VLOS), com o piloto mantendo visada do RPA durante todo o levantamento, sem a utilização de lentes, equipamentos ou o auxílio de observadores, se responsabilizando por evitar colisões com aeronaves e obstáculos.

### 3.3.2.1 Experimento 1: Pátio ferroviário da Estação Cabo, em Cabo de Santo Agostinho – PE

O primeiro experimento foi realizado no pátio ferroviário da Estação Cabo no município de Cabo de Santo Agostinho, no estado de Pernambuco (mapa na Figura 18). A superestrutura do trecho ferroviário que foi levantado é constituída de trilhos do tipo TR-45 sobre dormentes bi-bloco de concreto com sistema de fixação S.75L. A grade ferroviária, trilhos e dormentes, estão apoiados em um lastro de brita. O pátio ferroviário da Estação Cabo é composto por 6 AMVs.

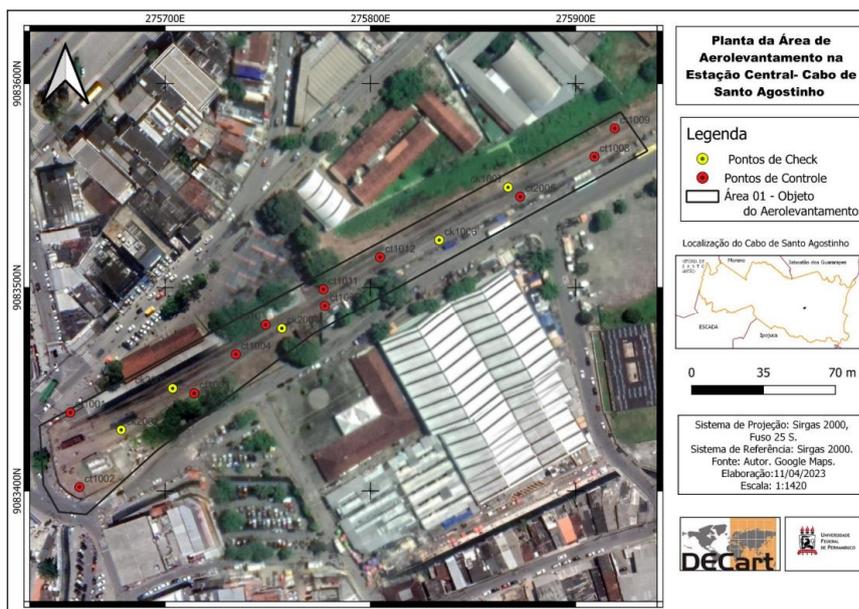
**Figura 18** – Mapa do levantamento para o primeiro experimento



Fonte: Elaboração própria, 2024

A Figura 19 apresenta a distribuição dos pontos de controle e pontos de verificação na área levantada para o primeiro experimento.

**Figura 19** – Distribuição dos pontos de controle e verificação do primeiro experimento



Fonte: Elaboração própria, 2024.

O plano de voo para o primeiro experimento está representado na Figura 20 e foi elaborado no software DroneDeploy de acordo com o planejamento apresentado a seguir.

**Figura 20** – Planejamento do voo do primeiro experimento



Fonte: Elaboração própria, 2024.

a) Planejamento do voo e coleta das coordenadas

A delimitação da área foi feita considerando a posição dos AMVs de manobra do pátio e o espaço entre os muros que o definem, os softwares utilizados nesta etapa

foram o Qgis e o Google Earth. Foram definidos os seguintes parâmetros de planejamento de voo:

- Área: 9.612m<sup>2</sup>;
- GSD: 0,84cm/pixel;
- Sobreposição longitudinal: 80%;
- Sobreposição transversal: 80%;
- Pontos de Controle: 11
- Pontos de Verificação: 5
- Altitude: 30 metros do nível do solo;
- Velocidade: 2m/s;
- Ângulo do gimbal: -90° (direção do nadir).

O início das atividades de campo se deu com o reconhecimento da área a ser levantada e posterior distribuição dos alvos utilizados como ponto de controle e ponto de verificação para a sua materialização em campo. Os receptores de Dados GNSS Polaris S100 foram utilizados na obtenção das coordenadas dos pontos com a aplicação da técnica N-Trip (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*).

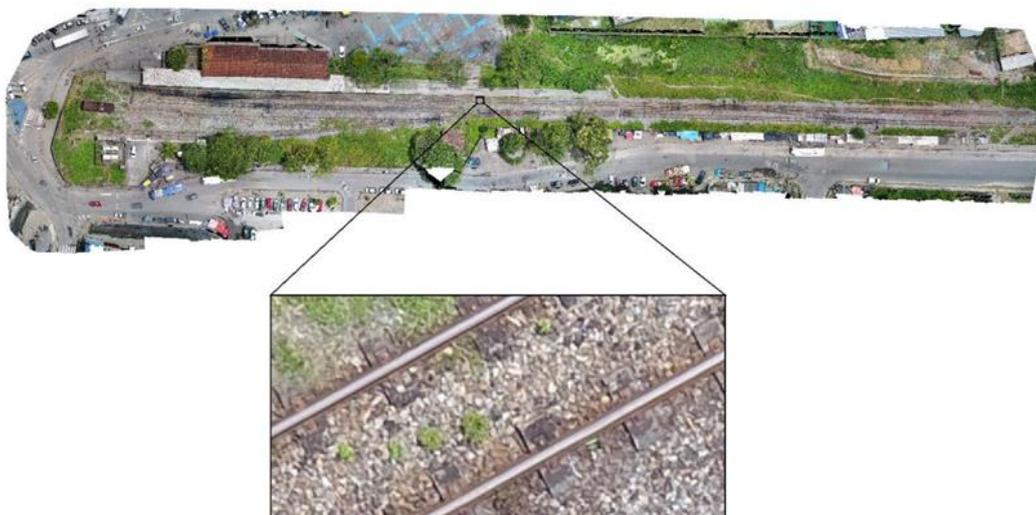
Após a coleta das coordenadas de cada ponto, foi realizado o voo com o Phantom 4 Advanced da DJI que possui uma câmara com uma distância focal equivalente a 24mm que coletou 206 imagens em 12 minutos e 05 segundos e consumiu uma bateria. Foi utilizada a mesma altura que a apresentada por Wu et al., 2018, 30 metros.

#### b) Processamento das imagens

O processamento dos dados do levantamento do primeiro experimento foi realizado no Laboratório de Fotogrametria do Departamento de Engenharia Cartográfica da UFPE com a utilização do software Pix4DMapper. Os resultados obtidos demonstram que para um valor da Resolução Espacial do Sensor (Ground Sample Distance, GSD) de 0,84 cm/pixel.

Após o processamento foi obtida a ortofoto apresentada na Figura 21.

**Figura 21** – Ortofoto do primeiro experimento

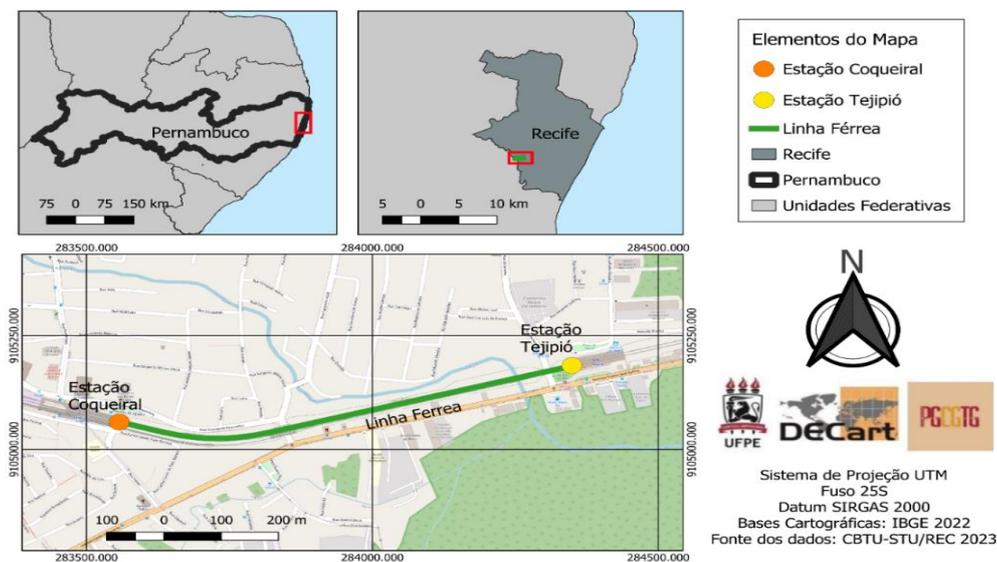


Fonte: Acervo próprio, 2024.

