

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LUÍZA DOTTA SCARRONE

**USO DE VANT E RMSE PARA LEVANTAMENTO DA IRREGULARIDADE DE
ESTRADAS VICINAIS**

Alegrete

2025

LUÍZA DOTTA SCARRONE

**USO DE VANT E RMSE PARA LEVANTAMENTO DA IRREGULARIDADE DE
ESTRADAS VICINAIS**

Defesa de dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. D.Sc. Jaelson Budny

Coorientador: Prof. D.Sc. Diego Arthur Hartmann

Alegrete

2025

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

S286u Scarrone, Luíza Dotta

Uso de VANT e RMSE para levantamento da irregularidade de
estradas vicinais / Luíza Dotta Scarrone.

72 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA, 2025.

"Orientação: Jaelson Budny".

1. Estradas vicinais. 2. VANT. 3. RMSE. 4. Manutenção de
estradas. I. Título.

LUIZA DOTTA SCARRONE

**USO DE VANT E RMSE PARA LEVANTAMENTO DA IRREGULARIDADE DE ESTRADAS
VICINAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Dissertação defendida e aprovada em: 26/02/2025

Banca examinadora:

Prof. Dr. Jaelson Budny
Orientador
(Unipampa)

Prof. Dr. Diego Arthur Hartmann
Coorientador
(Unipampa)

Prof^a. Dra^a Laura Maria Goretti da Motta
(COPPE/UFRJ)

Prof. Dr. Renan Gustavo Scherer
(FURG)



Assinado eletronicamente por **JAELSON BUDNY, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/02/2025, às 14:49, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **DIEGO ARTHUR HARTMANN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/02/2025, às 15:07, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Renan Gustavo Scherer, Usuário Externo**, em 28/02/2025, às 17:11, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Laura Maria Goretti da Motta, Usuário Externo**, em 28/02/2025, às 19:55, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1670446** e o código CRC **DCC960E5**.

À estrela mais brilhante do meu céu,
Otelina, dedico este trabalho.

RESUMO

A determinação do grau de deterioração de vias é um desafio devido à falta de métodos automatizados e à subjetividade das inspeções manuais. Em se tratando de vias não pavimentadas, o cenário é ainda mais complexo, dada a quantidade de vias, variedade de formações geológicas e trajetos sinuosos de baixa velocidade, ainda há a carência de um sistema minimamente automatizado para a realização do levantamento das condições dessas vias, com trabalhos, em sua maioria, voltados para vias pavimentadas. Este estudo propõe um método simplificado para identificar irregularidades longitudinais nessas vias, utilizando drones e processamento de imagens por *Structure from Motion* (SfM). A análise, baseada no Erro Quadrático Médio (RMSE), foi aplicada em seções virtuais, de controle e em trechos reais, e provou-se capaz de detectar descontinuidades de até 3 mm, indicando resolução suficiente do modelo para detecção de defeitos na estrutura. O método reduz a necessidade de inspeções em campo e contribui para a gestão eficiente e segura da manutenção viária.

Palavras-chave: estradas vicinais, VANT, drone, RMSE, manutenção de estradas.

ABSTRACT

Determining the degree of road deterioration is challenging due to the lack of automated methods and the subjectivity of manual inspections. For unpaved roads, the scenario is even more complex, given the large number of roads, diverse geological formations, and low-speed, sinuous routes. Additionally, there is a lack of minimally automated systems to evaluate the conditions of these roads, with most studies focusing on paved roads. This study proposes a simplified method for identifying longitudinal irregularities in unpaved roads using drones and image processing through Structure from Motion (SfM). The analysis, based on the Root Mean Square Error (RMSE), was applied to virtual, control, and real sections, demonstrating the ability to detect discontinuities as small as 3 mm. This indicates that the model has sufficient resolution for defect detection in the road structure. The method reduces the need for field inspections and contributes to the efficient and safe management of road maintenance.

Keywords: unpaved roads, VANT, drone, RMSE, road maintenance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de veículo de diagnóstico utilizado em rodovias no Brasil.	18
Figura 2 - VANT utilizado por Zhang <i>et al.</i> (2008).	19
Figura 3 - VANT utilizado por Dobson <i>et al.</i> (2013).	20
Figura 4 - Esquema de balão hélio.	20
Figura 5 - Detecção automática de defeitos.	21
Figura 6 - Defeitos encontrados em estradas vicinais.	22
Figura 7 - Representação esquemática do funcionamento do <i>SfM</i> .	23
Figura 8 - Sobreposição mínima recomendada.	24
Figura 9 – Exemplo de foto aérea e modelo tridimensional.	25
Figura 10 - Fluxograma de etapas desenvolvidas.	26
Figura 11 - DJI Mavic 2 Enterprise Advanced.	27
Figura 12 - Processos de fotogrametria.	27
Figura 13 – Fluxo de processamento do código.	29
Figura 14 - Seções virtuais.	30
Figura 15 - Terreno de referência (a); terreno com objetos (b).	31
Figura 16 - Esquema dos objetos utilizados.	32
Figura 17 - Disposição dos objetos.	32
Figura 18 – Nuvem de pontos esparsa (a) e densa (b).	33
Figura 19 – Objetos na representação tridimensional.	33
Figura 20 - Objetos em planta.	34
Figura 21 - Localização dos trechos experimentais.	34
Figura 22 - Trecho 1	35
Figura 23 - Trecho 2	35
Figura 24 - Trecho 3	36
Figura 25 - Planejamento do voo para o Trecho 1	36
Figura 26 - Perfil longitudinal e RMSE da seção plana.	38
Figura 27 - Perfil longitudinal e RMSE da seção inclinada.	40
Figura 28 - Perfil longitudinal e RMSE da seção curva.	42
Figura 29 - Perfil longitudinal e RMSE da seção de referência.	44
Figura 30 - Perfil longitudinal e RMSE da seção com objetos.	46
Figura 31 - Comparação na amplitude 0,50 m.	47
Figura 32 - Perfil longitudinal e RMSE do Trecho 1.	49
Figura 33 – Representação tridimensional do Trecho 1.	50

Figura 34 - Perfil longitudinal e RMSE do Trecho 2.	52
Figura 35 – Perfil longitudinal e RMSE do Trecho 3.....	54
Figura 36 - Detalhe do defeito no Trecho 3.....	55

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1.	Objetivos	14
2.	REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1.	Gerenciamento de estradas vicinais	15
2.2.	Levantamento dos defeitos em rodovias no Brasil.....	15
2.3.	Levantamento dos defeitos em estradas com o uso de imagens	17
2.4.	Levantamento dos defeitos em estradas com o uso de imagens aéreas 18	
2.5.	Análise tridimensional	21
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1.	Equipamentos utilizados	27
3.2.	Geração dos modelos tridimensionais	27
3.3.	Tratamento dos dados	28
3.4.	Obtenção dos perfis de análise.....	30
4.	RESULTADOS	37
4.1.	Seções virtuais para verificação	37
4.2.	Seções de controle	43
4.3.	Seções reais	48
4.4.	Síntese dos resultados.....	56
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
5.1.	Sugestões para trabalhos futuros	59
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
	APÊNDICE A.....	68

1. INTRODUÇÃO

De acordo com relatório mais recente disponibilizado pela Confederação Nacional do Transporte, as rodovias não pavimentadas, também denominadas estradas vicinais, constituem grande maioria da malha viária brasileira, com 1,4 milhão de quilômetros sem nenhum tipo de revestimento, correspondendo a cerca de 78% das estradas existentes no país (BRASIL, 1997; CNT, 2023). Em levantamento realizado pelo Sistema Nacional de Viação, quando analisada por esfera de jurisdição, a malha sob responsabilidade dos municípios é a que menos apresenta vias pavimentadas, com apenas 2% de sua extensão com algum tipo de revestimento (SNV, 2015).

A forte presença da indústria agropecuária na região de Alegrete (RS), aliada à importância desse setor para a economia nacional, destaca as estradas vicinais como elemento crucial para o crescimento regional e do país, visto que a circulação de insumos, maquinários agrícolas e o escoamento da produção é majoritariamente realizado por essas vias. Assim, sua precariedade compromete o conforto e segurança dos usuários, força o tráfego em velocidades reduzidas, atrasa a entrega das safras e acaba desgastando de forma acelerada os veículos. A má condição das vias transcende o âmbito econômico e afeta diretamente a qualidade de vida dos moradores do campo, retardando e muitas vezes restringindo a ligação do campo com os recursos disponíveis nas zonas urbanas, como saúde, educação e lazer (ODA, 1995; DONE, 2008; ROCHA, 2005).

Bartholomeu e Caixeta Filho (2008), ao estudarem os impactos econômicos decorrentes do estado de conservação das rodovias, relataram um aumento nos custos de operação de veículos de carga que trafegam por vias inadequadas, visto que, ao trafegarem por rotas com melhores condições de conservação, obteve-se uma redução de 7,8% no consumo médio de combustível e de 18,7% no gasto com manutenção do veículo. Além da redução de custos, rotas em condições adequadas também resultam em benefícios ambientais, visto que, segundo dados de 2016, somente a categoria de transportes foi responsável por cerca de 23% das emissões de CO₂ no país (MCTI, 2020).

Como as estradas vicinais constituem grande parte da malha viária brasileira, especialmente em áreas rurais, a adoção de algum método de gerência e acompanhamento para essas vias é fundamental para otimizar a manutenção e reparos, visando garantir condições de trafegabilidade com segurança.

O intervalo entre as intervenções também deve ser ajustado de acordo com as condições específicas de cada trecho. Oda (1995) ressalta que, se a manutenção for postergada por longos períodos, as estradas podem sofrer uma deterioração tão severa que a simples manutenção não será suficiente. Nesse caso, serão necessárias obras de reabilitação mais profundas para restaurar as condições da via, o que aumenta significativamente os custos e a complexidade das intervenções.

Independentemente do sistema de gestão adotado, é fundamental realizar um levantamento preciso das condições das estradas. Os métodos mais comuns para levantamento de defeitos, como o caminhamento e o uso de veículos adaptados com câmeras, demandam de tempo e mão de obra, podem oferecer perigo aos envolvidos e estão sujeitos a subjetividade do olhar do observador. Esses fatores, somados às dificuldades supracitadas, limitam a agilidade na tomada de ação, aumentando a necessidade de recursos. No contexto municipal, onde os recursos são geralmente mais escassos, essa limitação se torna ainda mais desafiadora, complicando a execução eficiente da manutenção das estradas dentro dos prazos e orçamentos disponíveis (ZHANG *et al.*, 2008; AL-SULEIMAN, 2015).

Uma alternativa que tem ganhado espaço no levantamento visual em diferentes áreas, como patologias de estruturas, agricultura, topografia e no levantamento de defeitos em estradas é o uso dos drones, que, equipados com câmeras de alta resolução e sensores, permitem um levantamento visual rápido e preciso, eliminando a subjetividade das inspeções manuais. Além disso, o levantamento pode ser conduzido à distância, minimizando riscos de segurança ao realizar um levantamento em uma rodovia com tráfego livre ou em regiões comprometidas, por exemplo (FERREIRA, 2010; GRAMANI *et al.*, 2018).

A partir das imagens aéreas obtidas pelo drone, com auxílio de softwares específicos, é possível reconstruir o ambiente tridimensional, que permite identificar os defeitos e obter sua extensão e profundidade. Portanto, aliando

tecnologia à eficiência, o uso de drones pode amplificar a frequência e a qualidade das inspeções, apresentando-se como uma boa alternativa no fornecimento de dados aos órgãos responsáveis pelas estradas, garantindo que estas recebam intervenções preventivas em vez de reabilitações, que são mais caras e complexas.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolver um método simplificado para identificar regiões com alta irregularidade em estradas vicinais com o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs).

1.1.2. Objetivos específicos

- Identificar irregularidades em estradas não pavimentadas usando imagens com uso de VANT;
- Automatizar o processo de análise por meio do desenvolvimento de um código computacional para identificar regiões com alta irregularidade;
- Verificar o funcionamento do código em trechos virtuais e de controle;
- Validar a aplicação do código em três trechos reais na cidade de Alegrete (RS).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Gerenciamento de estradas vicinais

Por conta da praticidade e conveniência, grande parte das estradas vicinais tiveram seu traçado estabelecido com base nas divisas entre propriedades, evoluindo de trilhas e caminhos feitos previamente pelos primeiros ocupantes da região, seguindo curvas naturais dos terrenos. Ao serem construídas sem estudos preliminares aprofundados, fatores importantes como declividades dos trechos, capacidade de carga do solo e a presença de corpos d'água próximos não são ponderados, fazendo com que a estrada fique suscetível ao surgimento de manifestações patológicas, acarretando a rápida degradação da via e no seu baixo desempenho (DNIT, 2005; OLIVEIRA, 2005).

Uma vez em estado precário, as vias vicinais tendem a desgastar cada vez mais rápido, pois, além de terem uma estrutura simplificada em relação às rodovias pavimentadas, a maioria dos veículos que transitam pelas estradas vicinais são de carga, como caminhões e bitrens, que transmitem grandes solicitações para a estrutura. Assim, antes de considerar a implementação de novas instalações, é essencial priorizar a manutenção das infraestruturas existentes, assegurando que as vias permaneçam em condições seguras e funcionais.

Para poder fornecer a manutenção em tempo hábil e de maneira eficiente, é necessário estabelecer um sistema de fiscalização eficaz, por meio de rotinas regulares de inspeção que auxiliarão no processo de escolha das intervenções a serem feitas e, com acompanhamento periódico, a frequência necessária desses reparos, visando prolongar a vida útil da via (ZAGHINI *et al.*, 2023).

2.2. Levantamento dos defeitos em rodovias no Brasil

Segundo Fontenele (2001), a metodologia para a avaliação superficial de vias pode ser dividida em duas abordagens: subjetiva e objetiva. A avaliação subjetiva é baseada na percepção humana, na suavidade ao rolamento e no conforto do usuário ao dirigir, sendo geralmente realizada por avaliadores treinados que atribuem notas durante o percurso no trecho analisado, de acordo

com uma escala previamente definida. Já na avaliação objetiva, são coletados dados a respeito dos defeitos existentes no trecho analisado, fazendo a quantificação e identificação do tipo de defeito, bem como suas dimensões e peculiaridades.

Quando comparadas, a avaliação objetiva se mostra mais adequada para fornecer dados para relatórios técnicos, pois também leva em consideração defeitos existentes que não são imediatamente perceptíveis ao usuário em termos de conforto ao rolamento, mas que podem apontar o início de uma deterioração, que está sujeita a progredir e comprometer a estrutura da via (FONTENELE, 2001; SCHIAVON, 2017).

Atualmente, as normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) que tratam sobre a avaliação objetiva de rodovias especificam a aplicação somente em pavimentos flexíveis e semirrígido. Assim, devido à falta de diretrizes específicas para estradas vicinais, essas normas também são aplicadas a elas na prática. As normas DNIT 006/2003 e 007/2003 descrevem o procedimento, que consiste no registro e classificação de ocorrências aparentes, por observação visual, a cada 20 metros alternados em relação ao eixo da pista. De forma a otimizar o processo de coleta de dados, a norma DNIT 008/2003 apresenta o Levantamento Visual Contínuo (LVC), que permite que a observação possa ser feita com os operadores em um veículo, analisando de forma contínua cada faixa de tráfego, mas ainda baseada na observação do operador, que anota manualmente em uma planilha os defeitos encontrados (DNIT, 2003a, 2003b, 2003c).

Em 2017, por meio de recursos de pesquisa da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), foi proposto o método de Levantamento Visual Contínuo Informatizado (LVCI), procedimento que empresas do âmbito nacional e internacional têm adotado, inclusive o DNIT. Se diferencia do LVC por sua agilidade: ao usar o veículo equipado com computador, *Global Positioning System* (GPS), odômetro de precisão e câmera digital, realiza-se o registro em vídeo do percurso, que é utilizado para validar o levantamento e realizar diagnósticos posteriormente. Ainda assim, o método requer, em campo, a presença de um engenheiro civil ou técnico, mais motorista (ANTT, 2017).

Estes enfoques, apesar de eficazes e de ampla aplicação, enfrentam limitações e desafios significativos, pois a inspeção visual é uma atividade

trabalhosa e demorada, que demanda de número considerável de operadores treinados, que além de tornar maiores os custos operacionais e tempo de serviço, também envolve o desgaste físico e mental dos trabalhadores (ZHANG *et al.*, 2008). Junto a isso, soma-se a subjetividade do olhar de cada operador, que pode resultar em inconsistências nas avaliações e consequentemente na uniformidade dos dados coletados (AL-SULEIMAN, 2015).

