



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

PAULO DE SOUZA LIMA NETO

**UMA METODOLOGIA PARA LEVANTAMENTO DE DEFEITOS EM PAVIMENTOS
URBANOS FLEXÍVEIS COM O USO DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA**

FORTALEZA

2019

PAULO DE SOUZA LIMA NETO

UMA METODOLOGIA PARA LEVANTAMENTO DE DEFEITOS EM PAVIMENTOS
URBANOS FLEXÍVEIS COM O USO DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L71m Lima Neto, Paulo de Souza.

Uma metodologia para levantamento de defeitos em pavimentos urbanos flexíveis com o uso de aeronave remotamente pilotada / Paulo de Souza Lima Neto. – 2019.
103 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira.

1. Aeronave remotamente pilotada. 2. Rodovias. 3. Defeitos. 4. Fotogrametria. 5. Pavimentos. I. Título.

CDD 388

PAULO DE SOUZA LIMA NETO

UMA METODOLOGIA PARA LEVANTAMENTO DE DEFEITOS EM PAVIMENTOS
URBANOS FLEXÍVEIS COM O USO DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovado em: __/__/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Heber Lacerda de Oliveira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Carlos Augusto Uchôa da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Viviane Adriano Falcão
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Francisco Heber, pelo apoio, encorajamento, disposição, gentileza e atenção durante toda minha vida acadêmica.

Ao Prof. Daniel Oliveira, que me proporcionou todo o conhecimento e as ferramentas para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores Carlos Augusto Uchôa da Silva e Viviane Adriano Falcão, por aceitarem participar da minha banca, ajudando o desenvolvimento do trabalho com suas devidas correções e sugestões.

Ao Departamento de Engenharia de Transportes, por toda a infraestrutura física e intelectual, provendo, assim, todos os ensinamentos para a realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro fornecido ao longo do projeto.

Aos meus colegas e a minha namorada, pelo companheirismo e ajuda e pelos momentos felizes e descontraídos, que jamais serão esquecidos.

À minha família, por todo o apoio e por serem os maiores responsáveis por eu ter chegado até aqui.

Por fim, agradeço a Deus, que está comigo sempre, permitindo-me alcançar todos os meus objetivos traçados.

RESUMO

Os defeitos de pavimentos devem ser gerenciados de forma que não proporcionem riscos e maiores custos aos usuários. Com isso, alguns métodos para levantamento de defeitos já foram estudados e elaborados como perfilômetro a laser, *pavement scanner*, imagens de satélites, entre outros, mas poucos são aplicados pelo poder público e concessionárias, alguns por questões de custos e logística de transporte e outros por falta de precisão. Com a ascensão da utilização de RPAs (*Remotely Piloted Aircrafts*) em diversas áreas no mundo, possibilitou-se que a necessidade de novos métodos de levantamentos de defeitos em pavimentos possa ser, em parte, suprida, ocasionando maior desempenho tanto qualitativa quanto quantitativamente. Assim, este trabalho tem como objetivo desenvolver um procedimento de levantamento de defeitos em pavimentos asfálticos urbanos com a utilização de RPAs, visando facilitar as tomadas de decisões para indicação de manutenção em vias urbanas, verificando e comparando os dados obtidos pelos levantamentos para que seja possível determinar qual a melhor metodologia a ser empregada. Dessa maneira, nesta investigação usou-se um RPA Multirotor para obtenção de imagens da superfície de pistas de rolamento em pavimentos flexíveis e *softwares* para planejamento de voo e processamento de imagens de uma determinada via da cidade de Fortaleza – CE. Por meio de interpretação visual, foi possível identificar e mensurar os defeitos dos tipos panelas e remendos no pavimento, em voos com as alturas de 30, 40, 50 e 60 metros, sem e com o uso de pontos de controle, utilizando 2 velocidades distintas (média e rápida) e dois métodos de levantamentos (*Grid* e *Linear*) sendo possível verificar a variação das medidas obtidas nos levantamentos, para, assim, propor um método. Concluiu-se que as diferentes variáveis como: alturas de voo, velocidade, métodos de levantamento e utilização de pontos de controle interferem no levantamento de defeitos em pavimentos, além de ser perceptível que o tamanho e tipo do defeito influencia na porcentagem de erro da mensuração. Também foi possível uma comparação estatística entre os métodos de levantamento na altura de 30 metros, já que essa altura foi a que obteve melhores resultados preliminarmente, tendo como conclusão maior precisão para levantamentos de defeitos em pavimento com a utilização de pontos de controle no método *Linear*.

Palavras-chave: RPAs, Rodovias, Defeitos, Fotogrametria, Pavimentos.

ABSTRACT

Defects of pavements must be managed in such a way that do not pose risks and higher costs to the users. Thus, some methods for collecting data on defects have been studied and developed, but only a few are applied by the public authorities and utilities, some due to cost and transportation logistics and others for the lack of precision. With the increasing use of RPAs in several areas around the world, it has been possible that this need can be partially met, leading to a higher performance both qualitatively and quantitatively for data collection of pavement defects, since its use for imaging is a reality in the context of Transport Engineering. Therefore, this work has the objective of developing a procedure to collect defects in flexible pavements with the use of RPAs, in order to facilitate decision making for indication of maintenance on urban roads with asphaltic pavements, verifying and comparing the data obtained so that it is possible to determine the best methodology to be used. In this investigation, a RPA Multicopter was used to obtain images of the surface of rolling tracks on flexible pavements and flight plan software and image processing of a certain road in the city of Fortaleza - CE. By means of visual interpretation, it was possible to identify and measure the defects of the types of pots and patches on the pavement, on flights with heights of 30, 40, 50 and 60 meters, with and without the use of control points, using two different speeds (medium and fast) and two collecting methods (Linear and Grid), so it is possible to verify the variation in measurements obtained from collecting, to thereby propose a method. It was concluded that the different variables such as: flight height, speed, collecting methods and use of control points interfere in the defects collection in pavements, in addition to being noticeable that the size and type of the defect influences the measurement error percentage. It was also possible to make a statistical comparison between the survey methods at the height of 30 meters, which was the one that obtained better preliminary results, having as conclusion a greater precision for the collection of data on pavement defects with the use of control points in the method Linear.

Keywords: RPAs, Roads, Defects, Photogrammetry, Pavement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desafios para a Gestão de Pavimento.	17
Figura 2 – Sobreposição lateral e longitudinal em voos fotogramétricos.	20
Figura 3 – Exemplificação de levantamento aéreo com sobreposição longitudinal.	21
Figura 4 – Exemplificação de levantamento aéreo com sobreposição lateral.	22
Figura 5 – Divisão de Classes de RPAs de acordo com a ANAC.	25
Figura 6 – Modelos de RPAs.	28
Figura 7 – Sistemas embarcados Phantom 4 Pro.	29
Figura 8 – Demonstração de altura de voo x área mapeada.	31
Figura 9 – Diferença de imagens com diferentes GSDs.	31
Figura 10 – Cálculo do GSD.	32
Figura 11 – Defeitos em pavimento flexível, panela (a) e Remendo (b).	35
Figura 12 – Phantom 4 Pro.	46
Figura 13 – Sistemas embarcados Phantom 4 Pro.	47
Figura 14 – Plano de Voo Software Pix4D.	49
Figura 15 – Plano de Voo Software Map Pilot.	49
Figura 16 – Avenida Corrêa Lima com destaque para a localidade de estudo.	51
Figura 17 – Fluxograma das etapas metodológicas.	52
Figura 18 – Exemplos de painéis encontrados na região de estudo.	53
Figura 19 – Exemplos de remendos encontrados na região de estudo.	53
Figura 20 – Template Pix4D no momento do levantamento.	55
Figura 21 – Template Map Pilot no momento do levantamento.	55
Figura 22 – Exemplo de ponto de controle.	57
Figura 23 – Fluxograma de processamento.	59
Figura 24 – Ortomosaico gerado após processamento.	60
Figura 25 – Ortomosaico com medições feitas.	61
Figura 26 – Comparação de processamento sem e com pontos de controle.	61
Figura 27 – Comparação de panela em diferentes alturas método Grid.	66
Figura 28 – Comparação de panela em diferentes alturas Método Linear.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de determinação do estado da superfície segundo IGGE e ICPF.	39
Tabela 2 – Especificações técnicas Phantom 4 Pro.	46
Tabela 3 – Relação custo benefícios RPAs DJI	47
Tabela 4 – Comparação entre valores de GSD por aplicativo utilizado.	54
Tabela 5 – Coordenadas dos pontos de controle levantados.	58
Tabela 6 – Resultados método Grid para painelas e remendos sem pontos de controle.	63
Tabela 7 – Resultados método Grid para painelas e remendos com pontos de controle.	68
Tabela 8 – Resultados Método Linear para painelas e remendos sem pontos de controle.	71
Tabela 9 – Resultados Método Linear para painelas e remendos com pontos de controle.	74
Tabela 10 – Comparação entre resultados do método Grid com e sem pontos de controle.	76
Tabela 11 – Comparação entre resultados do método Linear com e sem pontos de controle.	78
Tabela 12 – Comparação entre resultados entre métodos Grid e Linear.	80
Tabela 13 – Resultados dos cálculos estatísticos da painela 1 para todos os métodos.	84
Tabela 14 – Resultados dos cálculos estatísticos da painela 2 para todos os métodos.	85
Tabela 15 – Resultados dos cálculos estatísticos da painela 7 para todos os métodos.	86
Tabela 16 – Resultados dos cálculos estatísticos do remendo 2 para todos os métodos.	88
Tabela 17 – Resultados dos cálculos estatísticos do remendo 3 para todos os métodos.	89
Tabela 18 – Resultados dos cálculos estatísticos do remendo 4 para todos os métodos.	90

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparação de erros médios para painelas método Grid sem pontos. .64	.64
Gráfico 2 – Relação erro versus velocidade versus altura para painelas do método Grid sem pontos.64	64
Gráfico 3 – Comparação de erros médios para remendos método Grid sem pontos.65	65
Gráfico 4 – Relação erro versus velocidade versus altura para remendos do método Grid sem pontos.69	69
Gráfico 5 – Comparação de erros médios para painelas método Grid com pontos de controle.69	69
Gráfico 6 – Relação erro versus velocidade versus altura para painelas do método Grid com pontos de controle.70	70
Gráfico 7 – Comparação de erros médios para remendos método Grid sem pontos de controle.71	71
Gráfico 8 – Relação erro versus velocidade versus altura para remendos do método Grid com pontos de controle.70	70
Gráfico 9 – Comparação de erros médios para painelas e remendos no método Linear sem a utilização de pontos de controle.726	726
Gráfico 10 – Comparação de erros médios para painelas Método Linear com pontos de controle.77	77
Gráfico 11 – Comparação de utilização de pontos de controle para painelas método Grid.78	78
Gráfico 12 – Comparação de utilização de pontos de controle para remendos método Grid.79	79
Gráfico 13 – Comparação de utilização de métodos para levantamento de painelas.81	81
Gráfico 14 – Comparação de utilização de métodos para levantamento de remendos.81	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ASP	<i>American Society of Photogrammetry</i>
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DJI	<i>Dà-Jiāng Innovations Science and Technology</i>
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
DoD	Departamento de Defesa dos EUA
DPU	<i>Data Processing Unit</i>
DUEB	Diálogos entre União Europeia e Brasil
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GSD	Ground Sample Distance
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICPF	Índice da Condição do Pavimento Flexível
IGG	Índice de Gravidade Global
IGGE	Índice de Gravidade Global Expedito
LVC	Levantamento Visual Contínuo
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
MNT	Modelo Numérico de Terreno
PCI	<i>Pavement Condition Index</i>
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
PPS	Posicionamento por Ponto Simples
RPA	<i>Remotely-Piloted Aircrafts</i>
RPAS	<i>Remotely Piloted Aircraft System</i>
RPS	<i>Remotely Pilot Station</i>
RSP	<i>Road Surface Profiler</i>
RTK	Posicionamento Relativo Cinemático em Tempo Real
UAVSA	<i>Unmanned Aerial Vehicle Systems Association</i>
VSA	Valor da Serventia Atual

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Considerações iniciais	13
1.2	Questões de pesquisa	14
1.3	Objetivos	15
1.3.1	<i>Objetivo geral</i>	15
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	15
1.4	Justificativa	16
1.5	Estrutura do trabalho	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Fotogrametria e produtos fotogramétricos	19
2.1.1	<i>Mosaicos fotogramétricos</i>	20
2.1.2	<i>Modelo Digital do Terreno</i>	22
2.1.3	<i>Ortofoto</i>	23
2.2	<i>Remotely Piloted Aircraft (RPAs)</i>	24
2.2.1	<i>Classificação das RPAs</i>	24
2.2.2	<i>Legislação brasileira</i>	25
2.2.2.1	<i>ANAC</i>	26
2.2.2.2	<i>DECEA</i>	26
2.2.2.3	<i>ANATEL</i>	26
2.2.3	<i>Tipos e funcionalidades de RPAs</i>	27
2.3	Aerofotogrametria por RPAs	30
2.3.1	<i>Ground Sample Distance (GSD)</i>	30
2.3.2	<i>Cálculo de Altura de Voo</i>	32
2.4	Pontos de controle	33

2.4.1	<i>Métodos de Posicionamento GNSS para materialização de pontos de controle</i>	34
2.5	<i>Defeitos de pavimentos flexíveis</i>	35
2.5.1	<i>Panelas ou buracos</i>	35
2.5.2	<i>Remendos</i>	36
2.6	<i>Métodos para levantamento de defeitos em pavimentos</i>	36
2.6.1	<i>Avaliação objetiva da superfície de pavimentos asfálticos</i>	37
2.6.2	<i>Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos asfálticos</i>	38
2.6.4	<i>Método Pavement Condition Index (PCI)</i>	40
2.6.5	<i>Perfilômetro Laser</i>	41
2.6.6	<i>Pavement Scanner</i>	42
2.6.7	<i>Inspeção de pavimentos com novas técnicas</i>	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS DA PESQUISA	45
3.1	<i>Equipamentos para medição dos defeitos In Loco</i>	45
3.2	<i>Especificações da Aeronave Remotamente Pilotada</i>	45
3.2.1	<i>Sistemas embarcados Phantom 4 Pro</i>	47
3.3	<i>Softwares para planejamento e realização de voo autônomo</i>	48
3.4	<i>Software para processamento de Imagens</i>	50
3.5	<i>Área de estudo</i>	50
3.6	<i>Método</i>	51
3.6.1	<i>Metodologia de levantamento</i>	52
3.6.1.1	<i>Checklist</i>	56
3.6.2	<i>Metodologia de levantamento de pontos de controle</i>	57
3.6.3	<i>Metodologia de processamento</i>	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62

4.1	Método <i>Grid</i>	62
4.1.1	<i>Resultados para processamentos sem pontos de controle</i>	62
4.1.2	<i>Resultados para processamentos com pontos de controle</i>	67
4.2	Método linear.....	71
4.2.1	<i>Resultados para processamentos sem pontos de controle Método Linear</i>	71
4.3	Comparação entre a utilização ou não de pontos de controle	75
4.4	Comparação entre métodos de levantamento.....	80
4.5	Verificação por aplicação de ferramentas estatísticas	82
4.5.1	<i>Verificação em defeitos do tipo panela</i>	83
4.5.2	<i>Verificação em defeitos do tipo remendo</i>	87
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	92
	REFERÊNCIAS.....	95
	ANEXO A	100
	MEMORIAL DESCRITIVO DE DEFEITO.....	100
	ANEXO B	103

1 INTRODUÇÃO

Devido à evolução tecnológica que o mundo vem passando desde a segunda metade do século XX (Terceira Revolução Industrial), novas ferramentas estão sendo empregadas nas mais diversas áreas de trabalho. Assim, é de suma importância o acompanhamento da comunidade técnica e acadêmica no estudo do emprego dessas tecnologias, para que a sociedade as utilize de forma mais segura, com rendimento e produtividade.

1.1 Considerações iniciais

Uma das novas ferramentas introduzidas no mercado de levantamentos aéreos, e que vem sendo cada vez mais aplicada em diversos campos da Engenharia, são as Aeronaves Remotamente Pilotadas; *Remotely-Piloted Aircrafts* (RPA), em Língua Inglesa. Sua empregabilidade refere-se à obtenção de imagens e filmagens comerciais, projetos fotogramétricos, monitoração ambiental, entre outros. O crescimento da utilização das RPAs vem ocorrendo em uma escala global, pois o aumento da demanda destes ocasionou queda no seu custo de aquisição, além de serem criadas várias classes e modelos, que podem variar de simples equipamentos de lazer até equipamentos profissionais específicos.

Na Engenharia de Transportes, o emprego das RPAs ainda se encontra em um estágio inicial. Além disso, há poucos trabalhos teóricos e práticos nessa área, como estudos realizados por Castelo Branco (2016), Di Renzo (2017) e Parente (2017), esses serão abordados em capítulos mais à frente. A Engenharia Rodoviária constitui um ramo do mercado que começou, nesta década, a empregar e a pesquisar essa nova tecnologia como meio de obtenção de dados para construção de novas vias, determinação de volume de jazidas de solos para empréstimo, levantamento de defeitos de pavimentos, contagem de tráfego entre outros fins.

Como principal modo de transporte do País, as rodovias brasileiras devem estar em constante análise, sendo verificado constantemente o seu estado de conservação para que os usuários possam utilizá-las de forma mais segura, com maior conforto e menor custo operacional. Segundo pesquisa feita pela CNT (2018),

o Brasil possui malha rodoviária de 1.720.700 km, representando 61% da movimentação anual de cargas e 95% da de passageiros. A respeito dessa malha, apenas 12,4% é pavimentada. Além disso, 57% das rodovias estaduais e federais analisadas apresentavam algum tipo de problema no pavimento, sinalização ou geometria.

A CNT (2018) ainda verificou que, devido à má condição da malha rodoviária, o custo operacional de transporte de cargas pode ter um aumento entre 18,8% e 91,5%, dependendo do estado de conservação da rodovia. Esses custos podem ser incrementados devido ao gasto desnecessário de combustível e à troca precoce de peças e pneus, bem como ao esforço excessivo causado pela má condição da via. Além destes, os problemas encontrados nas das rodovias causam vários acidentes de alto custo às gestões públicas.

Dessa forma, os defeitos de pavimentos devem ser gerenciados de forma que não proporcionem riscos e maiores custos aos usuários. Existem alguns métodos para levantamento de defeitos de pavimentos como levantamento visual contínuo, avaliação subjetiva da superfície do pavimento, *Pavement Condition Index*, *Pavement Scanner*, entre outros. Todavia, a maioria desses ou demanda bastante tempo e custo ou são bastante subjetivos. Com isso, para que seja possível diminuir a quantidade de tempo, custos e erros dos levantamentos de defeitos em pavimentos, devem-se aplicar e estudar novas tecnologias presentes na atualidade.

Adotando ferramenta como as RPAs para levantamento de defeitos de vias urbanas, é possível obter imagens de alta precisão, além das localidades dos defeitos na malha. Assim, com levantamentos periódicos, torna-se possível uma análise temporal do pavimento e de suas áreas afetadas por defeitos. Vale ressaltar que essa ferramenta não tem como finalidade substituir os métodos existentes, e sim auxiliá-los e agregar melhorias para obtenção de dados.

1.2 Questões de pesquisa

O uso de RPAs encontra-se em uma fase bastante inicial para a Engenharia de Transportes. Nesse sentido, várias questões, ainda, estão sem solução, tais como:

- a) Qual procedimento deve ser seguido para realizar os levantamentos de defeitos de pavimentos urbanos com RPAs?

- b) Quais alturas de voo são mais apropriadas para esse tipo de levantamentos utilizando um quadricóptero?
- c) Quais métodos obtêm melhores resultados para os levantamentos de defeitos em pavimentos urbanos com auxílio de RPAs?
- d) Qual a precisão desses levantamentos de acordo com método e altura?
- e) Quais as diferenças de precisão de acordo com o defeito levantado?
- f) A utilização desse tipo de levantamento é viável em pavimentos urbanos?

Este trabalho trará respostas para todas essas questões, a fim de que, dessa forma, seja possível contribuir com o preenchimento das lacunas sobre o estudo de Engenharia de Transportes.

1.3 Objetivos

Nesta seção serão abordados o objetivo geral e os objetivos específicos do estudo.

1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver um método dedicado de levantamento de defeitos em pavimentos urbanos flexíveis com a utilização de RPA quadricóptero (DJI Phantom 4 Pro), visando facilitar as tomadas de decisões para indicação de manutenção em vias urbanas com pavimentos asfálticos.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar a influência de variáveis como altura de voo, velocidade, método de levantamento e utilização de pontos de controle para análise do procedimento de levantamento;
- b) Elaborar *checklist* para auxílio em períodos pré, durante e pós-voos;
- c) Analisar dados de precisão obtidos em relação à porcentagem de erros de mensuração e estudo estatístico;

- d) Comparar os dados obtidos nos levantamentos *in situ* com os valores obtidos pelos levantamentos com RPA para os defeitos tipo panela e remendo;

1.4 Justificativa

No Brasil, geralmente, são empregados 3 métodos mais usuais para levantamento de defeitos em pavimentos: o primeiro, Levantamento Visual Contínuo (DNIT 008/2003), tem baixa precisão, mas rápida obtenção de dados e baixo custo; o segundo, Avaliação Objetiva (DNIT 006/2003), tem alta precisão com grande período de obtenção de dados e custo relativamente alto; e, por último, há a varredura a laser com uso de um perfilômetro inercial que tem alta precisão, rápida obtenção de dados mas alto custo e difícil acesso para todas as regiões do País. Por essa razão, há necessidade de novos métodos que sejam acurados, rápidos e de baixos custos, quando comparado aos já existentes, para a mensuração de defeitos em pavimentos urbanos, sendo as RPAs uma tecnologia que pode preencher, em parte, os requisitos destacados.

A utilização da RPA vem sendo, cada vez mais, empregada para vários serviços. Estudos de Pessoa *et al* (2017) e Komazaki *et al.* (2017) revelaram que é possível obter bons resultados tanto qualitativos como quantitativos, aplicando esses veículos para auxílio dos levantamentos aerofotogramétricos. O primeiro autor verifica a qualidade posicional de modelo digital de superfície e o segundo, a qualidade geométrica de modelos digitais de terreno.

A *Federal Highway Administration* (FHWA) desenvolveu, juntamente a outros profissionais, *Roadmap* de Gerência de Pavimentos para auxiliar a identificação do caminho que seria necessário para abordar os desafios e as lacunas existentes na Engenharia de Transportes, além de determinar iniciativas e prioridade de pesquisa e desenvolvimento (ZIMMERMAN; PIERCE; KRSTULOVICH, 2010). Castelo Branco (2016), analisando esse *Roadmap*, identificou uma lista de desafios, apresentados na Figura 1, para a Gerência de Pavimentos que ainda não foram solucionados; essa lista encontra-se dividida em desafios com necessidades de curto e longo prazos.

Figura 1 – Desafios para a Gestão de Pavimento.



Fonte: Castelo Branco, 2016.

Como pode-se perceber na Figura 1, existem diversos temas propostos para a gestão de pavimentos, sendo, na área de necessidade de longo prazo, a localidade onde se encontram dois temas relacionados à pesquisa realizada: uso de imagens aéreas para análise de defeitos e identificação de estratégias para incorporação de tecnologias emergentes nos sistemas de gerenciamento de pavimentos.

Castelo Branco (2016) afirma que o *Roadmap* está sendo utilizado como uma orientação mundial. Além da comunidade científica, órgãos públicos e privados, o documento serve como norteamento para novas pesquisas e inovação na área de Gerência de Pavimentos, possibilitando a utilização de novas formas de tecnologias.

A carência de publicações nacionais e até mesmo internacionais sobre a aplicação de RPAs, para auxílio ao levantamento de defeitos de pavimentos, induz a necessidade de maiores estudos para verificar a capacidade dessa nova tecnologia bem como sua aplicabilidade. Principalmente quando os trabalhos publicados não trazem pormenores, como quais os motivos da adoção ou não de diferentes métodos, alturas, velocidades e quantidades de pontos de controle,

além de uma análise mais criteriosa e comparativa dessas variáveis. Dessa maneira, diante do exposto, pretende-se propor um novo método, que seja viável tanto científica quanto tecnicamente.

1.5 Estrutura do trabalho

Esta Dissertação, além deste capítulo introdutório, tem-se, no Capítulo 2, a pesquisa bibliográfica elaborada sobre o tema, que descreve desde a fotogrametria e sua aplicação na Engenharia, até características dos levantamentos realizados. No Capítulo 3, estão presentes os materiais utilizados e o desenvolvimento do programa experimental com os métodos empregados. O Capítulo 4 destina-se à análise de resultados e a comparação com resultados encontrados *in loco*. No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões e sugestões para futuras pesquisas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será abordado o embasamento teórico desta dissertação. Essa fundamentação abrange uma breve explicação sobre fotogrametria e seus produtos, passando por pontos de controle, aeronaves remotamente controladas e, por fim, defeitos de pavimentos e seus métodos de levantamento.

Visto que esta investigação abrange diversas áreas de estudo, foi necessário elaborar ampla pesquisa teórica para definir e descrever a utilização das RPAs para fins fotogramétricos e trazer essa ferramenta para ser empregada na área de gerência de pavimentos flexíveis urbanos.

2.1 Fotogrametria e produtos fotogramétricos

Segundo Tomasseli (2009), o termo fotogrametria tem origem das palavras gregas *photos*, referente à luz, *gramma*, que significa algo desenhado ou escrito, e *metron*, que significa medir. Ou seja, Fotogrametria, significaria medir, graficamente, usando luz.