### 3.3.2.2 Experimento 2: Trecho entre as estações Tejió e Coqueiral, em Recife-PE

Para o segundo experimento foi realizado um levantamento em um segmento ferroviário localizado no município do Recife-PE, entre as Estações Tejió e Coqueiral, Figura 22. O trecho é composto por uma ferrovia duplicada, de bitola larga, com trilho do tipo TR-57 fixado nos dormentes monobloco de concreto protendido com o grampo e-Clip. O trecho contempla uma zona de manobra que possui 8 AMVs.

**Figura 22** – Mapa do levantamento para o segundo experimento



Fonte: Elaboração própria, 2024.

A Figura 23 apresenta a distribuição dos pontos de controle e pontos de verificação para o segundo experimento.

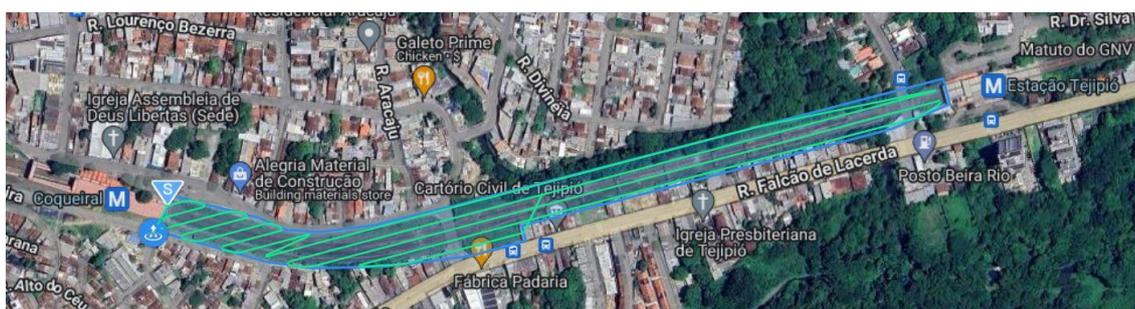
**Figura 23** – Distribuição dos pontos de controle e verificação do segundo experimento



Fonte: Elaboração própria, 2024.

O planejamento do voo para o segundo experimento está representado na Figura 24.

**Figura 24** – Planejamento do voo segundo experimento



Fonte: Elaboração própria, 2024.

a) Planejamento do voo e coleta das coordenadas

No segundo experimento a delimitação da área se deu pelas estações Tejió e Coqueiral e os muros do sistema ferroviário. Foi utilizado o DJI Flight Hub 2 e os parâmetros apresentados a seguir para o planejamento do voo e o Google Earth para orientar o posicionamento dos pontos de controle e de verificação.

Parâmetros do plano de voo:

- Área: 22.804,66m<sup>2</sup>;
- GSD: 1,04cm/pixel;
- Sobreposição longitudinal: 80%;
- Sobreposição transversal: 80%;

- Pontos de Controle: 11
- Pontos de Verificação: 9
- Altitude: 25 metros do nível do solo;
- Velocidade: 2m/s;
- Ângulo do gimbal:  $-90^{\circ}$  (direção do nadir).

O voo foi realizado com o DJI Mavic 3 E, que é uma aeronave com grande estabilidade e autonomia, e possui uma câmara com uma distância focal de 162 mm. Foi utilizada uma única bateria para a realização do voo, com duração de 16 minutos e 15 segundos, tempo suficiente para a captura das 234 fotos necessárias para a cobertura total da área de interesse.

A coleta das coordenadas dos pontos de controle e de verificação foi realizada através de um receptor de Dados GNSS, CHC i73, aplicando a técnica N-Trip. No momento do levantamento foram materializados na área os alvos, cujas coordenadas foram coletadas. Após esta etapa, procedeu-se à realização do voo.

Foi utilizada a mesma altura de voo que Craven, 2017 para o segundo experimento, 25 metros, sendo mantidas as sobreposições frontais e laterais do primeiro experimento.

#### b) Processamento das imagens

O processamento dos dados do levantamento do segundo experimento foi realizado em computador da CBTU com a utilização do software Agisoft Metashape. Os resultados obtidos demonstram que para um valor da Resolução Espacial do Sensor (Ground Sample Distance, GSD) de 1,04 cm/pixel.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise do produto gerado pelo levantamento fotogramétrico buscou definir se as ortofotos podem fornecer as informações exigidas pelo Manual de Fiscalização da ANTT para a inspeção dos elementos da superestrutura ferroviária.

Quanto à possibilidade de lastro contaminado, insuficiente ou fuga lateral, a ortofotos se demonstrou suficiente, podendo ser observada a presença de plantas no lastro, o que caracteriza a sua contaminação. O lastro em todo o trecho levantado não apresentou insuficiência ou fuga lateral.

Ao verificar se o trecho apresenta dormentes com defeitos graves ou dormentes inservíveis em sequência, foi possível verificar que os dormentes apresentam um bom estado de conservação. E se as fixações estão presentes e não apresentam deformações que as caracterizem como inservíveis.

Os trilhos demonstram desgastes que indicam a possibilidade de um desgaste, o que recomendaria uma visita in loco de maneira pontual para analisar o quão grave este desgaste está presente e o seu possível impacto na segurança da circulação dos veículos.

Em relação aos defeitos de solda de trilhos, o trecho do primeiro experimento não possui soldas ou taco de trilho. O trecho é composto por barras de trilhos de 12 metros que são ligadas somente por juntas, que são instaladas na alma do trilho. O levantamento fotogramétrico, da forma como foi executado no primeiro experimento não possibilitou a fiscalização deste elemento.

O trecho não apresenta defeitos de nivelamento, alinhamento ou flambagem que sejam capazes de serem identificados por uma inspeção visual, conforme indicado no manual da ANTT.

Os AMVs estão em bom estado de conservação, apesar de apresentar alguns pontos de desgaste, não são o suficiente para que se demande uma vistoria in loco para a obtenção de mais informações ou a realização de algum levantamento específico.

Para o preenchimento de uma ficha como a apresentada no apêndice do Manual de fiscalização da ANTT se faz necessário informar a quilometragem em que o defeito foi identificado. Para essa análise, foi realizada a importação da ortofotos para o arquivo do *as-built*, em formato .DWG, com a utilização do software Autodesk Civil 3D. Os dados foram fornecidos pela CBTU e a extensão da via está representada

por um estaqueamento de estacas de 100 metros.

Com a identificação dos defeitos nos elementos da superestrutura e a sua posição, é possível subsidiar as equipes de manutenção para que sejam feitas as intervenções necessárias para sanar estes defeitos.

Com a ortofoto é possível identificar a face superior do boleto, área crítica por ser o local de contato roda-trilho, porém, a alma do boleto fica encoberta pelo boleto com a metodologia de levantamento fotogramétrico adotada, assim como as talas de junção, que são utilizadas nas juntas. Nestes casos, a análise busca os efeitos secundários de defeitos nesses elementos, como as fissuras nos trilhos.

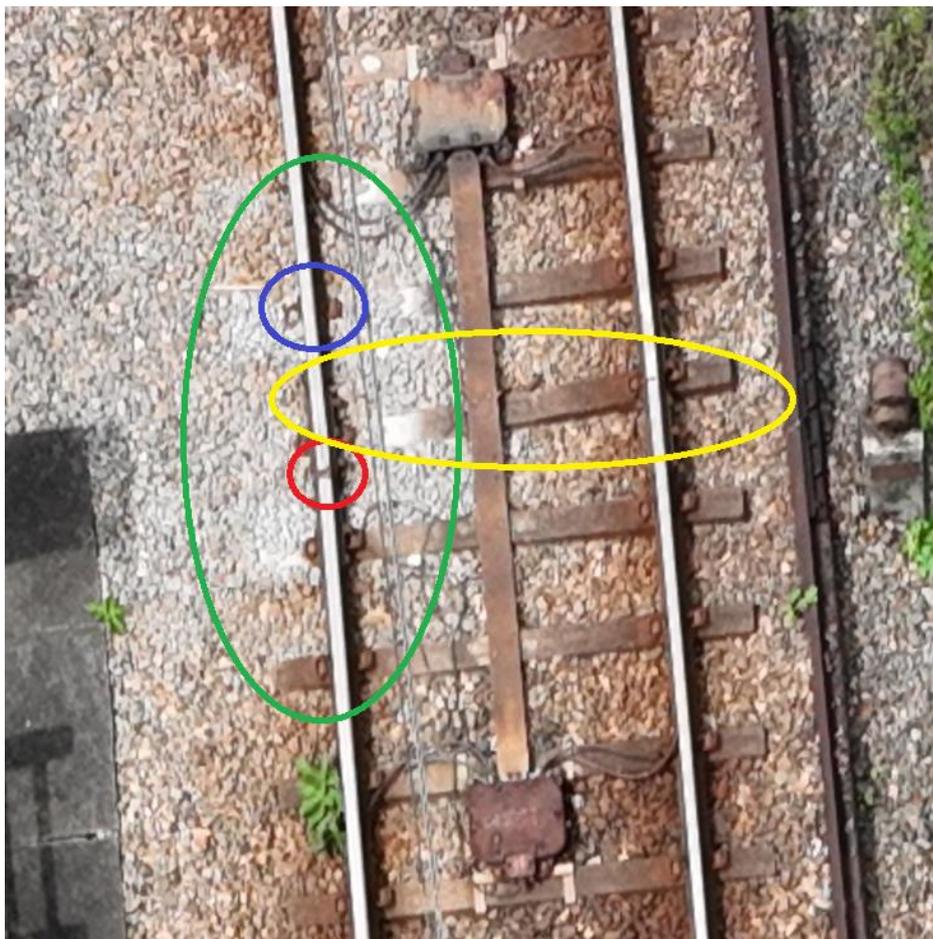
Os acessórios de fixação do trilho no dormente são avaliados quanto à sua existência e buscar indícios que a fixação está inservível, este defeito pode ser apresentado por um desalinhamento dos dormentes.