2.3. Levantamento dos defeitos em estradas com o uso de imagens

De modo a mitigar as limitações impostas pela avaliação visual feita in situ, a utilização de imagens para a avaliação de pavimentos apresenta-se como uma técnica mais conveniente e eficiente, pois pode ser realizada de forma remota, minimizando os riscos à segurança dos técnicos e proporcionando uma análise contínua e detalhada de grandes extensões de pavimento, que seriam complexas de serem inspecionadas manualmente com a mesma agilidade (DIAS, 2021; FERREIRA, 2010; VASCONCELLOS FERNANDES, 2021; MANJUSHA, 2023).

Em relatório realizado pelo *Transportation Research Board*, em 2004, os autores já destacavam a importância de eliminar a variável do observador do resultado das avaliações, apresentando métodos para a coleta de dados da condição da superfície das estradas que utilizam apenas dados obtidos por meio de imagens ou por sensores, posteriormente analisados em escritório. Dentre os métodos apresentados, destacam-se o uso de imagens, tanto analógicas (em filmes de 35 mm) quanto digitais (seja em foto ou vídeo), para a identificação de defeitos. Inicialmente, as imagens eram obtidas por meio de câmeras acopladas a veículos que, ao percorrerem os trechos, registravam a superfície em intervalos previamente definidos para posterior análise em escritório (ADOLFO E LUDWIG, 1992; MCGHEE, 2004).

Embora eficaz para analisar a rodovia e inovador frente a inspeção por caminhamento, essa abordagem ainda se limitava a capturar apenas perspectivas superficiais e bidimensionais, permitindo a identificação visual dos defeitos e medições em planta. Para obter informações mais detalhadas, como a profundidade dos defeitos, tornou-se necessária a implantação de outras tecnologias capazes de fornecer dados sobre a variação de cotas do terreno,

como sensores de profundidade, câmeras termográficas e georadares, o que aumenta significativamente os custos operacionais dos veículos adaptados (LOULIZI *et al.*, 2003; CHANG *et al.*, 2005; CAFISO *et al.*, 2006; KIM, 2014). Um exemplo é o Veículo de Diagnóstico de Rodovias (VDR), apresentado na Figura 1, comumente utilizado no Brasil para a análise de rodovias pavimentadas, é equipado com acelerômetros, câmeras, GPS e perfilômetro inercial laser (ANTT, 2023).

Figura 1 - Exemplo de veículo de diagnóstico utilizado em rodovias no Brasil.



Fonte: ANTT (2023).

Dependendo das condições da rodovia, em trechos muito deteriorados, há o risco de danos tanto ao veículo quanto aos sensores, o que pode atrasar as inspeções e aumentar os custos. Além disso, a acessibilidade a áreas remotas ou de difícil acesso adaptados se torna impraticável ou excessivamente arriscada (NECKEL *et al.*, 2021).

2.4. Levantamento dos defeitos em estradas com o uso de imagens aéreas

Com a constante procura por novas tecnologias, o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) tem sido amplamente utilizado na engenharia, para inspeções técnicas, não somente de rodovias, mas também na construção civil, geologia e agricultura. Na avaliação de rodovias, seu uso se destaca frente aos veículos tradicionais pela facilidade em realizar manobras e capacidade de

acessar locais de difícil acesso, que podem comprometer o equipamento ou a segurança do operador. Além disso, os VANTs possuem um custo de manutenção mais baixo em comparação a carros e caminhões adaptados, por exemplo (ALDEA, 2015; WESTOBY, 2012; MELO JÚNIOR *et al.*, 2018; ROMERO-CHAMBI *et al.*, 2020).

Ao longo do tempo, diferentes tipos de equipamentos foram desenvolvidos e adaptados para a captação das imagens aéreas, variando desde helicópteros de pequeno porte até drones. A seguir, são apresentados alguns exemplos de como esses equipamentos têm sido utilizados na inspeção de vias.

- **Veículos aéreos não-tripulados:**

Zhang *et al.* (2008) trataram de um helicóptero de pequenas dimensões com um único rotor, equipado apenas com câmera de alta resolução e sistema de posicionamento para detectar a posição e a orientação da captura das fotos, além da velocidade do voo. Com fotos em alta resolução, tiradas a alturas entre 20 e 30 metros, foi possível identificar visualmente defeitos na superfície de uma estrada vicinal, permitindo determinar onde concentrar esforços para melhorias.

Figura 2 - VANT utilizado por Zhang *et al.* (2008).



Fonte: ZHANG *et al.* (2008).

Zhang e Elaksher (2012) e Dobson *et al.* (2013), também fizeram o uso de um esquema de câmera digital, GPS e *Inertial Measurement Unit* (IMU) acoplados a um pequeno helicóptero, porém, não apenas com o objetivo de registrar imagens para identificação visual, mas também visando a recriação tridimensional da superfície da estrada, permitindo a caracterização dos defeitos

com suas respectivas profundidades. Para isso, as fotos foram tiradas de diferentes ângulos, com uma certa sobreposição, permitindo a aplicação do sistema de reconstrução de imagens *Structure from Motion* (SfM), que permite extrair informações tridimensionais a partir de imagens estáticas (DOBSON *et al.*, 2013; DE PAOLI e TRINDADE, 2015).

Figura 3 - VANT utilizado por Dobson *et al.* (2013).



Fonte: Dobson *et al.* (2013).

Zhang *et al.* (2016), de modo a propor uma alternativa econômica em relação aos helicópteros de pequeno porte, utilizaram um esquema de câmera, sensor CMOS e GPS montados em uma estrutura personalizada, suspensa de um balão de hélio, conforme Figura 4, que permitiu que as fotos fossem tiradas a 10 metros de altura.

Figura 4 - Esquema de balão hélio.



Fonte: Zhang *et al.* (2016).

- **Drones:**

Entre os VANTs disponíveis no mercado, os drones se popularizaram e se destacam para trabalhos de engenharia, devido à sua leveza e dimensões reduzidas, que facilitam o transporte e operação. Além disso, os drones são equipados com câmeras de alta resolução, GPS e sensores infravermelhos integrados, que possibilitam capturar imagens de maneira facilitada, otimizando os processos e reduzindo custos na adaptação desses sistemas. No Item 2.5, são apresentadas pesquisas que fizeram o uso de drones para o levantamento visual.

2.5. Análise tridimensional

No âmbito do uso de imagens para a avaliação de rodovias, os trabalhos concentram-se principalmente na detecção visual dos defeitos em pavimentos asfálticos, onde a identificação de padrões é realizada majoritariamente pela identificação de padrões na imagem, de maneira bidimensional.

Trabalhos como os de Pan *et al.* (2018), Ersoz *et al.* (2017), Silva *et al.* (2020) e Nappo *et al.* (2021) utilizaram redes neurais e métodos de aprendizado de máquina para detectar automaticamente defeitos em pavimentos asfálticos, como fendas (fissuras e trincas) e buracos, a partir da correlação visual com padrões a partir de banco de dados alimentado com diversas imagens dos defeitos, conforme ilustrado na Figura 5.

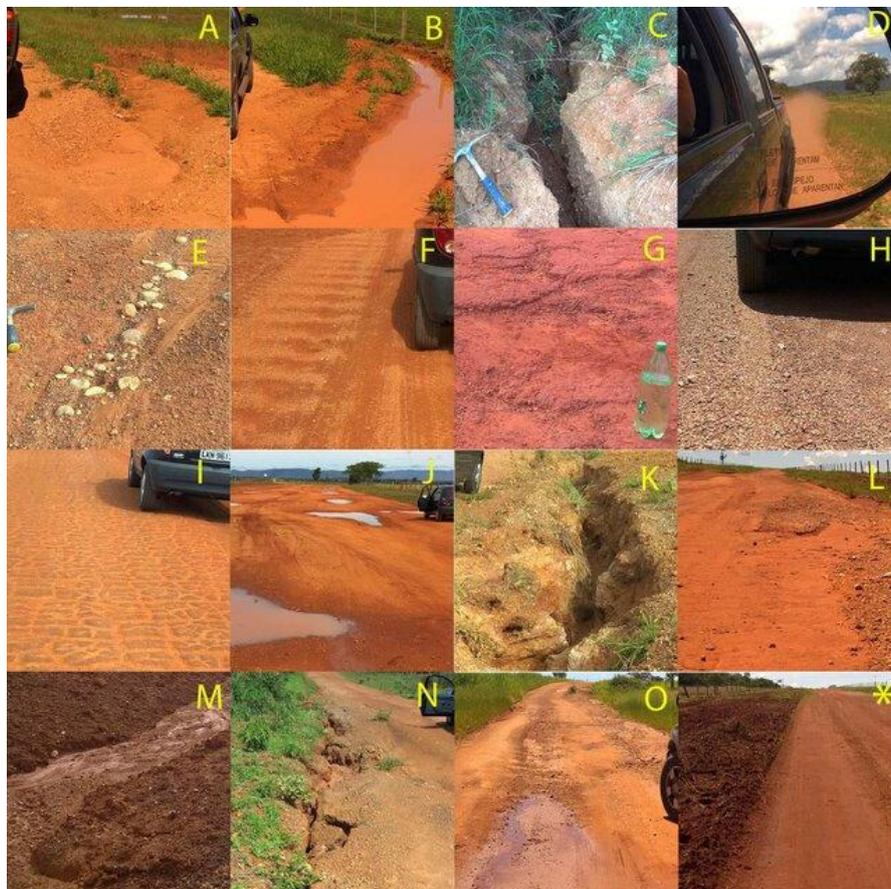
Figura 5 - Detecção automática de defeitos.



Fonte: SILVA *et al.* (2020).

No entanto, ao tratar dessa análise em estradas vicinais, os defeitos são principalmente caracterizados por mudanças na seção da via, como corrugações, panelas, trilhas de roda, erosão e seção transversal inadequada (ODA, 1995; SAEED *et al.*, 2020). Tais defeitos não são tão facilmente identificados apenas por padrões visuais, visto que as estradas não pavimentadas não são tão homogêneas como as rodovias, devido a irregularidades no perfil longitudinal, diversidade de coloração do solo, presença de água acumulada e vegetação, conforme ilustrado na Figura 6. Portanto, deve-se buscar métodos que permitam a análise das variações tridimensionais do perfil da estrada.

Figura 6 - Defeitos encontrados em estradas vicinais.



Fonte: DALOSTO *et al.* (2016).

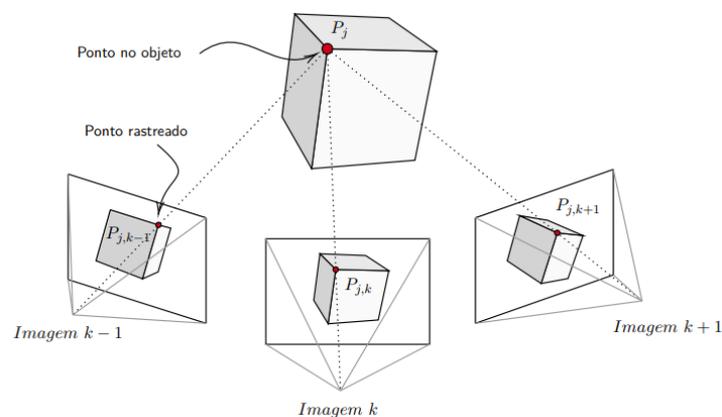
O sistema de extração de modelos tridimensionais das estradas para análise do pavimento foi detalhado por Eisenbeiss (2004), que descreveu os passos necessários para a geração de Modelos Digitais de Superfície (MDS) a partir de fotos aéreas capturadas com VANTs. No entanto, o autor destaca que

o método não se difundiu devido as dificuldades encontradas nesse processo, como a necessidade de utilizar múltiplos *softwares* para cada etapa, o que pode resultar em problemas de incompatibilidade de formatos durante a exportação dos dados. Além disso, para gerar modelos confiáveis, é preciso fotos de alta resolução, que torna a operação onerosa.

Atualmente, o cenário sofreu uma mudança significativa, há uma variedade de *softwares* disponíveis no mercado, como o *Agisoft Metashape*, *Pix4D Mapper*, *Global Mapper* e *3DF Zephyr*, que possibilitam que todo o fluxo de trabalho seja feito de maneira integrada, desde a importação das imagens até a geração final dos modelos digitais.

Estes *softwares* utilizam a técnica de fotogrametria chamada *Structure from Motion (SfM)*, que reconstrói modelos tridimensionais (3D) a partir de imagens bidimensionais (2D) capturadas de diferentes ângulos. Para isso, são identificados pontos em comum nas diferentes imagens, chamados *tie points* (pontos de amarração), que fornecem informações para calcular a posição e orientação da câmera, que são refinadas por processos iterativos. Viana (2021) afirma que os pontos de amarração do objeto a ser reconstruído precisam ser vistos em no mínimo três imagens, reforçando a necessidade de uma sobreposição adequada. Na Figura 7 está ilustrada como é feita a reconstrução da cena: um mesmo ponto (ponto de amarração) é identificado em fotos capturadas de diferentes ângulos, e sua posição em cada uma delas é utilizada para calcular suas coordenadas tridimensionais.

Figura 7 - Representação esquemática do funcionamento do *SfM*.



Fonte: VIANA (2021).

Para garantir uma boa qualidade do modelo, Coelho e Brito (2009) recomendam que as imagens devem possuir uma sobreposição mínima de 60% lateralmente e 30% longitudinalmente, conforme Figura 8.

Figura 8 - Sobreposição mínima recomendada.



Fonte: Adaptado de COELHO E BRITO (2021).

Além disso, durante o voo para a captura das fotos, é necessário tomar alguns cuidados. É importante evitar dias com ventos fortes, pois eles podem desestabilizar a câmera, resultando em imagens desfocadas ou desalinhadas, além de aumentar o consumo de bateria. Em relação à iluminação, dias nublados são ideais, pois proporcionam uma luz difusa, evitando sombras fortes ou alongadas e garantindo uma iluminação uniforme, sem variações significativas no brilho das imagens (PIX4D, 2022). Borges *et al.* (2017) ressaltam que, em áreas com vegetação densa, o uso de drones apresenta limitações, podendo gerar regiões inconsistentes, sendo recomendado um levantamento complementar com GNSS/RTK para garantir a qualidade do produto.

Assim, de maneira geral, a técnica de reconstrução tridimensional a partir do *SfM* é a mais empregada atualmente, servindo de base para diversas metodologias.

Diversos trabalhos afirmam a possibilidade do uso do modelo tridimensional para mensurar os defeitos de maneira manual.

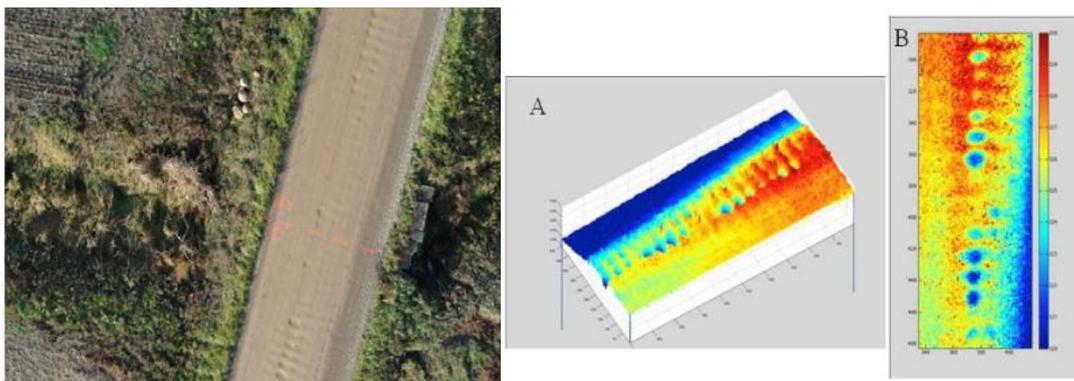
Zhang e Elaksher (2012), ao realizarem capturas fotográficas a uma altura de 45 metros, com um helicóptero de pequeno porte, equipado com câmera digital, GPS e *Inertial Measurement Unit* (IMU), conseguiram identificar e medir

a dimensão de painéis em pavimentos asfálticos, resultando em uma acurácia de até 0,5 cm.

Leonardi *et al.* (2018), em uma abordagem semelhante, reconstruíram a rodovia com imagens capturadas com um drone a uma altitude de 30 metros e encontraram uma diferença média inferior a 3 cm entre as medições feitas em defeitos em campo e as obtidas a partir do modelo tridimensional.