A definição de Fotogrametria, até a década de 60, era a ciência e a arte de obter medidas confiáveis por meio de fotografias (*American Society of Photogrammetry – ASP*). Com o advento de novos tipos de sensores, uma definição mais abrangente de Fotogrametria foi proposta, também, pela ASP em 1979, como a arte, ciência e tecnologia de obtenção de informação confiável sobre objetos físicos e o meio ambiente por meio de processos de gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas, e padrões de energia eletromagnética radiante e outras fontes (TOMASSELI, 2009).

Segundo Wolf e Dewiitt (2014), a ciência originalmente consistia em analisar fotografias. No entanto, o uso de câmeras de filme diminuiu muito em favor de sensores digitais e, atualmente, o processo está quase automatizado.

A fotogrametria pode ser classificada de diversas formas, sendo uma das principais a classificação por instrumentação adotada para a medição e redução dos dados. Os métodos mais arcaicos de processamento de dados fotogramétricos necessitavam de instrumentos analógicos, pois, ainda, não existiam computadores

para facilitar as transformações e calcular as diversas etapas do processo fotogramétrico. Dessa forma, o processo ficou conhecido como fotogrametria analógica (TOMASSELI, 2009).

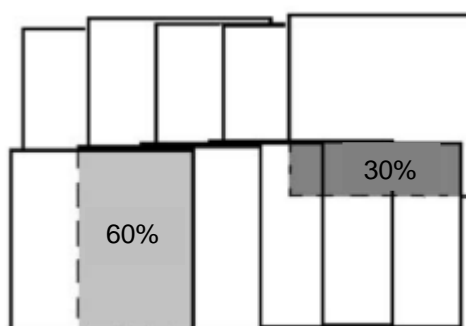
Com a chegada dos computadores e a conseguinte evolução desses equipamentos ao longo dos últimos anos, tornou-se possível a redução da participação instrumental no processo fotogramétrico. Conseqüentemente, aumentou-se também a precisão e a sofisticação dos modelos matemáticos, sendo estas descritas como fotogrametria analítica (TOMASSELI, 2009).

2.1.1 Mosaicos fotogramétricos

Para que seja possível melhor visualização da ampla área fotografada, são feitas montagens de imagens, ou seja, mosaico fotogramétrico. Esse procedimento causa impressão de continuidade entre as fotografias, pois faz-se entender que a mesma é uma única imagem formada por todas as outras.

Para entender melhor a formação dos mosaicos, é necessário compreender que há imagens sobrepostas em um recobrimento aéreo. Segundo Coelho Filho e Silva (2007), mesmo a quantidade de fotografias superior, o recobrimento permite maior operacionalidade destas. Há dois tipos distintos de sobreposição: lateral e longitudinal, a primeira, aquela cujo valor é, geralmente, 30% e ocorre entre as faixas do bloco; a segunda, geralmente, superior a 60% e ocorre entre as fotografias, constante na Figura 2.

Figura 2 – Sobreposição lateral e longitudinal em voos fotogramétricos.



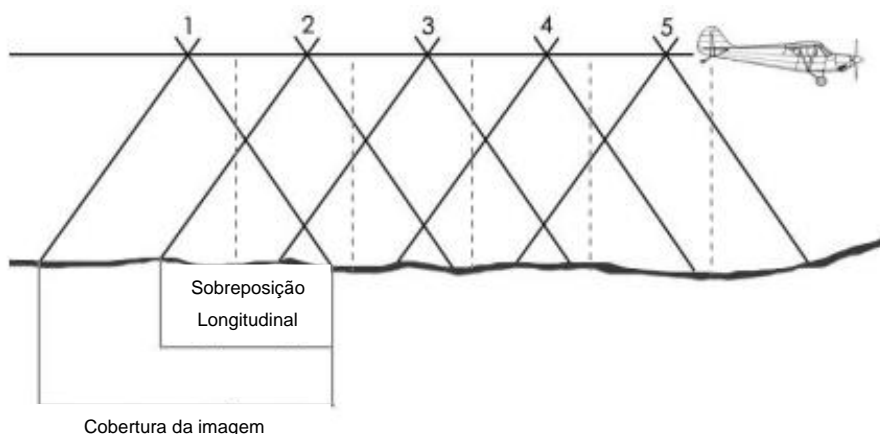
Fonte: Coelho Filho, 2007.

Os mosaicos podem ser classificados em controlados, semicontrolados e não controlados. Isso varia de acordo com o processo de produção e com o nível de

controle (WOLF, 2013). Para fotogrametria aérea, os mosaicos controlados são os mais comumente utilizados, pois são construídos com base em fotografias retificadas na mesma escala. Dessa forma utilizam-se pontos de controle em que serão ajustadas as fotografias retificadas. Segundo Andrade (1994), retificar uma imagem consiste em modificar os ângulos da câmera bem como a distância focal, projetando a imagem em um plano horizontal. Esse processo é bastante interessante para fotografias aéreas, visto que é capaz de transformar as imagens tornando-as verticais.

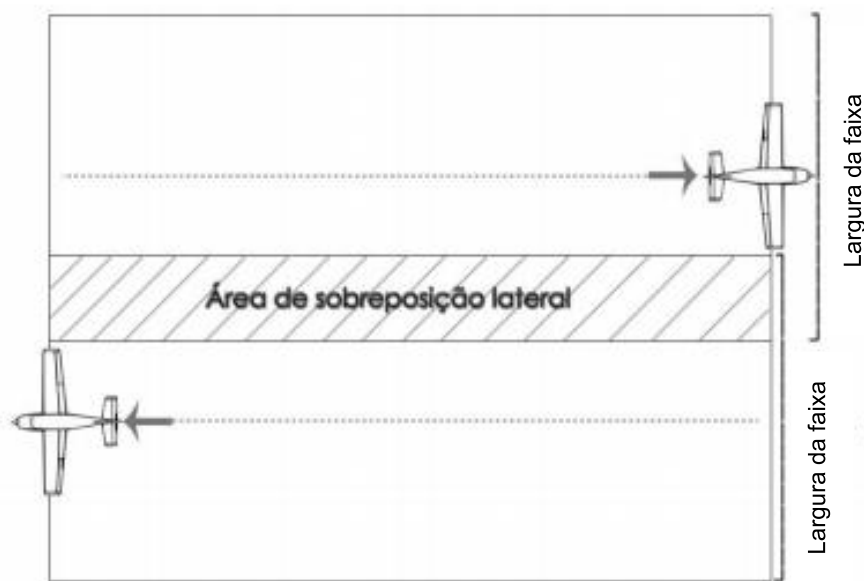
Segundo Ferreira (2014), quando utilizadas aeronaves, o recobrimento na linha de voo era obtido de forma que houvesse superposição longitudinal (ao longo da faixa de voo) que, geralmente, é da ordem de 60%. De maneira semelhante, entre faixas de fotos, existe superposição lateral (transversalmente à direção de voo) que é da ordem de 30%, permitindo assim a composição de pares estereoscópicos, conforme Figuras 3 e 4. Esses valores são utilizados em fotogrametria de grande formato e podem ser alterados de acordo com o levantamento.

Figura 3 – Exemplificação de levantamento aéreo com sobreposição longitudinal.



Fonte: Ferreira, 2014.

Figura 4 – Exemplificação de levantamento aéreo com sobreposição lateral.



Fonte: Ferreira, 2014.

2.1.2 Modelo Digital do Terreno

Segundo Felícisimo (1994), a forma de trabalhar a informação geográfica sofreu bastante alteração com o início do emprego dos computadores nas rotinas de pesquisa. Com o auxílio da ferramenta computacional, surgiram os Sistema de Informações Geográficas – SIG. Estes trouxeram a possibilidade de trabalhar diferentes dados geográficos em formato digital.

Para que seja possível distinguir as informações contidas em certa área da superfície terrestre, existem diversas nomenclaturas para cada abordagem. Dentre elas, podem ser citados o Modelo Digital de Terreno (MDT), Modelo Numérico de Terreno (MNT), Modelo Digital de Elevação (MDE) e o Modelo Digital de Superfície (MDS). O MDT e MDS são os produtos com maior utilidade e interesse entre os profissionais e pesquisadores de SIG (ZANARDI, 2006).

Modelo Digital de Terreno (MDT) constitui na representação matemática da distribuição espacial de determinada característica vinculada a uma superfície real, utilizado para modelagem o relevo e outros tipos de informações que variam de acordo com ele. Por exemplo, a representação topográfica, batimétrica, representação de temperatura, dentre outros (ZANARDI, 2006).

De acordo com Gripp Junior (2009), um Modelo Digital de Elevação (MDS) constitui na representação da superfície da Terra, representa a superfície do terreno acrescida de quaisquer objetos existentes sobre ela. É extraído o que é visível nas imagens ópticas. Logo, existindo árvores e construções, a superfície representada será o seu topo. Já o MDT representa a superfície real do terreno, ou seja, as feições que estão diretamente acima do solo.

A distribuição, a densidade e acurácia dos pontos de referências, bem como a escolha dos métodos de modelagem são fatores primordiais para gerar um modelo mais confiável (ANDRADE, 1998). Várias são as aplicações do modelo digital na área de informações espaciais. Para o presente trabalho, destaca-se a utilização do MDT e MDS no processo de ortorretificação de imagens.

2.1.3 Ortofoto

Segundo Lima *et al.* (2010), com o grande aumento do emprego da Fotogrametria Digital, tornou-se possível a utilização de fotografias para a geração direta de um mapa. Assim, com o tratamento e a adição de algumas informações, a fotografia passa de ser um insumo e se torna parte do mapa. O produto resultante é denominado ortofotocarta.

O princípio básico de produção de ortofotos digitais consiste no processo de transformação da projeção central na imagem em projeção ortogonal ao plano. Dessa forma, as feições nela contidas são apresentadas em suas verdadeiras posições. Tal tarefa exige o conhecimento de inclinação, posição e distorção da câmera aérea no instante da tomada das fotografias além de informações do terreno obtidas por meio de um modelo digital (ANDRADE, 1998).

Segundo Pereira e Tamamaru (2013), no processamento de imagens da RPA, utilizam-se técnicas automáticas implementadas em softwares baseados em algoritmos SfM (*Structure from Motion Procedures*) que possibilitam a segmentação de pontos-chave em imagens tomadas pelas câmeras, em angulações distintas. Tais pontos são então representados nos planos X, Y e Z. Posteriormente, são gerados, automaticamente, o mosaico georreferenciado e ortorretificado.

2.2 Remotely Piloted Aircraft (RPAs)

O termo *Remotely Piloted Aircraft* (RPA) correspondente a aeronaves remotamente pilotadas adotadas pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2018). No Brasil, esse termo vem sendo o mais difundido e utilizado por regulamentações. Outras terminologias muito usadas são Drone e Aeromodelo, utilizadas, popularmente, para descrever qualquer aeronave (ou mesmo outro tipo de veículo) que possua alto grau de automatismo.

O que diferencia essas duas categorias de aeronaves são suas finalidades. Sendo Aeromodelo toda aeronave não tripulada com finalidade de recreação e RPA uma aeronave não tripulada pilotada a partir de uma estação de pilotagem remota, *Remotely Pilot Station* (RPS), que tenha qualquer outra finalidade que não seja recreativa, tais como comercial, corporativa e experimental. A junção da RPA e do seu RPS torna-se o *Remotely Piloted Aircraft System* (RPAS), ou seja, sistema de aeronaves remotamente utilizadas com propósitos não recreativos (ANAC, 2018).

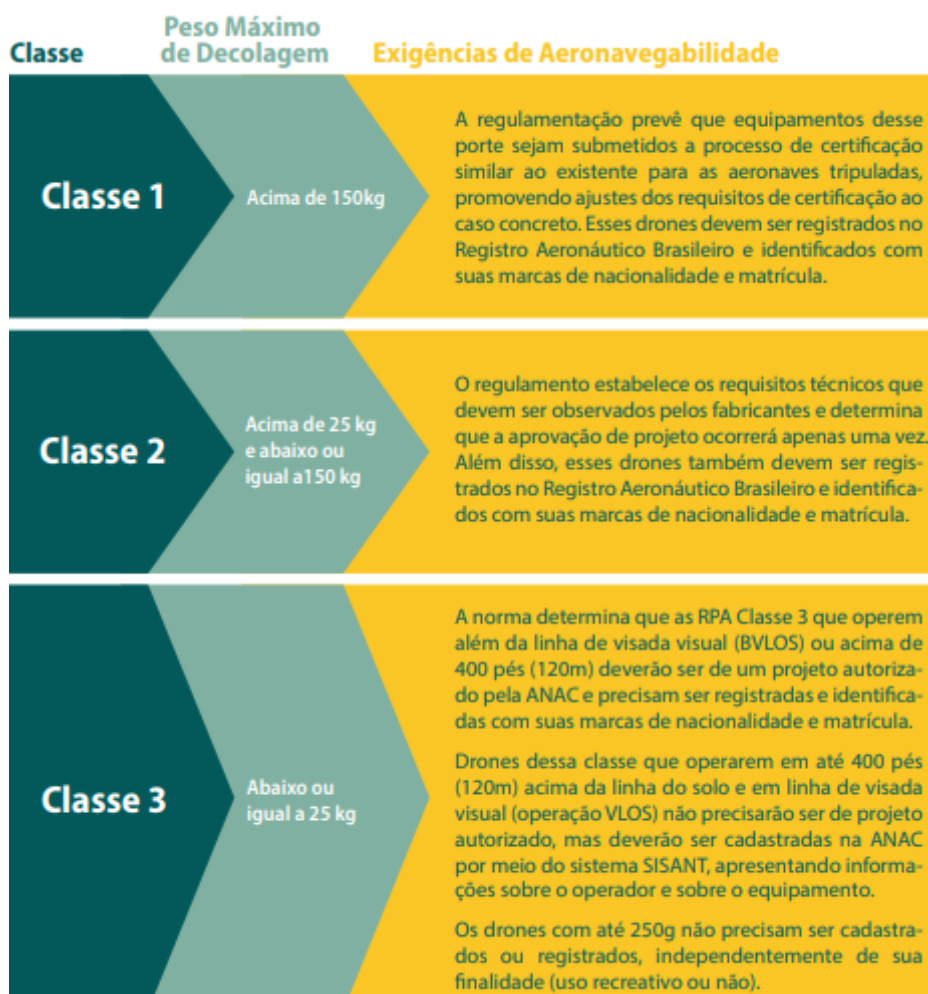
Já de acordo com o relatório do DoD (Departamento de Defesa dos EUA) (2005), RPA é definido como: veículo aéreo motorizado que não transporta operador humano, utilizam forças aerodinâmicas para se elevar, podem voar de forma autônoma ou ser pilotado remotamente, podem ser dispensáveis ou recuperáveis, e podem transportar carga bélicas ou não bélicas. Veículos balísticos ou não balísticos como mísseis de cruzeiro e projéteis de artilharia não são considerados veículos aéreos não tripulados.

2.2.1 Classificação das RPAs

Segundo Castelo Branco (2016), devido às diversas formas e fins que as RPAs apresentam, classificá-las tem sido difícil tarefa pela falta de uma padronização metodológica. A ausência de normas internacionais e nacionais para classificação faz com que cada país desenvolva suas próprias regras, assim sendo as classificações americanas as mais presentes na literatura.

No Brasil a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), em 2017, categorizou as RPAs de uso comercial em três classes de acordo com o peso máximo de decolagem do equipamento, conforme Figura 5.

Figura 5 – Divisão de Classes de RPAs de acordo com a ANAC.



Fonte: ANAC, 2017.

2.2.2 Legislação brasileira

No Brasil existem três órgãos que regulam a operação de RPAs, estes são: a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL).

Cabe a cada órgão gerenciar e normatizar de acordo com seu setor o uso dos RPAs no país. Como a maioria dos regulamentos foram criados há pouco tempo, ainda não existe uma grande fiscalização das agências regulamentadoras, dessa forma, ainda ocorrem muitos voos irregulares.

2.2.2.1 ANAC

Pela regra, os RPAs com mais de 250g somente poderão voar em áreas distantes de terceiros (no mínimo 30 metros horizontais), sob total responsabilidade do piloto operador e conforme regras de utilização do espaço aéreo do DECEA. Caso exista uma barreira de proteção entre o equipamento e as pessoas, a distância especificada não precisa ser observada. Para voar com RPA com mais de 250g perto de pessoas, é necessário que elas concordem, previamente, com a operação, ou seja, a pessoa precisa saber e concordar com o voo daquele equipamento nas proximidades onde se encontra (ANAC, 2017).

2.2.2.2 DECEA

O DECEA como órgão regulamentador do espaço aéreo brasileiro emitiu em 2016 uma Instrução de Comando da Aeronáutica – ICA 100-40 – intitulado como Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro. Essa instrução serviu de base para a elaboração do Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial nº 94/2017 (RBAC-E nº 94/2017).

Estão presentes nesse documento informações sobre altura de voos e condições para voos já contidas no RBAC-E nº 94/2017. O que diferencia essa instrução do Regulamento é a necessidade de uma solicitação de autorização para voos com RPAs exigida pelo DECEA.

2.2.2.3 ANATEL

A medida de controle da ANATEL tem como objetivo evitar interferências das RPAs em outros serviços, a exemplo das comunicações via satélite. Os interessados em utilizar essa tecnologia deverão preencher um requerimento disponível no site da Agência e pagar uma taxa. No processo de homologação, são verificadas as características técnicas de transmissão dos equipamentos (ANATEL, 2016).

Essa medida de controle é necessária em virtude de as RPAs possuírem transmissores de radiofrequência em seus controles remotos e, em alguns casos, no

próprio veículo aéreo, para a transmissão de imagens. Assim, é necessário que todos as RPAs sejam homologados pela Anatel; inclusive os de uso recreativo.

2.2.3 Tipos e funcionalidades de RPAs

Como supracitado, as RPAs foram, inicialmente, desenvolvidas para fins militares, contudo, nesta última década, vem ocorrendo uma grande evolução em relação a essa tecnologia fazendo com que seja empregada em diversas áreas.

Esse crescente uso das RPAs deve permitir que se tornem algo comum, de modo que passem a ser comercializadas de forma mais ampla, garantindo disseminação cada vez maior. As principais vantagens do fotolevanteamento por RPAs, em relação ao aerotransportado por aeronaves tripuladas e ao orbital, podem ser: a redução dos custos de obtenção de imagens/fotografias/visões aéreas; a maior flexibilidade de resolução temporal para aquisição de imagens de alta resolução espacial; possibilidade de execução de missões em condições adversas sem o risco de vida para o piloto e operador da câmara aerofotogramétrica; menor necessidade de gastos de treinamento de pilotos e a maior facilidade e velocidade de incorporação de novas tecnologias (CASTELO BRANCO, 2016).

Há diversas configurações de RPAs, sendo os Asa Fixa e Multirotores os mais utilizados pelo mercado atual, dentre os multirotores os mais empregados são aqueles que usam quatro motores localizados nas extremidades de quatro eixos, visto que estes estão mais disseminados na população e podem ser utilizados para diversos fins. Esses pequenos motores são elétricos e giram pequenas hélices que dão sustentação ao voo do dispositivo, adotando o mesmo princípio que explica como os helicópteros voam. A Figura 6 exemplifica alguns dos modelos empregados.

Para controle e monitoramento do voo pelo operador, a maioria das RPAs possuem um sistema de comunicação por meio de frequência de rádio entre o operador de solo e a aeronave. Assim, pode-se controlá-las em diversas distâncias e alturas (FERREIRA, 2014).

Utilizando o sinal de GNSS de quatro ou mais satélites, pode-se ter a sua localização georreferenciada. No controle remoto, é possível visualizar quantos satélites estão sendo utilizados pela aeronave para se localizar. Dessa forma, conforme o piloto comanda o deslocamento, tanto horizontal quanto vertical, a RPA

(armazena, registra) a posição e seus motores compensam as forças da gravidade e do vento para mantê-lo voando exatamente na mesma localidade.

Figura 6 — Modelos de RPAs.



Fonte: Aero Drone Brasil, 2018.

As RPAs são constituídas de diversos sistemas embarcados, esses podem ser definidos como uma combinação de *software* e *hardware* projetados para executar tarefas específicas. Desse modo, um microprocessador operará como um subsistema de um certo sistema maior (BARR, 1999). Em alguns casos, podem-se combinar todos os sistemas com mais algumas peças mecânicas para que um produto exerça certas funções, como uma RPA decolar ou manobrar.

Um RPA avançado utiliza diferentes recursos e tecnologias para seu funcionamento, dentre essas temos:

- a) CPU: tem a função de controle integral do RPA, incluindo navegação e comunicação com o console de controle;
- b) Módulo acelerômetro: permite a medição da inclinação do RPA, sendo necessário para realização de manobras para frente, atrás, direita e esquerda;
- c) Módulo Giroscópio: permite a medição da velocidade angular do RPA nos 3 eixos, X,Y,Z. Esta medição é importante para mantê-lo estável e na posição desejada, juntamente com o acelerômetro permite a navegação inercial;
- d) Módulo de Motor: controla os motores simultaneamente para garantir a navegação, recebe informações do acelerômetro e do giroscópio para

controlar as hélices e manter o RPA estável, realizando também as ações de planar, deslocar para esquerda, direita, frente, ré, subir, descer e pousar;

- e) Módulo GPS: recebe os sinais de satélites informando a CPU a localização do RPA no Globo, além da orientação norte-sul;
- f) Módulo GSM-3G: é responsável pela comunicação com o controle por estações 3G, permitindo a transferência de dados como imagens, velocidade, altura, entre outros;
- g) Sonar: serve para realização de pousos autônomos, no qual os sonares são utilizados para medição da distância para a superfície enviando esse dado para CPU a qual vai controlar a velocidade;
- h) *Eletronic Speed Control*: esse módulo são os circuitos *driver* dos motores, recebem a alimentação diretamente da bateria passando para os motores de acordo com o que é solicitado pela CPU.

Nos sistemas embarcados, existem os que são declarados de sistemas críticos, ou seja, caso ocorram falhas nesses sistemas, podem haver sérios danos e prejuízos ambientais, materiais e sociais, causando assim riscos em instalações de alto custo (ARMOUSH *et al.*, 2009; MEDIKONDA *et al.*, 2009). Um exemplo desse tipo de sistema são os sistemas embarcados encontrados na Figura 7.

Figura 7 – Sistemas embarcados Phantom 4 Pro.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

2.3 Aerofotogrametria por RPAs

Como mencionado anteriormente, há um curto período de tempo, a aerofotogrametria necessitava de equipamentos de grande custo e dimensões como aviões e helicópteros. Com a evolução das RPAs e dos *softwares* de processamento de imagens, facilitou-se a obtenção de imagens e dados aerofotogramétricos.

Por ser um veículo de diferentes proporções e diferentes equipamentos e tecnologias embarcadas, a aerofotogrametria com RPAs difere em certos pontos da aerofotogrametria tradicional, mas sempre segue os princípios determinados por esta.

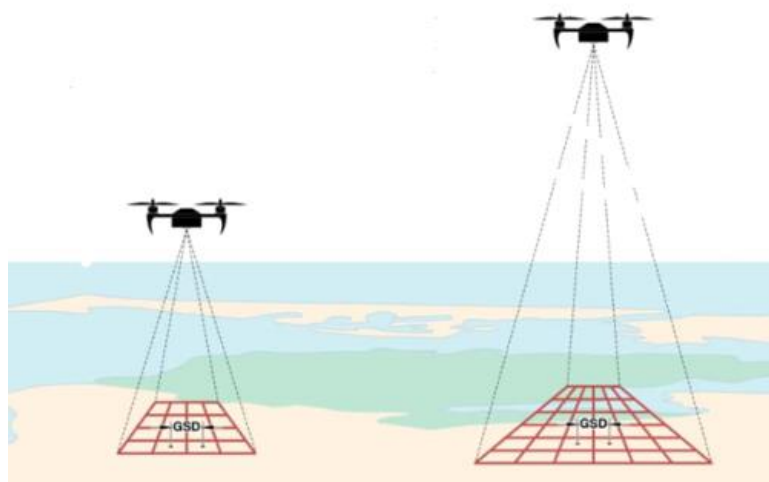
Na fotogrametria com RPAs, a taxa de sobreposição deve ser aumentada para um valor de 80% longitudinal e 60% lateral, visto que, em virtude da menor estabilidade que esse equipamento tem em relação a aeronaves tripuladas, há maior risco de se obterem imagens borradas que podem comprometer o processamento. Dessa maneira, quanto maior a sobreposição, maior a quantidade de fotos da mesma localidade; o que permite, por sua vez, maior segurança e confiabilidade ao levantamento.

2.3.1 *Ground Sample Distance (GSD)*

Segundo Kugler (2012), o termo em Língua Inglesa *pixel* origina-se de *Picture Element*. É a menor unidade de uma imagem digital e define a sua resolução espacial. Nos *pixels* são armazenados valores que formarão a imagem. Em cada *pixel* da imagem, é armazenado um valor ponderado de toda a energia refletida correspondente a sua área no terreno de acordo com o GSD utilizado. Para um GSD de 10 cm, esta área no terreno terá esse valor armazenado em um pixel. Quanto menor for o GSD, maior será a resolução da imagem, ou seja, melhor será a definição dos objetos.

Na aerofotogrametria, o GSD é uma das variáveis mais importantes e é a primeira que deve ser definida, pois ela garante a resolução espacial do mapeamento, ou seja, o campo de visão que será alcançado. A escolha do GSD influencia diretamente a nitidez do levantamento e a sua capacidade de mapeamento, pois, para aumentar o nível de detalhamento, deve-se sobrevoar mais baixo. Com isso, cobrirá uma porção menor do terreno e, conseqüentemente, mapeará uma área menor, conforme a Figura 8.