Os dormentes são classificados como inservíveis em uma inspeção visual quando apresentam fissuras, rachaduras, deslocamentos ou perde a capacidade de ancoragem do sistema de fixação. Estes defeitos são visíveis em uma análise por levantamento fotogramétrico.

A contaminação ou insuficiência do lastro demonstrou uma tarefa possível de ser realizada na fotogrametria por RPA. As contaminações são causadas por plantas, lixos ou excesso de partículas finas. Nos casos em que as partículas finas preenchem os vazios do lastro, a característica drenante do lastro é prejudicada podendo ocasionar uma colmatação do lastro. Este defeito repercute nos demais elementos da superestrutura ferroviária. No levantamento, foi possível identificar pontos com o lastro colmatado.

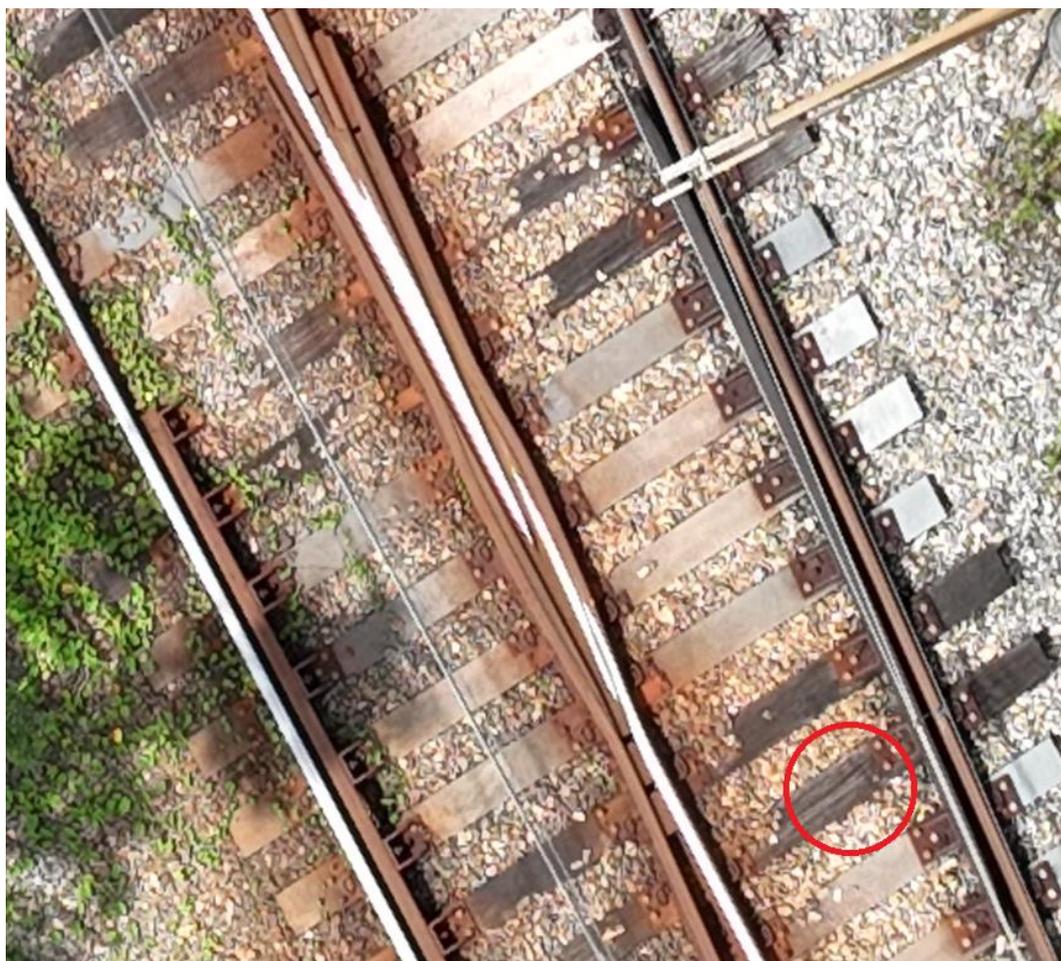
A colmatação é definida por Pires *et al.*, (2017) como a presença de materiais finos na camada de lastro. Os materiais finos podem ter origem pela degradação do material que compõe o lastro, bombeamento de material fino do subleito ou do Sublastro, ter sido transportado de áreas externas, abrasão entre o lastro e o dormente e intemperismo. O preenchimento dos vazios dos lastros prejudica a drenagem e a trabalhabilidade do lastro.

**Figura 25** – Trecho com defeitos na superestrutura



Fonte: Elaboração própria, 2024.

A Figura 25 apresenta os bondes de impedância entre os circuitos de sinalização do sistema ferroviário. Esta região se demonstrou uma área crítica, podendo ser identificado indícios de colmatação do lastro (destaque em verde), o desalinhamento dos dormentes (destaque em amarelo), a falta de elementos de fixação (destaque em azul), a existência de vegetação no lastro e que o trilho apresenta elevado desgaste na região da tala de junção (destaque em vermelho). Os parafusos que prendem a tala de junção na alma do trilho, são identificáveis na imagem.

**Figura 26** – Coração do AMV

Fonte: Elaboração própria, 2024.

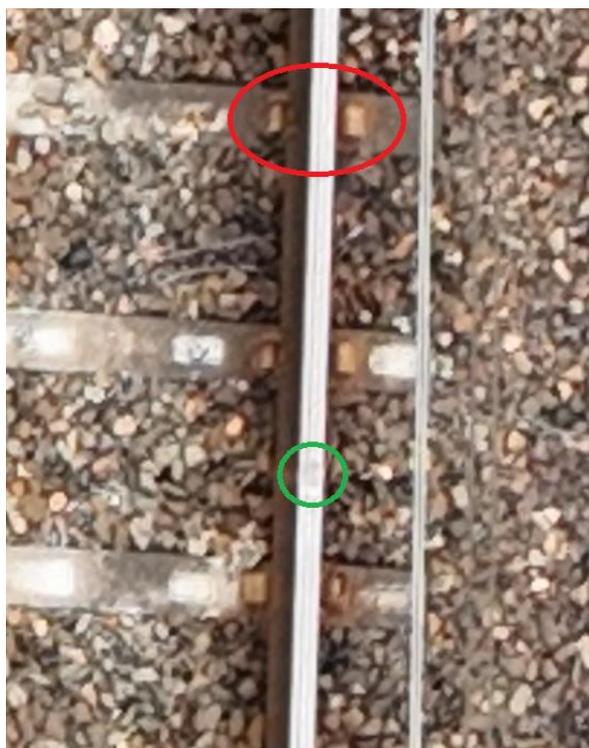
Como demonstrado na Figura 26, é possível verificar as condições do coração do AMV para analisar de forma visual o quanto o grau de desgaste. Além do coração, as fixações são avaliadas quanto a sua existência. Os dormentes especiais de madeira presentes na imagem apresentam indícios de fissuras (destaque vermelho) o que pode indicar que a ancoragem da fixação não está nas condições ideais e necessitam de uma conferência no local.