Autores como Dobson *et al.* (2013), Saad e Tahar (2019), Opong-Adu (2023), com fotos obtidas entre 10 e 30 metros, também apontam o sucesso na medição dos defeitos de maneira manual no modelo tridimensional de estradas não pavimentadas, obtendo diferenças entre a medição em campo e pelo modelo dentro da faixa de 1 cm. A Figura 9 traz um exemplo de foto aérea e modelo de elevações gerado.

Figura 9 – Exemplo de foto aérea e modelo tridimensional.

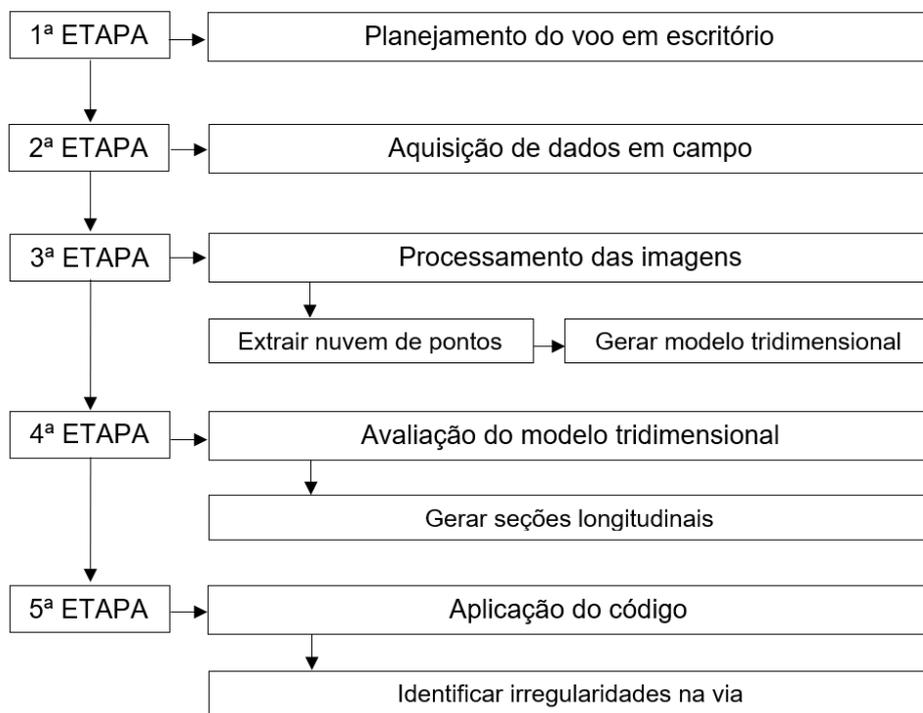


Fonte: Dobson *et al.* (2013).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item são descritos os materiais e métodos empregados na pesquisa, com o objetivo de otimizar recursos com o uso de automação, a fim de obter um método simples e viável, com inserção no estado da prática em poucos anos. Na Figura 10 está apresentado o fluxograma de execução da pesquisa.

Figura 10 - Fluxograma de etapas desenvolvidas.



Fonte: Elaboração própria (2024).

3.1. Equipamentos utilizados

Para a realização deste trabalho foi utilizado um Drone DJI Mavic 2 Enterprise Advanced (Figura 11), cujo sensor possibilita imagens de 48 megapixels e com autonomia de voo de até 31 minutos. Para a análise das imagens foi utilizado um computador com um processador Core I9 13900K com 128GB de RAM e uma placa de vídeo GeForce RTX 4090.

Figura 11 - DJI Mavic 2 Enterprise Advanced.

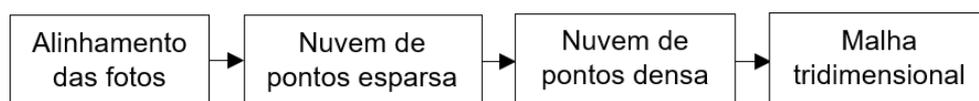


Fonte: DJI (2021).

3.2. Geração dos modelos tridimensionais

O processamento das fotos e modelagem tridimensional foi realizado por meio do software de fotogrametria *3DF Zephyr* (versão 7.531), em sua modalidade de licença estudantil. O software emprega a técnica *Structure from Motion (SfM)*, que permite a reconstrução de ambientes tridimensionais a partir de fotografias aéreas. O processo de geração do modelo é composto por quatro etapas principais, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Processos de fotogrametria.



Fonte: Elaboração própria (2024).

3.3. Tratamento dos dados

Nesta etapa da pesquisa, realizou-se a avaliação do estado da estrada com base na irregularidade da via. O método desenvolvido utiliza o modelo tridimensional gerado a partir de imagens aéreas capturadas por drones, descrito anteriormente, permitindo a análise da variação longitudinal da superfície.

A partir do modelo tridimensional, traçam-se seções longitudinais de interesse e extraem-se os dados de cada ponto que as compõem, resultando em um conjunto de coordenadas tridimensionais que descrevem a seção analisada.

Para identificar a presença de defeitos, o perfil longitudinal é gerado a partir dos dados obtidos nas seções e segmentado em intervalos de amplitude conhecida, ou seja, dividido em trechos de comprimento específico para a análise das irregularidades.

Em cada segmento, ajusta-se uma linha de tendência por meio de regressão linear, representando a forma idealizada do perfil dentro do intervalo analisado. A identificação das discontinuidades é realizada pelo cálculo do Erro Quadrático Médio (RMSE – do inglês *Root Mean Square Error*), conforme Equação 1, que mede a dispersão dos pontos em relação à linha de tendência ajustada.

Equação 1 - Erro quadrático médio

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}$$

Onde:

RMSE: erro quadrático médio;

n: número total de pontos no segmento;

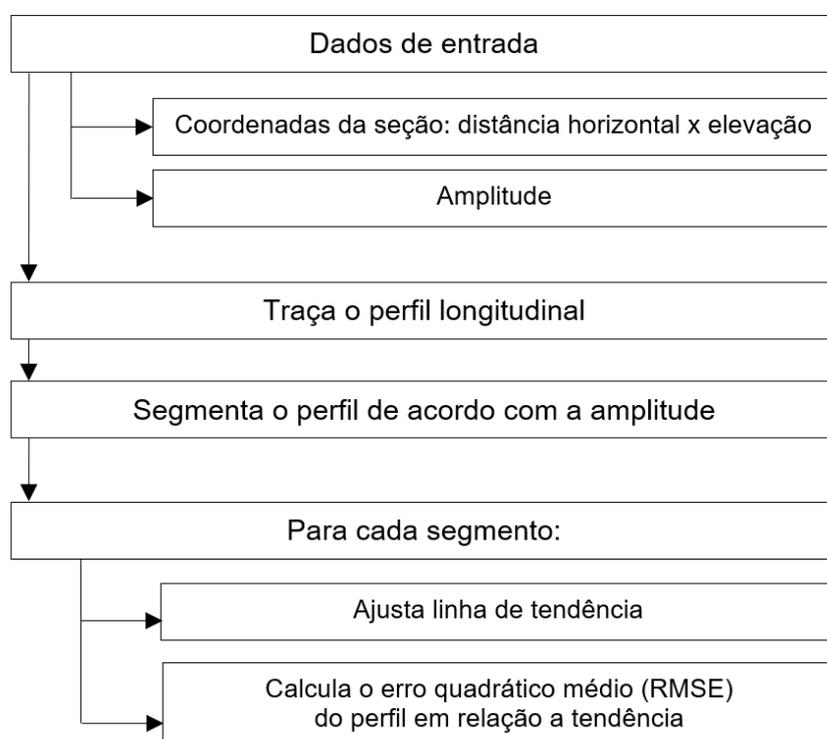
y: valores de elevação do perfil analisado;

y': valores de elevação previstos pela linha de tendência.

O uso da média quadrática se justifica em situações em que os valores apresentam distribuição simétrica centrada em zero, como o caso em que há variações simétricas na superfície, como elevações e depressões de mesma magnitude, que resultariam em uma média nula (MUNIZ, 2014). Assim, sempre que houver uma descontinuidade - seja uma elevação ou uma depressão - um valor numérico positivo de RMSE indicará sua presença. Com isso, valores elevados de RMSE indicam maior variação dos dados em relação à tendência.

O processo de tratamento de dados supracitado foi automatizado por meio de um código desenvolvido em Python, permitindo a aplicação automatizada dos cálculos em diferentes amplitudes, para os diferentes casos de análise, assegurando consistência nos resultados e reduzindo o tempo de processamento. A Figura 13 ilustra a ordem dos processos, e o código completo está apresentado em apêndice.

Figura 13 – Fluxo de processamento do código.



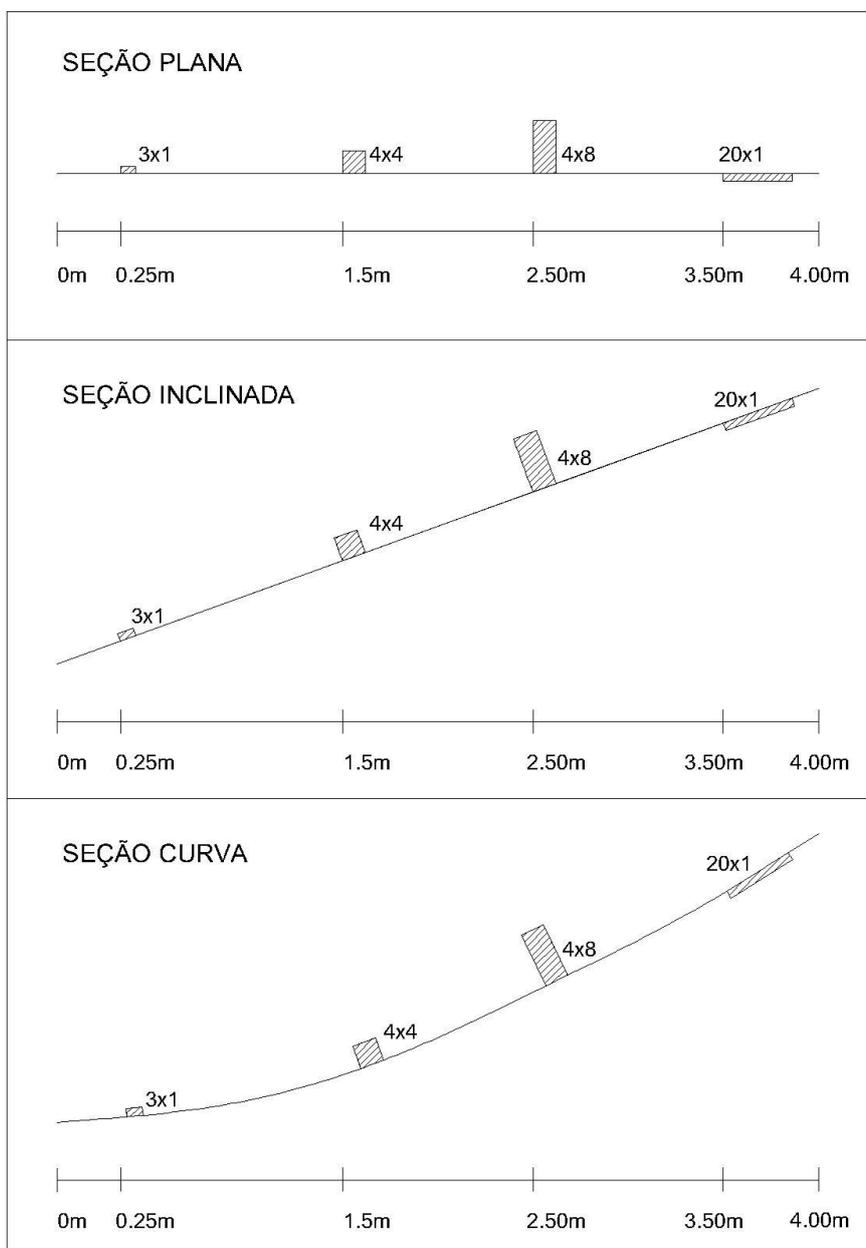
Fonte: Elaboração própria (2024).

3.4. Obtenção dos perfis de análise

3.4.1. Seções virtuais

Para verificar o funcionamento do código de análise, inicialmente foram criadas seções virtuais, com descontinuidades de dimensões conhecidas, conforme Figura 14, que permitiram testar a precisão do método de análise antes da aplicação em dados reais.

Figura 14 - Seções virtuais.



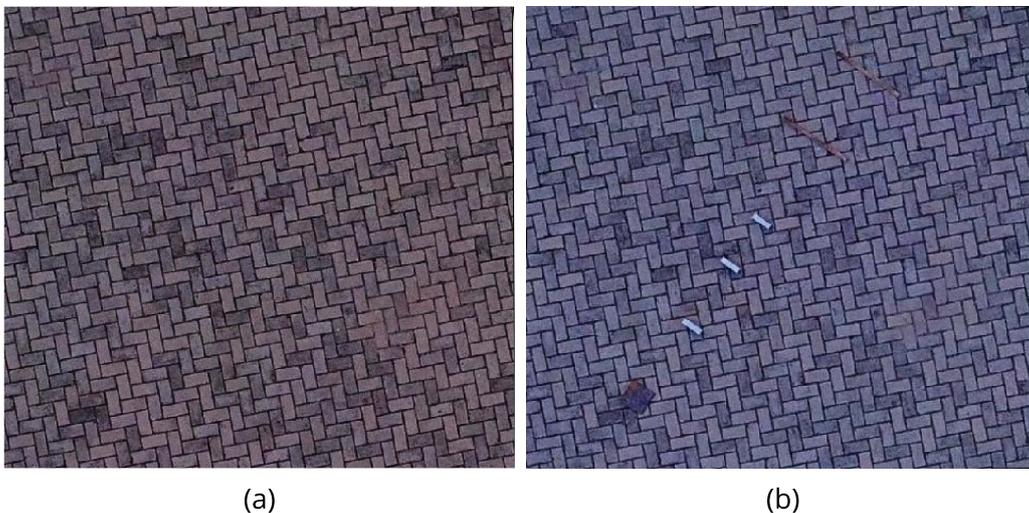
Fonte: Elaboração própria (2024).

3.4.2. Seções de controle

Após a verificação por meio das seções virtuais, procedeu-se à coleta de dados em campo para validação do funcionamento, em um ambiente controlado, com a utilização de elementos de dimensões previamente estabelecidas, visando verificar a viabilidade do uso do drone para o proposto.

Para isso foi obtida uma imagem de referência, de uma superfície plana (Figura 15a), e em seguida obtida a imagem da mesma superfície, porém com adição de objetos de diversas dimensões conhecidas (Figura 15b).

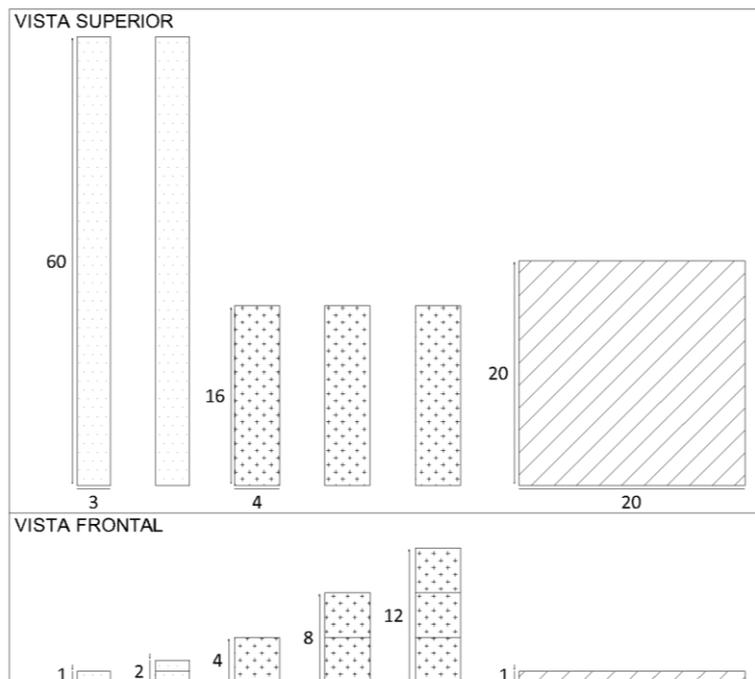
Figura 15 - Terreno de referência (a); terreno com objetos (b).



Fonte: Elaboração própria (2024).

Os objetos adicionados têm suas dimensões em centímetros especificadas conforme esquema na Figura 16. Na Figura 17 está indicada a disposição dos objetos em solo.

Figura 16 - Esquema dos objetos utilizados



Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura 17 - Disposição dos objetos.



Fonte: Elaboração própria (2024).