Figura 8 – Demonstração de altura de voo x área mapeada.



Fonte: Aviassist, 2016.

De acordo com Kugler (2012), para exemplificar a relação anteriormente, é possível verificar a Figura 9, reparando as imagens que estão representando uma mesma área com dimensão de GSD diferente, ou seja, resolução espacial distintas. A primeira imagem, em que o GSD mede 10 cm, é bastante nítida. Já na última imagem, em que se mede um GSD de 2 metros (200 cm), há perda significativa de definição.

Figura 9 – Diferença de imagens com diferentes GSDs.



Fonte: Kugler, 2012.

Nem sempre a escolha do menor GSD é a melhor opção, visto que este interfere na capacidade de mapeamento, o que influencia em mais voos para a mesma área de cobertura. Com isso, eleva-se o custo do mapeamento. Portanto, é importante equacionar a escolha para garantir boa relação entre custo-benefício.

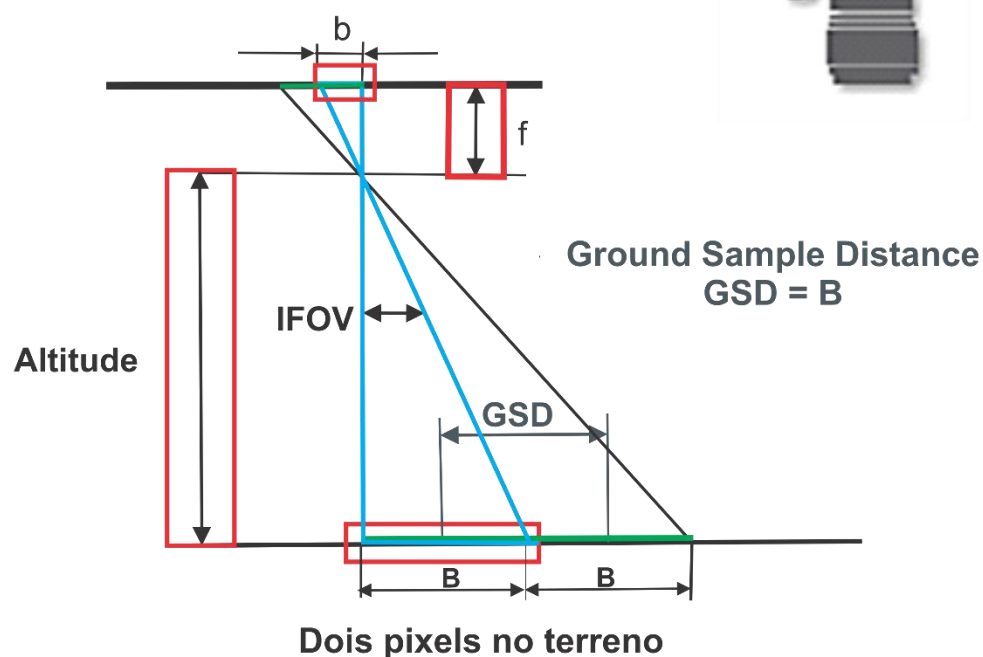
2.3.2 Cálculo de Altura de Voo

Para cálculo de altura de voo, são necessários dados como: GSD que pretende obter-se para o levantamento, tamanho do sensor da câmera utilizada e o tamanho da imagem gerada por esse sensor, para que, relacionando-se os dois, seja possível calcular o tamanho do pixel. Este último é calculado pela relação entre o valor do tamanho do sensor pelo valor do tamanho da imagem.

Com os valores de dimensão do pixel, distância focal e de GSD desejável, é possível calcular a altura de voo de acordo com a Figura 10.

Figura 10 – Cálculo do GSD.

Dois pixels na linha CCD



Fonte: Droneng, 2015.

Assim, por uma simples semelhança de triângulos, tem-se que:

$$H = \frac{B \cdot f}{b} \quad (1)$$

Em que:

B: valor do GSD, em metros.

f: Valor da distância focal, em metros.

b: Valor do tamanho do pixel, em metros.

2.4 Pontos de controle

Pontos de controle são pontos que podem ser identificados nas fotografias, podendo ser objetos, alvos e detalhes singulares no terreno que desaparecerão nas imagens aéreas. Servem para que seja possível relacionar o sistema de coordenadas das imagens com o sistema de coordenadas do terreno, sendo pontos de referência no solo que no processamento aumentarão o nível de qualidade e acurácia dos produtos que serão gerados.

Na Fotogrametria clássica (com aviões tripulados), os pontos de controle tinham enorme importância no processamento dos dados, pois os *softwares* disponíveis não eram capazes de processar as imagens sem uma referência em solo. Atualmente, com o avanço computacional, os algoritmos dos *softwares* evoluíram e os pontos de controle já não são mais pré-requisito para o pós-processamento dos dados. Porém, a sua utilização influencia, diretamente, a qualidade dos produtos gerados (SILVA NETO et al. ,2018).

A função dos pontos de controle é servir de referência para amarrar o bloco fotogramétrico ao terreno. Em um processo estatístico, primeiramente tem-se os parâmetros de entrada, após o ajustamento das observações, são gerados os parâmetros de saída. Trazendo essa linha de pensamento para o mapeamento aéreo com RPAs, os parâmetros iniciais ou de entrada são as informações do receptor GNSS embarcado e da IMU (Sistema Inercial), a maioria das aeronaves utiliza um receptor de navegação no qual apresenta um erro posicional em média de 5 a 10 metros. Ao se utilizar pontos de controle coletados por um receptor geodésico, adicionam-se pontos com precisão milimétrica ou até centimétrica, corrigindo assim os parâmetros iniciais das imagens e ajustando os parâmetros finais do

processamento. Ou seja, as coordenadas que antes tinham uma precisão métrica, após o processo, terão uma precisão centimétrica. Em resumo, ao se utilizarem pontos de controle, inserem-se dados com maior qualidade no processo que corrigirão os dados de entrada, o que resulta em dados de saída com maior qualidade (SILVA NETO et al., 2018).

2.4.1 Métodos de Posicionamento GNSS para materialização de pontos de controle

Na Geodésia, ciência que aborda o posicionamento via *Global Navigation Satellite System* (GNSS), há diversos métodos de posicionamento com diversas características distintas. Na sequência serão abordados, somente, os mais comuns no mercado e mais interessantes ao mapeamento aéreo com RPAs, que são três, segundo Lima *et al.* (2010):

- a) Posicionamento Relativo Cinemático em Tempo Real (RTK): o método RTK é feito por meio de uma estação ou um ponto de referência com coordenadas conhecidas. Um receptor serve como base e fica fixo em um ponto coletando dados durante todo o período de coleta dos pontos, e os receptores possuem uma antena de rádio que mantém uma conexão em tempo real da base ao outro receptor, comumente denominado de Rover (que por sua vez permite a transmissão das correções da base ao Rover). Dessa maneira, obtém-se as coordenadas corrigidas dos pontos em poucos minutos e em tempo real. Nesse método não há a necessidade de pós-processar os pontos (SILVA NETO et al., 2017);
- b) Posicionamento por Ponto Simples (PPS): no método PPS utiliza-se somente um receptor, sem nenhuma base de referência, e as coordenadas são determinadas somente pelas informações coletadas dos satélites, sem nenhuma outra correção;
- c) Posicionamento por Ponto Preciso (PPP): o método PPP é feito por processamento *online*. No Brasil, é disponibilizado pelo IBGE, em que a coleta pode ser feita utilizando-se somente um receptor de uma ou dupla frequência em campo sem nenhuma base de referência. Nesse método não há a necessidade de esperar os dados de bases da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) (IBGE, 2017).

2.5 Defeitos de pavimentos flexíveis

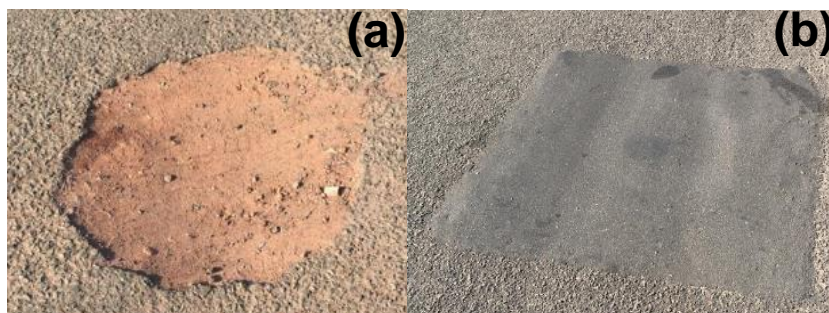
Pavimentos flexíveis são aqueles em que o revestimento é composto por agregados e ligantes asfálticos. Geralmente, é formado por quatro camadas, sendo estas: revestimento, base, sub-base e reforço do subleito. A quantidade de camadas é determinada de acordo com o nível de tráfego planejado e a qualidade dos materiais disponíveis para a construção (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os defeitos em pavimentos podem aparecer tanto precocemente (devido a erros ou inadequações) quanto em médio ou em longo prazo (devido à utilização pelo tráfego e efeitos das intempéries). Os erros ou inadequações, que podem atuar separada ou conjuntamente, que mais se destacam são: erros de projeto; erros ou inadequações na seleção, na dosagem ou na produção de materiais; erros ou inadequações construtivas; e erros ou inadequações nas alternativas de conservação e manutenção (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Assim, os defeitos são catalogados pela normativa de Terminologia TER 005/2003, DNIT (2003). A partir daí, os defeitos são divididos em dois grandes blocos que totalizam oito tipos, sendo estes blocos denominados Fenda e Outros Defeitos.

Por existirem diversos tipos de defeitos, delimitou-se nesta pesquisa o estudo de dois tipos: panelas e remendos. Estes foram escolhidos por serem mais detectáveis nos levantamentos propostos e serem defeitos mais usuais nos pavimentos flexíveis urbanos. A Figura 11 revela esses defeitos, respectivamente.

Figura 11 — Defeitos em pavimento flexível, panela (a) e Remendo (b).



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

2.5.1 Panelas ou buracos

Segundo DNIT (2003), as panelas são cavidades formadas inicialmente no revestimento do pavimento possuindo dimensões e profundidades variadas. É um defeito bastante grave, pois afeta estruturalmente o pavimento, permitindo o acesso

das águas superficiais às camadas granulares do interior da estrutura. Também é grave do ponto de vista funcional, pois afeta a irregularidade longitudinal, e como consequência, a segurança do tráfego e o custo do transporte.

As principais causas relacionadas a esse tipo de defeito são o trincamento por fadiga em estágio terminal e o desgaste localizado com alta severidade na superfície do pavimento. Vale lembrar que essa falha está diretamente relacionada à ação do tráfego e aos fatores climáticos sobre o pavimento.

2.5.2 Remendos

De acordo com a normativa DNIT (2003), remendo é uma porção do revestimento em que o material original foi removido e substituído por outro material - similar ou diferente. São considerados falhas, pois refletem o mau comportamento da estrutura original, gerando normalmente incremento na irregularidade longitudinal.

Os remendos são considerados defeitos quando provocam desconforto devido à solicitação intensa do tráfego, emprego de material de má qualidade, agressividade das condições ambientais e problemas construtivos. Vale ressaltar que, assim como os pavimentos, os remendos deterioram-se por diversos mecanismos, principalmente pela combinação do tráfego e das condições ambientais.

2.6 Métodos para levantamento de defeitos em pavimentos

Existem vários métodos com objetivo de definir um índice de qualidade para um segmento de pavimento de acordo com os defeitos presentes sobre a superfície deste. Em alguns métodos, os defeitos que são levantados objetivamente geram parâmetros qualitativos, quantitativos, ou até mesmo os dois simultaneamente; já em outros métodos, pode ser qualificado o pavimento sob o ponto de vista operacional, ou seja, sua condição de conforto ao rolamento.

Os levantamentos podem ser realizados de forma manual ou mecanizada. Nos levantamentos manuais, os segmentos são selecionados por amostragem, em intervalos predeterminados, utilizando-se procedimentos estatísticos. O tamanho da amostra pode variar entre 10 a 25% da extensão da rede; isto é determinado em função dos recursos disponíveis e dos tipos de defeitos existentes (Haas *et al*, 1994)

No Brasil o DNIT propõe 3 normativas para levantamentos de avaliação de defeito dos pavimentos, sendo essas:

- a) Avaliação objetiva da superfície de pavimentos asfálticos – Procedimento (DNIT a);
- b) Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos asfálticos – Procedimento (DNIT b);
- c) Levantamento para avaliação subjetiva da superfície do pavimento – Procedimento (DNIT c).

Além dos métodos propostos pelo DNIT, outros métodos também são utilizados no país sendo um dos mais utilizados o Índice de Irregularidade Longitudinal, a Varredura a Laser e *Pavement Condition Index* (PCI). Cada um dos métodos citados será abordado posteriormente nesta pesquisa.

2.6.1 Avaliação objetiva da superfície de pavimentos asfálticos

O procedimento DNIT – PRO 006/2003 tem como objetivo básico apresentar a sistemática de cálculo do Índice de Gravidade Global (IGG), adaptado para as condições dos pavimentos brasileiros pelo Engenheiro Armando Martins Pereira do *Severity Index* utilizado no Canadá.

O IGG possibilita a classificação do estado geral de um determinado trecho homogêneo de pavimento, em função da incidência de defeitos de superfície. Ele é um indicador das condições do pavimento, muito útil para a tomada de decisões quanto às intervenções de restauração necessárias atribuindo-lhe conceitos variáveis.

Neste método, são implantadas estações de ensaio afastadas de 20m, alterando as faixas de tráfego direita e esquerda, para o caso de pistas simples. Para realizar os levantamentos de defeitos, um técnico vai em cada estação de ensaio para anotar, em uma ficha de campo, a configuração de terraplenagem e a presença ou não de cada um dos tipos de falha. No caso das trilhas de roda, devem ser medidos os afundamentos internos e externos, essa medição é realizada com uma treliça de alumínio de base de 1,2m, que possui uma régua corrediça localizada em sua posição central (BALBO,1997).

O cálculo do IGG é baseado na atribuição de pesos ou fatores de ponderação aplicáveis a cada evento mensurado (frequência relativa de estações com

ocorrência de cada tipo de defeito e parâmetros ligados à análise estatística das flechas nas trilhas de roda); esses pesos buscam exprimir maior ou menor importância no que diz respeito à serventia do pavimento (DNIT, 2003).

Esta sistemática do DNIT tem como pontos positivos permitir a análise das condições do pavimento e também a interpretação detalhada do perfil de falhas ocorrentes em cada segmento homogêneo, sendo um método com uma boa acurácia e que é capaz de fazer medições ponderadas dos defeitos presentes. Sua maior problemática é a grande demanda de tempo para levantamentos dos defeitos, cálculo e análise de dados, principalmente quando é necessária medição em grandes áreas pavimentadas.

2.6.2 Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos asfálticos

O procedimento de levantamento visual contínuo constitui-se em uma síntese de outros procedimentos de avaliações objetivas e subjetivas da superfície dos pavimentos asfálticos. Deste modo, é possível determinar o Índice da Condição do Pavimento Flexível (ICPF), Índice de Gravidade Global Expedito (IGGE), porcentagem de área com trincamento (área trincada), número de painéis e remendos, porcentagem de área com outros defeitos e Índice do Estado de Superfície do Pavimento (IES).

Segundo o procedimento DNIT – PRO 008/2003, o processo de avaliação consiste no preenchimento de um formulário por, no mínimo, dois técnicos experientes, além do motorista do veículo. Os dados de quantidades de defeitos presentes na pista são anotados no formulário a cada segmento ultrapassado. Estes devem ter, no mínimo, 1 km e, no máximo, 6km.

Após realizar a coleta dos dados de defeitos de todos os trechos, o ICPF, o IGGE e o IES são calculados de acordo com os formulários de campo e as tabelas presentes na Normativa DNIT 008/2003. Dessa maneira, determina-se o estado da superfície do pavimento de acordo com a tabela de IES, presente na Tabela 1.

Dessa forma, o método utilizado pelo levantamento visual contínuo pode ser declarado de rápida obtenção de dados, simples cálculo e baixo custo, porém também é um método com uma boa taxa de imprecisão que visa classificar

numericamente o pavimento, mas não mensura os defeitos - assim sendo simplesmente um método qualitativo.

Tabela 1 – Tabela de determinação do estado da superfície segundo IGGE e ICPF.

DESCRIÇÃO	IES	CÓDIGO	CONCEITO
$IGGE \leq 20$ e $ICPF > 3,5$	0	A	ÓTIMO
$IGGE \leq 40$ e $ICPF \leq 3,5$	1	B	BOM
$20 \leq IGGE \leq 40$ e $ICPF > 3,5$	2		
$20 \leq IGGE \leq 40$ e $ICPF \leq 3,5$	3	C	REGULAR
$40 \leq IGGE \leq 60$ e $ICPF > 2,5$	4		
$40 \leq IGGE \leq 60$ e $ICPF \leq 2,5$	5	D	RUIM
$60 \leq IGGE \leq 90$ e $ICPF > 2,5$	7		
$60 \leq IGGE \leq 90$ e $ICPF \leq 2,5$	8	E	PÉSSIMO
$IGGE > 90$	10		

Fonte: Adaptado DNIT 008/2003 PRO.

2.6.3 Levantamento para avaliação subjetiva da superfície do pavimento

O procedimento para a avaliação subjetiva de pavimentos asfálticos empregado pela normativa DNIT 009/2003 – PRO foi calculado com base na metodologia desenvolvida na experiência da AASHTO para a determinação do Valor da Serventia Atual (V.S.A) que estabelece, subjetivamente, as qualidades de suavidade e conforto de rolamento proporcionado pelo pavimento existente.

De acordo com DNIT 009/2003 – PRO, essa avaliação é calculada pela média de notas atribuídas por uma equipe de no mínimo de 5 avaliadores que percorrem o segmento rodoviário em exame a uma velocidade próxima e abaixo da velocidade máxima permitida. Para essa verificação, devem ser escolhidos cerca de dez trechos de pavimentos, cada um com comprimento aproximado de 600m, preferencialmente localizados em sequência para que todos possam ser avaliados em um tempo de percurso razoavelmente pequeno. Na ficha de avaliação, o parecer dos componentes do grupo deve ser registrado em escala de 0,0 a 5,0, indicando, respectivamente, pavimentos de estado “péssimo” a “ótimo”.

No preenchimento da ficha, o avaliador deve ter em mente os seguintes aspectos: “como se portaria esse trecho de pavimento, atendendo à finalidade para a qual foi construído, durante um período de 24 horas por dia, se ele estivesse localizado em uma rodovia principal?”; “qual o conforto que este pavimento me proporcionaria se tivesse que utilizá-lo dirigindo um veículo durante 8 horas? ”; “como me sentiria dirigindo ao longo de 800 quilômetros sobre este pavimento?”.

Assim, o VSA é um método de levantamento que pode ser obtido rapidamente, e com poucos gastos, mas sem orientação qualitativa.

2.6.4 Método Pavement Condition Index (PCI)

O método do PCI (*Pavement Condition Index*), conhecido no Brasil como ICP (Índice da Condição do Pavimento), foi desenvolvido por Shahin e pelo *US Army Construction Engineering Research Laboratory (CERL)* em 1979 (APS *et al.*, 1998). Segundo Shahin e Kohn (1979), o objetivo principal do método do PCI é o desenvolvimento de um índice numérico de condição de pavimento para estacionamentos, ruas e rodovias, sejam eles rígidos ou flexíveis, destinados a fornecer ao engenheiro um método padrão para avaliar a condição estrutural e a condição da superfície de uma seção do pavimento, determinar as necessidades de manutenção e de reparação em função da condição do pavimento, e também determinar o desempenho do pavimento, em função de avaliação contínua do PCI.

O valor numérico do PCI é baseado nas informações da inspeção visual sendo o valor máximo correspondendo a 100, ou seja, o pavimento tem uma excelente qualidade, enquanto o nível mínimo corresponde a 0, referindo-se a um pavimento de péssima qualidade.

Para a inspeção dos defeitos, o pavimento deve ser dividido em unidades amostrais. Há dois métodos sugeridos para essa inspeção, o primeiro seria o método de inspeção total, em que todas as unidades amostrais do trecho selecionado são avaliadas, enquanto no segundo, o método de inspeção por amostragem, apenas uma porção das unidades amostrais do trecho são avaliadas (SHAHIN, 2005). Em ambos os métodos, o avaliador caminha sobre cada localidade medindo todos os tipos de defeitos, todos os dados obtidos são registrados em um formulário de Inspeção de Pavimento. Após o registro total dos defeitos da unidade amostral, a densidade de

cada um deles é calculada em função da sua incidência na área analisada - a razão entre a quantidade do defeito e a área da unidade amostral (FIALHO, 2015).

Em função da densidade e da severidade, é possível determinar os valores-dedução individuais (VDi), por meio das curvas valores-dedução existentes para cada tipo de defeito. Em seguida, obtém-se o valor-dedução total (VDT), em função do VDT e do número de deduções individuais maiores que 5, determina-se o valor-dedução corrigido (VDC). Por fim, para o cálculo do PCI, basta diminuir o VDC ao total (no caso 100), obtendo-se, assim, a classificação da pista.

2.6.5 Perfilômetro Laser

O perfilômetro laser foi projetado para determinar, com grande precisão, os perfis longitudinal e transversal das rodovias. Além desses parâmetros, o equipamento é capaz de avaliar as inclinações horizontais e verticais da rodovia, raios de curvatura, o Quociente de Irregularidade (QI) ou o *International Roughness Index* (IRI), e os afundamentos nas trilhas de roda externa e interna. Um dos tipos mais modernos é o *Road Surface Profiler* (RSP). Esse sistema foi desenvolvido para ter flexibilidades, incorporando um conceito modular que permite uma variedade de combinação de sensores e configurações.

Segundo a Dynatest (2016), o equipamento é composto por três sensores lasers para medição de altura ou profundidade da pista, dois acelerômetros para compensação de esforços inerciais e um sensor óptico de partida assentados em uma barra transdutora. Há também um hodômetro de precisão montado na roda dianteira para definição da posição longitudinal. Todos esses sensores são ligados à unidade de processamento (DPU – *Data Processing Unit*) por meio de módulos de conexão, sendo as informações processadas, armazenadas e visualizadas em “tempo real” em um notebook posicionado na cabine do veículo.

Os parâmetros de medição são calculados em tempo real e apresentados em intervalos mínimos de 25 mm (1 polegada) até um máximo de 1,6 km (1 milha). O equipamento permite ainda alcançar grande produtividade, uma vez que ele pode percorrer a rodovia em estudo a uma velocidade de operação de até 80 km/h, dependendo das condições do trecho.

Dessa maneira esse método de levantamento tem grande precisão e velocidade de recepção e processamento de dados, além de fácil transporte do

equipamento já que este é composto por módulos. Um dos pontos negativos é a existência de um alto custo de obtenção dos equipamentos, visto que há grande quantidade de tecnologias embarcadas e que devem ser comprados modularmente, além de poder ser empregado em diversos veículos, é necessário um tempo de montagem e calibração do equipamento. Por fim é um método que indica as condições do pavimento tanto qualitativamente como quantitativamente.

2.6.6 Pavement Scanner

O *Pavement Scanner* utiliza linhas de varredura a laser, câmeras de alta potência e óptica para, assim, adquirir o perfil 3D da rodovia em alta definição. Essa exclusiva tecnologia permite avaliação automática do estado do pavimento, seja ele flexível ou rígido com resolução de 1 mm, sobre uma largura de 4 m em pista, com velocidades de até 100 km/h (FIALHO, 2015).

Os dados do *Pavement Scanner* são adquiridos e comprimidos em tempo real no veículo de levantamento, de modo a minimizar as necessidades de armazenamento (aproximadamente 1GB por km). O perfil transversal da rodovia é um conjunto de pontos de um plano levantados ao longo do eixo transversal da rodovia, sendo captado cada vez que o controlador do *Pavement Scanner* recebe um sinal de disparo, a partir do hodômetro do veículo. Tipicamente, o sistema pode capturar um perfil da rodovia a cada 5 mm em uma velocidade de 100 km/h). Cada perfil consiste de até 4160 pontos de dados.

Os dados coletados são processados, podendo-se determinar os trincamentos, sinalização horizontal, degrau entre pista e acostamento, panela, exsudação, remendos e desagregação. É possível medir os perfis longitudinais, IRI, declividade e inclinação transversal, bem como a definição da macrotextura. O afundamento na trilha de roda, também, é medido e caracterizado utilizando mais de 4.000 pontos na seção transversal analisada. No caso de rodovias com pavimento rígido, suas pistas podem ser escaneadas para se avaliarem as juntas e falhas entre as placas de concreto.

Portanto, o *Pavement Scanner* é um dos métodos mais evoluídos e tecnológicos para obtenção de dados de defeitos em pavimentos, sua capacidade de obtenção de dados e processamento de dados é bastante rápida e precisa, porém, como toda grande tecnologia, esta tem grande custo envolvido. Isso ocorre em virtude

da necessidade de compra do automóvel totalmente adaptado para as tarefas que irão ser exercidas, o que dificulta também a movimentação deste para outras localidades, principalmente em um país de grandes proporções como o Brasil. Por fim, também é um método que indica as condições do pavimento tanto qualitativa como quantitativamente.