**Figura 27** – Região da ponta da agulha do AMV



Fonte: Elaboração própria, 2024.

As agulhas e a cota de salvaguarda do AMV apresentados na Figura 27 não apresentam indícios de desgastes. Os dormentes especiais de madeira apresentam fissuras que podem indicar a perda da capacidade de suporte e de ancoragem da fixação (destaque em vermelho), necessitam de uma conferência no local. A presença de vegetação caracteriza uma contaminação do lastro no local, que por se tratar de um ponto crítico do AMV, região da agulha, necessita de uma intervenção.

**Figura 28** – Ausência de elementos do sistema de fixação

Fonte: Elaboração própria, 2024.

A inexistência do e-clip (destaque em vermelho), elemento de fixação do trilho ao dormente, e achatamento na região da solda do trilho (destaque em verde) estão representadas na Figura 28

Após os levantamentos foi elaborado um quadro resumo com uma análise dos trechos demonstrando quais itens podem ser inspecionados e quais não foram inspecionados com esta metodologia. Estes dados estão apresentados no Quadro 1.

**Quadro 1** – Síntese da inspeção da superestrutura ferroviária

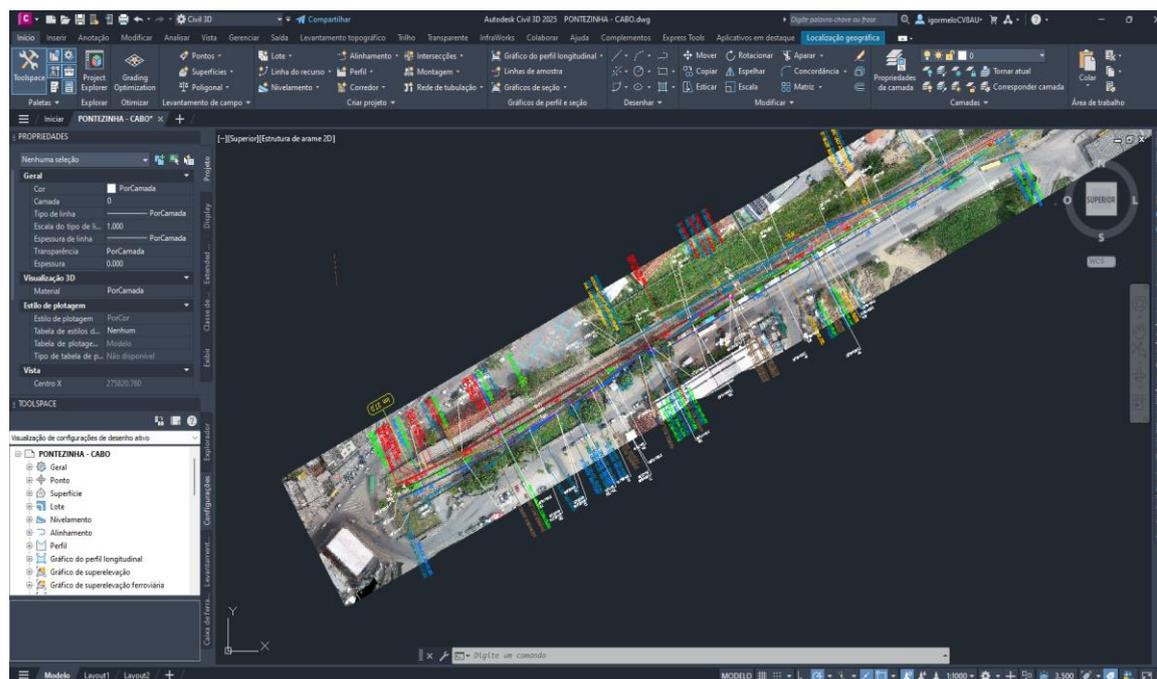
Análise da inspeção da superestrutura ferroviária			
Elemento	Defeito	Análise	Consideração
Lastro	Contaminação do lastro com a presença de plantas, colmatação ou elementos estranhos.	A Figura 25 apresenta indícios de colmatação.  As Figuras 25, 26 e 27 têm presença de vegetação no lastro.	Os levantamentos fotogramétricos com RPA com altitude de 25 e 30 metros com os recursos tecnológicos apresentados

Dormentes	Presença de fissuras e rachaduras ou deslocamentos.	Não foram identificados dormentes com deslocamento e não foi possível identificar a presença de fissuras e rachaduras.	O levantamento demonstrou a integridade dos dormentes, mas não foi possível inspecionar quanto a presença de fissuras e rachaduras.
Fixação	Ausência de fixação ou fixações inservíveis.	É possível verificar a ausência dos elementos de fixação na Figura 28. O desalinhamento dos dormentes apresentado na Figura 25 é um indício que as fixações estão inservíveis.	O levantamento com as atitudes de 25 e 30 metros é eficaz para identificar a presença dos elementos de fixação e analisar o alinhamento dos dormentes.
Trilho	Boleto achatado, fino, desgastado ou com outro defeito.	A Figura 25 elevado desgaste do trilho na região da tala de junção na área do bonde.	A análise da face superior do boleto é inspecionada. Não é possível inspecionar a alma e o patim dos trilhos com esta metodologia.
Solda de trilho	Trincas, achatamento, desgaste ou outro defeito no boleto na região da solda.	A Figura 28 apresenta uma região de solda com achatamento.	Os defeitos da solda na região da alma e do patim não foram detectáveis por esta metodologia.
Nivelamento ou alinhamento	Via desalinhada ou desnivelada.	Os trechos que os levantamentos foram realizados não apresentaram características de desnivelamento ou desalinhamento perceptíveis.	Os indícios de desnivelamento ou desalinhamento que são perceptíveis em uma inspeção visual, principalmente o desgaste na lateral do boleto ou o deslocamento transversal dos

			dormentes.
Flambagem da via	Desvio ou ruptura da estrutura.	Os levantamentos não identificaram pontos de flambagem.	A flambagem da via apresenta um desvio da via que é perceptível em uma inspeção visual.
Junta	Fissuras, ausência de parafusos ou inservíveis.	Não foi possível realizar uma inspeção visual nos elementos da junta, com a Figura 25 apresentando desgaste do trelho e desalinhamento dos dormentes como indícios de defeitos na junta.	Os indícios apresentados necessitam de uma confirmação pontual em campo.
AMV	Quebra ou desgaste elevado na agulha e desgaste elevado na região do coração do AMV.	A Figura 27 apresenta as agulhas de um AMV assentado no trecho sem desgaste ou quebra.  A Figura 26 é da região do coração, a região não apresenta desgaste elevado.	Os levantamentos foram capazes de subsidiar uma inspeção visual de AMV.

Fonte: Elaboração própria, 2024.

Além da identificação dos desgastes dos elementos da superestrutura ferroviária, a ortofoto gerada pelo levantamento fotogramétrico por RPA, pode ser importada para o software Civil 3D da Autodesk, Figura 29. A utilização do software permite que a ortofoto seja sobreposta ao as built da ferrovia, a união permite identificar a estaca ferroviária de cada defeito identificado.

**Figura 29** – Autodesk Civil 3D com as ortofotos georreferenciadas

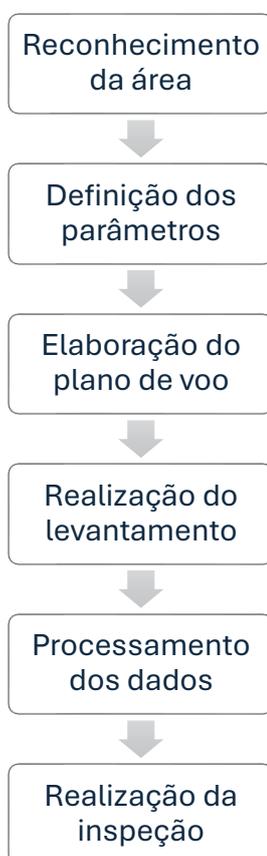
Fonte: Acervo próprio, 2024.

Uma inspeção visual foi realizada nos trechos dos experimentos 1 e 2 foi realizada de forma tradicional, com uma equipe percorrendo a área. Para o trecho do segundo experimento, a equipe de inspeção utilizou o Relatório de Inspeção da Superestrutura Ferroviária preenchidos com os dados obtidos pela inspeção por RPA realizada. Os defeitos identificados nos levantamentos foram confirmados em campo, assim como os indícios de defeitos, que na inspeção em campo, demonstrou que os elementos estavam sob os defeitos sugeridos, dentro das limitações indicadas no Quadro 1.