As imagens aéreas foram capturadas a uma altura de voo de 20 metros em diversos pontos sobre a área de interesse, abrangendo uma área de aproximadamente 420 m², de modo a garantir uma sobreposição suficiente para englobar todos os elementos múltiplas vezes e em diversas perspectivas, requisitos para gerar um modelo com alta qualidade com a técnica *SfM*.

Como resultado, obteve-se uma malha tridimensional, na qual é possível observar os objetos adicionados para verificação, assim como demais variações topográficas presentes no terreno. Na Figura 18 é possível verificar o processo de criação do modelo tridimensional, com a nuvem de pontos esparsa (a) e densa (b) de toda a região fotografada.

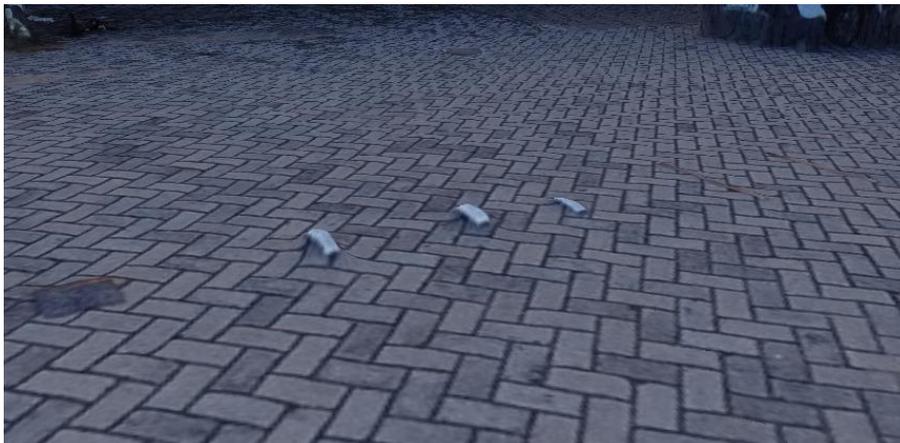
Figura 18 – Nuvem de pontos esparsa (a) e densa (b).



Fonte: Elaboração própria (2024).

Na Figura 19 está apresentada a malha tridimensional resultante desse processo, contendo os objetos posicionados no terreno. O modelo permite a fácil visualização das características, porém não é necessário para a análise computacional visto que o computador é capaz de identificar os objetos a partir da malha tridimensional gerada.

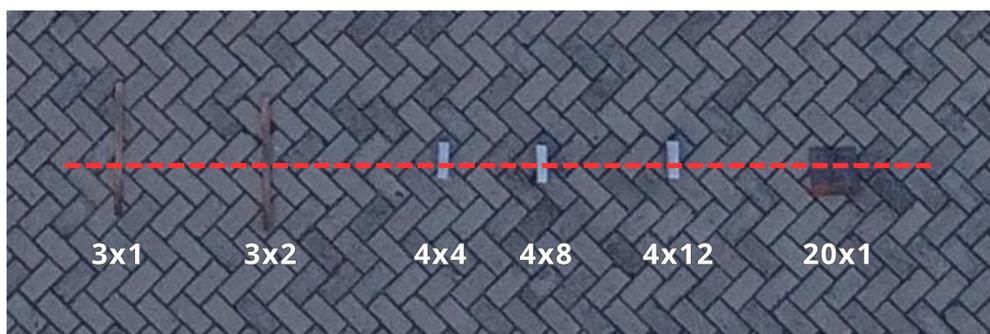
Figura 19 – Objetos na representação tridimensional.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Assim, a partir da geração das seções transversais, foi possível identificar as variações longitudinais do perfil. Para isso, foi traçada uma linha que abrange todos os objetos na área de estudo, conforme ilustrado na Figura 20. Como resultado, foram obtidas as coordenadas de latitude, longitude e elevação de cada ponto ao longo da linha traçada, dados que serão utilizados para análise, conforme descrito em 3.3.

Figura 20 - Objetos em planta.



Fonte: Elaboração própria (2024).

3.4.3. Seções reais

Para a análise em campo, foram escolhidos três trechos na cidade de Alegrete (RS), conforme Figura 21, devido à proximidade com a Universidade e pela presença de tráfego intenso de veículos pesados, os quais contribuem para a degradação acelerada da via, o que facilita a observação de alterações na superfície de rolamento.

Figura 21 - Localização dos trechos experimentais.



Fonte: Google Earth (2024).

Durante as visitas de campo, foi possível avaliar, de forma subjetiva, as condições gerais dos trechos selecionados para análise.

- Trecho 1: escolhido por ter passado recentemente por obras de manutenção, apresentando uma superfície em melhores condições, com a presença pontual de defeitos;

Figura 22 - Trecho 1



Fonte: Elaboração própria (2024).

- Trecho 2: observaram-se desafios mais evidentes à trafegabilidade, com a presença de defeitos que exigem a redução da velocidade em determinados pontos;

Figura 23 - Trecho 2



Fonte: Elaboração própria (2024).

- Trecho 3: representa o pior cenário dentre os avaliados, com maior presença de irregularidades.

Figura 24 - Trecho 3

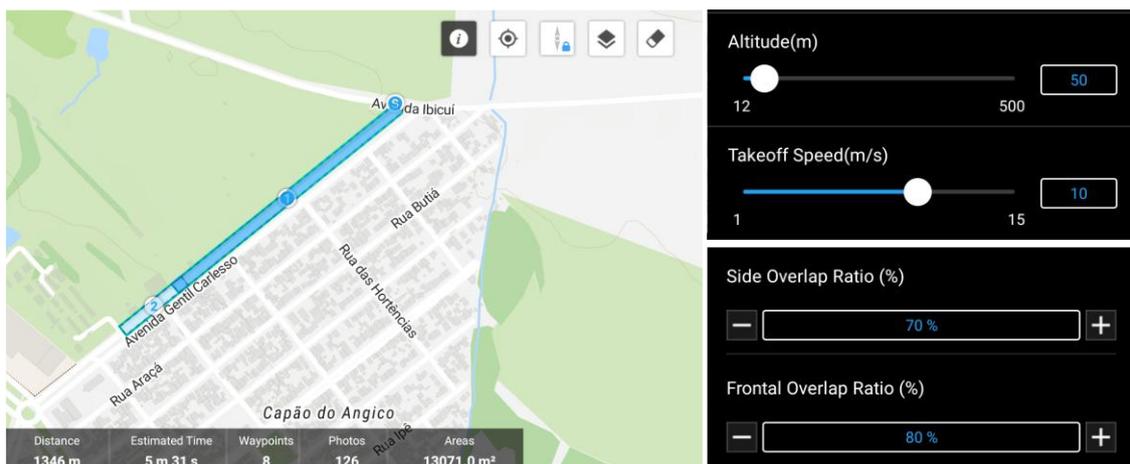


Fonte: Elaboração própria (2024).

O planejamento do voo foi realizado previamente para todos os trechos, configurando-se um percurso específico para o drone, com parâmetros estabelecidos para garantir a sobreposição adequada das imagens. Uma vez configurado o plano de voo, como mostrado na Figura 25, o drone executará o percurso de forma autônoma, assegurando uma cobertura uniforme do trecho e reduzindo a necessidade de intervenção humana.

O levantamento foi realizado a uma altura de 50 metros, com sobreposição lateral de 70% e longitudinal de 80%.

Figura 25 - Planejamento do voo para o Trecho 1



Fonte: Elaboração própria (2024).

Realizados os voos, os modelos tridimensionais foram gerados seguindo o mesmo procedimento descrito no item 3.4.2.

4. RESULTADOS

Nesta seção estão apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia exposta no Item 3. Inicialmente são expostos os dados resultantes da verificação do modelo, com seções virtuais. Na sequência, o código desenvolvido para o tratamento dos dados é aplicado em seções teste e trechos reais da cidade de Alegrete (RS).

4.1. Seções virtuais para verificação

Para verificar o uso do método descrito no Item 3.4.1, foram criadas seções virtuais cujos perfis longitudinais foram definidos matematicamente. A estes perfis foram definidos defeitos posicionados em locais predefinidos. Analisar-se-ão os resultados obtidos a partir da aplicação do código desenvolvido.

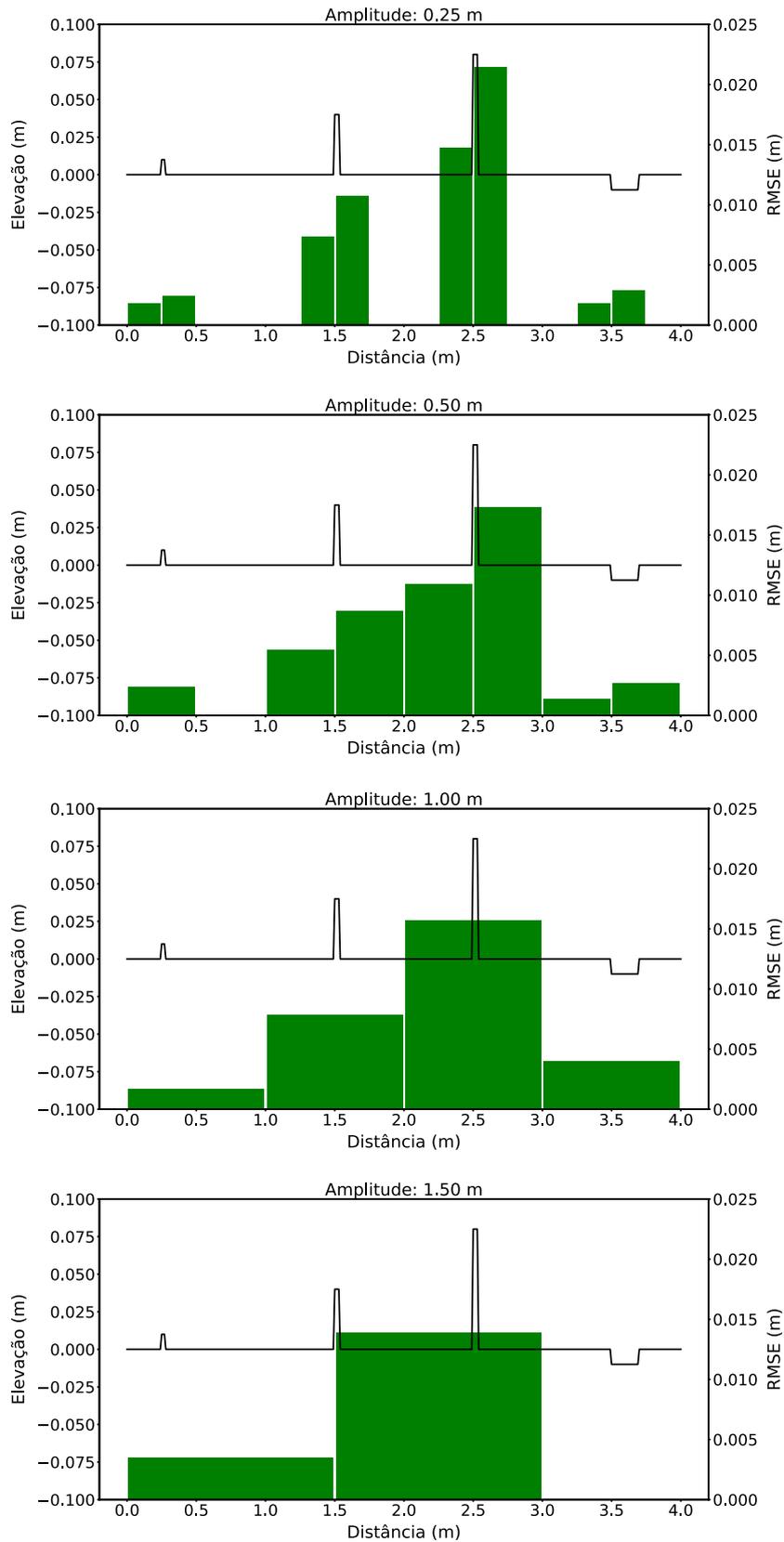
Em todas as análises foram consideradas amplitudes de 0,25 m, 0,50m, 1,00 e 1,50 metros. Os perfis estão apresentados em plotagem linear de cor preta e os resultados de RMSE em barras verdes.

4.1.1. Seção plana

Na Figura 26 estão ilustrados os resultados obtidos a partir da análise do RMSE para um perfil virtual plano com 4 metros de comprimento. Este perfil possui uma elevação de referência de 0 metros, com aclives e declives entre 1 e 12 centímetros.

Estas discontinuidades simulam a existência de defeitos na superfície, e tem suas dimensões semelhantes às dos objetos utilizados na análise das seções de controle, com extensões variando entre 1 e 20 centímetros, conforme especificado em 3.4.2.

Figura 26 - Perfil longitudinal e RMSE da seção plana.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Como pode-se observar, para todas as amplitudes consideradas, o RMSE permitiu observar a presença de alterações na elevação do perfil. Menores amplitudes permitiram identificar o início e o fim das descontinuidades, a depender da posição da descontinuidade em relação a amplitude.

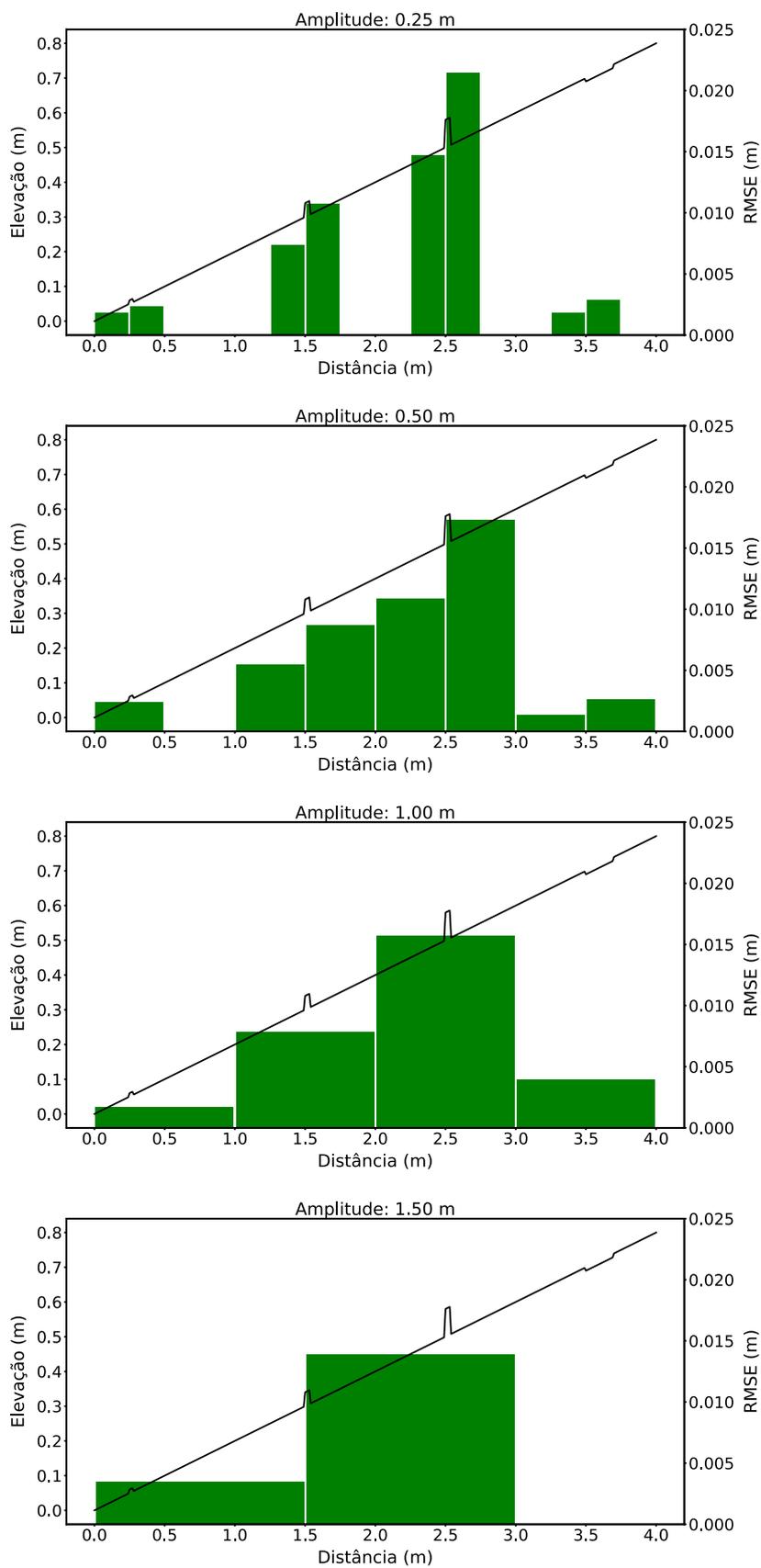
O grau de alteração pode ser estimado a partir da magnitude de RMSE, que varia quando há uma alteração no perfil. Quando a elevação é constante (0 m para este caso) o valor de RMSE é 0, indicando um ajuste perfeito e um perfil uniforme.