2.6.7 Inspeção de pavimentos com novas técnicas

Com a verificação dos métodos expostos anteriormente, é possível perceber que existe a lacuna científica para a elaboração de novos métodos que utilizem novas tecnologias e que possam atuar unitariamente ou em conjunto auxiliando os métodos já existentes, pois a tecnologia está em constante evolução e dessa forma equipamentos que eram utilizados há 5 ou 10 anos atrás começam a se tornar obsoletos na atualidade. Dessa forma vários pesquisadores desenvolveram ou estão desenvolvendo novos métodos de levantamento de defeitos em pavimento.

Chambo *et al.* (2011) e Schnebele *et al.* (2015) elaboraram um tipo de inspeção com a utilização de um veículo equipado com câmeras e um conjunto de sensores que fornecem imagens, geolocalização e informações de textura. Logo, houve a possibilidade de se ter uma análise das imagens por meio de processos digitais de imagens PDI, sendo assim possível verificar a condição do pavimento.

Wang *et al.* (2016) utilizaram imagens de alta resolução obtidas por satélites para analisar rodovias. Determinou-se assim um método no qual demonstra que, antes de extrair informações da imagem, deve-se ser feita a segmentação da rodovia, uma vez que a imagem como um todo contém diversos outros dados além da rodovia. Dessa maneira, por meio desse procedimento, somente a rodovia será analisada com maior precisão.

Herold *et al.* (2008) abordam em seu estudo o uso da espectrometria de campo em rodovias juntamente ao sensoriamento remoto hiperespectral para verificar as condições de estradas. Além disso, salientaram que os RPAs são uma tecnologia emergente no contexto de transporte e que, com os sensores embarcados, podem constituir uma nova e econômica fonte de informações para o sensoriamento remoto em Infraestruturas de Transportes.

Zakeri *et al.* (2016) utilizaram imagens obtidas por um levantamento de rodovia com RPA para verificar os defeitos presentes no pavimento e, com o auxílio

de técnicas de processos digitais de imagens (PDI), desenvolveram uma abordagem de detecção dos defeitos.

Como metodologias mais próximas com o que este trabalho procura atingir, Castelo Branco (2016), Di Renzo (2017) e Parente *et al.* (2017), propuseram métodos para levantamentos de defeitos de pavimentos com a utilização de RPAs. Nesses trabalhos é possível verificar os resultados obtidos nos levantamentos feitos. Castelo Branco (2016) e Di Renzo (2017) desenvolveram algoritmos para a determinação automática de defeitos nos pavimentos e os dois obtiveram bons resultados relacionados à determinação do tipo de defeito. Em ambos os trabalhos, foi possível verificar e analisar três tipos de defeitos: fendas, panelas e remendos.

Diferentemente das pesquisas anteriores, o presente trabalho procura utilizar a aeronave de modelo mais comercial, sendo, portanto, mais acessível para a população, além de determinar o melhor método de levantamento comparando métodos de planejamentos de voos, alturas e velocidades em um pavimento urbano flexível.

3 MATERIAIS E MÉTODOS DA PESQUISA

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados, a área de estudo, a via escolhida para a realização dos levantamentos aerofotogramétricos dos defeitos em pavimentos flexíveis, assim como também serão descritos os métodos utilizados para realização desta investigação.

3.1 Equipamentos para medição dos defeitos *In Loco*

Para medições dos defeitos tipo buracos e remendos *in loco*, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- a) trena para mensuração de comprimento e largura dos defeitos;
- b) receptor da marca Topcon, modelo Hiper V, com recursos de rastreamento GNSS/RTK com 226 canais para rastreamento das constelações GPS e GLONASS nas portadoras L1/L2/L2C e SBAS;
- c) *smartphone* Samsung modelo A8 para captura das fotos na localidade dos levantamentos.

3.2 Especificações da Aeronave Remotamente Pilotada

Para a coleta de imagens, foi utilizado um RPA quadricóptero Phantom 4 Pro (Figura 12). O equipamento compreende plataforma aérea com sensores e câmera acoplados que possibilitam a obtenção de imagens fotogramétricas, sensores que aumentam a estabilidade da aeronave, como também a transmissão de dados para que seja possível o acompanhamento em tempo real da missão. A empresa desenvolvedora do equipamento é a *Dà-Jiāng Innovations Science and Technology* (DJI), fundada em 2006, possui assim uma diversa quantidade de produtos para várias utilizações civis e comerciais.

Figura 12 – Phantom 4 Pro.



Fonte: DJI, 2018.

O RPA escolhido possui uma câmera acoplada que, segundo DJI (2018), tem as seguintes especificações: um sensor de 1 polegada, com capacidades fotográficas de 20 *megapixels*, que lhe permite 11,6 pontos de alcance dinâmico, mantendo uma grande precisão mesmo em situações de baixa iluminação. Ademais, contém um *Gimbal* avançado de 3 eixos que elimina vibrações e movimentos indesejados durante o voo, permitindo que a câmera capture imagens suaves e fluidas mesmo durante manobras complexas. A Tabela 2 detalha algumas especificações técnicas da RPA.

Tabela 2 – Especificações técnicas Phantom 4 Pro.

Sensores	5 sensores de colisão
Câmera	20 MP com sensor de 1 "
Velocidade	Máxima de 50 Km/H
Bateria	Duração de 20 à 30 min
Gimbal	Contem 3 eixos
GNSS	Acurácia de 0,5m Vertical e 1,5 m Horizontal
Altura de Voo	Máxima de 1,5 Km
Distância de Voo	Máxima de 5 Km

Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

A escolha desse RPA foi feita devido ao fato de o equipamento preencher todos os requisitos necessários para o levantamento, além de ser o modelo mais atual de RPAs produzidos em larga escala presente no mercado. Além disso, quando comparado a outros modelos, sua relação custo-benefício em relação ao GSD obtido

por teste *in loco* é a melhor possível, como mostrado pela Tabela 3, retirada do artigo comparativo produzido pela empresa Droneng (2018).

Tabela 3 – Relação custo benefícios RPAs DJI

CUSTO/BENEFÍCIO			
Classificação	Modelo	Valor de Mercado	GSD obtido em teste
1º	Phantom 4 Pro	\$1.500,00	5,14
2º	Mavic PRO	\$1.000,00	5,29
3º	Phantom 4	\$1.000,00	5,30
4º	Inspire 2	\$3.000,00	5,22

Fonte: Adaptado Droneng, 2019.

3.2.1 Sistemas embarcados Phantom 4 Pro

A Figura 13 mostra os sistemas embarcados presentes no Phantom 4 Pro. Nela é possível visualizar sua placa de controle, sensores, motores, *gimbal*, câmera utilizada outros equipamentos.

Figura 13 – Sistemas embarcados Phantom 4 Pro.



Fonte: Adaptada pelo autor de DJI, 2019.

Como é possível perceber, o Phantom 4 Pro é formado por diversos sistemas de placas em que cada uma serve para controlar as funções da RPA. Nessas placas existem diversos componentes, sendo um deles o acelerômetro (que serve como unidade de medida inercial), que mantém a RPA estável e voando na angulação e sentido desejado. Para controle de movimento e inclinação, também há um giroscópio de 6 eixos que detecta as menores mudanças e compensa automaticamente, com auxílio da rotação de motores, as posições e inclinações.

Para auxílio de posicionamento, é utilizado um módulo de bússola (*Compass*) eletrônica que contém um sensor magnético de 3 eixos, que fornece informações sobre os eixos X, Y e Z, sendo utilizado para detectar o norte magnético da Terra. Além do *Compass*, há um módulo de posicionamento geodésico, em que é possível determinar, automaticamente, com auxílio do sistema de navegação global por satélite (GNSS), as coordenadas da RPA.

Para determinação altimétrica, o Phantom 4 Pro possui um altímetro. Neste, com o auxílio de um barômetro digital, que faz a medição da pressão atmosférica, é possível realizar a medição das alturas em que o RPA se encontra com uma precisão de 2 metros.

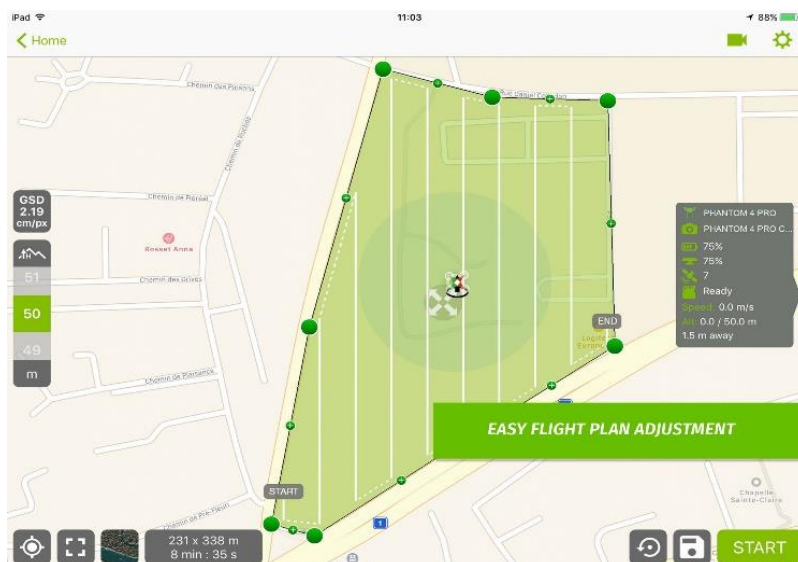
3.3 Softwares para planejamento e realização de voo autônomo

Para o planejamento dos voos autônomos, foram utilizados dois *softwares* distintos: um para missões tipo *Grid* (2D), no qual a RPA passa de forma transversal à localidade delimitada, capturando as imagens de acordo com a sobreposição desejada; e outro, para missões tipo Linear (Corredor), percorrendo a localidade em linha reta, capturando as imagens de acordo com a sobreposição desejada.

Para as missões tipo Grid, foi utilizado o *software Pix4D capture*, versão 4.5.0, proveniente da empresa Pix4d, que produz diversos *softwares* para mapeamento e análises com RPAs (Figura 14). Nele é possível selecionar a área que deseja sobrevoar e determinar o plano de voo, a velocidade (rápida, média ou lenta) e a altura desejada. Assim, o equipamento calcula, automaticamente, o *Ground Sample Distance* (GSD) que o levantamento obterá. Durante o voo, é possível verificar onde estão sendo capturadas as imagens e o trajeto que a RPA está realizando, além

de visualizar em tempo real, por meio de sua câmera, todo o trajeto que está sendo executado.

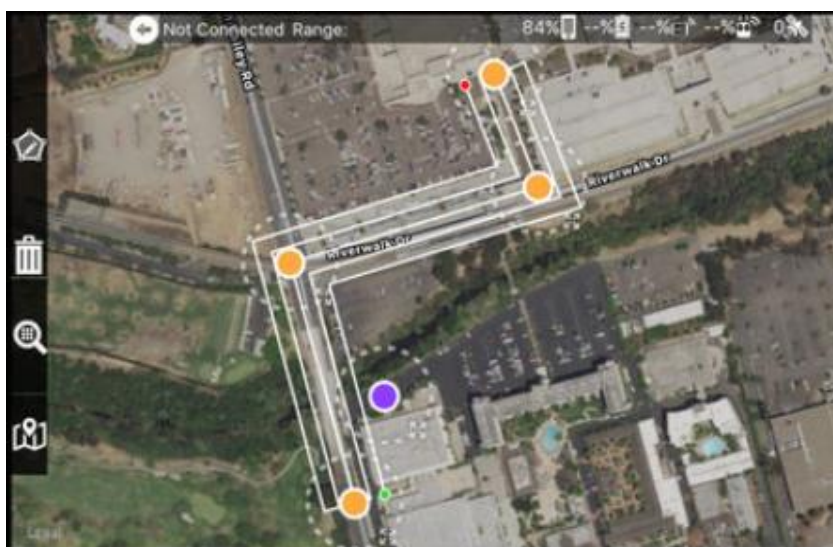
Figura 14 – Plano de Voo Software Pix4D.



Fonte: Pix4D, 2019.

Já para missões do tipo Linear, foi utilizado o *software Map Pilot*, versão 4.0.4 (Figura 15), desenvolvido pela empresa *Maps Made Easy*. Nele, também se podem definir algumas variáveis como: altura, sobreposição de imagens, quantidade de baterias necessárias, entre outros. Disponibiliza todos os dados para realização e controle do voo. Além disso, permite a verificação a respeito de onde estão sendo feitas as imagens e acompanhamento da movimentação da RPA em tempo real.

Figura 15 – Plano de Voo Software Map Pilot.



Fonte: Map Pilot, 2019.

3.4 Software para processamento de Imagens

Para a presente pesquisa, o *software* escolhido para o processamento de imagens foi o *Agisoft PhotoScan*, versão 1.4.2, desenvolvido pela empresa *Agisoft*. O *software* é capaz de realizar o processamento fotogramétrico digital e também produz dados espaciais em 3D, podendo ser utilizado em aplicações de Sistema de Informação Geográfica (SIG), para medições indiretas de objetos em várias escalas, além de outros serviços de medições.

A tecnologia empregada no *Agisoft PhotoScan* usa a técnica de fotogrametria digital implementada com métodos de visão por computador. Isso resulta em um sistema de processamento automatizado e inteligente, que pode ajustar o fluxo de trabalho para várias tarefas específicas e para tipos de dados obtidos.

Para cumprir uma tarefa de georreferenciamento, o programa utiliza dados de GPS aerotransportados, combinados com uma tecnologia de nuvem de pontos para uma execução de resultados mais precisos. Com a introdução de pontos de controle em terra, pode ocorrer significativa melhora na precisão dos resultados.

Para a realização desses processamentos das imagens, foi utilizado computador equipado com CPU Core i7-4500U, 8GB RAM, com sistema operacional de 64 bits e processadores gráficos (ou GPU) GeForce GT 740M e Intel HD Graphics 4400.

3.5 Área de estudo

Como área de estudo, foi escolhido um trecho urbano de cerca de 400 metros de extensão, da Avenida Corrêa Lima, no bairro Edson Queiroz, na cidade de Fortaleza, estado do Ceará. A via possui quatro faixas de tráfego, revestida em Concreto Asfáltico e com canteiro dividindo-a em duas pistas (Figura 16).

Figura 16 — Avenida Corrêa Lima com destaque para a localidade de estudo.



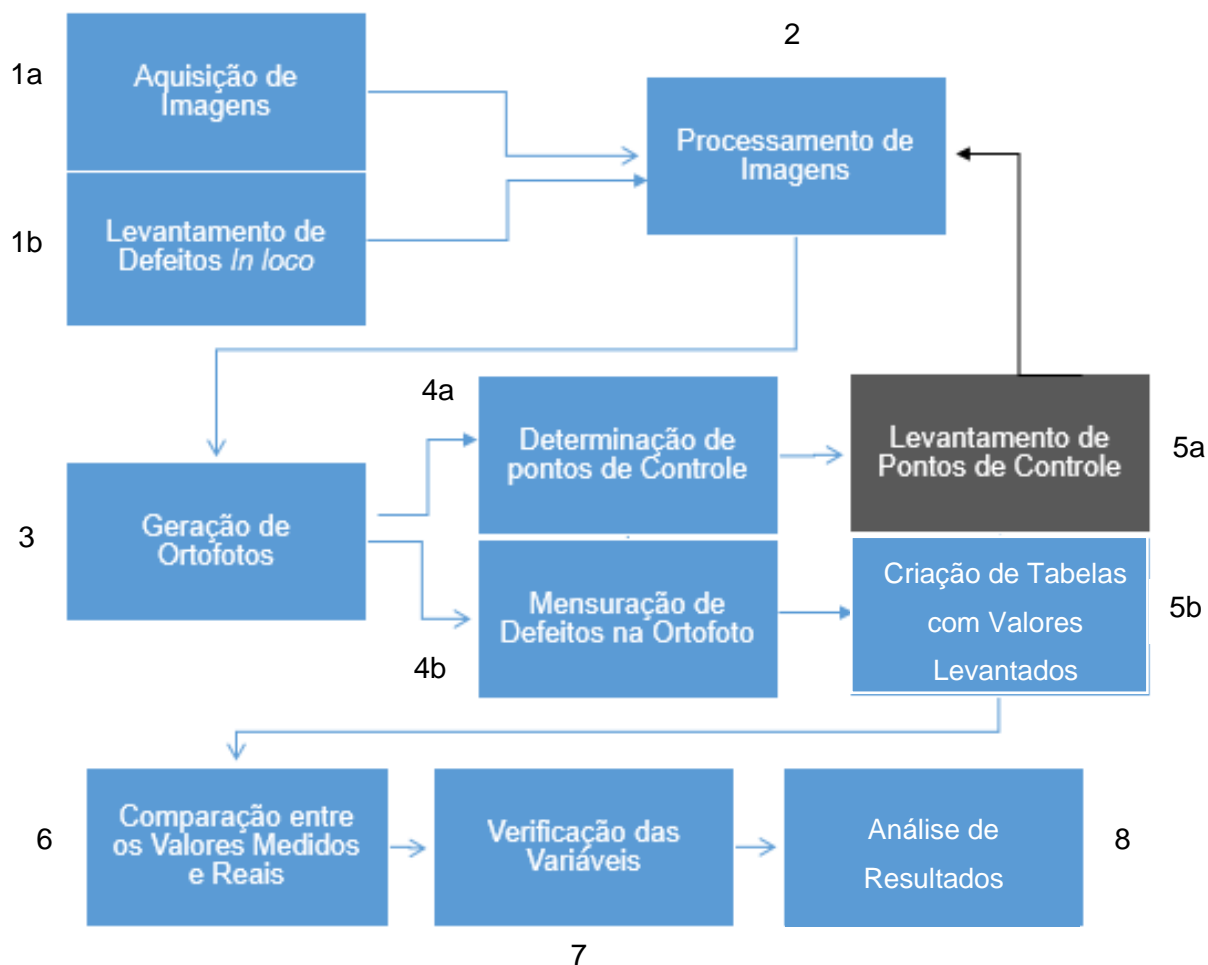
Fonte: *Google Earth Pro*, 2019.

A localidade foi escolhida pela quantidade de defeitos do tipo buraco e remendos presentes no revestimento (contatados por meio de inspeção visual prévia feita pelo Autor), bem como por ser uma área de pouco tráfego, sendo predominantes veículos de passeio, e ter adequadas zonas para serem feitas as ações de pouso e decolagem, facilitando assim, a realização dos levantamentos necessários. Além disso, a região selecionada é de grande importância, interligando dois bairros que estão em desenvolvimento na cidade de Fortaleza: Sapiranga e Edson Queiroz.

3.6 Método

Para melhor visualização da metodologia de pesquisa, elaborou-se o fluxograma presente na Figura 17. Vale ressaltar que a etapa de levantamento de pontos de controle encontra-se na cor cinza por questão de ser uma etapa que retorna para o processamento de imagens. Também foi elaborado um fluxograma para a etapa de processamento de imagens, visto que neste estágio existem diversos passos além de um *checklist* para levantamento de imagens aéreas.

Figura 17 – Fluxograma das etapas metodológicas.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

3.6.1 Metodologia de levantamento

Para a elaboração desta investigação, realizaram-se levantamentos *in loco*, possibilitando a verificação e a medição dos defeitos presentes no revestimento da via de estudo. Em seguida, foi elaborado um memorial descritivo com imagens (capturadas com um *smartphone*) de cada defeito e suas respectivas medidas de largura e comprimento, essas obtidas pela medição por trena, presentes no Anexo A. Foram levantados e analisados um total de 7 painéis e 10 remendos. As Figuras 18 e 19 mostram alguns dos defeitos presentes no revestimento.

Figura 18 — Exemplos de painelas encontradas na região de estudo.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Figura 19 — Exemplos de remendos encontrados na região de estudo.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Após a verificação *in loco*, foram realizados os levantamentos fotogramétricos com o quadrirrotor. Para a realização destes, foi elaborado um *checklist* (presente no Anexo B) para voos, em que constam os parâmetros: verificação de condições climáticas para voo; verificação em campo de aves, cabos ou algo que possa restringir o voo; possibilidade de localidade para pouso e decolagem; conformidade do voo segundo órgãos controladores; altura e velocidade de levantamento; quantidade de carga em baterias e controle; entre outros.

Foram escolhidas quatro alturas para a realização dos levantamentos: 30, 40, 50 e 60 metros, essas foram escolhidas a partir do princípio que a menor altura para voo, determinada pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), é de 30 metros. As quatro alturas foram definidas de acordo com os valores de GSD desejados para o levantamento, pois os defeitos levantados são de pequena à média proporção

em termos de dimensões. Desta forma, determinou-se um GSD mínimo de 3 cm/px, para que fosse possível obter maior detalhamento e quantidade de imagens sobrepostas e, caso ocorressem arrastamentos ou problemas de captura de imagem, o erro no processamento pelo *PhotoScan* poderia ser reduzido. Além disso, não foram encontrados por esta pesquisa, na literatura, voos realizados abaixo de 120 metros, pois, na maioria dos casos, são utilizados RPAs de asa fixa.

Para cada altura, foram feitos voos em dois métodos diversos, sendo eles: Grid 2D (Pix4D) e Linear ou Corredor (*Map Pilot*). O primeiro método possibilita a mudança de velocidades de levantamento, sendo assim determinadas as velocidades média e rápida. No total, foram realizados 12 voos na área escolhida.

Vale ressaltar que os dois métodos foram escolhidos por serem os mais usuais para levantamentos em rodovias. Foi percebido que, de acordo com o aplicativo empregado para as missões, o valor do GSD também sofre alterações, provavelmente por conta das diferentes programações que os dois tem como base. A Tabela 4 revela os valores de GSD de acordo com a altura e método utilizado.

Tabela 4 – Comparação entre valores de GSD por aplicativo utilizado.

Altura (m)	GSD Pix 4D (cm/px)	GSD Map Pilot (cm/px)
30	0,82	1,4
40	1,09	1,7
50	1,36	2,2
60	1,64	2,6

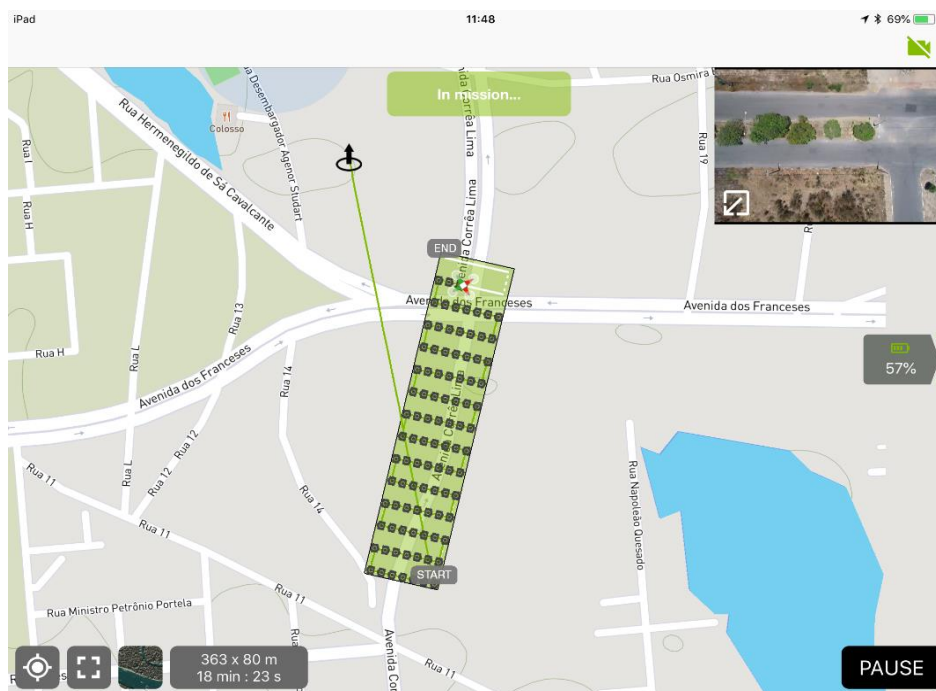
Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Após a análise e verificação do *checklist*, foi realizado o voo. Antes da RPA decolar, foram especificados no aplicativo do método escolhido: a altura de voo, a sobreposição (recobrimentos) e a área de levantamento. Caso a missão seja do tipo Grid, também é determinada a velocidade. Os valores de sobreposição mais utilizados para levantamentos fotogramétricos com RPAs são os de 80% frontal e 70% lateral. Assim, esses parâmetros foram mantidos fixos. Todos os voos foram realizados entre 11:30 e 13h, em dias com poucas nuvens, para que fosse possível obter a menor quantidade de sombras possível, sendo necessários cerca de 5 dias para realização de todos os levantamentos.