## 5 PROCEDIMENTO DE FISCALIZAÇÃO DA SUPERESTRUTURA FERROVIA COM UTILIZAÇÃO DE FOTOGRAMETRIA POR RPA

O procedimento implantado para a fiscalização da superestrutura ferroviária foi elaborado e utilizado nos experimentos descritos. A formalização do procedimento, Figura 30, como forma de inspeção ocorre com a elaboração de um procedimento padronizado que norteará os próximos levantamentos da Companhia e poderá ser utilizado como referência por outras operadoras.

**Figura 30** – Procedimento padronizado de inspeção ferroviária por fotogrametria com RPA



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Foram consideradas na elaboração do procedimento o Manual de fotogrametria e os aprendizados decorrentes dos experimentos realizados neste trabalho. A experiência obtida na realização do primeiro experimento sugere como boa prática para a fiscalização da superestrutura ferroviária a utilização de RPA na elaboração de levantamento fotogramétrico em trechos entre nos turnos da manhã e as atividades de escritório no turno da tarde.

O segundo experimento foi realizado em um trecho ferroviário com uma configuração de superestrutura ferroviária diferente do primeiro experimento e demonstrou que a metodologia apresenta bons resultados nas duas configurações estudadas.

O procedimento para fiscalização de superestrutura ferroviária inclui as etapas prévias como o reconhecimento da área, solicitação de voo junto ao DECEA, identificação de pontos no local que podem ser utilizados como pontos de controle, a previsão do tempo, a menor dimensão que precisa ser identificada no produto gerado e a existência de obstáculos na área de interesse, como passarelas, viadutos ou redes de energia.

As etapas prévias subsidiam o planejamento do voo que tem como principal parâmetro a altura do voo, que será feita de acordo com a tabela proposta no procedimento ou calculada para o caso específico. Caso o local levantado apresente restrição para altura de voo, seja pela existência de um obstáculo ou por uma exigência externa, como as Forças Armadas e a Infraero, essa restrição será considerada no levantamento.

Os equipamentos serão inspecionados no dia anterior ao levantamento e as cargas das baterias serão conferidas. A previsão do tempo será novamente consultada durante todo o processo de levantamento. Os equipamentos que serão utilizados deverão ser inspecionados e verificada a carga das baterias.

O procedimento foi elaborado com as etapas: reconhecimento da área, definição dos parâmetros, elaboração do plano de voo, realização do levantamento, processamento dos dados e realização da inspeção.

O reconhecimento da área busca delimitar a região a ser levantada, sendo sugerido a extensão entre as estações do sistema para otimizar o consumo da bateria e diminuir a interferência do tráfego ferroviário com a ocupação da via pelos trens que estão em operação no sistema. Nesta etapa também é realizada a identificação de restrições físicas e legais para a região a ser levantada. Neste momento também é realizada a identificação de possíveis pontos fixos no local e a necessidade de utilização de Pontos de Controle no Solo e Pontos de verificação.

Na definição dos parâmetros é feito o cálculo da altura necessária, das sobreposições, frontal e lateral, e a velocidade do voo. Com a realização dos experimentos, tem-se como padrão, a ser adaptado a cada levantamento, os seguintes parâmetros: altura de voo de 25 metros, sobreposição frontal de 80%,

sobreposição lateral de 80% e velocidade de 2m/s<sup>2</sup>.

Na elaboração do plano de voo são conferidos os equipamentos que serão utilizados e a carga das baterias que serão utilizadas. Para a realização do levantamento se faz necessária a verificação do tempo, a coleta das coordenadas dos Pontos de Controle e de Verificação, quando for o caso, e a realização do voo com operação em linha de visada visual.

Os dados obtidos são processados no escritório para a elaboração do ortomosaico do trecho. A realização da inspeção é feita com a sobreposição do ortomosaico obtido na etapa anterior com o *as built* da ferrovia, assim, é possível realizar a inspeção dos elementos da superestrutura ferroviária e o preenchimento do relatório de inspeção identificando a estaca de cada evento encontrado, conforme demonstrado na Figura 31.

**Figura 31** – Sobreposição do *as built* com o ortomosaico



Fonte: Elaboração própria, 2024.

As informações obtidas são repassadas para um relatório de inspeção da superestrutura ferroviária, Apêndice B, que subsidiará as equipes responsáveis pelo planejamento da manutenção ferroviária para priorizar os trechos que necessitam de intervenções emergenciais, identificar possíveis causas e para realizar o monitoramento dos desgastes dos elementos, permitindo a criação de um banco de dados para estudar a evolução da superestrutura.

O relatório indica os parâmetros do levantamento, as características da

superestrutura ferroviária e a localização dos defeitos que foram encontrados na inspeção.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A utilização de RPA para subsidiar os profissionais responsáveis pela fiscalização da superestrutura ferroviária demonstra condições favoráveis para a implantação de um procedimento. O resultado do primeiro experimento, quando utilizado com o “*as-built*” fornecido pela CBTU, foi capaz de identificar as condições dos elementos.

Com a fotogrametria por RPA é possível identificar os defeitos na região do boleto dos trilhos, a alma e o patim não são disponíveis para inspeção com a utilização desta metodologia. Para possibilitar a inspeção nessas regiões pode-se estudar a utilização de fotogrametria oblíqua.

Os dormentes são verificados quanto ao seu alinhamento e a sua integridade, porém, a existência de fissuras e rachaduras necessita de mais estudos com a utilização de RPAs com câmera que permita a identificação de fissuras com 3 milímetros.

A presença dos elementos de fixação é possível de ser realizada pelo levantamento fotogramétrico por RPA, a análise, quanto a capacidade de desempenhar uma pressão entre o trilho e o dormente, pode ser feita com referência nas repercussões de fixações inservíveis nos demais elementos da superestrutura ferroviária.

As talas de junção não são possíveis de ser inspecionados visualmente, mas a metodologia permite a identificação de indícios de defeitos nos elementos de fixação. Para a inspeção visual, assim como para o patim e alma dos trilhos, a realização de um levantamento por fotogrametria oblíqua pode ser estudada como solução.

O levantamento se demonstrou como uma possibilidade para a inspeção do lastro, sendo utilizado para a identificação de defeitos, contaminações e presença de vegetação. Os elementos do AMV que são inspecionados visualmente, agulha e coração, são identificáveis e possíveis de serem analisados pelo levantamento.

O levantamento realizado na base de dados da SCOPUS demonstra um interesse no desenvolvimento de trabalhos com a utilização de RPAs para a realização de inspeções na ferrovia. Estes trabalhos utilizam o RPA para a inspeção de elementos específicos da superestrutura ferroviária ou inspeções de Obras de Arte Especiais.

Desta forma foi possível elaborar um procedimento de inspeção dos elementos

da superestrutura ferroviária por levantamento fotogramétrico por RPA capaz de identificar defeitos ou indícios de defeitos nestes elementos. A validação do levantamento proposto foi realizada com uma inspeção visual tradicional percorrendo a via que confirmaram os defeitos identificáveis pela metodologia.

Caso o levantamento apresente um erro RMS que impacte na precisão da ortofoto em um deslocamento da ortofoto em relação à sua posição georreferenciada, pode ser corrigida, desde que seja identificáveis feições fixas para realizar o reposicionamento da ortofoto em relação ao *as built* georreferenciado da ferrovia.

Com a confirmação do que foi apresentado, o procedimento recomendado é a inspeção por RPA de um sistema metropolitano de transporte de passageiros sobre trilhos que deverá ser realizado por trechos entre as estações e durante o horário comercial, indicando a realização dos levantamentos em Operação em Linha de Visada Visual (*Visual Line of Sight, VLOS Operation*). Assim, o responsável pelo levantamento poderá pausar o voo quando um trem estiver trafegando pela linha que está sendo fiscalizada.

Este procedimento não substitui a manutenção preventiva. A sua utilização é indicada para a identificação de defeitos que necessitam de uma ação corretiva e de estudo do desempenho da superestrutura ferroviária.

A paralisação da operação comercial durante a madrugada será otimizada, pois subsidiará a equipe em quais pontos deverá atuar. No caso do sistema da Superintendência de Trens Urbanos do Recife da Companhia Brasileira de Trens Urbanos, a paralisação ocorre entre as 00h e 3h30min.

Como recomendações para trabalhos futuros, pode-se testar a inclusão dos demais elementos da ferrovia que necessitam de inspeção, como muros de vedação, postes, dispositivos de drenagem, obras de arte e obras de arte corrente e a realização de um levantamento fotogramétrico oblíquo que permita a análise destes elementos. É possível ainda utilizar métodos de inteligência artificial para análise das imagens e assim gerar um relatório indicando os defeitos e a sua localização.

## REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16741, Via férrea – Tala de junção**. Rio de Janeiro. 2019.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7590, Trilho Vignole – Requisitos**. Rio de Janeiro. 2012.

AGISOFT. **Agisoft Metashape user Manual – Professional edition**. Version 2.1. Agisoft LLC. Disponível em: <https://www.agisoft.com/downloads/user-manuals/>  
Acesso em: 24 de agosto de 2024.

ANAC. **Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial – RBAC –E nº 94**. Disponível em: [http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94-emd-00/@@display-file/arquivo\\_norma/RBACE94EMD00.pdf](http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94-emd-00/@@display-file/arquivo_norma/RBACE94EMD00.pdf)  
Acesso em: 20 maio 2024.

ASKARZADEH, T.; BRIDGELALL, R.; TOLLIVER, D. D. Systematic Literature Review of Drone Utility in Railway Condition Monitoring. **Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems**, v. 149, n. 6, p. 04023041, jun. 2023.

BANIC, Milan; MILTENOVIC, Aleksandar; PAVLOVIĆ, Milan; ĆIRIĆ, Ivan. **Intelligent machine vision based railway infrastructure inspection and monitoring using uav**. Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering. 17. 357, 2019. 10.22190/FUME190507041B.

BRASIL. Decreto-lei nº 89.396, de 22 de fevereiro de 1984. Autoriza a Rede Ferroviária Federal S.A. - RFFSA a, mantida a condição de subsidiária, mudar a denominação e objeto social da Empresa de Engenharia Ferroviária S.A. - ENGEFER e dá outras providências. Disponível em: <  
[BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT. \*\*Glossário de Termos Ferroviários\*\*. Disponível em: < <https://www.gov.br/dnit/pt-br/ferrovias/glossario-de-termos-ferroviarios/glossario.pdf>> Acesso em: 19 de jul. 2024.](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/1980-1984/d89396.htm#:~:text=DECRETO%20N%C2%BA%2089.396%2C%20DE%2022%20DE%20FEVEREIRO%20DE%201984&text=Autoriza%20a%20Rede%20Ferrovi%C3%A1ria%20Federal,ENGEFER%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%A2ncias.> Acesso em: 19 de jul. 2024.</p>
</div>
<div data-bbox=)

BRASIL. **Lei nº 10.233, de 05 de junho de 2001**. Dispõe sobre a reestruturação dos transportes aquaviário e terrestre, cria o Conselho Nacional de Integração de Políticas de Transporte, a Agência Nacional de Transportes Terrestres, a Agência Nacional de Transportes Aquaviários e o Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, e dá outras providências. Disponível em: <  
[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/leis\\_2001/l10233.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10233.htm)> Acesso em: 19 de jul. 2024.

BRINA, H. L. **Estradas de ferro**. LTC – Livros Técnicos e Científicos. Editora S.A..

1ed Rio de Janeiro, 1979.

CABRAL, Rafael; OLIVEIRA, Rogério; RIBEIRO, Diogo; SANTOS, Ricardo; AZENHA, Miguel; RAKOCZY, Anna; CORREIA, José; TAVARES, Joao. **Railway bridge condition assessment based on state-of-the-art reality capture technologies: application to a case study**. 2019. DOI: 10.35490/EC3.2023.329

CBTU. 2005a. Especificação de Material Via Permanente. **Dormente de Madeira**. EMVP 15 / CBTU. Disponível em: < <https://www.cbtu.gov.br/images/manutencao/emvp/emvp15.pdf> > Acesso em: 19 de jul. 2024.

CBTU. 2005b. Especificação de Material Via Permanente. **Dormente Bi-bloco de Concreto Armado**. EMVP 17 / CBTU. Disponível em: < <https://www.cbtu.gov.br/images/manutencao/emvp/emvp17.pdf> > Acesso em: 19 de jul. 2024.

CBTU. 2019. Especificação de Material Via Permanente. **Dormente Monobloco de Concreto**. EMVP 10 / CBTU. Disponível em: < <https://www.cbtu.gov.br/images/manutencao/emvp/emvp10.pdf> > Acesso em: 19 de jul. 2024.

CBTU. 2024. Disponível em: < <https://www.cbtu.gov.br/index.php/pt/> > Acesso em: 19 de jul. 2024.

CBTU. Especificação de Material Via Permanente. **Lastro**. EMVP 12 / CBTU. Disponível em: < [ESPECIFICAES DE MATERIAL VIA PERMANENTE \(cbtu.gov.br\)](https://www.cbtu.gov.br/images/manutencao/emvp/emvp12.pdf) >. Acesso em: 19 de jul. 2024.

CCR. Disponível em: < <https://www.grupoccr.com.br/> > Acesso em: 19 de jul. 2024.

ĆMIELEWSKI, Kazimierz; GOŁUCH, Piotr; KUCHMISTER, Janusz; WILCZYŃSKA, Izabela; ĆMIELEWSKI, Bartłomiej; GRZEJA, Olga. **Detection of crane track geometric parameters using UAS**. Automation in Construction. 128. 103751. 10.1016/j.autcon.2021.103751. 2021.

DNIT. **ISF-215**. Projeto de Superestrutura da Via Permanente – AMV. Brasília: DNIT, 2016.

EMPRETEC. **Auto de Linha**. Disponível em: < <https://empretec.com.br/produtos/auto-de-linha/> >. Acesso em: 19 de jul. 2024.

EMTU. Disponível em: < <https://www.emtu.sp.gov.br/emtu/home/home.htm> > Acesso em: 19 de jul. 2024.

ESCAP (Economic and Social Commission for Asia and the Pacific). 2019. **Inspection and monitoring of railway infrastructure using aerial drones**. Bangkok, Thailand: Economic and Social Commission for Asia and the Pacific.

FONTES, L. C. A. A. Levantamentos Aerofotogramétricos Aplicados À Topografia:

Teoria E Exercícios Propostos . *In*: \_\_\_\_\_. (org.). **LEVANTAMENTOS AEROFOTOGRAMÉTRICOS APLICADOS À TOPOGRAFIA**. Salvador: UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, 2005. p. 1- 18.

FREDERIKSEN, M. H.; MOURIDSEN, O.-A. V.; PR, M. **Drones for inspection of infrastructure: Barriers, opportunities and successful uses**. Center for Integrative Innovation Management, SDU, p. 22, 2019.

GEOINFORMATICS. **Plowman Craven Launches Vogel R3D Rail Survey System**. Geolnformatics, 18 ago. 2017. Disponível em: <<https://www.geoinformatics.com/plowman-craven-launches-vogel-r3d-rail-survey-system/>>. Acesso em: 19 jul. 2024

GREENWOOD, W. W.; LYNCH, J. P.; ZEKOS, D. Applications of UAVs in Civil Infrastructure. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 25, n. 2, p. 04019002, jun. 2019.

HAN, Yang; XIAOFENG, Li; YUXIN, Guo; LIMIN, Jia. **Discretization–Filtering–Reconstruction: Railway Detection in Images for Navigation of Inspection UAV,** in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. v. 71. 2022. Doi: 10.1109/TIM.2022.3220295.

ICAO, **Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS)**, Doc 10019 AN/507, 1st edition, 2015.

JAHANSHAH, M. R. et al. Accurate and Robust Scene Reconstruction in the Presence of Misassociated Features for Aerial Sensing. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 31, n. 6, p. 04017056, 1 nov. 2017.

KRAUS, K. **Photogrammetry: Fundamental and Standard Processes**, V.1. Dümmler/Bonn, 1993

LEBEDEV, ARTEM. O.; VASILEV, V. V.; PAULISH, A. G. **UAV Flight Control Along the Railway Using Technical Vision**. 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). **Anais...** Em: 2023 IEEE 24TH INTERNATIONAL CONFERENCE OF YOUNG PROFESSIONALS IN ELECTRON DEVICES AND MATERIALS (EDM). Novosibirsk, Russian Federation: IEEE, 29 jun. 2023. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10225104/>>. Acesso em: 19 jul. 2024

LI, Jian; PENG, Yipu; TANG, Zhiyuan; LI, Zichao. Three-Dimensional Reconstruction of Railway Bridges Based on Unmanned Aerial Vehicle–Terrestrial Laser Scanner Point Cloud Fusion. **Buildings**. 13. 2841. 10.3390/buildings13112841. 2023.

LI, Xiaofeng; GUO, Yuxin; YANG, Han; YE, Qixiang; JIA, Limin. DWPIs: Dynamic-Weight Parallel Instance and Skeleton Network for Railway Centerline Detection. **Applied Sciences**. 13. 6133. 10.3390/app13106133. 2023.

