

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
E AMBIENTAL**

**USO DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA (RPA)
PARA APOIO TÉCNICO NAS ATIVIDADES DE
PLANEJAMENTO DE MINA E PROJETOS DE
MINERAÇÃO EM UMA MINA A CÉU ABERTO**

JONAS CARVALHO GONDIM

ORIENTADOR: PROF. NEWTON MOREIRA DE SOUZA, D.Sc.

CO-ORIENTADOR: PROF. LENILDO SANTOS DA SILVA, D.Sc.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

**PUBLICAÇÃO: G.DM -320/2018 BRASÍLIA/DF: 30 DE
NOVEMBRO DE 2018**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**USO DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA (RPA)
PARA APOIO TÉCNICO NAS ATIVIDADES DE
PLANEJAMENTO DE MINA E PROJETOS DE
MINERAÇÃO EM MINA A CÉU ABERTO**

JONAS CARVALHO GONDIM

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO
DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE
BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM GEOTECNIA.**

APROVADA POR:

_____ **NEWTON MOREIRA DE
SOUZA, D.Sc. (Universidade de Brasília) (ORIENTADOR)**

_____ **LENILDO SANTOS DA
SILVA, D.Sc. (Universidade de Brasília) (CO-ORIENTADOR)**

_____ **LUIS FERNANDO
MARTINS RIBEIRO, D.Sc (Universidade de Brasília) (EXAMINADOR
INTERNO)**

_____ **GIULIANO SANT'ANNA
MAROTTA, D.Sc (Universidade de Brasília) (EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 30 DE NOVEMBRO DE 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

GONDIM, JONAS CARVALHO

planejamento de mina e projetos de mineração em mina a céu aberto. Uso de Aeronave Remotamente Pilotada (*RPA*) para apoio técnico nas atividades de

xv, 107 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2018)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Aeronaves Remotamente Pilotadas	2. Planejamento de Mina
3. Topografia em mina a céu aberto	4. Projetos de Mineração

I. ENC/FT/UnB II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

JONAS, C.G. (2018). Uso de Aeronave Remotamente Pilotada (*RPA*) para apoio técnico nas atividades de planejamento de mina e projetos de mineração em mina a céu aberto. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-XXX/2018, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, XVII, 111 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Jonas Carvalho Gondim

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Uso de Aeronave Remotamente Pilotada (*RPA*) para apoio técnico nas atividades de planejamento de mina e projetos de mineração em mina a céu aberto.

GRAU / ANO: Mestre / 2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Jonas Carvalho Gondim
Brasília, Distrito Federal, Brasil E-mail:
jonas.engenharia@yahoo.com.br

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus e ao nosso senhor Jesus Cristo por me permitir dar passos firmes dentro da pesquisa científica.

Ao meu filho Gustavo que tanto me ajuda a ser um ser humano melhor a cada dia, e por ser o meu orgulho, te amo.

Também agradeço aos meus Pais Dalva e Luciano por sempre serem o meu porto seguro, meu exemplo de vida, me apoiando, me ouvindo e torcendo sempre pelo sucesso de minhas realizações.

Aos meus irmãos Valdeci, Jeanete, Luciano, Raquel e Patrícia, parceiros na vida que estiveram e estarão ao meu lado.

Agradeço também à minha noiva Joseane pelo apoio, sua presença me alegra e me fortalece.

Agradeço ao meu orientador Newton pela oportunidade de trabalhar nesta pesquisa, pelo seu apoio e experiência tanto na discussão do geoprocessamento quanto na resolução de dificuldades que me deparei durante o período de pós-graduação.

Agradeço ao meu co-orientador Prof. Lenildo por me ensinar a fazer o processamento dos dados obtidos em campo, pelo apoio de hardware o qual foi decisivo para o atingimento dos resultados desta pesquisa e pelas discussões técnicas relevantes.

Agradeço de forma geral ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB pela oportunidade de vivenciar um ambiente abundante de conhecimento, de tantas discussões científicas e técnicas que me fizeram adentrar um mundo novo, incrível. Aos meus amigos da geotecnia também lhes agradeço pelo apoio e troca de conhecimento os quais foram fundamentais nesta caminhada, a vocês também desejo todo o sucesso.

Agradeço à Mineração Maracá Indústria e Comércio Ltda. (Yamana Gold Inc.), empresa parceira no desenvolvimento desta dissertação, à qual permitiu que a minha pesquisa fosse realizada nas suas dependências, na Mina de Chapada, fornecendo todo o apoio e ferramentas necessárias.

Aos meus colegas de trabalho que me ajudaram na dissertação: João Vitor, Guilherme Zavaglia, Carlito, Paraizo, Ozenilto, e toda a equipe de topografia da MMIC, o meu muito obrigado pelo seu apoio, contem sempre comigo.

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação ao meu filho Gustavo e à minha noiva Joseane.

“O maior risco é não tomar riscos, não dá para ficar sem tomar algum risco, senão não faz nada”.

Jorge Paulo Leman

RESUMO

O setor de mineração brasileiro é reconhecido por ser uma parte da indústria nacional atenta às inovações tecnológicas com a intenção de utilizá-las sempre que for possível em seu ciclo produtivo.

Uma das tecnologias que atualmente chama a atenção da indústria mineral é a das aeronaves remotamente pilotadas, do inglês “Remotely Piloted Aircraft”, a qual tem um vasto campo de aplicação: pesquisa mineral, projetos de engenharia, controle de terras, segurança, dentre outros.