Com todos os dados inseridos no aplicativo, foi realizada a decolagem. Nos dois aplicativos, é possível observar, em tempo real, a localização da RPA, as

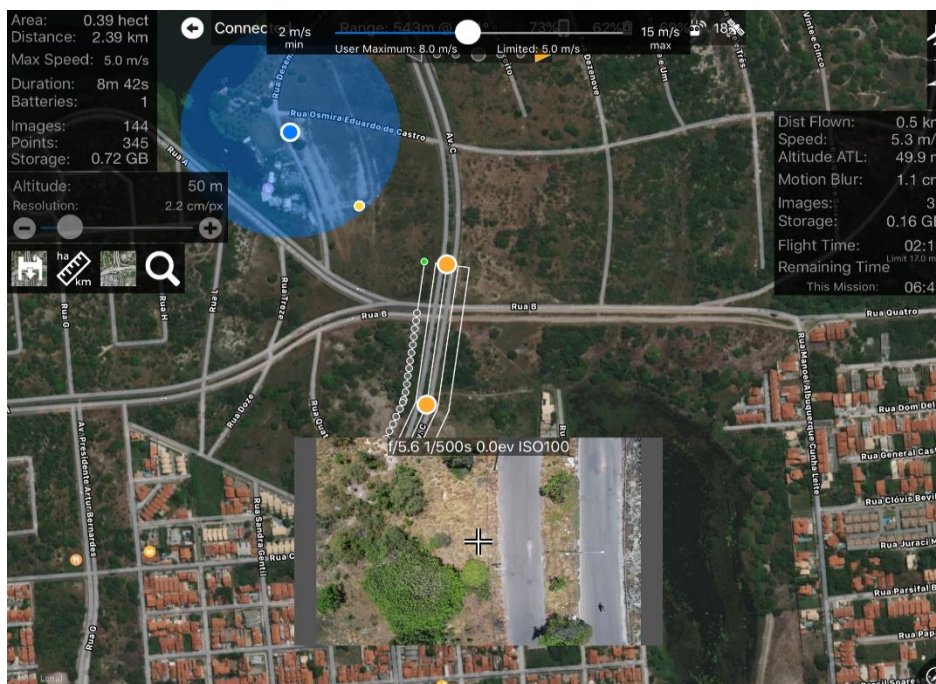
localidades de onde está capturando as imagens, o tempo de voo, a quantidade de bateria e acompanhar o levantamento, por meio da câmera. As Figuras 20 e 21 mostram os dois *templates* dos programas utilizados durante o voo.

Figura 20 — Template Pix4D no momento do levantamento.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Figura 21 — Template Map Pilot no momento do levantamento.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Após o voo, as imagens foram armazenadas no dispositivo de memória da RPA e as missões ficaram registradas nos aplicativos utilizados. Logo, foi possível

verificar a quantidade de imagens capturadas e o tempo de voo. As imagens foram transferidas para o computador para que fosse possível realizar os processamentos no *Agisoft PhotoScan*.

3.6.1.1 Checklist

O *checklist* mencionado anteriormente é de grande importância para a realização dos levantamentos, visto que os voos são autônomos, ou seja, o aplicativo escolhido para realização da missão controlará a aeronave. Desta forma, todos os devidos itens devem ser abordados para que as imagens sejam obtidas com a melhor qualidade possível e a RPA não venha a colidir ou cair.

Este *checklist* foi dividido em três momentos de observações: pré, durante e pós-voo. Cada um dos itens contém uma tabela com diversas instruções nas quais devem ser marcados com um “X” os espaços de sim ou não (S ou N). Dessa forma, permite-se ao operador ter maior controle do voo, certificando-se que suas verificações estejam adequadas.

Na tabela da primeira seção do *checklist* (observações pré-voo) encontram-se averiguações que devem ser feitas na localidade, como verificar as condições ambientais para voo, visto que o RPA não é capaz de suportar chuvas e rajadas de ventos a cima de 36 km/h. Além disso, grandes quantidades de nuvens também afetam o levantamento, uma vez que estas causam sombras na localidade. Também deve ser verificada a presença de pássaros, cabos elétricos e objetos de grande altura na região, pois todos podem interferir no voo e ocasionar uma eventual queda da RPA.

A seção de observações pré-voo ainda contempla itens relacionados diretamente a RPA, tais quais: verificação se o programa para voo está na sua última atualização, se as baterias estão com quantidade suficiente de carga, se o cartão de memória está inserido, se a tampa da câmera foi removida, além de constatar se as conformidades de voo segundo os órgãos de controle estão sendo seguidas, e outras checagens que devem ser seguidas para que os voos sejam feitos com a maior segurança e melhor qualidade possível.

A segunda parte do *checklist*, observações durante voo, contém averiguações que devem ser feitas para certificar que o voo está ocorrendo normalmente, como: verificação quanto à câmera estar na posição desejável para voo,

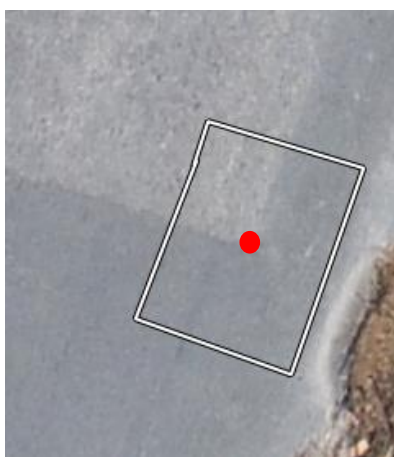
se o plano de voo está sendo seguido de forma correta e se as baterias estão com cargas suficientes para continuação do voo, além de ressaltar o cuidado com pássaros e que, para pouso, a câmera deve retornar ao ângulo de 90° a fim de evitar a danificação do equipamento.

Por fim, na terceira e última secção do *checklist* (operações pós-voo) estão presentes operações básicas que devem ser feitas após o pouso como: desligamento do RPA e remoção da bateria (para que nenhum defeito na bateria atinja o RPA), importação das imagens obtidas para o computador, etc. Finalmente, o dispositivo será limpo e guardado. Serão retiradas as hélices, e, posteriormente, será observada a presença de danos neste.

3.6.2 Metodologia de levantamento de pontos de controle

Para a determinação das localidades onde foram levantados os pontos de controle, primeiramente realizou-se um levantamento prévio de reconhecimento e, conseqüentemente, gerou-se um ortomosaico para melhor visualização da área de estudo, permitindo a verificação de quais pontos pudessem ser declarados como pontos fixos para obtenção de suas coordenadas (Figura 22).

Figura 22 — Exemplo de ponto de controle.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Após a determinação dos locais que receberiam os pontos de controle, eles foram levantados em campo empregando o sistema GNSS com posicionamento RTK. Para realizar o levantamento dos pontos, foi estabelecida uma base com um dos receptores GNSS e em seguida os pontos foram levantados em cada localidade pré-

determinada. Na sequência, foram levantados seis pontos de controle, sendo o equipamento posicionado por cerca de um minuto em cada um deles.

Após o levantamento dos pontos, eles foram corrigidos em pós processamento de acordo com o levantamento Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Os resultados obtidos com as correções feitas encontram-se na Tabela 5, a qual contém os valores das coordenadas X, Y e Z de cada ponto levantado.

Tabela 5 – Coordenadas dos pontos de controle levantados.

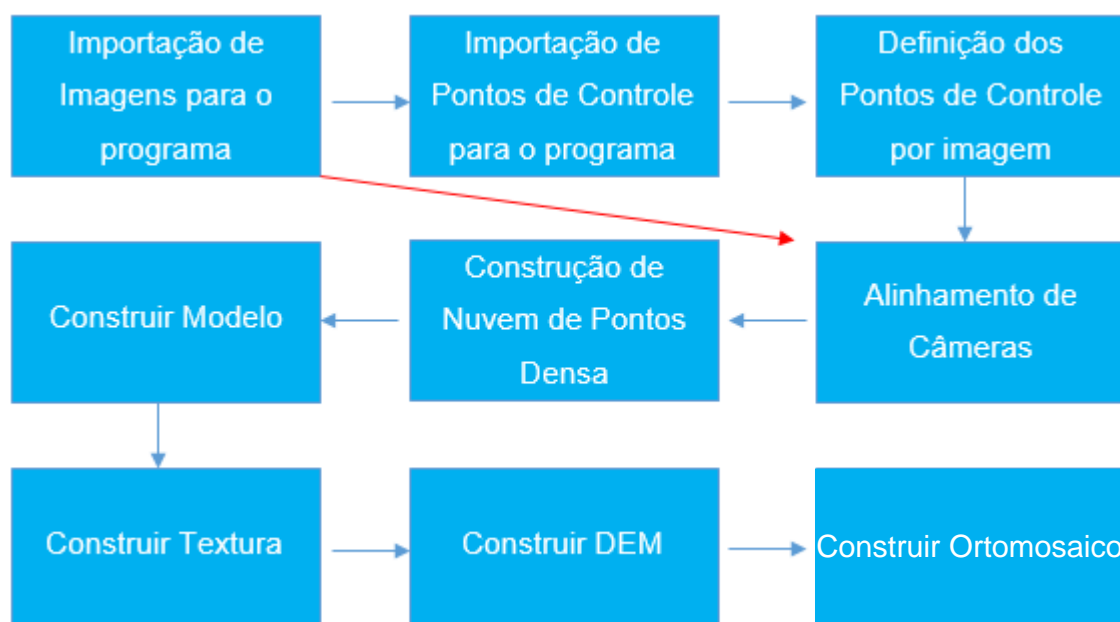
PONTO	E (m)	N (m)	Precisão (m)
Base1	559000.000	9582025.000	0.005
P1	559136.000	9581721.000	0.005
P2	559150.000	9581829.000	0.005
P3	559173.000	9581907.000	0.005
P4	559157.000	9581932.000	0.005
P5	559145.000	9581872.000	0.005
P6	559119.000	9581749.000	0.005

Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

3.6.3 Metodologia de processamento

O programa *Agisoft PhotoScan* trabalha em um sequenciamento de etapas. Para que seja possível realizar o processamento de imagens e a construção do ortomosaico, cada uma das etapas foi seguida rigorosamente, sendo elaborado um fluxograma, presente na Figura 23, para melhor visualização da dinâmica das etapas. Vale ressaltar que a seta em destaque vermelho significa que, para os processamentos sem pontos de controle, as duas etapas precedentes (importação de pontos de controle para o programa e definição dos pontos de controle por imagem) foram desprezadas.

Figura 23 – Fluxograma de processamento.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Cada etapa mencionada no fluxograma da Figura 23 tem seu objetivo próprio para que seja possível, ao final, a construção de um ortomosaico com melhor qualidade possível. Esses objetivos são:

- a) Alinhamento de câmera: nesta etapa o programa faz a combinação de imagens, ajustando-as de acordo com sua posição, gerando uma nuvem de pontos dispersos e um conjunto de posições de câmeras;
- b) Construção de nuvem de pontos densa: após alinhamento das imagens, o programa gera maior quantidade de pontos, criando nova nuvem de pontos que pode servir de referência para a criação de um modelo 3D, além de refinamento do processamento como um todo;
- c) Construção de modelo: a partir da nuvem densa de pontos o *PhotoScan*, cria-se um modelo geométrico da superfície levantada, ou seja, fixa-se cada ponto extraído da imagem em sua respectiva localidade, possibilitando a visualização da região em 3D;
- d) Construção de textura: essa etapa consiste no aumento da definição dos detalhes do modelo digital de terreno, utilizando as imagens originais para cobrir o modelo de terreno de acordo com os pontos determinados na nuvem densa de pontos;
- e) Construção de DEM: nesse passo, é feito o modelo digital de terreno mostrando suas diferenças de elevações. Cada variação de elevação é

representada por diferentes tons de cores, permitindo uma melhor visualização do modelo do terreno;

- f) Construção de ortomosaico: a ortofotografia é o produto resultante da transformação de uma foto original em uma foto em que os deslocamentos, devido ao relevo e a inclinação da fotografia, são eliminados. Já um mosaico de ortofotos é um produto gerado do processo de mosaicagem de várias ortofotos. O processo de montagem do mosaico é realizado por meio da busca de pontos homólogos entre duas ou mais imagens sobrepostas entre si. Dessa maneira, a partir da nuvem densa de pontos e do modelo gerado, o *software* produz o mosaico de imagens, em que é possível realizar as medições e verificação de uma forma mais detalhada e clara onde estão localizadas as áreas de estudo.

Após a geração do ortomosaico, as medições dos defeitos foram feitas diretamente na plataforma do programa, conforme Figuras 24 e 25.

Figura 24 — Ortomosaico gerado após processamento.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Figura 25 – Ortomosaico com medições *in loco*.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Após o processamento e medição sem pontos de controles, os mesmos foram adicionados e o ortomosaico foi reprocessado, sendo perceptível a alteração de localidade das medições sem pontos de controles dos defeitos, ou seja, o melhor georreferenciamento das imagens. A Figura 26 expõe a localização dos defeitos antes de serem adicionado os pontos, marcações em branco, e a nova localização do defeito após o processamento com pontos de controle. Os valores obtidos nas medições foram organizados em tabelas para melhores comparações, que serão apresentadas no Capítulo 4.

Figura 26 – Comparação de processamento sem e com pontos de controle.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados das mensurações dos levantamentos fotogramétricos realizados, comparando-se os erros entre as medições *in loco* e medições no ortomosaico. Além disso, comparam-se as variáveis como a utilização de pontos de controle, velocidade e método, para que seja possível determinar qual destas tem melhor utilização para levantamentos dos defeitos (panelas e remendos) em pavimentos flexíveis.

Todas as imagens obtidas para o desenvolvimento desta pesquisa foram adquiridas em um ambiente no qual não havia impedimentos para a realização do voo, visto que todo o *checklist* foi seguido rigorosamente, assim evitando-se problemáticas de voo.

Para melhor análise, este capítulo foi dividido em cinco itens, abordando desde as representações dos dois métodos distintos até a comparação dos resultados obtidos, tendo por fim um item de análise estatística, possibilitando melhor investigação dos valores obtidos.

4.1 Método *Grid*

Como mencionado anteriormente para o levantamento pelo Método *Grid*, utilizou-se o aplicativo Pix4D, que possibilita a utilização de diferentes velocidades de voos, além de diferentes alturas para a captura de imagens. Foram realizados cerca de 8 voos para esse método. Após a obtenção das imagens, estas foram processadas sem e com pontos de controle, gerando um total de 16 processamentos.

4.1.1 Resultados para processamentos sem pontos de controle

Os primeiros processamentos foram realizados sem a utilização dos pontos de controle para verificar a diferença de precisão que os pontos de controle podem trazer para o levantamento. A Tabela 6 foi elaborada para facilitar a comparação entre os levantamentos, possibilitando a verificação do erro percentual das mensurações, comprimentos e larguras, na ortofoto quando comparadas com os valores levantados

in loco para os dois tipos de defeitos encontrados na via (painelas e remendos), nas 4 alturas e 2 velocidades trabalhadas.

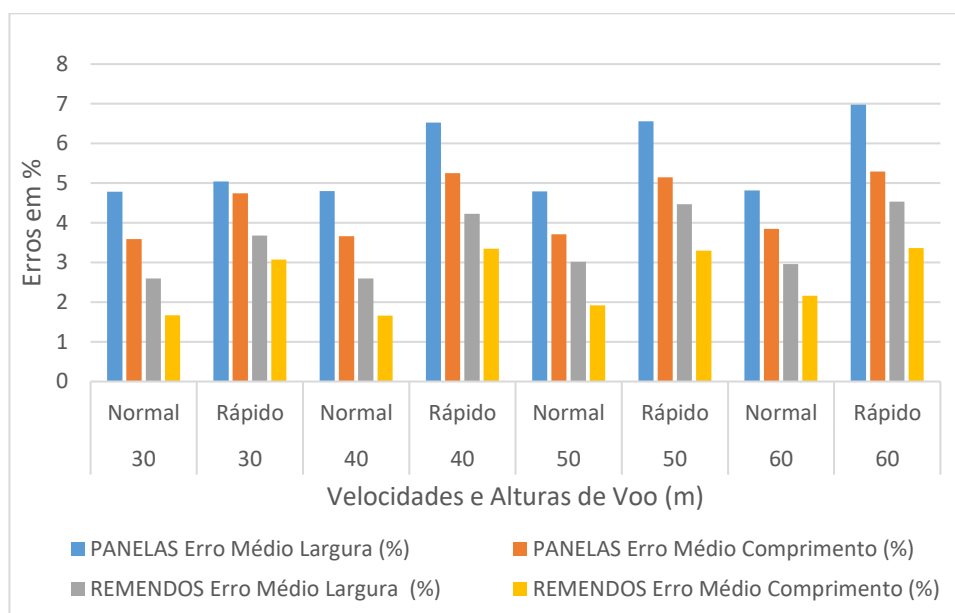
Tabela 6 – Resultados método Grid para painelas e remendos sem pontos de controle.

PANELAS				REMENDOS	
Alturas de Voo (m)	Velocidade de Voo	Erro Médio Largura (%)	Erro Médio Comprimento (%)	Erro Médio Largura (%)	Erro Médio Comprimento (%)
30	Normal	4,78	3,59	2,60	1,67
30	Rápido	5,04	4,74	3,68	3,07
40	Normal	4,80	3,66	2,60	1,66
40	Rápido	6,53	5,25	4,23	3,35
50	Normal	4,79	3,71	3,02	1,92
50	Rápido	6,56	5,15	4,47	3,30
60	Normal	4,82	3,85	2,96	2,16
60	Rápido	6,98	5,29	4,53	3,36

Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

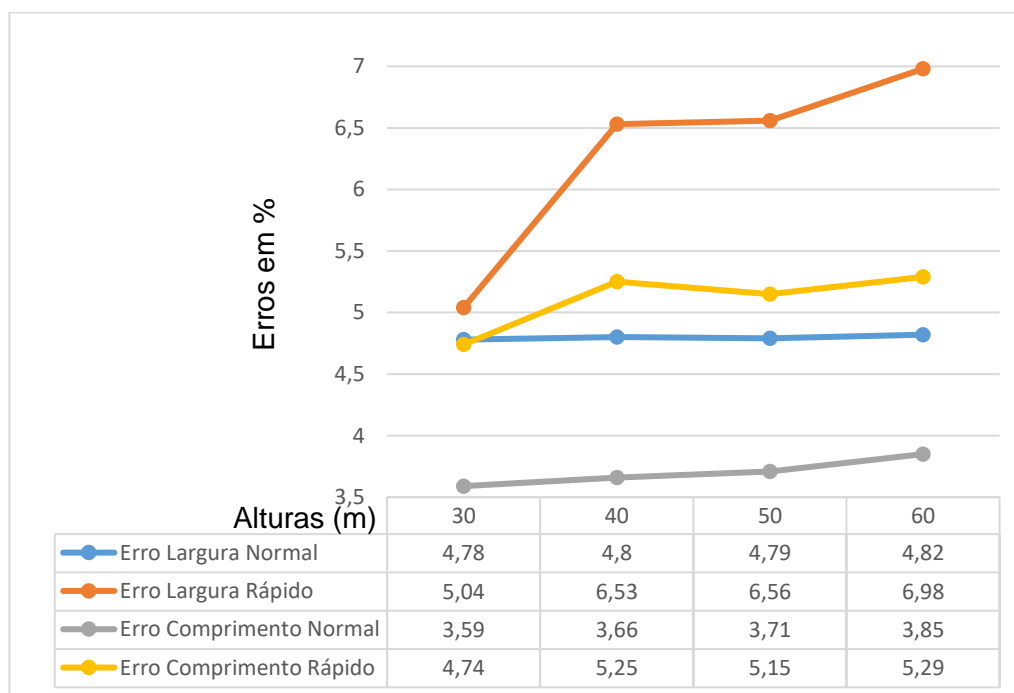
Elaboraram-se, ainda, os Gráficos 1, 2 e 3 para melhor avaliação e comparação dos resultados, relacionando as alturas, as velocidades e os erros obtidos, facilitando a observação dos dados e a obtenção de conclusões.

Gráfico 1 – Comparação de erros médios para painéis e remendos método Grid sem pontos de controle.



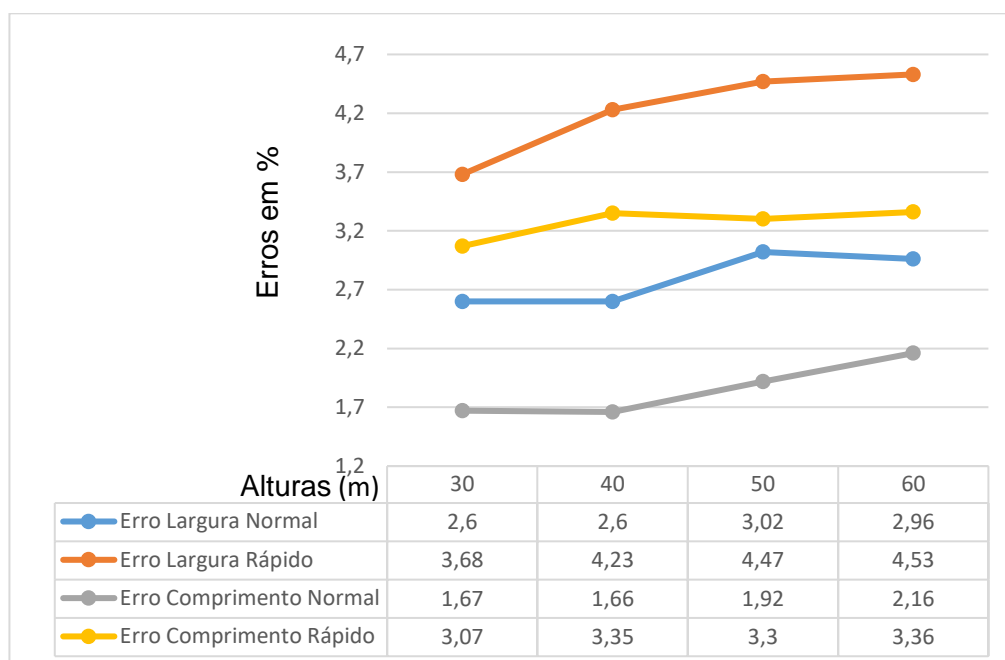
Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Gráfico 2 – Relação erro *versus* velocidade *versus* altura para painéis do método Grid sem pontos de controle.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Gráfico 3 – Relação erro *versus* velocidade *versus* altura para remendos do método Grid sem pontos de controle.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Conforme os gráficos 2 e 3, as alterações das velocidades e alturas de voo influenciaram na qualidade do levantamento de defeitos em pavimentos. Para os dois tipos de defeitos, foi perceptível que, na maioria das vezes, com o aumento da altura e da velocidade, as porcentagens de erros, tanto para largura quanto para comprimento, tendem a aumentar; e, com a diminuição da velocidade e da altura de voo, os valores de erros tendem a diminuir. Logo, os valores de porcentagem de erro para velocidade normal são menores que os valores obtidos para velocidade rápida.

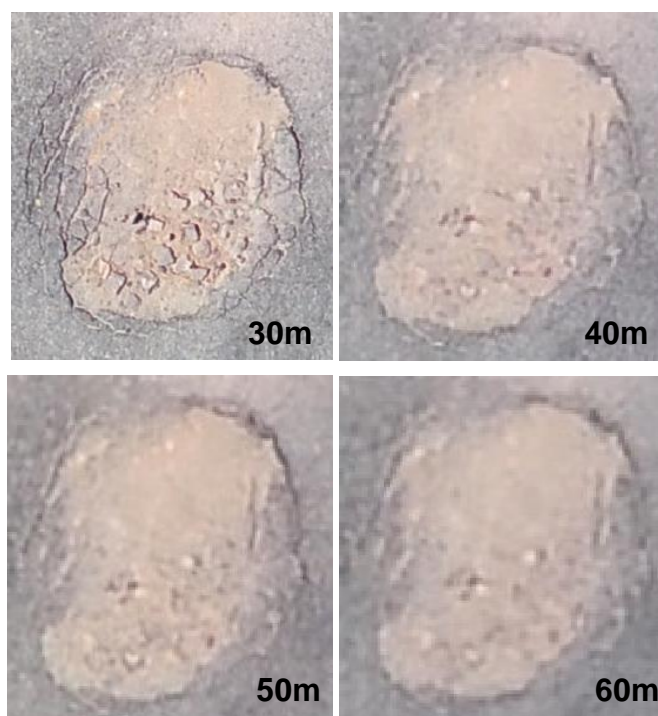
Além disso, os mesmos gráficos revelam que há menor variação na mensuração dos remendos quando comparados às painelas. Essa diferença deve ocorrer pelo fato de que os remendos, como pode-se observar no Anexo 2, são de dimensões maiores e mais fáceis de serem visualizados que os de painelas. Assim, em levantamentos do tipo *Grid*, os remendos estarão presentes em diversas imagens; quando sobrepostas e processadas, fornecerão mais dados de localização ao *Agisoft*, aumentando o nível de precisão e diminuindo a porcentagem de erros.

Essas discrepâncias nas porcentagens de erros podem ocorrer por diversos fatores, como:

- a) quantidade de imagens obtidas de uma mesma localidade, de acordo com a altura de voo, visto que, quanto menor a altura de voo, maior a quantidade de imagens e sobreposição;

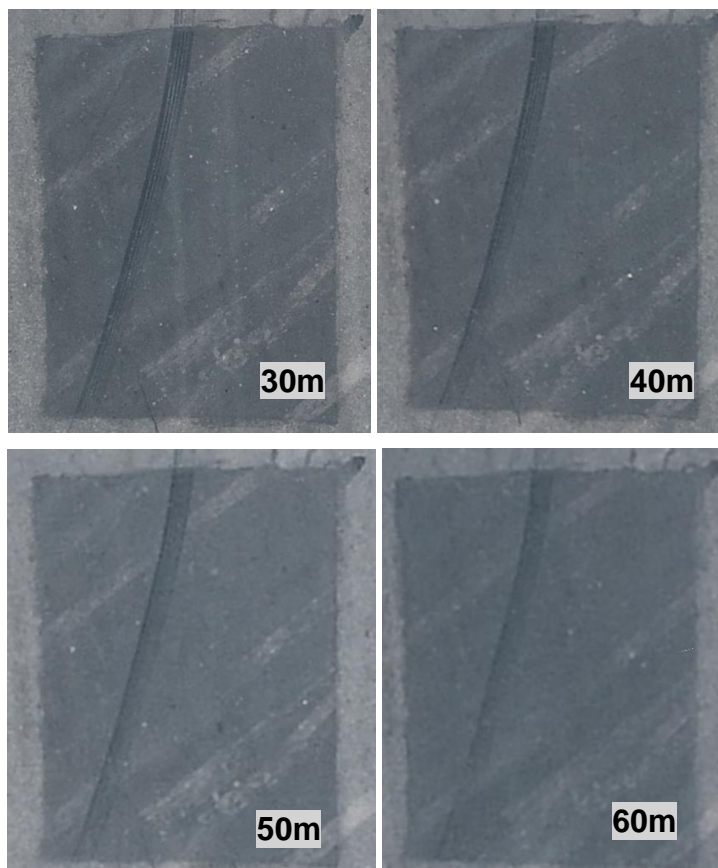
- b) melhor captura das imagens de acordo com a velocidade de levantamento, pois, quanto mais lento o levantamento, menor será a vibração da câmera, e, portanto, melhor será a captura das imagens, além de melhorar a determinação da localização do RPA pelo sistema GNSS;
- c) melhor qualidade de imagens para medição de acordo com a altura levantada. É perceptível que, quanto menor a altura levantada, melhor a qualidade de detalhes na ortofoto, conforme Figura 27 e 28;
- d) erros causados pelo ambiente ou mensuração da ortofoto. Quando se trabalha com levantamentos em campo, existe a possibilidade de erros ambientais como rajadas de ventos, sombras de nuvens, entre outros. Além desses, podem existir erros da mensuração da ortofoto pelo usuário.