LIMA, E. M.; THOMAZ, T. A. M.; SEVERO, T. C. **Mapeamento aerofotogramétrico digital utilizando fotografias de médio formato**. 2010. Trabalho de Conclusão de

Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2010

LONGHITANO, George Alfredo. **Vants para Sensoriamento Remoto: Aplicabilidade na Avaliação e Monitoramento de Impactos Ambientais Causados por Acidentes com Cargas Perigosas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 148 p. 2010.

LOWE, D. G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. **International Journal of Computer Vision**, v. 60, n. 2, p. 91–110, nov. 2004.

LOWE, D. G. **Object recognition from local scale-invariant features**. Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. **Anais...** Em: PROCEEDINGS OF THE SEVENTH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION. Kerkyra, Greece: IEEE, 1999. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/790410/>>. Acesso em: 19 jul. 2024

MCGLONE, J. C. **Manual of Photogrammetry**. 5 ed. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 2004.

MELLO, Caio César de Sousa. **Aerofotogrametria com VANT: aplicações no monitoramento operacional de aterros sanitários**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Minas Gerais. 116 p. 2020.

METRÔ BH. Disponível em: < <https://www.metrobh.com.br/>> Acesso em: 19 de jul. 2024

METRO DF. Disponível em: < <https://metro.df.gov.br/>> Acesso em: 19 de jul. 2024.

METRÔ RIO. Disponível em:< <https://www.metrorio.com.br/>> Acesso em: 19 de jul. 2024.

METRÔ SP. Disponível em:< <https://www.metro.sp.gov.br/>> Acesso em: 19 de jul. 2024.

METROFOR. Disponível em:< <https://www.metrofor.ce.gov.br/>> Acesso em: 19 de jul. 2024.

MIGUEL, Daniel; VINHAL, Silvio et al. **MANUAL DE FISCALIZAÇÃO DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO**, Superintendência Transporte Ferroviário, 3ª Ed. Brasília - DF, 2021. 104pg.

NAMAIS, R. J. S. **Manual básico de Engenharia Ferroviária**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

NETO, M. S.; ARIAS, A.; CAMPITELLI, M. **Drones e Produtividade: Asa fixa X Multirotor**. São Carlos: Blog Droneng, 2016. Disponível em: < <http://conteudo.droneng.com.br/e-book-asa-fixa-x-multirotor>>. Acessado em 20 de maio de 2024.

PANDROL. **Sistemas de fixação**. Disponível em:< <https://www.pandrol.com/pt-br/product-lines/sistemas-de-fixacao/>> Acesso em: 19 de jul. 2024.

PIRES, J.; COSTA, R.; BERNUCCI, L.; MOTTA, R. MOURA, E. Degradação do lastro ferroviário – principais aspectos e estudo de caso. **Revista Transportes**. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2017.

POTENZA, Francesco; RINALDI, Cecilia; OTTAVIANO, Erika; GATTULLI, Vincenzo. A robotics and computer-aided procedure for defect evaluation in bridge inspection. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**. 10. 10.1007/s13349-020-00395-3., 2020.

RAMPRIYA, R. S. et al. A Comparative Assessment of Deep Neural Network Models for Detecting Obstacles in the Real Time Aerial Railway Track Images. **Applied Artificial Intelligence**, v. 36, n. 1, p. 2018184, 31 dez. 2022.

SANTOS, D. R. **Ajustamento de observações aplicado na Fotogrametria**. 2. ed. Curitiba: Departamento de Geomática UFPR, 2013. 48p .

SILVA, D. C. Evolução da Fotogrametria no Brasil. **Revista Brasileira de Geomática**. 2015.

STEMMLER, Simon; KAUFMANN, Timo; BANGE, Maria Justine; MERKLE, Dominik; REITERER, Alexander; KLEMT-ALBERT, Katharina; MARX, Steffen. **Multisource-data-fusion for the digitization of critical infrastructural elements**. 4. 10.1117/12.2634711. 2022.

STOTT, E.; WILLIAMS, R. D.; HOEY, T. B. Ground Control Point Distribution for Accurate Kilometre-Scale Topographic Mapping Using an RTK-GNSS Unmanned Aerial Vehicle and SfM Photogrammetry. **Drones**, v. 4, n. 3, p. 55, 8 set. 2020.

SUPERVIA. Disponível em:< <https://www.supervia.com.br/>> Acesso em: 19 de jul. 2024.

TANG, Gang; WANG, Chenyuan; ZHANG, Zhao; MEN, Shaoyang. UAV Path Planning for Container Terminal Yard Inspection in a Port Environment. **Journal of Marine Science and Engineering**. 12. 128. 10.3390/jmse12010128. 2024.

TOMMASELLI, A. M. G. **Fotogrametria Básica**. 2004.

TRENSURB. Disponível em: < <https://www.trensurb.gov.br/home/>> Acesso em: 19 de jul. 2024.

WOLF, Paul R. **Elementos de fotogrametria**: com interpretação de fotos aéreas e sensoriamento remoto. v. 2. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1983.

WU, Yunpeng; MENG, Fanteng; QIN, Yong; QIAN, Yu; XU, Fei; JIA, Limin. UAV imagery based potential safety hazard evaluation for high-speed railroad using Real-time instance segmentation. **Advanced Engineering Informatics**, vol. 55, no. October 2022, 2023. DOI 10.1016/j.aei.2022.101819.

VIA MOBILIDADE. Disponível em:< <https://www.viamobilidade.com.br/>> Acesso em:19 de jul. 2024.

VIA QUATRO. Disponível em:< <https://www.viaquatro.com.br/>> Acesso em: 19 de jul. 2024.

VLT CARIOCA. Disponível em: < <https://www.vltrio.com.br/#/>> Acesso em: 19 de jul. 2024.

ZACHAR, P. et al. The Influence of Point Cloud Accuracy from Image Matching on Automatic Preparation of Training Datasets for Object Detection in UAV Images. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 11, n. 11, p. 565, 10 nov. 2022.

## APÊNDICE A

### GLOSSÁRIO DE TERMOS FERROVIÁRIOS

Os termos ferroviários são apresentados e utilizados de acordo com o apresentado no Glossário de Termos Ferroviários do DNIT que foi adaptado para auxiliar a compreensão dos procedimentos, especificações e Instruções de Serviços Ferroviários. Foram destacados os seguintes termos:

- Acessório de via: Denominação dada ao aparelho de mudança de via e outros pertencentes metálicos da via, tais como placas de apoio, talas de junção, grampos, etc.
- Agulha: Conjunto de peças móveis e paralelas entre si, partes integrantes do aparelho de mudança de via ou chave, e cujo deslocamento leva o trem ou veículo a passar de uma via para outra.
- Agulha direita: É a agulha que se situa a direita do observador colocado entre as duas agulhas da chave, olhando para o coração.
- Agulha esquerda: É a agulha que se situa a esquerda do observador colocado entre as duas agulhas de chave, olhando para o coração.
- Alma: Parte do trilho, compreendida entre o boleto e o patim.
- Aparelho de manobra: É toda a aparelhagem que permite movimentar as agulhas, dando passagem para uma outra via.
- Aparelho de Mudança de Via (AMV): É um conjunto de peças colocadas nas concordâncias de duas linhas para permitir a passagem dos veículos ferroviários de uma para outra. Também denominado de “CHAVE”, compõe-se das seguintes partes principais: agulhas, contra-agulha ou “encosto da agulha”, aparelho de manobra, trilhos de enlace ou de ligação, “coração” ou “jacaré”, calços, coxins e contratrilhos.
- Barra de trilho: É o tamanho em que os trilhos são fornecidos. Normalmente em comprimento de 12; 18; e 24 metros.
- Bitola: É a distância interna dos boletos dos trilhos, tomada na linha normal a essas faces, 16mm abaixo do plano constituído pela superfície superior do boleto.
- Bitola larga: Aquela superior a 1,435m. No Brasil, é a bitola de 1,600m.
- Bitola métrica: Aquela igual a 1,000m.
- Boleto: Parte superior do trilho, sobre a qual deslizam as rodas dos veículos.