Nota-se também que para amplitudes diferentes, um mesmo defeito leva a diferentes magnitudes de RMSE, com o caso do terceiro defeito, variando de aproximadamente 0,015 a 0,020. Essa situação ocorre porque, para maiores amplitudes, o ajuste da tendência linear desses casos apresenta menor precisão. Assim, não é imediatamente possível correlacionar o grau do defeito a um valor de RMSE, sendo o RMSE apenas um indicativo da existência de defeito na região. Ainda, por se tratar de um erro quadrático médio, observa-se que o sinal do perfil se perde, assim apenas a descontinuidade é detectada e não se ela é positiva ou negativa.

4.1.2. Seção inclinada

Na Figura 24 estão ilustrados os resultados obtidos a partir da análise do RMSE para um perfil virtual inclinado, com 4 metros de comprimento em planta. Este perfil possui uma variação de elevação 0,80 metro, com aclives e declives entre 1 e 12 centímetros.

Figura 27 - Perfil longitudinal e RMSE da seção inclinada.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Assim como para a seção plana, para todas as amplitudes consideradas foi possível identificar a existência de descontinuidades no perfil. As menores amplitudes novamente permitiram identificar o início e o fim das descontinuidades, a depender da posição da descontinuidade em relação a amplitude.

Para a amplitude de 1,50 metro, apesar de ter-se identificado a ocorrência de descontinuidades, dada a proximidade entre elas não foi possível determinar com precisão o local onde elas ocorriam. Isto não é necessariamente um problema, visto que para a aplicação real esta situação indicaria a existência de defeitos, implicando no início de um plano de correção na área.

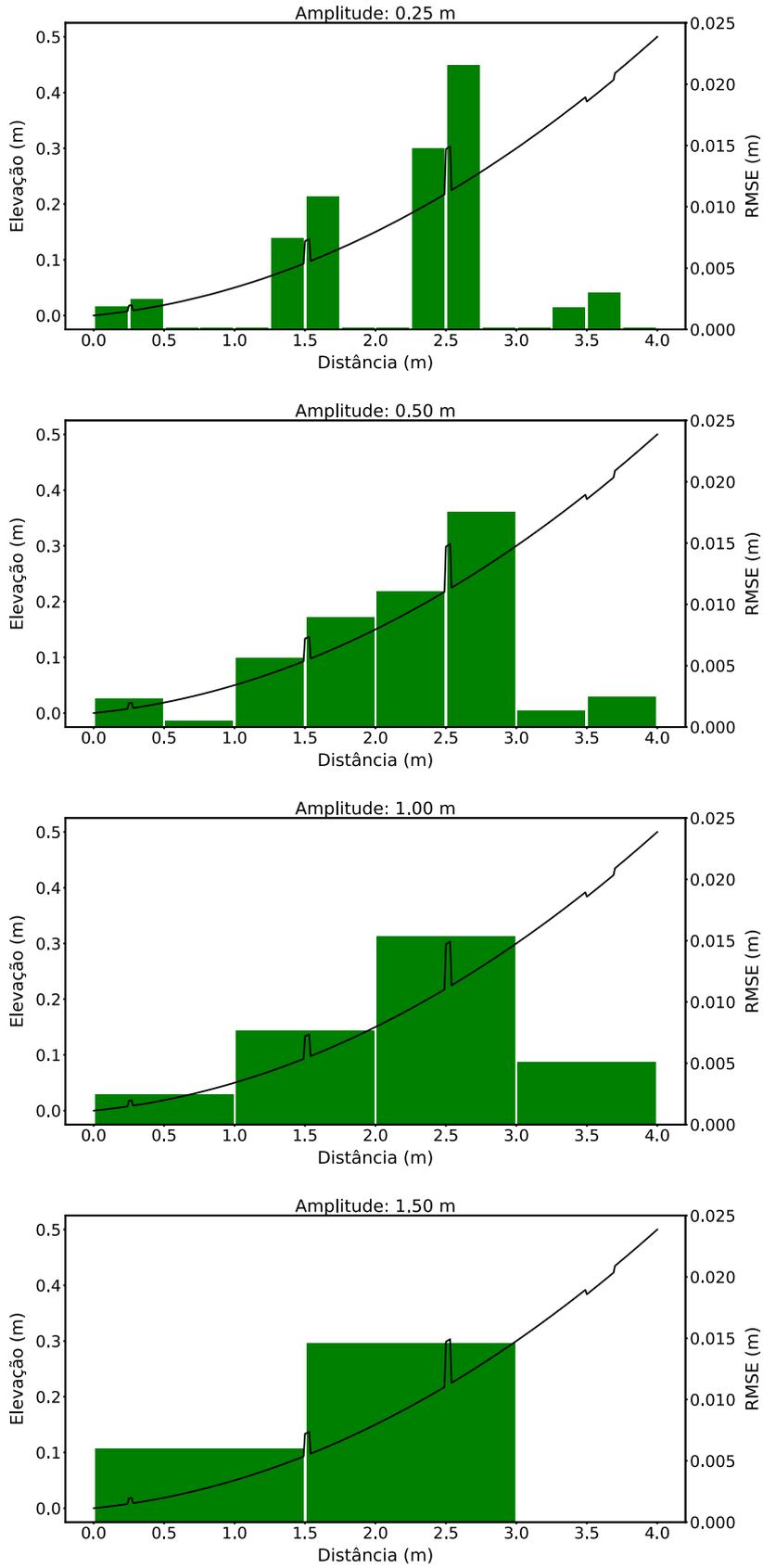
4.1.3. Seção curva

Na Figura 28 estão ilustrados os resultados obtidos a partir da análise do RMSE para um perfil virtual curvo, com 4 metros de comprimento em planta. Este perfil possui uma variação de elevação de 0,50 metro, com aclives e declives entre 1 e 12 centímetros.

Assim como para as seções anteriores, para todas as amplitudes consideradas foi possível identificar a existência de descontinuidades no perfil, incluindo a identificação do início e do fim das descontinuidades, a depender da posição da descontinuidade em relação a amplitude.

Por se tratar de um perfil curvo com ajustes de tendências lineares, o RMSE foi maior que zero para todos os casos, sendo de maior magnitude para maiores amplitudes consideradas, visto o erro ser maior. De qualquer forma, o RMSE mostra-se relevante para indicar regiões com irregularidades.

Figura 28 - Perfil longitudinal e RMSE da seção curva.



Fonte: Elaboração própria (2024).

4.2. Seções de controle

Posteriormente, conforme comentado no item 3.4.2, o código foi aplicado a seção de controle, ou seja, em dois perfis obtidos a partir do imageamento com drone: perfil da seção de controle referência e perfil da seção de controle com objetos, conforme Figura 15.

4.2.1. Seção de referência

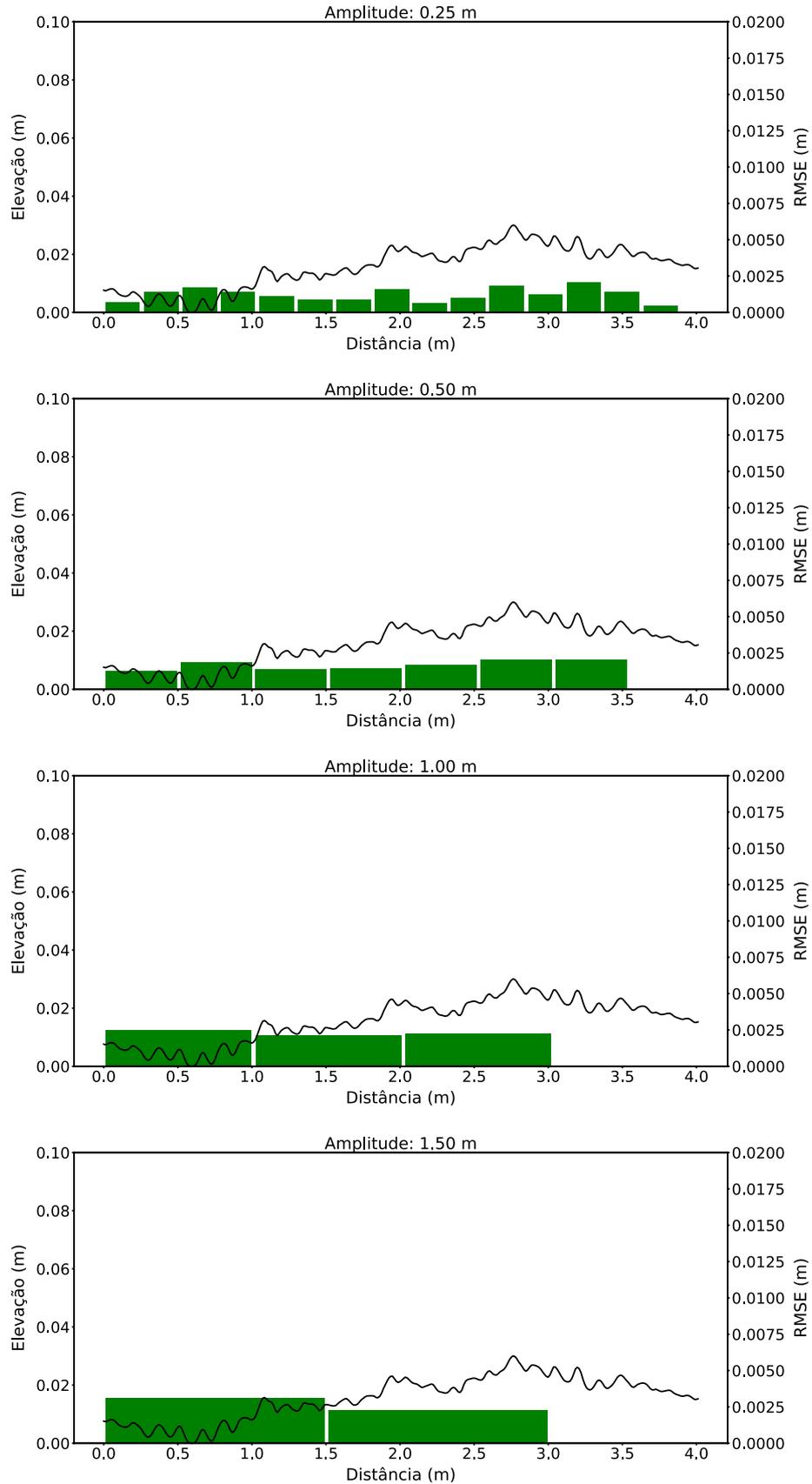
Na Figura 29 estão ilustrados os resultados referentes a análise do perfil de controle referência, com aproximadamente 4,00 metros de comprimento, em uma área pavimentada com blocos intertravados de concreto. O perfil de referência contém apenas o pavimento, sem objetos adicionais para simular defeitos.

Primeiramente, observando o perfil do terreno, representado pela linha contínua preta, nota-se que com o imageamento foi possível capturar a variação de cota relacionada aos espaços entre blocos. Esta variação no perfil corresponde a distâncias entre picos e vales de aproximadamente 3 mm, indicando resolução suficiente do modelo para detecção de defeitos na estrutura.

Quanto aos valores de RMSE, devido às irregularidades inerentes ao perfil, resultantes dos blocos intertravados, e ao fato de o código realizar ajustes por meio de tendências lineares, o RMSE apresentou valores superiores a zero em todos os casos. No entanto, esses valores apresentam-se relativamente baixos em comparação àqueles obtidos em seções com a inserção de descontinuidades. Além disso, os valores aqui encontrados se assemelham aos observados em trechos regulares observados na seção curva (Item 4.1.3).

Para amplitudes superiores a 0,25 m, nota-se que ao fim do perfil os valores de RMSE foram nulos, o que se deve ao fato de o código considerar apenas valores inteiros de amplitude para o cálculo do RMSE. Dessa forma, quando não há pontos suficientes para completar a amplitude estabelecida, o trecho correspondente não retorna resultados. Esta situação é menos influente em longos trechos, como será visto adiante.

Figura 29 - Perfil longitudinal e RMSE da seção de referência.



Fonte: Elaboração própria (2024).

4.2.2. Seção com objetos

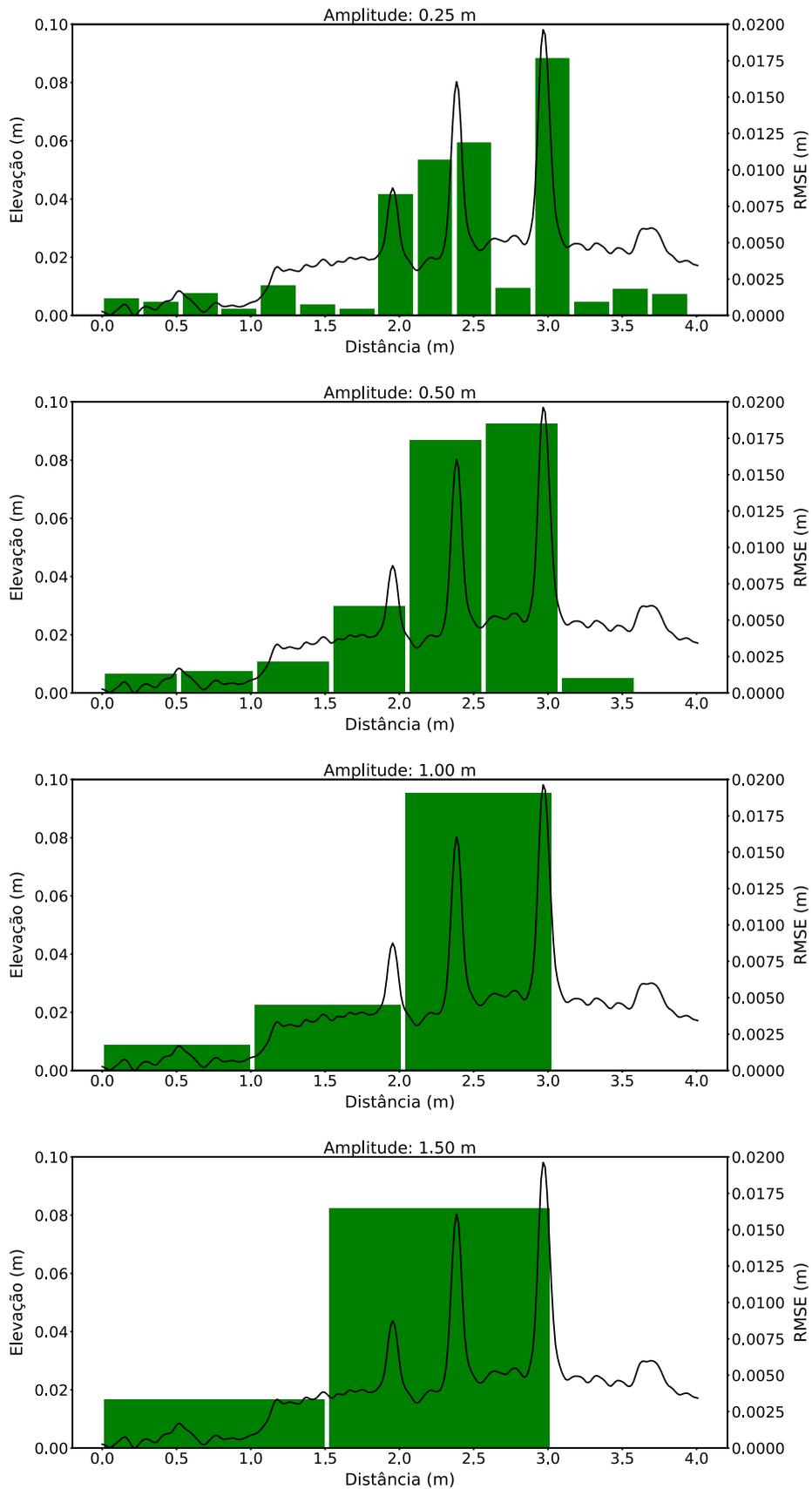
Na Figura 30 estão ilustrados os resultados referentes a análise do perfil de controle referência, com aproximadamente 4,00 metros de comprimento, na mesma área pavimentada com blocos intertravados de concreto. Neste caso, porém, foram inseridos os objetos de controle conforme comentado no item 3.4.2.

Como pode ser observado no perfil do terreno, representado pela linha preta contínua, os objetos inseridos no perfil de controle podem ser facilmente observados em forma de picos em 2, 2,5, 3 e 3,6 metros.