Figura 27 — Comparação de panela em diferentes alturas método Grid.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Figura 28 – Comparação de remendos em diferentes alturas método Grid.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Dessa maneira, percebe-se que, nos levantamentos em velocidades normais e na altura de 30 metros, foram obtidos os melhores resultados. Mesmo com as diferenças percentuais, é possível perceber que a taxa de erro nos levantamentos é pequena, variando de 3,59% a 6,98% para painéis e de 1,67% a 7,55% para remendos, sendo possível verificar que existe uma similaridade dos valores do levantamento e processamento com os valores reais.

4.1.2 Resultados para processamentos com pontos de controle

Após analisar os resultados dos processamentos sem a utilização de pontos de controle, foram verificados os resultados dos processamentos com a utilização de pontos de controle. Com os dados de medição obtidos, foi possível elaborar a Tabela 7.

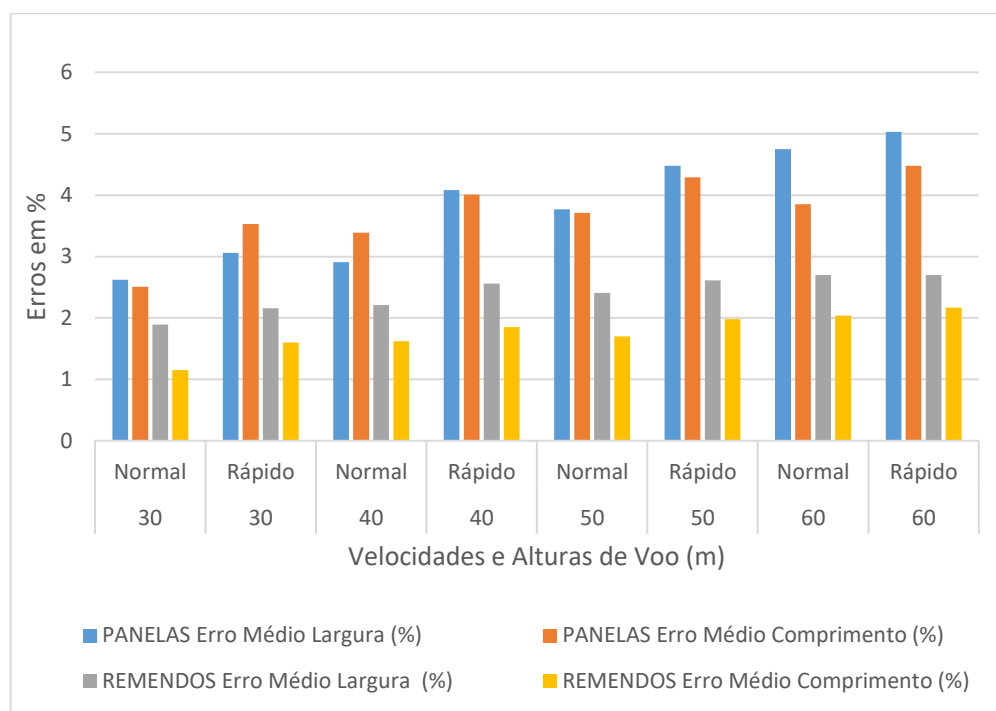
Tabela 7 – Resultados método Grid para painéis e remendos com pontos de controle.

Alturas de Voo (m)	Velocidade de Voo	PANELAS		REMENDOS	
		Erro Médio Largura (%)	Erro Médio Comprimento (%)	Erro Médio Largura (%)	Erro Médio Comprimento (%)
30	Normal	2,62	2,51	1,89	1,15
30	Rápido	3,06	3,53	2,16	1,60
40	Normal	2,91	3,39	2,21	1,62
40	Rápido	4,08	4,01	2,56	1,85
50	Normal	3,77	3,71	2,41	1,70
50	Rápido	4,48	4,29	2,61	1,98
60	Normal	4,75	3,85	2,70	2,04
60	Rápido	5,03	4,48	2,70	2,17

Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

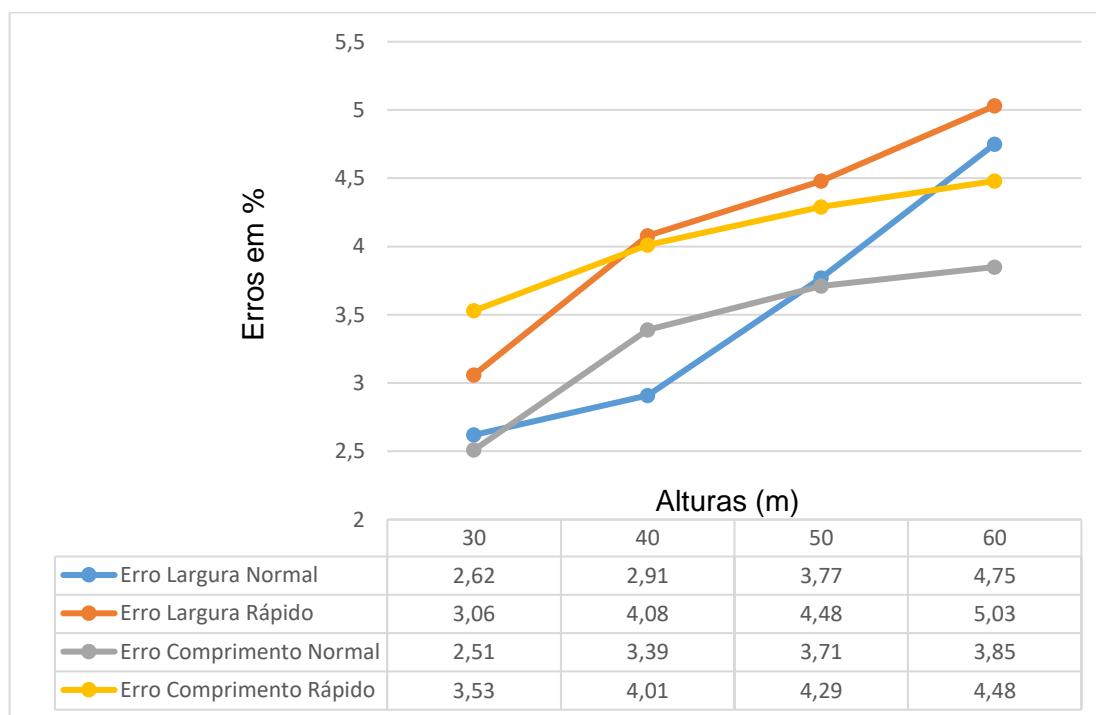
Elaboraram-se, ainda, os Gráficos 4, 5 e 6 para melhor avaliação e comparação dos resultados, relacionando as alturas, as velocidades e os erros obtidos, facilitando a análise dos dados e a obtenção de conclusões.

Gráfico 4 – Comparação de erros médios para painéis e remendos método Grid com pontos de controle.



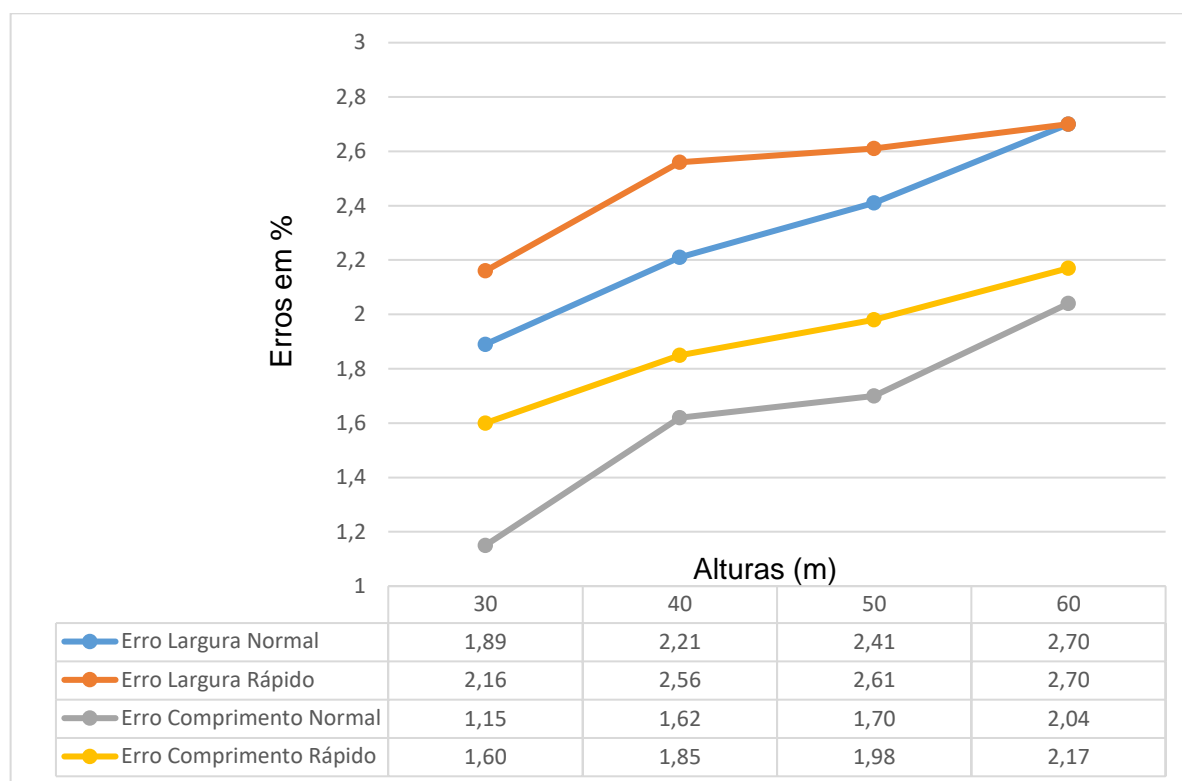
Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Gráfico 5 – Relação erro versus velocidade versus altura para painéis do método Grid com pontos de controle.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Gráfico 6 – Relação erro *versus* velocidade *versus* altura para remendos do método Grid com pontos de controle.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

É perceptível que as mudanças de alturas e velocidades influenciam os resultados de levantamentos. Os voos realizados com pontos de controle na velocidade normal, em geral, obtiveram melhores resultados que os voos em velocidade rápida, sendo o melhor resultado de 1,89% para erro de largura e 1,15% em erro de comprimento para velocidade normal; para velocidade rápida, tem-se 2,16% de erro para largura e 1,60% para comprimento. Provavelmente, essa diferença ocorre em virtude de, em voos mais lentos, as imagens obtidas terem maior precisão de localização e menor chance de estarem desfocada.

Quando verificada a altura, percebe-se que as menores alturas de voo têm um menor erro, sendo, para a altura de 30 metros na velocidade normal, erros de 1,89% em largura e 1,60% em comprimento, e, para altura de 60 metros em velocidade normal, 2,95% para erro de largura e 2,04% para erro de comprimento. Nesse caso, também, quanto menor a altura e velocidade de voo, melhor a definição das imagens, diminuindo assim os erros de medição, além dos erros médios para remendos serem menores que os de painéis.

4.2 Método linear

Como mencionado anteriormente, no método Linear o RPA voa de forma longitudinal à área delimitada. Para esse tipo de levantamento, foi utilizado o aplicativo *Map Pilot*, que possibilita a utilização de diferentes alturas para a captura de imagens. Foram realizados cerca de 4 voos e, após a obtenção das imagens, estas foram processadas sem e com pontos de controle, gerando um total de 8 processamentos.

4.2.1 Resultados para processamentos sem pontos de controle Método Linear

Para a melhor verificação do cálculo dos erros percentuais para os levantamentos lineares sem pontos de controle, foi elaborada a Tabela 8, em que se encontram os valores calculados de erros médios de largura e comprimento para painelas e remendos.

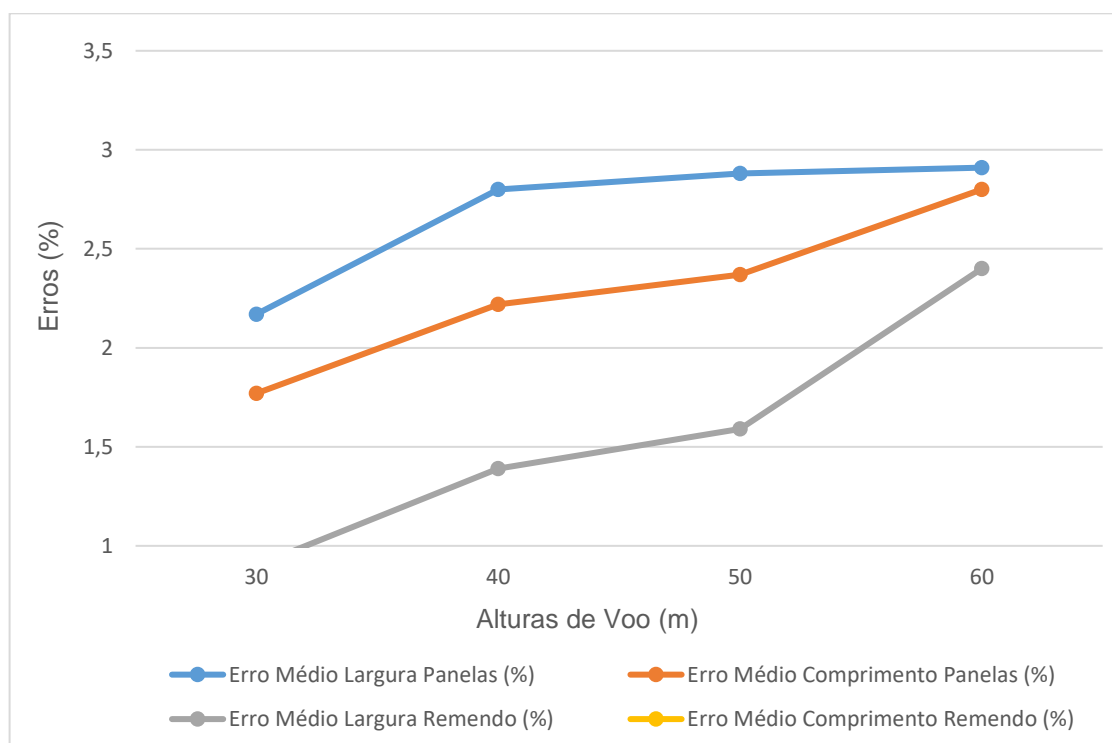
Tabela 8 – Resultados Método Linear para painelas e remendos sem pontos de controle.

Alturas de voo (m)	PANELAS		REMENDOS	
	Erro médio largura (%)	Erro médio comprimento (%)	Erro médio largura (%)	Erro médio comprimento (%)
30	3,96	2,90	1,63	1,21
40	4,03	3,42	2,55	1,69
50	4,35	3,82	2,97	1,68
60	4,55	3,88	3,44	1,72

Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Para melhor visualização e comparação dos valores da Tabela 8, foi elaborado o Gráfico 7, em que é possível analisar a variação dos respectivos erros percentuais.

Gráfico 7 – Comparação de erros médios para painéis e remendos no método Linear sem a utilização de pontos de controle.

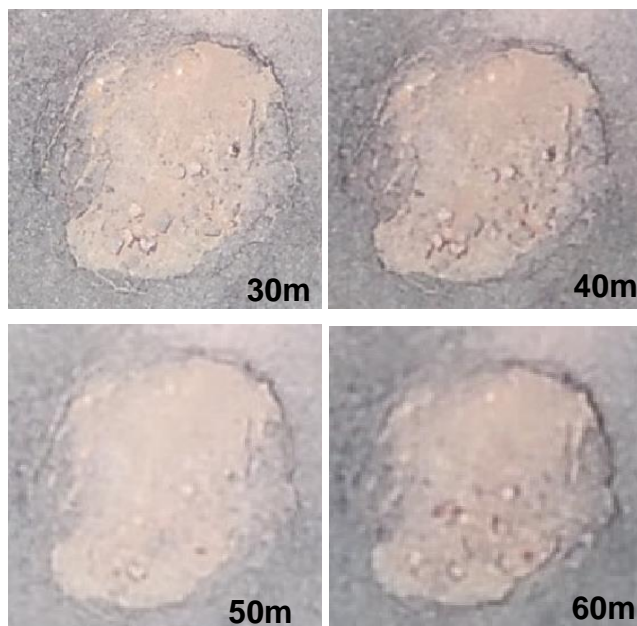


Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Analisando o Gráfico 7, são perceptíveis as alterações nas médias dos erros dos levantamentos quando ocorrem alterações nas alturas. Nesse caso, com os levantamentos de larguras, há menor variação na mensuração das painéis quando comparados aos remendos. Também é possível perceber que há aumento do erro de acordo com o aumento da altura para ambos os defeitos. Isso ocorre, provavelmente, pela menor quantidade de imagens sobrepostas das localidades com defeitos, visto que, quanto maior a altura, menor a quantidade de imagens para sobreposição, pois a área de abrangência da captura da imagem será maior. Dessa forma, quanto menor for a quantidade de imagens sobrepostas, menor será a acurácia e a qualidade do processamento e do mosaico de imagens, causando um erro maior quando este é medido.

Além das taxas de sobreposição, é perceptível que, quanto menor a altura de voo, maior é a qualidade das imagens (como mostrado na Figura 29), facilitando assim a medição dos defeitos e diminuindo o percentual de erro humano das mensurações feitas.

Figura 29 — Comparação de panela em diferentes alturas Método Linear.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Como no método Grid, mesmo com essas diferenças percentuais, percebe-se que a taxa de erro nos levantamentos é pequena, variando de 2,90% a 4,55% para panelas, e de 1,21% a 3,44% para remendos, sendo possível verificar a similaridade dos valores do levantamento e processamento com os valores reais.

4.2.2 Resultados para processamentos com pontos de controle Método Linear

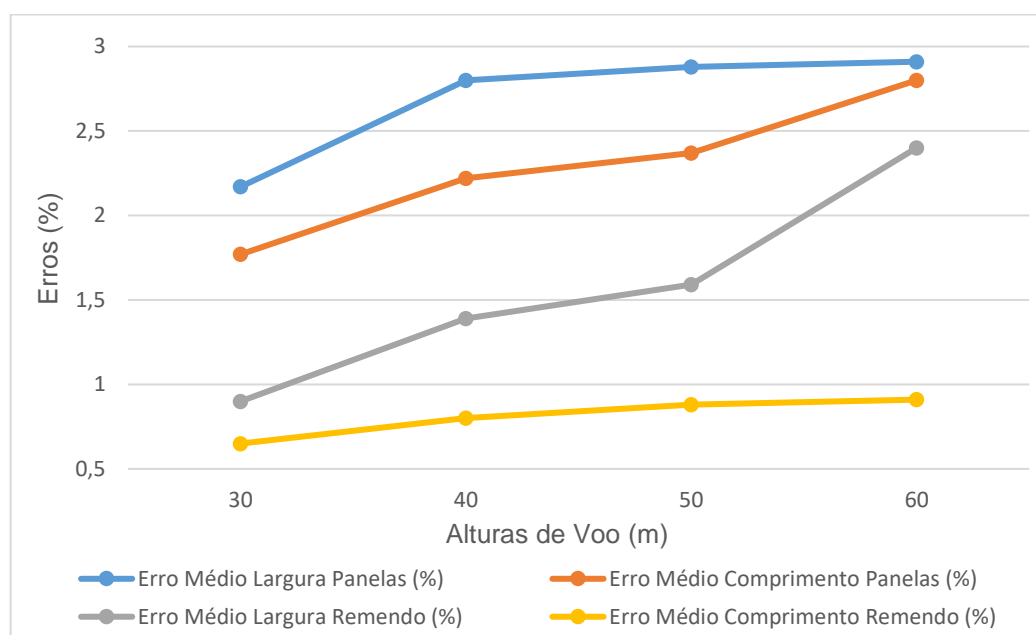
Após verificar os resultados obtidos por levantamentos sem a utilização de pontos de controle, foram analisados os resultados obtidos para as mensurações com pontos de controle. Assim, elaborou-se a Tabela 9, juntamente ao Gráfico 8, para que fosse possível melhor visualização e comparação dos resultados alcançados.

Tabela 9 – Resultados Método Linear para painéis e remendos com pontos de controle.

Alturas de voo (m)	PANELA		REMENDO	
	Erro médio largura (%)	Erro médio comprimento (%)	Erro médio largura (%)	Erro médio comprimento (%)
30	2,17	1,77	0,90	0,65
40	2,80	2,22	1,39	0,80
50	2,88	2,37	1,59	0,88
60	2,91	2,80	2,40	0,91

Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Gráfico 8 – Comparação de erros médios para painéis Método Linear com pontos de controle.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Com os dados obtidos, é perceptível que a altura de voo influencia a porcentagem de erros dos levantamentos, sendo analisado que, em uma altura de 30 metros, obtiveram-se erros de 2,17% para largura e 1,77% em comprimento de painéis. Para uma altura de 60 metros, a porcentagem de erros aumentou para 2,91% em largura e 2,80% em comprimento.

Para remendos, houveram erros percentuais em uma altura de 30 metros de 0,90% para largura e 0,65% para comprimento; para 60 metros de altura, esses erros chegam a 2,40% em largura e 0,91% em comprimento. Dessa maneira, percebe-

se que, quanto menor a altura de voo, menores os erros obtidos, tanto em largura quanto em comprimento, e também em área no caso dos remendos.

Além da diferença entre os valores dos erros de acordo com as alturas, também é perceptível que os erros para defeitos do tipo panela são maiores percentualmente que os erros obtidos para remendos. Essas diferenças devem ocorrer por conta do tamanho de cada defeito. Como os remendos abrangem maior área, tem-se maior quantidade de sobreposição de imagens, melhorando a acurácia do processamento das imagens obtidas.

4.3 Comparação entre a utilização ou não de pontos de controle

Para que fosse possível realizar uma comparação entre os resultados, desenvolveu-se a Tabela 10 e os Gráficos 9 e 10. Neles encontram-se presentes os valores de erros médios para painéis e remendos, comparando-se os levantamentos utilizando pontos de controle e sem a utilização de pontos de controle para o método Grid.

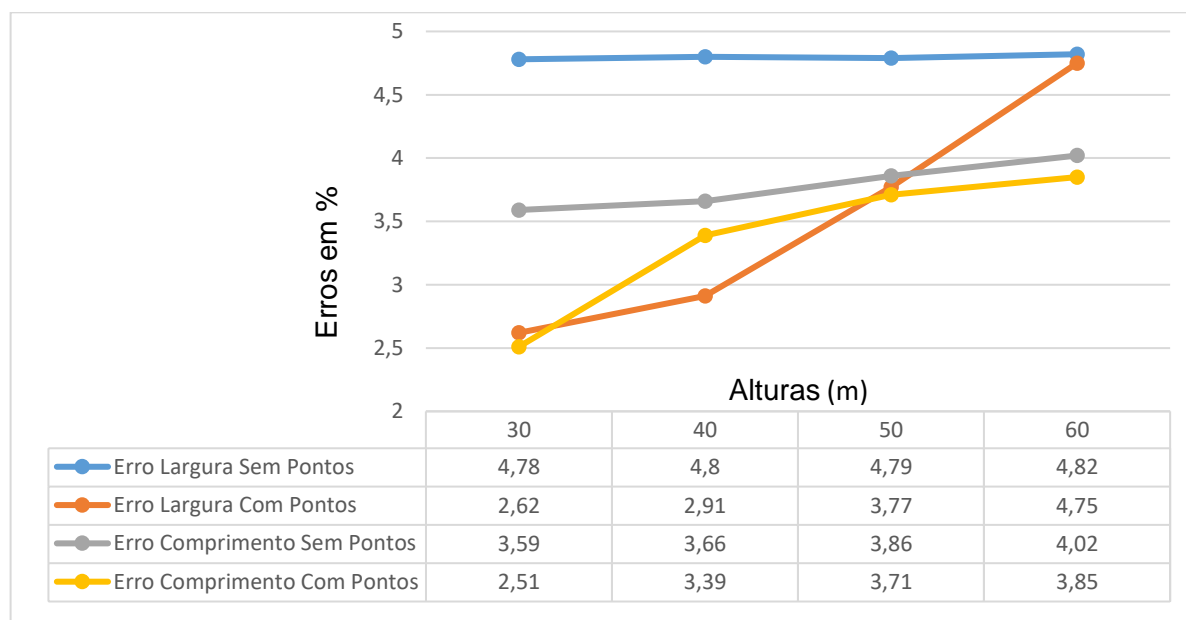
Vale ressaltar que, como visto nos subitens anteriores (4.1.1 e 4.1.2), os levantamentos em velocidade normal foram os que obtiveram melhores resultados de erros. Dessa maneira foram utilizados esses valores para elaboração das tabelas e gráficos supramencionados.