- Bonde (“Bond”, conexão): Condutor elétrico de pequeno comprimento, geralmente de cobre, que é ajustado ou soldado na extremidade dos trilhos de uma junta livre, a fim de manter a continuidade de circuito de via e ainda, o retorno da corrente nas vias eletrificadas.
- Brita: É a denominação dada as pedras quebradas nas dimensões determinadas pelas normas técnicas.
- Calços: São peças de AMV, de ferro fundido, aparafusadas entre os trilhos e contratrilhos, ou entre a agulha e contra-agulha e têm por finalidade de manter invariável a distância entre eles.
- Capina: Ato de destruir a vegetação na plataforma da via férrea.
- Centro de Controle Operacional (CCO): Órgão que centraliza e controla as atividades técnicas da Operação.
- Chapas de junção: Acessório de fixação dos trilhos. Chapa de aço ou ferro colocada nas juntas dos trilhos, em ambos os lados, fixada por meio de parafusos.
- Chave: É outra denominação dada aos aparelhos de mudança de via.
- Concessão: Ato do Poder Político delegando a terceiros a construção, uso e gozo de uma via férrea.
- Contra-agulha: Trilho de encosto da agulha. Geralmente são peças usinadas a partir dos trilhos, adaptadas para servir de encosto da agulha.
- Contratrilho: Peça de trilho curvo nas extremidades, colocado paralelamente ao trilho da linha, para impedir a roda de descarrilhar ou, ainda, evitar que o friso da roda se choque com a ponta do jacaré ou da agulha (nos AMVs). Trilhos de comprimento adequado, colocados junto aos trilhos externos e de um lado e outro do coração do AMV, tendo por finalidade “puxar” o rodeiro para fora, evitando que os frisos das rodas se choquem contra a ponta do coração.
- Coração: Bloco maciço central, fixo, pertencente ao jacaré (peça do aparelho de mudança de via).
- Coxins: São chapas colocadas sob as agulhas do AMV, e mantidas sempre lubrificadas, pois sobre elas deslizam as agulhas, quando movimentadas.
- Dormente: Peça de madeira, concreto, concreto protendido ou ferro, onde os trilhos são apoiados e fixados e que transmitem ao lastro parte dos esforços e vibrações produzidos pelos trens.

- **Dormente de concreto:** Feitos em concreto armado. Podem ser de concreto protendido, bi-bloco (concreto e aço) e polibloco.
- **Dormente de madeira:** Feitos de madeira, atendem a especificações em que são fixadas a qualidade da madeira, dimensões tolerâncias etc.
- **Dormente especial:** Dormente serrado em dimensões especiais, utilizado normalmente em pontes e aparelhos de mudança de vias
- **Eixo da via-férrea:** Lugar geométrico dos centros da via.
- **Faixa de domínio (faixa da estrada):** Faixa de terreno de pequena largura em relação ao comprimento, em que se localizam as vias-férreas e demais instalações da ferrovia, inclusive os acréscimos necessários à sua expansão.
- **Ferrovia (estrada de ferro):** Sistema de transporte sobre trilhos, constituído de via-férrea e outras instalações fixas, material rodante, equipamento de tráfego e tudo mais necessário à condução segura e eficiente de passageiros e carga.
- **Fixação:** Dispositivo para fixar os trilhos, mantendo a bitola da via e impedindo e/ou reduzindo o caminhamento deles.
- **Grampo:** Acessório de fixação dos trilhos.
- **Greide:** É a posição, em perfil, do eixo da estrada. Também denomina-se gradiente ou grade.
- **Headway:** Intervalo entre trens.
- **Infraestrutura:** Parte inferior da estrutura. Na via permanente, a infraestrutura é tudo que fica da plataforma para baixo, formando o trilho, dormente e lastro a superestrutura.
- **Jacaré (coração):** Peça do AMV que permite às rodas dos veículos, movendo-se em uma via, passar para os trilhos de outra. É a parte principal do AMV e que praticamente o caracteriza. Pode ser constituído de uma só peça de aço fundido ou de trilhos comuns cortados, usinados e aparafusados e cravados a uma chapa de aço que se assenta no lastro.
- **Junta:** Conexão de dois trilhos ou duas barras de trilhos consecutivas, obtida pelo ajustamento e fixação das talas de junção.
- **Junta soldada:** Conexão de trilhos obtida por soldagem, após a remoção das talas.
- **Lastro:** Parte da superestrutura ferroviária, que distribui uniformemente na plataforma os esforços da via-férrea transmitidos através dos dormentes, impedindo o deslocamento deles, oferecendo suficiente elasticidade à via,

reduzindo impactos e garantindo-lhe eficiente drenagem e aeração.

- Linha (linha férrea): Conjunto de trilhos assentados sobre dormentes, em duas filas, separadas por determinada distância, mais acessórios de fixação, aparelhos de mudança de via (chave etc.) e desvios, onde circulas os veículos e locomotivas, podendo ainda, num sentido mais amplo, incluir os edifícios, pontes, viadutos etc. Via-férrea ou conjunto de vias-férreas adjacentes, em que se opera o tráfego ferroviário.
- Máquina de via permanente: Máquina usada nos trabalhos mecanizados de via permanente.
- Material rodante: Compõem-se de material de tração, carros de passageiros, vagões para mercadorias, animais, bagagens etc.
- Obras de Arte: Constam de bueiros, pontilhões, pontes, viadutos, passagens superiores e inferiores, túneis, galerias, muros de arrimo, revestimento, etc.
- Obras de Arte Especiais: Obras de Arte que deva ser objeto de projeto específico, especialmente:
  - túneis;
  - pontes;
  - viadutos;
  - passagens superiores e inferiores especiais;
  - Muros de arrimo
- Obras de Arte Correntes: Obra de Arte, que por sua frequência e dimensões restritas, obedece a um projeto-padrão, em geral:
  - drenos superficiais ou profundos;
  - bueiros;
  - pontilhões;
  - pontes com vão até 25 metros, inclusive;
  - passagens superiores e inferiores com vão até 25 metros, inclusive;
  - muros de arrimo, com altura até 3,5 metros, inclusive;
  - corta-rios.
- Patim (sapata ou Patim do trilho): Base do trilho constituída pela mesa mais larga do duplo T através da qual é apoiado e fixado. Parte do trilho que assenta sobre o dormente.
- Pátio: Áreas externas em torno das estações, oficinas, depósitos, etc., onde se colocam desvios para um conjunto de vias para a formação de trens,

manobras e estacionamento de veículos ferroviários e outros fins.

- Placa amortecedora (coxim): Placa interposta entre o patim do trilho e a placa de apoio ou entre o patim do trilho e o dormente, para absorção das vibrações decorrentes dos esforços dinâmicos.
- Placa de apoio: Placa metálica padronizada interposta e fixada entre o patim do trilho e o dormente de madeira, para melhor distribuição dos esforços e melhor fixação do trilho ao dormente.
- Plataforma da linha (leito, subgreide): Superfície superior da infraestrutura.
- Roçada (roço): Derrubada da vegetação na faixa da estrada.
- Rodeiro: Conjunto constituído do eixo e das rodas de um veículo de estrada de ferro.
- Soldagem de trilho: Operação feita na via ou em estaleiro, que consiste em unir um trilho a outro, topo a topo, com emprego de processo adequado de solda.
- Sublastro: Parte inferior do lastro, em contato direto com plataforma da linha e constituída de material mais econômico que o da parte superior, porém capaz de oferecer suficientes condições de drenagem e ter capacidade de suporte para as pressões que lhe forem transmitidas.
- Superestrutura: Parte superior da estrutura da via que suporta diretamente os esforços dos veículos e os transmite à infraestrutura.
- Tala de junção (TJ): Peça de aço ajustada e fixada, aos pares, por meio de parafusos, porcas e arruelas, na junta de trilhos para assegurar continuidade da superfície teórica de rolamento da via.
- Terceiro trilho: Condutor que fornece energia ao trem.
- Tirefão: Parafuso especial, empregado para fixar no dormente de madeira o trilho, a placa de apoio ou ambos, simultaneamente.
- Tráfego: Conjunto de operações do qual resulta o transporte de passageiros, coisas e animais.
- Travessão: Uma linha diagonal provida de chaves nas duas extremidades, ligadas a linhas paralelas, a fim de permitir a passagem de trens de uma das linhas paralelas para outra.
- Trilho (TR): Barras de aço, de formato especial, assentada em fila dupla sobre dormente, nas quais circulam as rodas dos carros e locomotivas. Perfilado metálico de seção transversal semelhante ao duplo T, com características de

viga, que suporta e guia as rodas do veículo ferroviário e constitui a superfície de rolamento da via.

- Trilho de ligação: São os trilhos que fazem a ligação do talão das agulhas, ao “coração” do AMV.
- Via-férrea: Duas ou mais fiadas de trilhos assentados e fixadas paralelamente sobre dormentes, de acordo com as bitolas, constituindo a superfície de rolamento.
- Via permanente: Abrange toda a linha férrea, os edifícios, as linhas telegráficas etc.