Quanto aos valores de RMSE, é possível notar o surgimento de picos de até 0,018, indicando que a lógica de detecção de defeitos está adequada e corretamente implementada. Assim como para as seções virtuais, os picos de RMSE indicam com precisão o local onde um objeto de controle foi posicionado, sendo mais precisa a determinação para menores valores de amplitude.

Ressalta-se que, contudo, não é necessário utilizar valores tão baixos de amplitude, visto que a mera detecção de objetos em uma área já é suficiente para iniciar o planejamento de manutenção.

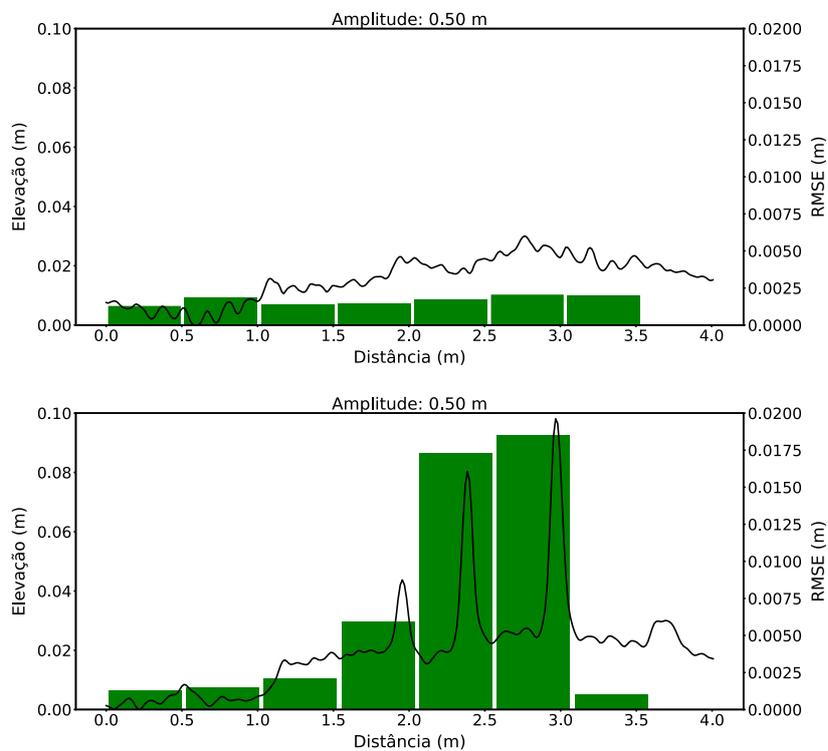
Figura 30 - Perfil longitudinal e RMSE da seção com objetos.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Quando comparado ao perfil anterior, como ilustrado na Figura 31, pequenas variações podem ser observadas entre os trechos de controle. Estas variações são referentes a dificuldade em traçar a seção transversal perfeitamente sobreposta a anterior. Ainda assim, observa-se que o método se mostra eficaz na identificação de irregularidades, uma vez que os valores de RMSE diferem nos locais esperados, onde os objetos de controle foram inseridos.

Figura 31 - Comparação na amplitude 0,50 m.



Fonte: Elaboração própria (2024).

4.3. Seções reais

Por fim, o código foi aplicado a três trechos reais do município de Alegrete, não-pavimentados, com dados obtidos a partir do imageamento com drones.

Em todas as análises foram consideradas amplitudes de 0,25 m, 0,50m, 1,00m, 1,50m e 5,00 metros. Os perfis estão apresentados em plotagem linear de cor preta e os resultados de RMSE em barras verdes.

4.3.1. Trecho 1

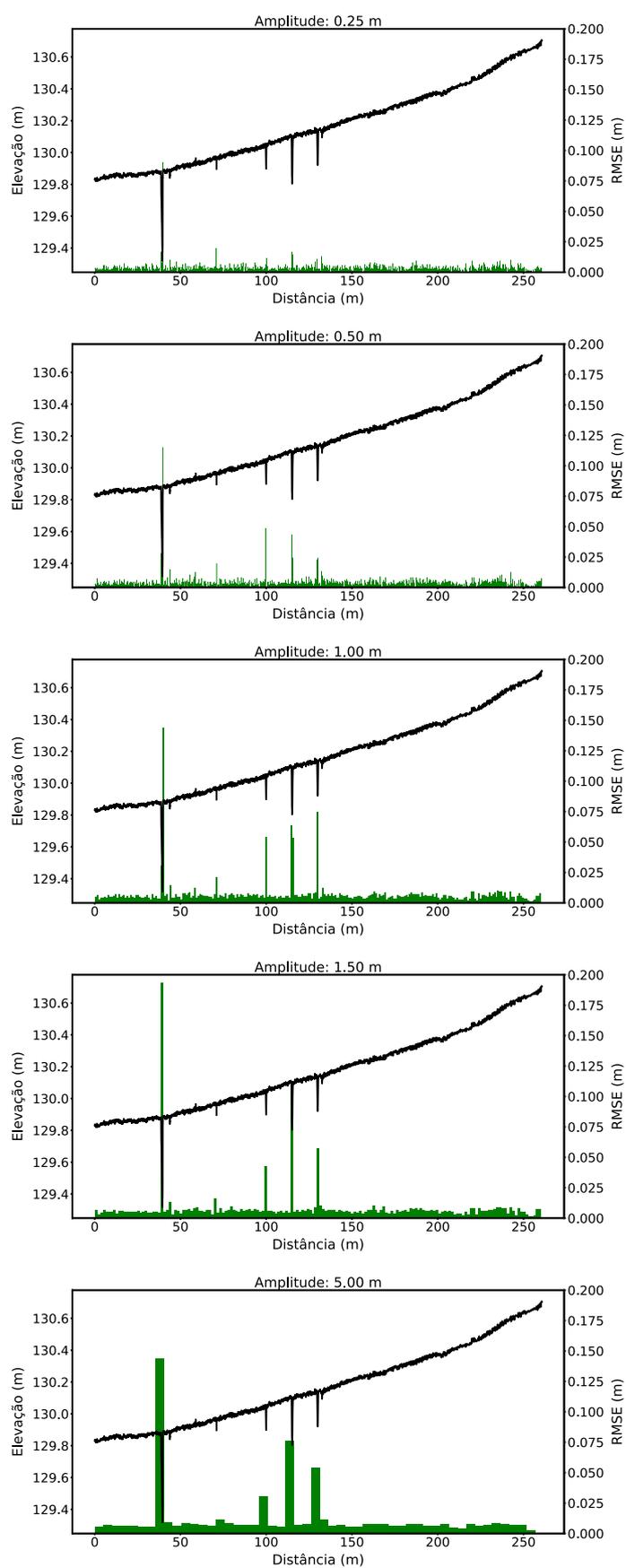
Na Figura 32 estão ilustrados os resultados referentes à análise do perfil do primeiro trecho analisado, para as diferentes amplitudes consideradas. O Trecho 1 possui um comprimento total de 250 metros e uma variação de cota de aproximadamente 0,80 metro. Esse trecho passou por reparos em período anterior ao levantamento, apresentando poucas e pontuais irregularidades, as quais foram constatadas por meio de visita ao local.

Observa-se que os valores de RMSE permanecem relativamente constantes ao longo do trecho, com valores abaixo de 0,025, que reflete irregularidades naturais características de estradas de terra. No entanto, destacam-se quatro picos bem definidos nos valores de RMSE, indicando irregularidades pontuais da via.

O primeiro pico, localizado na distância de aproximadamente 40 metros, apresenta uma variação altimétrica de cerca de 0,40 metro, evidenciando uma irregularidade mais acentuada em relação aos três picos subsequentes, que refletem variações em torno de 0,20 metro.

Assim, o código mostra-se eficaz para detecção das discontinuidades na superfície da via, com sensibilidade para indicar as diferentes magnitudes que a irregularidade pode apresentar, visto que os valores de RMSE diferem nos locais esperados, com intensidades coerentes com o tamanho da irregularidade.

Figura 32 - Perfil longitudinal e RMSE do Trecho 1.

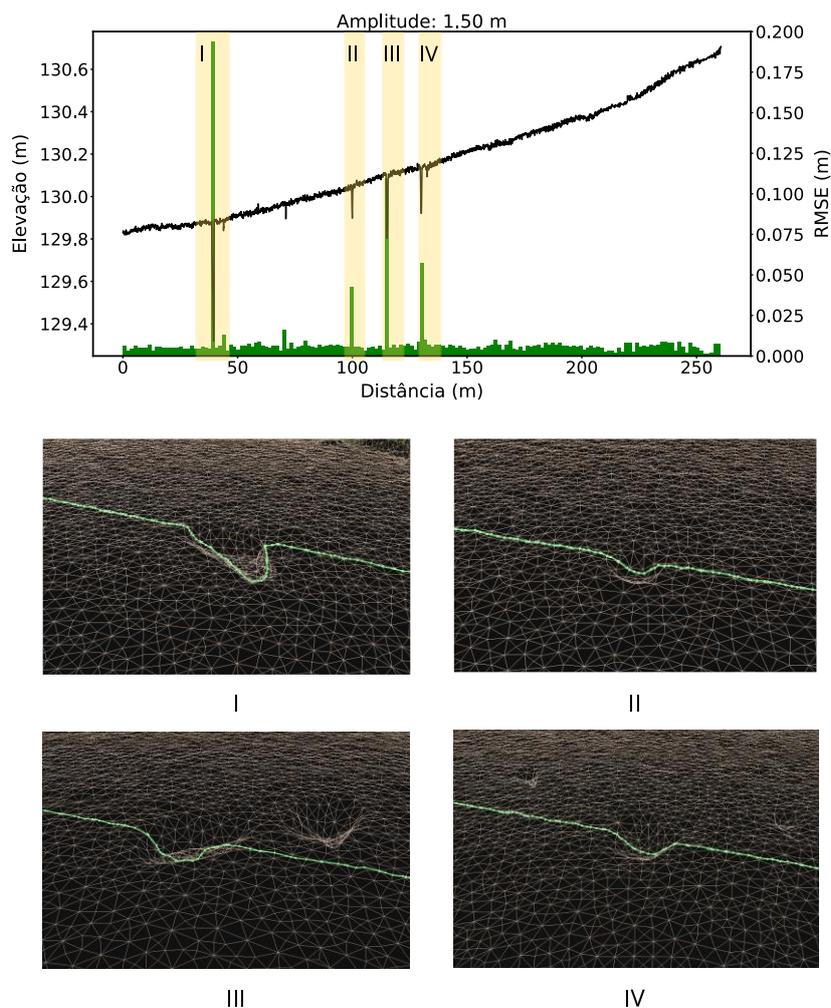


Fonte: Elaboração própria (2024).

Na Figura 33 é possível observar em detalhe as quatro irregularidades identificadas na análise Trecho 1, agora visualizadas na malha tridimensional, onde a linha verde representa a seção longitudinal extraída para análise. A representação ilustra como o ambiente é reconstruído a partir das imagens, e evidencia a capacidade do código de identificar, matematicamente, os locais de irregularidade da superfície permitindo a identificação clara das descontinuidades na superfície.

Ressalta-se, ainda na Figura 30-III, a presença de outra irregularidade, paralela à captada pela seção analisada, destacada pela linha verde. Diante disso, evidencia-se a necessidade de traçar múltiplas seções longitudinais, a fim de proporcionar uma avaliação mais abrangente das condições da via.

Figura 33 – Representação tridimensional do Trecho 1.



Fonte: Elaboração própria (2024).

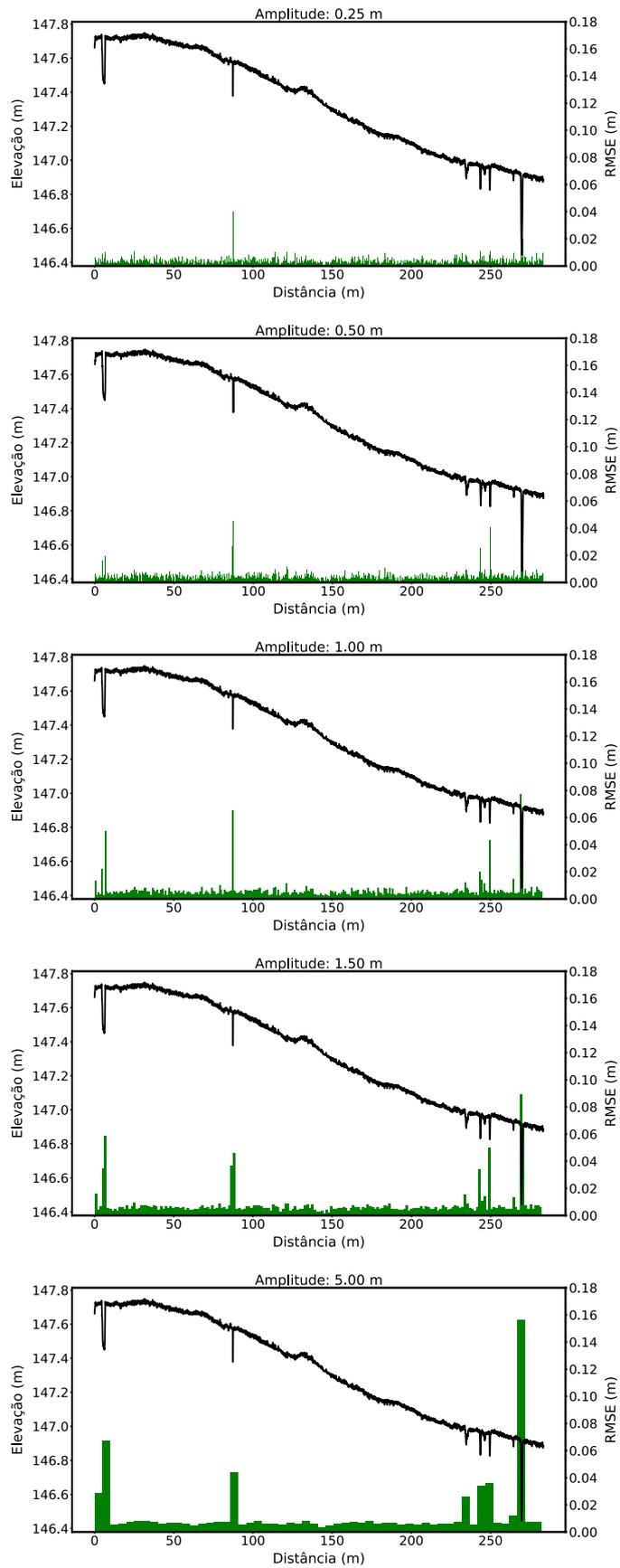
4.3.2. Trecho 2

Na Figura 34 estão ilustrados os resultados referentes à análise do perfil do segundo trecho analisado, para as diferentes amplitudes consideradas. O Trecho 2 possui um comprimento total de 250 metros e uma variação de cota de aproximadamente 0,80 metro.

De maneira semelhante ao trecho anterior, nota-se que os valores de RMSE continuam relativamente constantes em determinadas regiões, mantendo-se em torno de 0,010, que pode ser associada à irregularidade intrínseca da via de terra, constante ao longo do perfil.

Nos gráficos é possível relacionar a presença de descontinuidades no perfil longitudinal e os picos de RMSE, ilustrando seu funcionamento.

Figura 34 - Perfil longitudinal e RMSE do Trecho 2.



Fonte: Elaboração própria (2024).