Tabela 10 – Comparação entre resultados do método Grid com e sem pontos de controle.

Alturas de voo (m)	Pontos de controle	PANELAS		REMENDOS	
		Erro Médio Largura (%)	Erro médio comprimento (%)	Erro médio largura (%)	Erro médio comprimento (%)
30	SEM	4,78	3,59	2,60	1,67
30	COM	2,62	2,51	1,89	1,15
40	SEM	4,80	3,66	2,60	1,76
40	COM	2,91	3,39	2,21	1,62
50	SEM	4,79	3,86	3,02	1,92
50	COM	3,77	3,71	2,41	1,70
60	SEM	4,82	4,02	2,96	2,16
60	COM	4,75	3,85	2,70	2,04

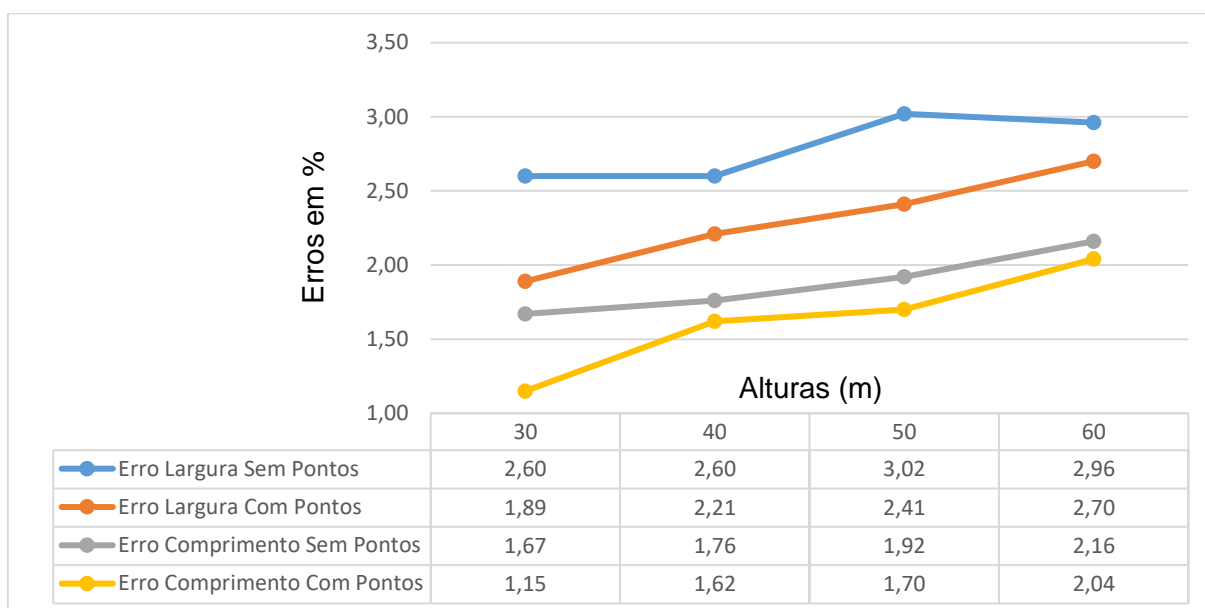
Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Gráfico 9 – Comparação de utilização de pontos de controle para painéis método Grid.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Gráfico 10 – Comparação de utilização de pontos de controle para remendos método Grid.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Com a verificação dos Gráficos 9 e 10, é perceptível que, mesmo com os dois levantamentos apresentando erros de pouca expressão a utilização de pontos de controle permite que os valores dos erros diminuam, obtendo melhores resultados para o levantamento dos defeitos para o método Grid. Assim, obtiveram-se valores mínimos de erro médio, como 1,89% em largura e 1,15% em comprimento na altura de 30m para remendos.

É perceptível que, para os erros médios em larguras, tanto para painéis quanto para remendos, ocorreram maiores alterações de valores, quando comparados os resultados obtidos com e sem a utilização de pontos de controle. Provavelmente isso ocorre em virtude de as larguras obterem maiores valores de erros percentuais nos levantamentos sem pontos de controle. Então quando os pontos são adicionados, ocorre maior variação na acurácia dos dados processados.

Além dessa diferença, percebe-se que, nos erros do tipo painel, ocorrem também maiores disparidades de resultados que os erros tipo remendo para os dois métodos de processamento. O que, provavelmente, se refere às dimensões desses defeitos, visto que as painéis são erros de menores proporções. Quando não existiam os pontos de controle, os dados fotogramétricos eram mais imprecisos para esses defeitos, pois não estavam presentes em diversas imagens, diferentemente dos remendos. Portanto, com a adição dos pontos, foi possível adicionar maior quantidade de dados ao processamento, diminuindo os erros médios existentes.

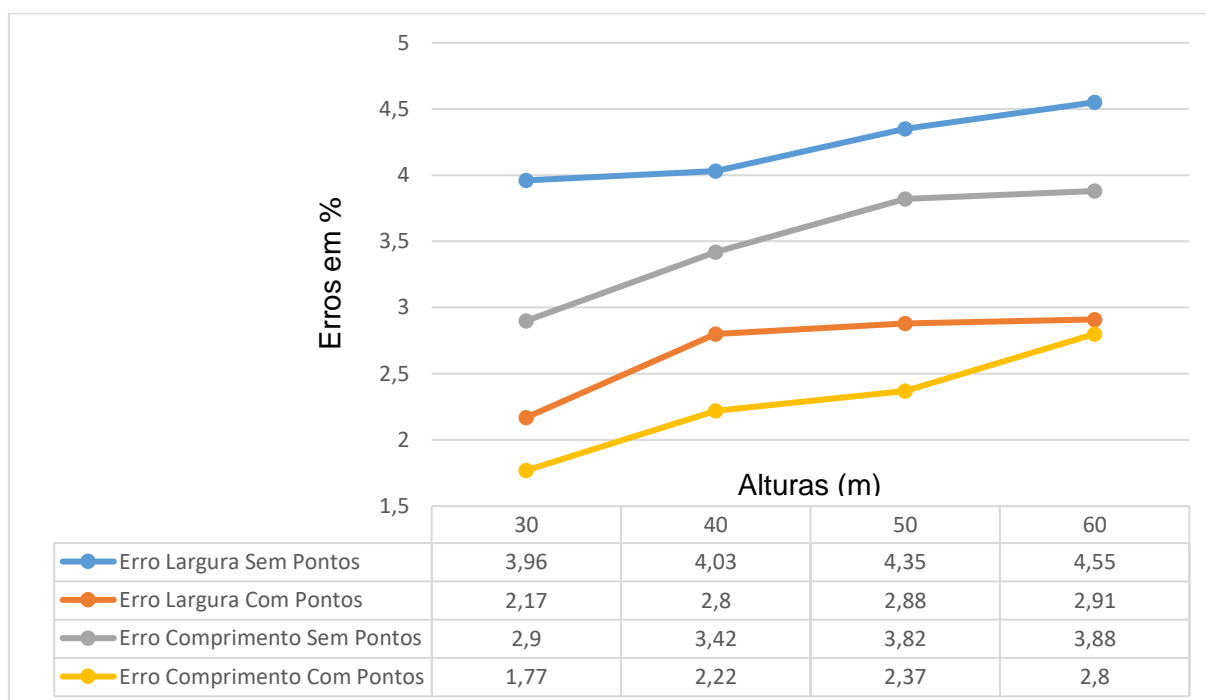
As relações feitas para o método Grid também foram feitas para o método Linear e são apresentadas na Tabela 11 e nos Gráficos 11 e 12.

Tabela 11 – Comparação entre resultados do método Linear com e sem pontos de controle.

Alturas de Voo (m)	Pontos de Controle	PANELAS		REMENDOS	
		Erro Médio Largura (%)	Erro Médio Comprimento (%)	Erro Médio Largura (%)	Erro Médio Comprimento (%)
30	SEM	3,96	2,90	1,63	1,21
30	COM	2,17	1,77	0,90	0,65
40	SEM	4,03	3,42	2,55	1,69
40	COM	2,80	2,22	1,39	0,80
50	SEM	4,35	3,82	2,97	1,68
50	COM	2,88	2,37	1,59	0,88
60	SEM	4,55	3,88	3,44	1,72
60	COM	2,91	2,8	2,4	0,91

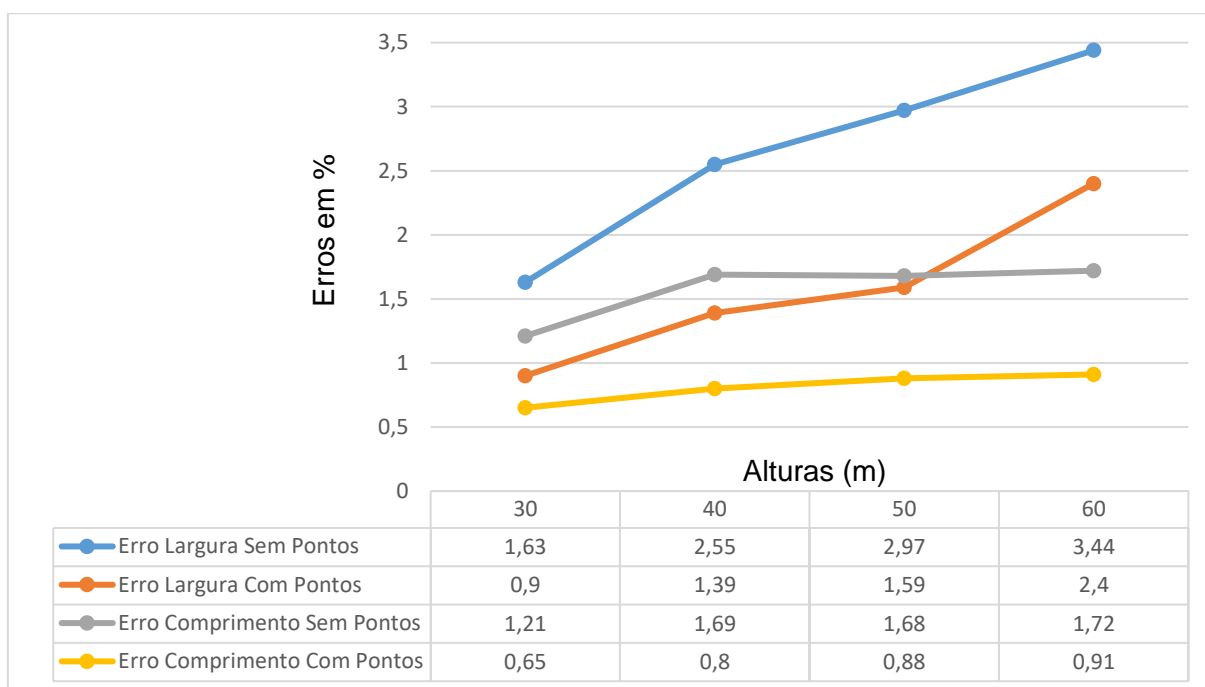
Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Gráfico 11 – Comparação de utilização de pontos de controle para painéis método Linear.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Gráfico 12 – Comparação de utilização de pontos de controle para remendos método Grid.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Como no método Grid, também, existem variações positivas nos resultados quando os pontos de controles são empregados no método Linear. É perceptível a diminuição dos valores de erros médios tanto para panelas quanto para remendo, fazendo com que esses valores cheguem até a resultados pequenos como 0,65% de erro de comprimento para remendos em uma altura de 30m.

Também, como no método Grid, verificou-se que as maiores alterações de valores estão presentes em defeitos do tipo panela. A maior diferença perceptível entre os dois métodos refere-se ao fato de que, no método Linear, percebe-se diminuição significativa tanto para erros de comprimento como para erros de largura. Isso pode ocorrer por conta do tipo de voo empregado em cada método, causando mudanças nas sobreposições e na qualidade das imagens obtidas das localidades com defeitos.

Deste modo, com os dados expostos, é possível concluir que os pontos de controle, quando empregados no processamento de defeitos de pavimentos, acarretam diminuição nos erros médios nos dois métodos de levantamento, principalmente para erros do tipo panela, pois estes, como explicado anteriormente, são menores. Assim, com a adição de pontos de controle, obtém-se maior quantidade de dados de posicionamento, além de melhora da precisão do ortomosaico gerado.

4.4 Comparação entre métodos de levantamento

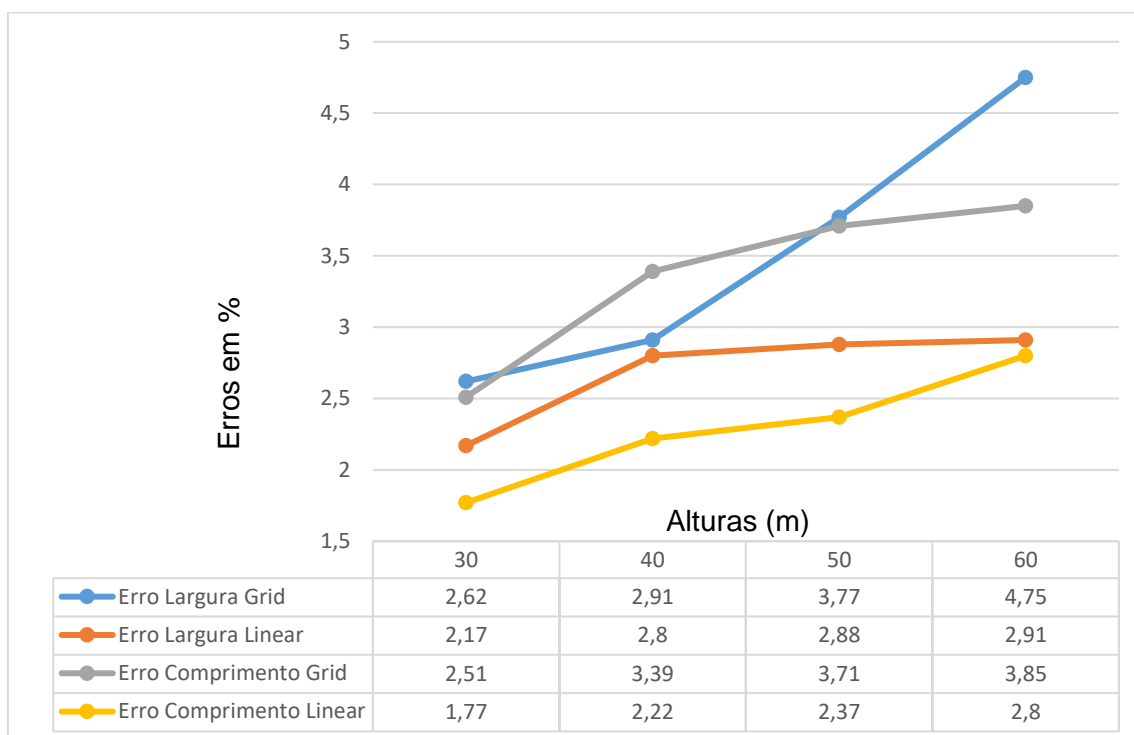
Para comparação dos métodos de levantamento (Grid e Linear), foram selecionados os resultados com o emprego de pontos de controle no levantamento, visto que estes são os dados com menores erros percentuais médios obtidos. Dessa forma, foram elaboradas a Tabela 12 e os Gráficos 13 e 14, possibilitando melhor comparação entre os valores levantados.

Tabela 12 – Comparação entre resultados entre métodos Grid e Linear.

Alturas de voo (m)	PANELAS			REMENDOS	
	Velocidade de voo	Erro médio largura (%)	Erro médio comprimento (%)	Erro médio largura (%)	Erro médio comprimento (%)
30	Grid	2,62	2,51	1,89	1,15
30	Linear	2,17	1,77	0,90	0,65
40	Grid	2,91	3,39	2,21	1,62
40	Linear	2,80	2,22	1,39	0,80
50	Grid	3,77	3,71	2,41	1,70
50	Linear	2,88	2,37	1,59	0,88
60	Grid	4,75	3,85	2,70	2,04
60	Linear	2,91	2,80	2,40	0,91

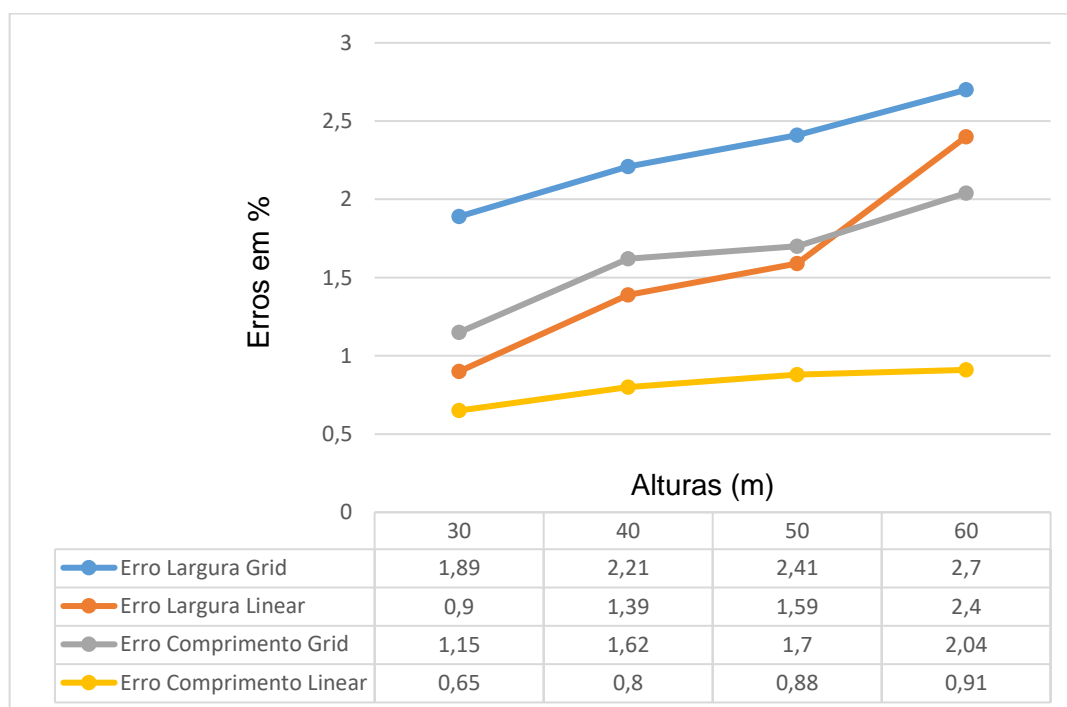
Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Gráfico 13 – Comparação de utilização de métodos para levantamento de painelas.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Gráfico 14 – Comparação de utilização de métodos para levantamento de remendos.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Com a análise da Tabela 12 e Gráficos 13 e 14, percebe-se que os resultados obtidos, para levantamentos de painéis e remendos, pelo método Linear apresentam menor erro percentual, tanto em relação à largura quanto ao comprimento, em comparação ao o método Grid. Os valores de erros médios tendem a diminuir de acordo com a altura de voo: comparando-se os erros de larguras e comprimentos para painéis, obtêm-se porcentagens de 2,62% para o método Grid e 2,17% para Linear, ou seja, um decréscimo de 0,45% em erros de largura. Para os erros de comprimento, obtêm-se 2,52% para o método Grid e 1,77 para o método Linear, apresentando, assim, um declínio de 0,74%.

Para defeitos do tipo remendo, também se obtiveram decréscimos satisfatórios: para largura os valores diminuíram de 1,89% no método Grid para 0,90% no método Linear, ou seja, uma diferença de quase 1,00%. Os valores de comprimento variaram de 1,15% no método Grid para 0,65% no método Linear, uma diferença de 0,50%.

Essas diferenças podem ocorrer por questões operacionais de cada voo, já que, no método Grid, são realizados voos transversais podendo tornar o RPA mais suscetível a adernamentos laterais e instabilidades de voo pela ação de ventos. Demandando, assim, maiores esforços de estabilização da aeronave. Já o método Linear, por utilizar deslocamentos longitudinais, faz com que o RPA supere, de maneira mais fácil, as ações do vento.

4.5 Verificação por aplicação de ferramentas estatísticas

Os resultados com menores erros percentuais, ou seja, mais satisfatórios, foram dos voos realizados na altura de 30 metros. Dessa forma, para uma melhor análise dos dados obtidos, determinou-se que esses valores seriam verificados estatisticamente, com intuito de comparação entre os métodos.

Para verificação e comparação estatística dos métodos utilizados para levantamentos dos defeitos, foram selecionados 3 painéis e 3 remendos de dimensões distintas. Estes tiveram seus comprimentos e larguras levantados 30 vezes para cada velocidade, cada método e com e sem o emprego de pontos de controle. Com esses dados, foi possível calcular as médias, desvio padrão e coeficiente de variação, além de realizar os Testes T de *Student*, visando a um teste de hipótese

para cada amostra, utilizando como média hipotética os valores medidos em campo, ou seja, valores reais.

4.5.1 Verificação em defeitos do tipo panela

Para facilitar a verificação e comparação entre os resultados obtidos com o teste de hipótese T de *Student* para panelas, elaboraram-se Tabelas 13,14 e 15, com os seguintes dados como: Média, Desvio Padrão, Coeficiente de Variação, Valor T e Valor P.

Vale ressaltar que, como média de hipótese, foram aplicados os valores levantados em campo. Assim, tem-se que:

H_0 : $\mu =$ média de hipótese

H_1 : $\mu \neq$ média de hipótese

Em que: H_0 é a hipótese nula;

H_1 é a hipótese alternativa;

μ é a média

Tabela 13 – Resultados dos cálculos estatísticos da panela 1 para todos os métodos.

PANELA 1										
Largura (Valor em campo: 1,44 m)						Comprimento (Valor em campo: 1,48 m)				
Método	Média	Desv Pad	Coef de Variação	Valor T	Valor P	Média	Desv Pad	Coef de Variação	Valor T	Valor P
Normal	1,36	0,0145	1,07%	-30,09	0	1,45	0,0215	1,48%	-6,85	0
Normal + Pontos	1,39	0,0118	0,85%	-23,58	0	1,47	0,0191	1,30%	-3,34	0,002
Rápido	1,34	0,0163	1,22%	-34,81	0	1,46	0,0227	1,55%	-5,87	0
Rápido + Pontos	1,35	0,0131	0,97%	-39,83	0	1,46	0,0226	1,55%	-5,01	0
Linear	1,36	0,0154	1,13%	-27,11	0	1,47	0,0166	1,13%	-4,28	0
Linear + Pontos	1,44	0,0101	0,70%	-1,35	0,187	1,47	0,0097	0,66%	-2,44	0,738

Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Tabela 14 — Resultados dos cálculos estatísticos da panela 2 para todos os métodos.

PANELA 2										
Largura (valor em campo: 0,72 m)						Comprimento (valor em campo: 0,74 m)				
Método	Média	Desv Pad	Coef de Variação	Valor T	Valor P	Média	Desv Pad	Coef de Variação	Valor T	Valor P
Normal	0,65	0,0145	2,23%	-27,24	0	0,65	0,0135	2,08%	-36,61	0
Normal + pontos	0,68	0,0102	1,50%	-21,83	0	0,71	0,0143	2,01%	-13,51	0
Rápido	0,66	0,0177	2,68%	-19,19	0	0,65	0,0143	2,20%	-19,27	0
Rápido + pontos	0,68	0,0135	1,99%	-14,73	0	0,68	0,0155	2,28%	-20,76	0
Linear	0,66	0,0138	2,09%	-27,36	0	0,69	0,0141	2,04%	-17,5	0
Linear + pontos	0,72	0,0076	1,06%	-0,72	0,476	0,74	0,0094	1,27%	-0,78	0,442

Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Tabela 15 – Resultados dos cálculos estatísticos da panela 7 para todos os métodos.

PANELA 7										
Largura (valor em campo: 2,55 m)						Comprimento (valor em campo: 1,70 m)				
Método	Média	Desv Pad	Coef de Variação	Valor T	Valor P	Média	Desv Pad	Coef de Variação	Valor T	Valor P
Normal	2,40	0,023	0,96%	-35,4	0	1,68	0,0152	0,90%	-7,09	0
Normal + pontos	2,49	0,0125	0,50%	-28	0	1,70	0,012	0,71%	-2,66	0,013
Rápido	2,39	0,0204	0,85%	-43,94	0	1,67	0,0233	1,40%	-6,89	0
Rápido + pontos	2,48	0,0136	0,55%	-30,01	0	1,69	0,0168	0,99%	-1,85	0
Linear	2,49	0,0161	0,65%	-19,78	0	1,70	0,0149	0,88%	-1,10	0,279
Linear + pontos	2,55	0,0119	0,47%	-0,15	0,879	1,70	0,0091	0,54%	1,61	0,677

Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Ao analisar as Tabelas 13,14 e 15, percebe-se que, na maioria dos casos, o método linear com pontos de controle foi o único que não apresentou indícios suficientes para rejeitar a hipótese nula de que a média das medidas realizadas é divergente da média dos valores levantados em campo. Apenas na análise de comprimento da Panela 7, mais de um método (Linear e Linear com Pontos de Controle) não apresentou indícios suficientes para rejeitar a hipótese nula, mas, em comparação aos outros fatores como Coeficiente de Variação e Valor T, percebe-se que o método Linear, com pontos de controle, apresenta melhores resultados.