4.3.3. Trecho 3

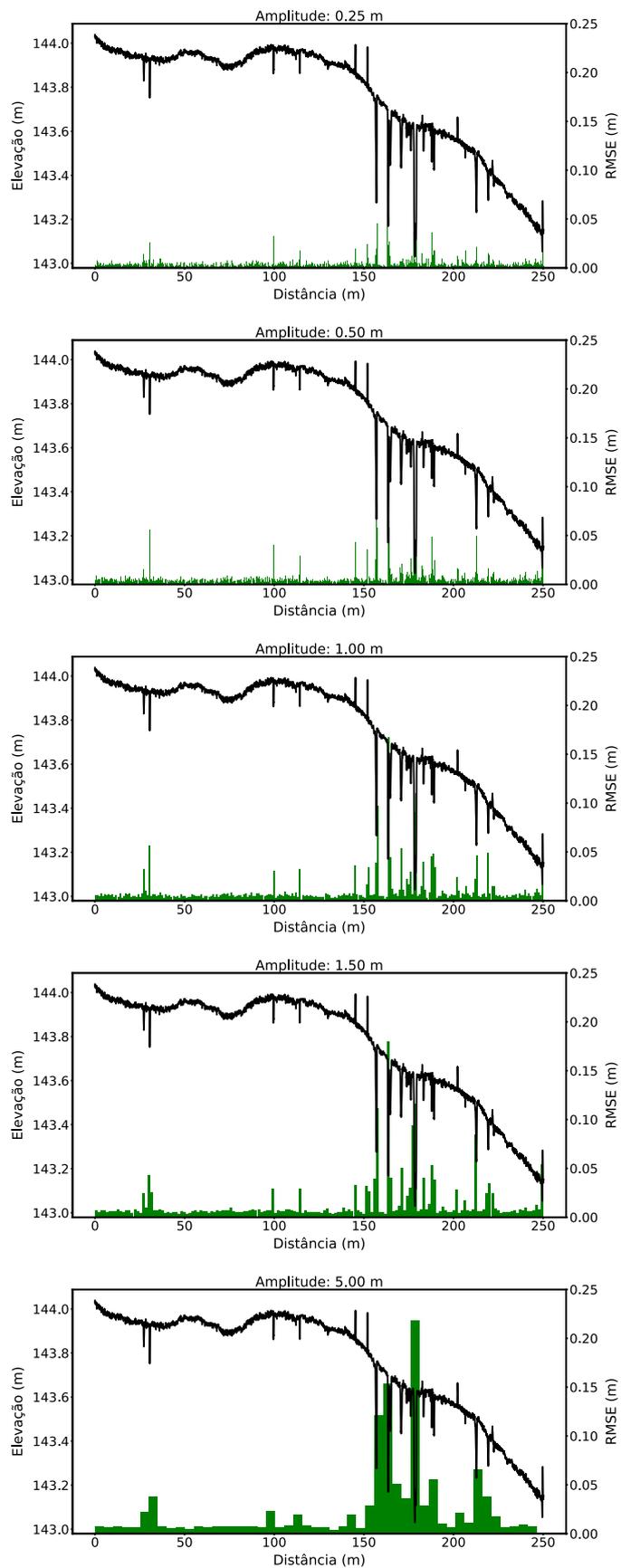
Na Figura 35 estão ilustrados os resultados referentes à análise do perfil do último trecho analisado, para as diferentes amplitudes consideradas. O Trecho 3 possui um comprimento total de 250 metros, com uma variação de cota em torno de 1,00 metro ao longo da extensão avaliada.

Analogamente às análises anteriores, neste trecho também é possível observar valores quase constantes de RMSE, em aproximadamente 0,010, que podem indicar a irregularidade inerente à via de terra.

O RMSE tem uma boa resposta quanto a intensidade dos defeitos, tendo seu maior pico na maior descontinuidade, registrada na distância de 180 metros.

Destaca-se também a capacidade do código em identificar irregularidades nos dois sentidos, apontando com clareza elevações tanto quanto depressões, como os picos positivos do perfil longitudinal nas distâncias de aproximadamente 150 e 200 metros, porém, sem indicar no valor do RMSE o sentido da irregularidade.

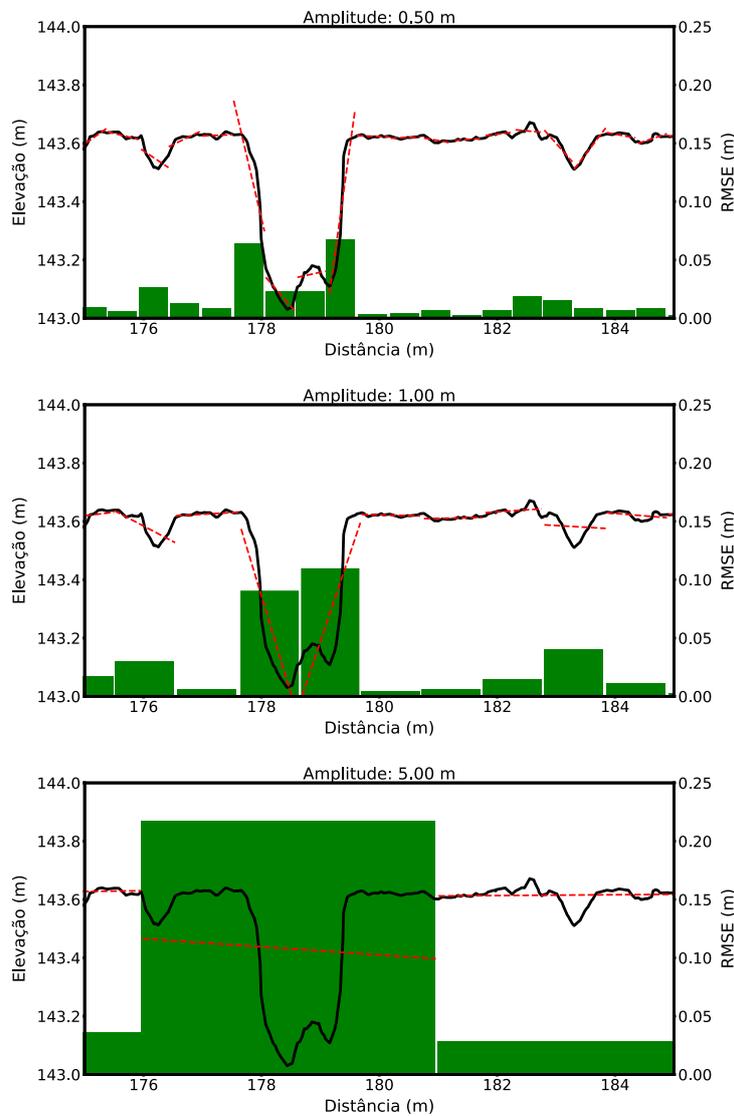
Figura 35 – Perfil longitudinal e RMSE do Trecho 3.



Fonte: Elaboração própria (2024).

Na Figura 36, os gráficos representam o mesmo trecho analisado, considerando diferentes amplitudes. Observa-se que, na amplitude de 5 metros, os valores de RMSE são significativamente maiores em comparação as demais amplitudes. Esse comportamento ocorre porque, nesse caso específico, o perfil do terreno se alinhou mais precisamente à linha de tendência ajustada (representada pela linha vermelha tracejada) nas menores amplitudes, resultando, conseqüentemente, em menores valores de erro. Diante disso, evidencia-se a necessidade da aplicação e comparação de diferentes amplitudes, para identificar padrões indesejáveis.

Figura 36 - Detalhe do defeito no Trecho 3.



Fonte: Elaboração própria (2024).

4.4. Síntese dos resultados

Neste estudo, os resultados obtidos nas seções virtuais, de controle e reais demonstraram que o código foi capaz de identificar áreas com a presença de irregularidades, por meio de picos nos valores de RMSE.

As seções virtuais permitiram verificar a aplicação do código em terrenos planos, inclinados e curvos, identificando as regiões com irregularidades a partir da simulação de defeitos com alturas variando entre 1 e 8 cm em todos os cenários e para todas as amplitudes testadas.

Posteriormente, a aplicação em trechos de controle permitiu validar o funcionamento do código em seções longitudinais extraídas dos modelos tridimensionais gerados a partir do levantamento de dados com drone, possibilitando a captura de variações milimétricas.

Por fim, as seções reais confirmaram o funcionamento do método em estradas na cidade de Alegrete, com trechos de 250 metros, em estradas com diferentes estados de conservação.

Esses achados, quando analisados em conjunto, sugerem que o levantamento de dados com o uso de VANTs, aliado ao código para análise da seção de interesse, constitui em um método viável para aplicação em diversos cenários. Essa abordagem reduz a necessidade de operadores em campo, diminui os custos com veículos adaptados e torna o processo mais ágil.

O imageamento dos trechos reais, considerando o drone utilizado e os parâmetros de voo adotados, permitiu o registro de, em média, até 3 km por bateria. Ressalta-se que, para aplicação prática em grandes extensões, existem no mercado opções de VANTs com maior autonomia, embora com custos mais elevados.

Quanto às amplitudes de análise utilizadas, não foi possível definir qual apresentou melhor desempenho, pois sua eficácia variou conforme a situação. Amplitudes menores permitiram identificar o início e o fim das discontinuidades, enquanto amplitudes maiores também foram eficazes na detecção de regiões com irregularidades.

Em uma aplicação prática, ambas podem ser utilizadas para indicar quais segmentos de uma via apresentam elevada irregularidade e necessitam de reparos, porém, evidencia-se a necessidade da aplicação e comparação de diferentes amplitudes, para identificar padrões indesejáveis.

Para o acompanhamento e observação da evolução dos danos ao longo do tempo, ainda existem dificuldades em traçar seções transversais perfeitamente sobrepostas às anteriores. Para isso, o emprego de pontos de controle georreferenciados, com precisão milimétrica, pode garantir a consistência na comparação entre os diferentes levantamentos.

Não é imediatamente possível estabelecer uma relação direta entre a magnitude do defeito e um valor específico de RMSE, pois essa métrica atua apenas como um indicativo da existência de descontinuidade na região analisada. Por se tratar de um erro quadrático médio, a informação sobre o sinal do perfil é perdida, assim a descontinuidade é apenas detectada, sem indicação se ela é positiva ou negativa.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo consistiu no desenvolvimento de um método simplificado para identificar regiões com presença de irregularidades em estradas vicinais, com base na análise de modelos tridimensionais gerados a partir de imageamento por drone.

A aplicação do Erro Quadrático Médio (RMSE) permitiu avaliar a dispersão dos pontos do perfil analisado e dos previstos pela linha de tendência, indicando regiões de irregularidades e com presença de descontinuidades.

O desenvolvimento e aplicação do código desenvolvido em Python proporcionou agilidade e consistência nas análises em diferentes cenários e variadas amplitudes de análise.

Dentre as principais vantagens do método proposto, destaca-se a possibilidade de avaliação remota das condições das vias, que reduz a necessidade de deslocamento de equipes técnicas para campo.

Em todas as situações analisadas, o código foi capaz de identificar áreas críticas com a presença de irregularidades, por meio de picos nos valores de RMSE. Mesmo em regiões com valores de RMSE diferentes de zero ao longo de todo o perfil, devido às irregularidades inerentes ao perfil, e ao fato de o código realizar ajustes por tendências lineares, pode-se observar valores destoantes, que indicam descontinuidades. Dessa forma, o trabalho demonstrou a viabilidade técnica do código desenvolvido.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

- Desenvolvimento de uma abordagem automatizada para todas as etapas do processo, desde o levantamento das imagens até a análise dos dados, de modo a reduzir ao máximo a intervenção manual;
- Exploração de métodos para a detecção de diferentes tipos de defeitos além das descontinuidades longitudinais;
- Estudar a avaliação de regiões contínuas em vez de seções lineares, que permitam uma avaliação mais abrangente da área de rolamento;
- Estudo do uso de softwares de código aberto, que gerem exclusivamente a malha tridimensional sem elementos visuais adicionais, visto que esses não são essenciais para os objetivos propostos no trabalho;
- Relacionar os dados obtidos com valores de serventia, visando alimentar um sistema de gerenciamento, tornando análise integrada e acessível para tomada de decisões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADOLFO, J.; LUDWIG, J. Low-Cost Video Image Processing System for Evaluating Pavement Surface Distress. 1992. **TRANSPORTATION RESEARCH RECORD**, v. 1348, p. 63. Disponível em: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1992/1348/1348-009.pdf>

Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). **Monitoração de pavimento BR-163/MT, BR-163/PA e BR-230/PA**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/rodovias/concessionarias/lista-de-concessoes/via-brasil/relatorios-de-monitoracao/2023/viabrazil-br0163-000-e-mon-000-rm-pv0-iri.pdf>

_____. **Procedimento para Levantamento Visual Contínuo Informatizado (LVCI) pelo Método da Varredura**. 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/rodovias/relatorios-de-pesquisa-rdt/projetos-rdt/via-040/finalizado/procedimento-para-levantamento-visual-contínuo-informatizado-lvci-pelo-metodo-da-varredura.pdf>

AGISOFT LLC. **Agisoft Metashape Professional Edition**. Versão 1.7. 2021. Disponível em: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_7_en.pdf.

ALDEA, Emanuel; LE HÉGARAT-MASCLE, Sylvie. Robust crack detection for unmanned aerial vehicles inspection in an a-contrario decision framework. **Journal of Electronic Imaging**, v. 24, n. 6, p. 061119-061119, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1117/1.JEI.24.6.061119>.

AL-SULEIMAN, T. I.. Effect of human factor on variability of pavement condition data. **International Conference on Advances in Civil and Environmental Engineering**. 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/304136744>.

BARTHOLOMEU, D. B.; CAIXETA FILHO, J. V.. Impactos econômicos e ambientais decorrentes do estado de conservação das rodovias brasileiras: um estudo de caso. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 46, n. 3, p. 703–738, jul. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-20032008000300006>. Acesso em: agosto de 2024.

BRASIL. **Código de Trânsito Brasileiro**. Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 24 set. 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19503compilado.htm. Acesso em: agosto de 2024.

CAFISO, Salvatore; DI GRAZIANO, Alessandro; BATTIATO, Sebastiano. **Evaluation Of Pavement Surface Distress Using Digital Image Collection and Analysis**. 2006.

CHANG, K. T., CHANG, J. R., & LIU, J. K. Detection of Pavement Distresses Using 3D Laser Scanning Technology. **Computing in Civil Engineering**. 2005. Disponível em: [do.org/10.1061/40794\(179\)103](https://doi.org/10.1061/40794(179)103).

COELHO, Luiz; BRITO, Jorge Nunes. **Fotogrametria digital**. EdUERJ, 2007. Disponível em: http://www.efoto.eng.uerj.br/images/Documentos/fotogrametria_digital_revisado.pdf

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, CNT. **Pesquisa CNT de rodovias**. 2023. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br>. Acesso em: agosto de 2024.

DALOSTO, João Augusto; COLTURATO, Silvio Cesar; PASQUALETTO, Antônio. Estradas Vicinais de Terra: estudo técnico da rodovia MT-336. **Enciclopédia Biosfera**, v. 13, n. 23, 2016.

DE PAOLI, Bruna Lopes; TRINDADE, Carlos Alberto. Boas práticas do uso da técnica de Structure from Motion. 2015. Anais XVII **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1423.pdf>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). DNIT 006/2003 – PRO: **Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos - Procedimento**. Rio de Janeiro: IPT, 2003a.

_____. DNIT 007/2003 – PRO: **Levantamento para avaliação da condição de superfície de subtrechos homogêneos de rodovias de pavimentos flexíveis e semirrígidos - Procedimento**. Rio de Janeiro: IPT, 2003b.

_____. DNIT 008/2003 – PRO: **Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos - Procedimento**. Rio de Janeiro: IPT, 2003c.

_____. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de conservação rodoviária**. 2. ed. - Rio de Janeiro, 2005. 564p. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/710_manual_de_conservacao_rodoviaria.pdf .

DIAS, Larissa Martins. **Avaliação das condições de superfície do pavimento da rodovia RN–233 no trecho entre Apodi e Caraúbas**. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/8132>.

DJI. **Manual do usuário: Drone DJI Mavic 2 Enterprise Advanced**. 2021. Disponível em: <https://www.dji.com/br/support/product/mavic-2-enterprise-advanced>. Acesso em: setembro de 2024.

DOBSON, R. J.; BROOKS, C.; ROUSSI, C.; COLLING, T. Developing an unpaved road assessment system for practical deployment with high-resolution optical data collection using a helicopter UAV. 2013. **International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)**, Atlanta, GA, USA, pp. 235-243. Disponível em: doi.org/10.1109/ICUAS.2013.6564695.

EISENBEISS, H. (2004). **A Mini Unmanned Aerial Vehicle (UAV): System Overview and Image Acquisition**, International Workshop on Processing and Visualization Using High Resolution Imagery, Pitsanulok. 2004.

ERSOZ, A.; PEKCAN, O.; TEKE, T. Crack identification for rigid pavements using unmanned aerial vehicles. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Proceedings of the Building up Efficient and Sustainable Transport Infrastructure**. 2017.

FERREIRA, Edgar Ricardo. **Automatic procedures to support the evaluation of pavements with the use of digital images**. 2010. 263 f. Tese (Doutorado em

Geotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010. Disponível em: <http://locus.ufv.br/handle/123456789/819>.

FONTENELE, Heliana Barbosa. **Estudo para adaptação de um método de classificação de estradas não pavimentadas às condições do município de São Carlos/SP**. 2001. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-10072017-174708/>

GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL; SECRETARIA DE PLANEJAMENTO, GOVERNANÇA E GESTÃO. **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul**. 7^a Ed. 2022. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/conselhos-regionais-de-desenvolvimentocoredes>. Acesso em: agosto de 2024.