Vale ressaltar que, em todos os casos, o método Linear com pontos de Controle apresenta os valores de médias mais próximos aos mensurados, além de ter um menor desvio padrão e coeficiente de variação, ou seja, menor dispersão e, com isso, melhor precisão. Além disso, percebe-se que os pontos de controle, as velocidades e métodos de levantamento influenciam os resultados de Coeficiente de Variação. Sendo, na maioria das ocasiões, o emprego de velocidade rápida e a não utilização dos pontos de controle os resultados com valores inferiores.

Vale ressaltar que, em relação ao coeficiente de variação, em todos os casos e em todas as amostras, os resultados foram considerados homogêneas, inferiores a 15%, ou seja, não houve grande dispersão dos valores obtidos (Lopes, 2003).

4.5.2 Verificação em defeitos do tipo remendo

O teste de hipótese T de *Student* também foi realizado para a verificação e comparação dos Remendos. As Tabelas 16, 17 e 18 foram elaboradas para facilitar a visualização dos dados. Nestas, assim como as tabelas do Item 4.5.1, estão presentes valores de: Média, Desvio Padrão, Coeficiente de Variação, Valor T e Valor P.

Tabela 16 – Resultados dos cálculos estatísticos do remendo 2 para todos os métodos.

REMENDO 2											
Largura (valor em campo: 1,44 m)						Comprimento (valor em campo: 1,70 m)					
Método	Média	Desv Pad	Coef de Variação	Valor T	Valor P	Método	Média	Desv Pad	Coef de Variação	Valor T	Valor P
Normal	5,56	0,0143	0,26%	-14,42	0	Normal	4,36	0,0165	0,38%	-13,63	0
Normal + pontos	5,59	0,0113	0,20%	-2,90	0,007	Normal + pontos	4,38	0,0167	0,38%	-6,90	0,002
Rápido	5,51	0,0186	0,34%	-27,03	0	Rápido	4,21	0,0175	0,42%	-60,59	0
Rápido + pontos	5,56	0,0144	0,26%	-14,58	0	Rápido + pontos	4,30	0,023	0,53%	-24,37	0
Linear	5,56	0,0169	0,30%	-14,64	0	Linear	4,36	0,0224	0,51%	-11	0
Linear + pontos	5,60	0,0112	0,20%	-0,82	0,42	Linear + pontos	4,40	0,0105	0,24%	-1,56	0,13

Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Tabela 17 – Resultados dos cálculos estatísticos do remendo 3 para todos os métodos.

REMENDO 3										
Largura (valor em campo: 1,44 m)						Comprimento (valor em campo: 1,70 m)				
Método	Média	Desv Pad	Coef de variação	Valor T	Valor P	Média	Desv pad	Coef de variação	Valor T	Valor P
Normal	3,21	0,0142	0,44%	-8,38	0	10,69	0,0146	0,14%	-40,53	0
Normal + pontos	3,21	0,0142	0,44%	-8,38	0	10,74	0,0136	0,13%	-23,28	0
Rápido	3,12	0,0177	0,57%	-34,12	0	10,60	0,0213	0,20%	-52,82	0
Rápido + pontos	3,17	0,0144	0,45%	-22,18	0	10,70	0,0183	0,17%	-29	0
Linear	3,21	0,0174	0,54%	-7,68	0	10,71	0,0203	0,19%	-23,93	0
Linear + pontos	3,23	0,0095	0,29%	-0,96	0,34	10,80	0,0108	0,10%	-1,35	0,187

Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Tabela 18 – Resultados dos cálculos estatísticos do remendo 4 para todos os métodos.

REMENDO 4										
Largura (valor em campo: 1,44 m)						Comprimento (valor em campo: 1,70 m)				
Método	Média	Desv Pad	Coef de Variação	Valor T	Valor P	Média	Desv pad	Coef de variação	Valor T	Valor P
Normal	1,42	0,0148	1,04%	-29,13	0	1,54	0,014	0,91%	-30,41	0
Normal + pontos	1,45	0,0135	0,93%	-20,4	0	1,56	0,0145	0,93%	-13,42	0
Rápido	1,44	0,0194	1,35%	-17,58	0	1,51	0,0223	1,48%	-22,52	0
Rápido + pontos	1,45	0,0157	1,08%	-14,85	0	1,56	0,0165	1,06%	-13,17	0
Linear	1,46	0,0185	1,27%	-10,66	0	1,59	0,0129	0,81%	-2,97	0,006
Linear + pontos	1,50	0,0089	0,59%	-1,42	0,165	1,60	0,0126	0,79%	0	1

Fonte: Elaborada pelo autor, 2019.

Como ocorrido anteriormente com os defeitos tipo panela, para os remendos, o método Linear com Pontos de Controle foi o único que não apresentou indícios suficientes para rejeitar a hipótese nula de que as medidas são iguais as médias em todos os casos. Além disso, percebe-se que esse método é o que apresenta menores valores de desvio padrão, de coeficiente de variação e valor T. Isso significa que ele possui maior acurácia nos seus resultados.

Ademais, como analisado com os defeitos do tipo panela, verificam-se piores resultados em geral para levantamentos em velocidade rápida e sem a utilização de pontos de controle. Desse modo, os pontos e a velocidade de voo podem alterar a precisão do levantamento e, com isso, os resultados obtidos.

Vale ressaltar novamente que, em relação ao coeficiente de variação, em todos os casos todas as amostras foram consideradas homogêneas, pois obtiveram-se valores menores que 15%, ou seja, não houve grande dispersão dos valores obtidos (LOPES, 2003).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Novas tecnologias podem ser incorporadas nas diversas áreas da Infraestrutura de Transportes de modo que seja possível obterem-se soluções mais produtivas. Os resultados obtidos nos levantamentos deste trabalho foram realizados com uma série de voos e processamentos, para que fosse possível comparar alturas, velocidades e métodos de levantamento de imagens.

Verificou-se que, com as ortofotos obtidas, é possível mensurar os erros de levantamento com uma boa acurácia, e que as variáveis estudadas como altura de voo, velocidade e método de levantamento têm grande influência para a realização de levantamentos fotogramétricos de defeitos do tipo panela e remendo em pavimentos urbanos flexíveis.

A análise dos resultados pela comparação dos valores de erros médios demonstrou que o Método Linear com a utilização de Pontos de Controle é o que melhor serve para levantamento de defeitos em pavimentos urbanos flexíveis, obtendo valores de erro médio para defeitos do tipo panela entre 2,17% e 2,91% para largura e 1,77% e 2,8% para comprimento. Para defeitos tipo remendo, foram obtidos resultados de erros médios para largura entre 0,90% e 2,40% e para comprimento entre 0,65% e 0,91%. Também foi possível verificar que as menores porcentagens de erros médios são daqueles voos realizados com alturas mais baixas.

Também foi possível realizar análise estatística exploratória dos melhores resultados obtidos, verificando-se, por meio do teste de hipótese T, análise de desvio padrão e coeficiente de variação, que os levantamentos na altura de 30 metros, com base no método Linear de levantamento e com o emprego de pontos de controle, é o que obtém resultados mais satisfatórios, visto que, para quase todos os casos verificados, este foi o único que não apresentou indícios suficientes para rejeitar a hipótese nula de que as medidas são iguais à média, apresentando menores valores de desvio padrão, coeficiente de variação e valor T.

Vale ressaltar que o que também determinará a melhor forma de levantamento é a quantidade necessária de precisão, tempo e custo, ou seja, para alguns levantamentos, os resultados de erros percentuais obtidos para voos, em uma altura de 60 metros, podem ser satisfatórios obtendo valores de 0,90% e 0,65% para erros de largura e comprimento em remendos.

Além disso, foi possível demonstrar as sequências que devem ser cumpridas para a realização desse tipo de levantamento, abordando desde a criação de um *checklist* de controle até uma série de tarefas que devem ser feitas no processamento de imagens.

Assim, com base nos resultados obtidos, conclui-se que as ortofotos geradas por levantamento com RPA podem colaborar um Sistema de Gerência de Pavimentos, auxiliando a obtenção de dados e o controle dos defeitos do tipo panelas e remendos. Vale salientar que a metodologia desenvolvida não visa extinguir os métodos existentes e, sim, agregar-se aos mesmos, além de também poder ser estendida para rodovias em geral. Com isso, deve-se ficar claro que cada plataforma aérea tem suas peculiaridades e cabe aos seus usuários adaptarem-se de acordo com suas necessidades.

Quando se trata de limitações para aplicação do método, tem-se que, no *checklist* para voo, há variáveis que afetam o levantamento fotogramétrico com a utilização de RPAs, sendo a maioria climatológicas. Dentre as limitações ambientais, tem-se que: em dias de chuva não podem ser feitos os voos já que o equipamento não é suporta contato com água; também não é aconselhável fazer os levantamentos em dias com grande quantidade de nuvens, pois as sombras geradas por essas podem interferir na visualização dos defeitos no pavimento; além de os voos não poderem ser feitos em dias com rajadas de vento maiores que 36 Km/H, visto que o equipamento pode não aguentar a força gerada pela ação do vento e cair. Por fim, é recomendado que os voos sejam realizados na janela horária de sol a pico, ou seja, entre 11 e 13 horas para que, assim, haja maior incidência de luz no pavimento, facilitando a visualização dos defeitos.

Também há variáveis externas que podem trazer limitações para o método como: evitar áreas onde haja redes de alta voltagem já que estas podem interferir na comunicação entre os satélites e o RPA; necessidade de um computador com configurações avançadas para o processamento de imagem; caso não existam alvos naturais para levantamento de pontos de controle, devem ser implantados alvos artificiais na localidade. Além disso, como mencionado anteriormente, foram utilizados dois tipos de defeitos, panelas e remendos em pavimentos flexíveis, para a elaboração desse estudo assim delimitando o emprego desse método.

Por fim, vale destacar as lacunas que a pesquisa deixa: a primeira refere-se à categoria de RPA adotada, o que implica com que o método deva ser adaptado

para outros tipos de aeronaves remotamente pilotadas; a segunda refere-se aos tipos de defeitos abordados. No caso da presente pesquisa, foram remendos e painéis, sendo necessários estudos para outros defeitos; a terceira constitui as alturas de voo abordadas limitando o trabalho para baixas alturas; a quarta refere-se às análises exploratórias realizadas que visaram à altura de 30 metros.

Assim, como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se:

- a) realizar levantamentos com outras plataformas aéreas, para que estas sejam possivelmente comparadas e verificar qual a mais indicada para o levantamento de outros defeitos em vias urbanas;
- b) executar estudos para outros defeitos existentes no pavimento como trincas, desgastes e afundamentos, para que, assim, seja possível complementar o método proposto neste trabalho;
- c) estudar outros valores de altura de voo como 80, 90 e 100 metros para que, assim, seja possível verificar a variabilidade dessas alturas de levantamento;
- d) verificar a viabilidade econômica para levantamentos de defeitos em pavimentos com auxílio de RPA.

REFERÊNCIAS

AERO DRONE BRASIL (Brasil). **Imagem tipos de drones para mineração**. 2018. Disponível em: <<https://www.aerodronebrasil.com/2018/07/10/drones-tecnicas-de-aerolevantamento-em-mineracao/tipos-de-drones-para-mineracao/>>. Acesso em: 10 de novembro de 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, ANAC. Regulamento brasileiro da aviação civil especial RBAC-E nº94, **Requisitos gerais para Veículos Aéreos Não Tripulados e Aeromodelos**. Disponível em <<http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94-emd-00>> Acesso em: 10 de julho de 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, ANAC. **Regras para Veículos Aéreos Não Tripulados e Aeromodelos**. 2017. Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/drones>>. Acesso em: 10 de julho de 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. **Manual de Orientações Homologação de DRONES uso próprio/pessoal - Declaração de Conformidade**. Brasília: ANATEL, 2016. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documento.asp?numeroPublicacao=347841&pub=original&filtro=1&documentoPath=347841.pdf>> Acesso em: 10 Julho de 2018.

ALMEIDA, I.C. **Estudo sobre o uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) para mapeamento aéreo com fins de elaboração de projetos viários**. 2014. 127f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2014.

ANDRADE, Jailson Bittencourt de. **Fotogrametria**. 2. ed. Curitiba: SBEE, 1994.

APS, Marcia.; BALBO, José Tadeu; SEVERI, Andreas Arantes. **Avaliação Superficial de Pavimentos Asfálticos em Vias Urbanas Utilizando o Método do PCI**. In: 31ª Reunião Anual de Pavimentação, São Paulo, 1998.

ARMOUSH, Ashraf; BEACKSCHULZE, Eva; KOWALEWSKI, Stefan. Safety assessment of design patterns for safety-critical embedded systems. In: EUROMICRO CONFERENCE, 35., 2009, [s.l.]. **Safety assessment of design patterns for safety-critical embedded systems**. [s.l.]: Seaa, 2009. p. 523 - 527.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentos asfálticos: patologia e manutenção**. São Paulo: Plêiade, 1997.

BARR, Michael. **Programming Embedded Systems in C and C++**. [s.l.]: O'reilly Media, 1999. 200 p.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 4. ed. Rio de Janeiro: Ultraset, 2008.

CASTELO BRANCO, Luiz Henrique, MANIAC: **Uma Metodologia Para O Monitoramento Automatizado das Condições dos Pavimentos Utilizando VANTs**. 2016. 191f. Tese (Doutorado) – Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Universidade de São Carlos, São Carlos, SP, 2016.

CHAMBON, S.; MOLIARD, J. M. Automatic Road Pavement Assessment with Image Processing: Review and Comparison. **International Journal of Geophysics**, v. 2011, p. 1–20, 2011.

CNT; SEST; SENAT. **Pesquisa CNT de rodovias 2018: Relatório Gerencial**. Brasília: Cnt, 2018. 405 p.

COELHO FILHO, Luiz Carlos Teixeira; SILVA, Jorge Luís Nunes Brito. **Fotogrametria Digital**. Rio de Janeiro: Eduerj, 2007. 196 p.

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO, DECEA. **INSTRUÇÃO DO COMANDO DA AERONÁUTICA – ICA-100-40**: Sistemas de aeronaves remotamente pilotadas e o acesso ao espaço aéreo brasileiro. Rio de Janeiro: DECEA, 2015 Disponível em: < <https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=4487> > Acesso em: 10 julho de 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **TERMINOLOGIA TER 005/2003**: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semirrígidos - terminologia. Rio de Janeiro: DNIT, 2003a. Disponível em < http://ipr.dnit.gov.br/normas-emanuais/normas/terminologiater/dnit005_2003_ter.pdf> Acesso em: 06 de agosto de 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 006/2003 – PRO**: Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos – Procedimento. Rio de Janeiro: Dnit, 2003a. 10 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 008/2003 – PRO**: Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos Procedimento. Rio de Janeiro: Dnit, 2003b. 11 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 009/2003 – PRO**: Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos – Procedimento. Rio de Janeiro: Dnit, 2003c. 06 p.

DI RENZO, André Biffe. **Desenvolvimento de Metodologia para Monitoramento Remoto de Rodovias – VANTRod**. 2017. 96 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PA, Brasil 2017.

DIÁLOGOS UNIÃO EUROPEIA BRASIL (DUEB). **Relatório Estudo Sobre a Indústria Brasileira e Europeia de Veículos Aéreos Não Tripulados**. Brasília: Diálogos União Europeia Brasil, 2017. 92 p. Disponível em: <http://www.sectordialogues.org/sites/default/files/publicacao_drones-20161130-20012017-web.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2018.

DJI (China). **Phantom 4 Pro**. 2016. Disponível em: <<https://www.dji.com/phantom-4-pro>>. Acesso em: 03 nov. 2018.

DOD. **Unmanned aircraft systems roadmap – 2005-2030**. Office of the Secretary of Defense, 2005.

Dynatest. **Perfilômetro a Laser**. 2016. Disponível em: <<http://dynatest.com.br/perfilometro-laser-rsp/>>. Acesso em: 03 nov. 2018.

ENSEN, John R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598 p.

FELÍCISIMO, Angel Manuel. **Modelos Digitales del Terreno: Introducción y Aplicaciones en las Ciencias Ambientales**. Oviedo: Pentalfa, 1994. 222 p.

FERREIRA, Alexandre Moreno Richwin. **Avaliação de câmara de pequeno formato transportada por veículo aéreo não tripulado-VANT, para uso em aerolevamento**. 2014, 93p. Tese de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Brasília, Brasília, 2014.

FIALHO, Paloma Cruz Gentil. **Validação de resultados do inventário funcional de pavimentos flexíveis com o emprego do equipamento pavement scanner**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. doi:10.11606/D.3.2016.tde-19072016-080731. Acesso em: 2019-06-16.

GRIPP JR, Joel. **Ortorretificação de imagens de alta resolução para aplicação no cadastro técnico rural e mapeamento de área de preservação permanente e reservas legais**. 2009. 174f. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2009.

HAAS, Ralph C. G.; HUDSON, W. Ronald; ZANIEWSKI, John P. **Modern Pavement Management**. Malabar/Flórida: Krieger Publishing Company, 1994.

Herold, M., Roberts, D. D., Noronha, V. and Smadi, O. (2008). **Imaging spectrometry and asphalt road surveys**. Transportation Research Part C, vol. 16, pp. 153-166.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE – **Manual do Usuário Aplicativo Online IBGE-PPP Versão: abril 2017**. Rio de Janeiro, [2017]. Disponível em:<<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: agosto/2018.

KOMAZAKI, Juliane Mendonça et al. Avaliação da Qualidade Geométrica de Modelos Digitais do Terreno Obtidos a Partir de Imagens Adquiridas com VANT. In: XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 2017, Rio de Janeiro. **Artigo**. Rio de Janeiro: Cbc, 2017. p. 576 - 580.

KULGER, Angela. **Apostila qual a escala de um voo digital**. Disponível em: <<http://www.esteio.com.br/downloads/2008/EscalaDigital.pdf>>. Acesso em: 06 ago. 2018.

LIMA, E. M.; THOMAZ, T. A. M.; SEVERO, T. C. **Mapeamento aerofotogramétrico digital utilizando fotografias de médio formato**. 2010. 126f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Cartográfica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

LONGHITANO, George Alfredo. **VANTs para sensoriamento remoto: aplicabilidade na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes com cargas perigosas**. 2010, 163f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MAP PILOT. Maps Made Easy Map Pilot. Disponível em: <<https://www.mapsmadeeasy.com/features>>. Acesso em: 06 de agosto de 2018.

MEDEIROS, Nicilene das Graças. **Orientação exterior de imagens orbitais usando modelos rigorosos com feições retas**. 2007. 183f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista-UNESP, Presidente Prudente, São Paulo, 2007.

MEDIKONDA, Ben Swarup; PANCHUMARTHY, Seetha Ramaiah. **A framework for software safety in safety critical systems**: ACM SEGSOFT Software Engineering Notes. 34. ed. [s.l]: Acm Segsoft, 2009.

PARENTE, Dênis Cardoso; FELIX, Natália Carvalho; PICANÇO, Aurélio Pessoa. Utilização de veículo aéreo não tripulado (VANT) na identificação de patologia superficial em pavimento asfáltico. **Revista Alconpat**, [s.l.], v. 7, n. 2, p.160-360, 31 maio 2017. Revista ALCONPAT. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i2.161>.

PEREIRA, Osvaldo José Ribeiro; TAMAMARU, Rafael. Geração de modelos digitais de elevação com base em técnicas de estereoscopia digital, por meio de imagens VANT: Subsídio a identificação de manchas de desmatamento em áreas de preservação permanente. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais**. Foz do Iguaçu: Sbsr, 2013. p. 2113 - 2119.

PESSOA, Guilherme Gomes; MIYOSHI, Gabriela Takahashi; CARRILHO, André Caceres. Análise da Qualidade Posicional de Modelo Digital de Superfície Gerado a Partir de Correspondência de Imagens Aéreas Obtidas por RPAs. In: XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 2017, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: [s.l.], 2017. p. 763 - 767.

PIX4D (Suiça). **Exemplo de plano de Voo**. 2018. Disponível em: <<https://pix4d.com/product/pix4dcapture/>>. Acesso em: 01 de agosto 2018.

SCHNEBELE, E. et al. Review of remote sensing methodologies for pavement management and assessment. **European Transport Research Review**, v. 7, n. 2, 2015.

SHAHIN, Mohamed Y. **Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots**. 2ª Ed. New York: Chapman & Hall, 2005.

SHAHIN, Mohamed Y.; KOHN, Start D. **Development of a Pavement Condition Rating Procedure for Roads, Streets and Parking Lots**. Construction Engineering Research Laboratory, U.S. Army Corps of Engineers, Technical Report M-268, 1979.

SILVA NETO, Manoel et al. **Mapeamento aéreo com Phantom**. 2017. Disponível em: <<http://conteudo.droneng.com.br/case-mapeamento-aereo-com-phantom>>. Acesso em: 06 de agosto de 2018.

TOMMASELLI, Antônio Maria Garcia. M. G. ARMOD - **Automação dos processos de Reconstrução e orientação de Modelos usando imagens digitais**, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq, processo: 472322/04-4, 2004.

TOMMASELLI, Antonio Maria Garcia. **Fotogrametria Básica**. 2009. Disponível em: <http://www.faed.udesc.br/arquivos/id_submenu/891/introducao_a_fotogrametria.pdf>. Acesso em: 06 de agosto de 2018.

UAVSA (Estados Unidos). **Tabela de Classificação de VANTs segundo UAVSA**. 2016. Disponível em: <<http://www.uavsa.org>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

WANG, W. et al. A review of road extraction from remote sensing images. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**. v. 3, n. 3, p. 271–282, 2016.

WOLF, Paul R.. **Elements of Photogrammetry**. 2. ed. Nova York: Mc Graw Hill India, 2013.

WOLF, Paul R.; DEWITT, Bon A.; WILKINSON, Benjamin E. **Elements of Photogrammetry with Applications in GIS**. 4. ed. Nova York: Mcgraw-hill Education, 2014.

ZAKERI, H.; NEJAD, F. M.; FAHIMIFAR, A. Rahbin: A quadcopter unmanned aerial vehicle based on a systematic image processing approach toward an automated asphalt pavement inspection. **Automation in Construction**, v. 72, p. 211–235, 2016.

ZANARDI, Rafael Pereira. **Geração de Modelo Digital de Terreno a Partir de Par Estereoscópico do Sensor CCD do satélite CBERS-2 e Controle de Qualidade das Informações 84 Altimétricas**. 2006. 94 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

ZIMMERMAN, Kathryn A.; PIERCE, Linda M.; KRSTULOVICH, James. **Pavement Management Roadmap**. Washington: Federal Highway Administration, 2010. 18 p.

ANEXO A**MEMORIAL DESCRITIVO DE DEFEITO****PANELAS**

LARGURA (m) X COMPRIMENTO (m)

**Panela 1**

1,44 X 1,48

**Panela 2**

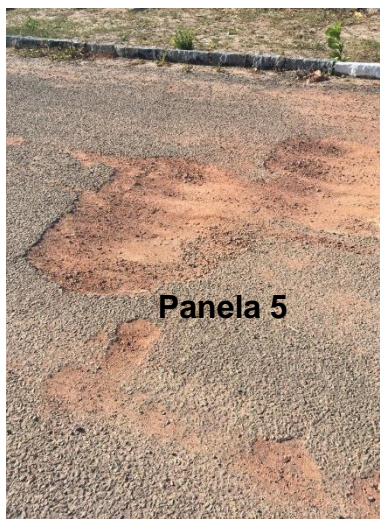
0,72 X 0,78

**Panela 3**

0,84 X 0,90

**Panela 4**

1,90 X 2,47

**Panela 5**

1,90 X 1,44

**Panela 6**

0,94 X 1,06



Panela 7

2,55 X 1,70

REMENDOS

COMPRIMENTO (m) X LARGURA (m)



Remendo 1

8,30 X 4,60



Remendo 2

4,40 X 5,60



Remendo 3

10,80 X 3,30



Remendo 4

1,60 x 1,56



2,36 X 2,45



6,68 X 4,10



3,10 X 2,00



3,97 X 3,20



3,00 X 2,27



2,32 X 1,67

ANEXO B

CHECKLIST DE VOO

OBSERVAÇÕES PRÉ VOO

	S	N
Verificação das condições ambientais para voo		
Observar de aves, cabos e objetos que possam atrapalhar o voo na localidade		
Ponto para decolagem e pouso livre de obstáculos		
Atualização de programas e aplicações		
Verificação da integridade do VANT e seus dispositivos		
Verificação da quantidade de cargas da bateria e controle		
Carga completa da bateria do celular ou Ipad		
Tampa da lente removida		
Cartão SD inserido		
Determinação de plano de Voo		
Conformidade do voo segundo órgãos controladores		

OBSERVAÇÕES PRÉ DECOLAGEM

	S	N
Ligar dispositivos		
Verificar Calibração da Bússola		
Verificar quantidade de satélites disponíveis		
Carregar missão autônoma no VANT		
Certificar que o VANT está pronto para voar		
Certificar que a área de decolagem está livre de pessoas ou objetos		

OBSERVAÇÕES DURANTE VOO

	S	N
Verificar posição da câmera		
Verificar se o VANT está seguindo o plano de voo		
Certificar a porcentagem de baterias		
Observar se pássaros estão aproximando do VANT		
Colocar câmera em 90° para pouso		

OBSERVAÇÕES PÓS VOOS

	S	N
Desligar VANT antes de desligar o controle de rádio		
Importar imagens para computador		
Limpar e guardar todos os dispositivos		

Data	Altura/Velocidade
Tempo de Voo	Método de Levantamento