GRAMANI, Marcelo Fischer *et al.* O uso de drone multirrotor de pequeno porte para diagnóstico e monitoramento de acidentes geológicos. In: **XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG) 2018**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/327546671>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Panorama do município de Alegrete**. 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/alegrete/panorama>. Acesso em: setembro de 2024.

JOUAV. ***A comprehensive guide to using ground control points for drone surveying***. 2024. Disponível em: <https://www.jouav.com/blog/ground-control-points.html>. Acesso em: setembro de 2024.

KIM, Taehyeong; RYU, Seung-Ki. Review and analysis of pothole detection methods. **Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences**, v. 5, n. 8, p. 603-608, 2014.

LOULIZI, A., AL-QADI, I. L., & LAHOUAR, S. Optimization of Ground-Penetrating Radar Data to Predict Layer Thicknesses in Flexible Pavements. **Journal of Transportation Engineering**, 129(1), 93–99. 2003. Disponível em: [doi.org/10.1061/\(asce\)0733-947x\(2003\)129:1\(93\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-947x(2003)129:1(93)).

MANJUSHA, M., & SUNITHA, V. A review of advanced pavement distress evaluation techniques using unmanned aerial vehicles. ***International Journal of Pavement Engineering***. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2268796>.

MCGHEE, Kenneth H. **Automated pavement distress collection techniques**. Transportation Research Board, 2004.

MELO JÚNIOR, C. M.; EVANGELISTA JUNIOR, F.; SILVA, L. S. da; NEPOMUCENO, A. A. Geração de mapas de danos de fachadas de edifícios por processamento digital de imagens capturadas por Vant e uso de fotogrametria digital. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 211-226. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000300277>.

MUNIZ, Sérgio Ricardo. **Introdução à Estatística**. 2014. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/169799/mod_resource/content/0/Introducao_Estatistica__plc0016_14.pdf. Acesso em: 29 jan. 2025

NAPPO, N.; MAVROULI, O.; NEX, F.; WESTEN, C.; GAMBILLARA, R.; MICHETTI, A. Use of UAV-based photogrammetry products for semi-automatic detection and classification of asphalt road damage in landslide-affected areas. **Eng. Geol.** 2021, 294, 106363.

NECKEL, N. R.; VIVAN, G. M.; SOARES, A. C. V.; LONGHINI, R. H. O.; VALQUES, I. J. B. Drone and vants as a tool for surveying hard-to-reach areas. **Brazilian Journal of Development**. 2021. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/41122>.

ODA, Sandra. **Caracterização de uma rede municipal de estradas não-pavimentadas**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995. Disponível em: doi.org/10.11606/D.18.1995.tde-14012005-161818. Acesso em: setembro de 2024.

OLIVEIRA, Mário José Garrido de. **Hierarquização para orientar a manutenção de rodovias não-pavimentadas**. 2005. Tese (Doutorado em Infraestrutura de Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos,

Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: doi.org/10.11606/T.18.2005.tde-23112006-082838.

OPPONG-ADU, Welbeck. **Mapping of Road Surface Condition features for Unpaved Roads Through the use of Remotely Sensed Imagery from Unmanned Aerial Vehicle.** 2023. Disponível em <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2623642/v1>.

PAN, Y.; ZHANG, X.; CERVONE, G.; YANG, L. Detection of asphalt pavement potholes and cracks based on the unmanned aerial vehicle multispectral imagery. **IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.** 2018.

PIX4D. **Conceitos básicos para conhecer a fotogrametria.** 2022. Disponível em: <https://www.pix4d.com/es/blog/conceptos-basicos-conocer-fotogrametria>.

ROMERO-CHAMBI, Eduardo *et al.* Analysis of optimal flight parameters of unmanned aerial vehicles (UAVs) for detecting potholes in pavements. **Applied Sciences**, v. 10, n. 12, p. 4157, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10124157>.

SAAD, Azri Mat; TAHAR, Khairul Nizam. Identification of rut and pothole by using multicopter unmanned aerial vehicle (UAV). **Measurement**, v. 137, p. 647-654, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.093>

SAEED, Nausheen *et al.* A review of intelligent methods for unpaved roads condition assessment. **15th IEEE conference on industrial electronics and applications (ICIEA).** 2020. Disponível em doi.org/10.1109/ICIEA48937.2020.9248317.

SCHIAVON, G.S. Avaliação objetiva e subjetiva em superfície de pavimento flexível em trecho urbano – Análise da distância entre estações de avaliação em subtrechos homogêneos. **Revista Científica Eletrônica**, Vol.10, n.10, 2017. Disponível em: doi.org/10.22533/at.ed.71820090714

SILVA, L.; BLAS, H.; GARCÍA, D.; MENDES, A.; GONZÁLEZ, G. An architectural multi-agent system for a pavement monitoring system with pothole recognition in UAV images. **Sensors.** 2020.

SILVA, Matheus *et al.* ANÁLISE DE UM ÍNDICE DE CLASSIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS URBANOS. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão (ISSN: 2525-4782)**, v. 6, n. 2, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.21575/25254782rmetg2021vol6n21305>. Acesso em: setembro de 2024.

SISTEMA NACIONAL DE VIAÇÃO, SNV. Extensão das rodovias nacionais. 2015. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/atlas-e-mapas/pnv-e-snv>. Acesso em julho de 2024.

VASCONCELOS FERNANDES, R. T. *et al.* Mapeamento de manifestações patológicas em pavimento asfáltico por meio de uso de drones. **Rev. ALCONPAT**, Mérida, v. 11, n. 1, p. 61-72. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.521>.

VIANA, Camila Duelis. **Fotogrametria digital multi-escala para aquisição de dados estruturais**. 2021. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. Disponível em: doi.org/10.11606/T.44.2021.tde-18012022-122057.

VISSER, A. T.; HUDSON, W. R. **Performance, Design, and Maintenance Relationships for Unpaved Low-Volume Roads**. 1983. Disponível em: <https://trid.trb.org/View/194708>. Acesso em: setembro de 2024.

WESTOBY, M. J.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N.F.; HAMBREY, M.J.; REYNOLDS, J.M. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, **Geomorphology**, Volume 179, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>.

ZAGHINI, R. C. *et al.* **Influência da altura de voo de veículo aéreo não tripulado (VANT) na identificação e dimensionamento de defeitos de pavimentos flexíveis. Anais do congresso de pesquisa e ensino em transportes**. Campinas, Galoá, Santos. 2023. Disponível em: <https://proceedings.science/anpet/anpet-2023/trabalhos/influencia-da-altura-de-voo-de-veiculo-aereo-nao-tripulado-vant-na-identificacao?lang=pt-br>.

ZHANG, C. and ELAKSHER, A. An Unmanned Aerial Vehicle-Based Imaging System for 3D Measurement of Unpaved Road Surface Distresses. 2012.

Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 27: 118-129.
Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2011.00727.x>

ZHANG, Chunsun et al. An UAV-based photogrammetric mapping system for road condition assessment. **Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci**, v. 37, p. 627-632, 2008. Disponível em: https://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/5_pdf/109.pdf.

APÊNDICE A

```
# O código lê um arquivo .csv e calcula o RMSE em intervalos de amplitude.

import sys
import os
from tkinter import Tk, filedialog, simpledialog

# Módulos externos
from functions import svg_plot as svg
from functions import maths

# Função para selecionar o arquivo de entrada
def select_file():
    """
    Abre uma janela de diálogo para o usuário selecionar um arquivo CSV.

    Retorna:
        str: Caminho do arquivo selecionado ou None se o usuário cancelar.
    """
    root = Tk()
    root.withdraw() # Esconde a janela principal do tkinter
    file_path = filedialog.askopenfilename(
        title="Selecione o arquivo CSV",
        filetypes=[("CSV files", "*.csv"), ("All files", "*.*")]
    )
    return file_path

# Função para solicitar a amplitude
def input_amplitude():
    """
    Abre uma janela de diálogo para o usuário inserir o valor da amplitude.

    Retorna:
        float: Valor da amplitude ou None se o usuário cancelar.
    """
    root = Tk()
    root.withdraw() # Esconde a janela principal do tkinter
    amplitude = simpledialog.askfloat(
        "Amplitude",
        "Digite o valor da amplitude:",
        minvalue=0.0, # Valor mínimo permitido
        maxvalue=100.0 # Valor máximo permitido
    )
    return amplitude

# Entradas do usuário
file_in = select_file() # Seleciona o arquivo CSV
if not file_in: # Verifica se o usuário cancelou a seleção
    print("Nenhum arquivo selecionado. O programa será encerrado.")
    sys.exit(1)

amplitude = input_amplitude() # Solicita o valor da amplitude
if amplitude is None: # Verifica se o usuário cancelou a entrada
    print("Amplitude não informada. O programa será encerrado.")
    sys.exit(1)

file_out = f"out_{amplitude:.2f}" # Nome do arquivo de saída
```

```

plot = 1 # Define se o gráfico será exibido (1 = sim, 0 = não)

# Define se as janelas de plotagem serão abertas
svg.plot = plot

# FUNÇÕES LOCAIS
def output_data(data):
    """
    Exibe qualquer array no terminal no formato CSV.

    Parâmetros:
        data (list): Array de dados a ser exibido.
    """
    for row in data:
        print(", ".join(map(str, row)))

# FUNÇÕES PRINCIPAIS
# SEQUÊNCIA PRINCIPAL PARA CÁLCULO DE RMSE
if True:
    # Lê o arquivo CSV
    data_arr = fh.read_csv(file_in)
    # Calcula o RMSE
    rmse = maths.rmse(data_arr, amplitude)
    # Exibe os dados
    output_data(rmse)
    # Salva os dados em um arquivo CSV
    fh.save_csv(file_out + ".csv", rmse)
    # Salva o gráfico
    svg.final_chart(file_out + ".svg", data_arr, rmse, amplitude)

```

- Funções matemáticas:

```

import numpy as np

def rotate_points(x, y, angle, origin=None):
    """
    Rotaciona um ponto em torno de uma origem. O ângulo deve estar em
    radianos.

    Parâmetros:
        x (float): Coordenada x do ponto.
        y (float): Coordenada y do ponto.
        angle (float): Ângulo de rotação em radianos.
        origin (list): Coordenadas [x, y] da origem. Se None, usa [0, 0].

    Retorna:
        list: Novas coordenadas [x, y] após a rotação.
    """
    if origin is None:
        origin = [0, 0]
    x_rot = (x - origin[0]) * np.cos(angle) + (y - origin[1]) * np.sin(angle)
    y_rot = (y - origin[1]) * np.cos(angle) - (x - origin[0]) * np.sin(angle)
    x_rot += origin[0]
    y_rot += origin[1]
    return [x_rot, y_rot]

def rotate_line(points, angle, origin=None):
    """
    Rotaciona uma linha (conjunto de pontos) em torno de uma origem. O ângulo
    deve estar em radianos.

    Parâmetros:
        points (list): Lista de pontos no formato [[x1, y1], [x2, y2], ...,
        [xn, yn]].
        angle (float): Ângulo de rotação em radianos.
        origin (list): Coordenadas [x, y] da origem. Se None, usa [0, 0].

    Retorna:
        list: Lista de pontos rotacionados.
    """
    if origin is None:
        origin = [0, 0]
    rotated_points = []
    for point in points:
        new_point = rotate_points(point[0], point[1], angle, origin)
        rotated_points.append(new_point)
    return rotated_points

def trendline(points):
    """
    Calcula a linha de tendência (regressão linear) para um conjunto de
    pontos.

    Parâmetros:
        points (list): Lista de pontos no formato [[x1, y1], [x2, y2], ...,
        [xn, yn]].

    Retorna:
        list: Inclinação (em radianos) e interceptação da linha de tendência.
    """

```

```

"""
xs = [point[0] for point in points]
ys = [point[1] for point in points]
slope, intercept = np.polyfit(xs, ys, 1)
slope_rad = np.arctan(slope) # Converte a inclinação para radianos
return [slope_rad, intercept]

def squeeze_plot(points, axs_max):
    """
    Comprime o gráfico no eixo X para um valor máximo especificado.

    Parâmetros:
        points (list): Lista de pontos no formato [[x1, y1], [x2, y2], ...,
        [xn, yn]].
        axs_max (float): Valor máximo para o eixo X.

    Retorna:
        list: Lista de pontos comprimidos.
    """
    squeezed_points = []
    for point in points:
        new_x = point[0] * axs_max / points[-1][0]
        squeezed_points.append([new_x, point[1]])
    return squeezed_points

def flatten_plot(points, amp):
    """
    Nivelam um gráfico em segmentos de amplitude fixa.

    Parâmetros:
        points (list): Lista de pontos no formato [[x1, y1], [x2, y2], ...,
        [xn, yn]].
        amp (float): Amplitude dos segmentos.

    Retorna:
        list: Lista de pontos nivelados.
    """
    print("FIXME: Amplitude is in data lines, not length!")
    count = 0 # Contador para verificar se a amplitude foi atingida
    amp_arr = [] # Valores da amplitude
    out = [] # Novo array de pontos após os cálculos

    for point in points:
        amp_arr.append(point)
        count += 1
        if count >= amp:
            trend = trendline(amp_arr)
            rotated_line = rotate_line(amp_arr, trend[0], [amp_arr[0][0],
            amp_arr[0][1]])
            out.extend(rotated_line)
            amp_arr.clear()
            count = 0
    return out

def rmse(points, amp):
    """
    Calcula o erro quadrático médio (RMSE) para vários segmentos.

    Parâmetros:

```

```

    points (list): Lista de pontos no formato [[x1, y1], [x2, y2], ...,
[xn, yn]].
    amp (float): Amplitude dos segmentos.

Retorna:
    list: Lista de valores de RMSE para cada segmento.
"""
rmse_arr = [] # Valores de RMSE
init_dist = 0
amp_arr = [] # Valores da amplitude

for point in points:
    amp_arr.append(point)
    if point[0] - init_dist >= amp:
        trend = trendline(amp_arr)
        xsum = sum((p[1] - (np.tan(trend[0]) * p[0] + trend[1])) ** 2 for
p in amp_arr)
        rmse_arr.append([init_dist + (point[0] - init_dist) / 2, (xsum /
len(amp_arr)) ** 0.5])
        amp_arr.clear()
        init_dist = point[0]
return rmse_arr

```

- Criação dos gráficos:

```
import matplotlib.pyplot as plt

# Configurações globais de estilo
plot = 1 # Define se o gráfico será exibido (1 = sim, 0 = não)

def final_chart(file, profile, plot2, amplitude):
    """
    Plota um gráfico misto (linha e barras) e salva em formato SVG.

    Parâmetros:
        file (str): Nome do arquivo SVG de saída.
        profile (list): Lista de listas no formato [[x1, y1], [x2, y2], ...,
        [xn, yn]] para o perfil.
        plot2 (list): Lista de listas no formato [[x1, y1], [x2, y2], ...,
        [xn, yn]] para o segundo gráfico (barras).
        amplitude (float): Valor da amplitude para o título do gráfico.
    """
    # Extrai dados do perfil
    distance1 = [point[0] for point in profile] # Eixo X (distância)
    altitude = [point[1] for point in profile] # Eixo Y (elevação)

    # Extrai dados do segundo gráfico (barras)
    distance2 = [point[0] for point in plot2] # Eixo X (distância)
    RMSE = [point[1] for point in plot2] # Eixo Y (RMSE)

    # Cria a figura e ajusta o tamanho
    fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(18, 9))

    # Cria um segundo eixo Y compartilhando o mesmo eixo X
    ax2 = ax1.twinx()

    # Plota o perfil (linha)
    ax1.plot(distance1, altitude, color='black', linewidth=2.0,
label='Perfil')

    # Plota o segundo gráfico (barras)
    ax2.bar(distance2, RMSE, color='green', width=amplitude, alpha=0.6,
label='RMSE')

    # Configurações do eixo X e primeiro eixo Y
    ax1.set_xlabel('Distância (m)', fontsize=font_axis_label, labelpad=10)
    ax1.set_ylabel('Elevação (m)', fontsize=font_axis_label, labelpad=15)
    ax1.tick_params(axis='both', labelsize=font_axis)
    ax1.set_title(f'Amplitude: {amplitude:.2f} m', fontsize=font_title)

    # Configurações do segundo eixo Y
    ax2.set_ylabel('RMSE (m)', fontsize=font_axis_label, labelpad=15)
    ax2.tick_params(axis='both', labelsize=font_axis)

    # Ajusta a ordem das plotagens para garantir que o perfil fique visível
    ax1.set_zorder(1) # Coloca o perfil na frente
    ax1.patch.set_visible(False) # Remove o fundo do primeiro eixo

    # Salva o gráfico em formato SVG
    plt.savefig(file, format="svg", bbox_inches='tight')
```