Nesta pesquisa foram utilizados dois tipos de aeronaves remotamente pilotadas: uma de asa fixa, e outra de asa rotativa, para realizar levantamentos topográficos na mina a céu aberto de Chapada, propriedade da Mineração Maracá Indústria e Comércio, empresa esta que pertence à multinacional canadense Yamana Gold Inc.

A finalidade principal foi verificar a capacidade técnica e operacional do uso destas aeronaves e sua tecnologia envolvida, em realizar levantamento topográfico de mina. Foram comparados seus resultados com os de equipamentos tradicionais: laser scanner terrestre, estação total e Receptor *GNSS*.

O principal resultado foi comprovar que os dois tipos de aeronaves remotamente pilotadas, são capazes de realizar levantamento topográfico de mina com qualidade similar aos equipamentos tradicionais mencionados.

Por fim foram discutidas as vantagens e desvantagens do seu uso, qualidade, desempenho, novos tipos de informação gerada, suas limitações tecnológicas atuais e proposições de pesquisas futuras.

ABSTRACT

Brazilian mining sector is recognized to be a part of the national industry attentive at technological innovations with the intention to use them always it is possible in your productive cycle.

One of the current technologies that draws attention of the mineral industry is the remotely piloted aircraft that has a large field of application: mineral research, engineering projects, land control, safety, and others.

In this research were used two types of remotely piloted aircraft: fixed and rotatives wings, to perform topographical survey in an open pit mine called Chapada, property of the Mineração

Maraca Industria e Comércio Ltda, a company that belongs to Yamana Gold Inc., a multinational Canadian company.

The main finality was to verify the technical and operational capability of the remotely piloted aircraft and their involved technology to perform mine topographic survey. Also was made a comparison of its results with the results obtained with the traditional equipment: terrestrial laser scanner, total station and *GNSS* Receptor.

The main result was to confirm that both types of remotely piloted aircraft are capable to perform mine topographic survey with similar quality as the mentioned traditional equipments.

At the end was discussed the advantages and disadvantages in its use, quality, performance, new types of information generated, its technological limitations and proposal to future researches.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTO GERAL	1
1.2 MOTIVAÇÃO	2
1.3 OBJETIVOS	2
1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.4 EMPRESA PARCEIRA NA REALIZAÇÃO DA PESQUISA	2
1.4.1 LOCALIZAÇÃO DA MINA DE CHAPADA (LOCAL DE PESQUISA).....	3
1.5 ESCOPO DA PESQUISA	4
2 REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 DEFINIÇÃO DE RPA	5
2.2 HISTÓRIA DOS RPAs	6
2.3 TIPOS DE RPAS	7
2.4 RPAS UTILIZADOS NA PESQUISA	8
2.4.1 RPA DE ASA FIXA	9
2.4.2 RPA DE ASA ROTATIVA.....	10
2.5 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA PARA USO DE RPAS	11
2.6 FOTOGAMETRIA E SENSORIAMENTO REMOTO	12
2.6.1 SENSORES REMOTOS.....	13
2.6.2 IMAGEM DIGITAL	13
2.6.3 PIXEL DE UMA IMAGEM DIGITAL	14
2.6.4 TAMANHO E RESOLUÇÃO DA IMAGEM DIGITAL.....	14
2.7 LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO NA MINERAÇÃO	15
2.7.1 LASER SCANNER TERRESTRE (LST).....	15
2.7.2 ESTAÇÃO TOTAL E RECEPTOR GNSS.....	17
2.7.3 AEROFOTOGAMETRIA (FOTOGAMETRIA AÉREA).....	19
3 METODOLOGIA	20
3.1 ESCOLHA DO RPA PARA CADA OBJETIVO DA PESQUISA	21
3.2 REALIZAÇÃO DE VOOS PARA A PESQUISA	21
3.3 ESTRUTURA DE PESQUISA: RPA DE ASA FIXA E ROTATIVA	21
3.4 FASE 1 – ESCRITÓRIO	22
3.4.1 OS EQUIPAMENTOS E SOFTWARES UTILIZADOS	22

3.4.2	PROFISSIONAIS ENVOLVIDOS	23
3.4.3	PLANEJAMENTO DOS VOOS.....	23
3.5	FASE 2 – CAMPO.....	26
3.5.1	EQUIPAMENTOS E SOFTWARES UTILIZADOS	27
3.5.2	PROFISSIONAIS ENVOLVIDOS	28
3.5.3	PREPARAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE	28
3.5.4	EXECUÇÃO DA FASE DE CAMPO	30
3.5.5	DADOS OBTIDOS.....	31
3.6	FASE 3 – ESCRITÓRIO.....	33
3.6.1	EQUIPAMENTOS E SOFTWARES UTILIZADOS	33
3.6.2	PROFISSIONAIS ENVOLVIDOS	34
3.6.3	PROCESSAMENTO DOS DADOS	34
3.6.4	PRODUTOS OBTIDOS.....	37
4	APRESENTAÇÃO DA PESQUISA REALIZADA	38
4.1	PESQUISA COM RPA DE ASA ROTATIVA	38
4.1.1	FASE 1 – ESCRITÓRIO.....	38
4.1.2	FASE 2 – CAMPO.....	40
4.1.3	FASE 3 – ESCRITÓRIO.....	50
4.2	PESQUISA COM RPA DE ASA FIXA	52
4.2.1	FASE 1 – ESCRITÓRIO.....	52
4.2.2	FASE 2 – CAMPO.....	53
4.2.3	FASE 3 – ESCRITÓRIO.....	57
5	RESULTADOS E ANÁLISES.....	59
5.1	TRAJETÓRIA DOS RPAs NO VOO, SOBREPOSIÇÃO DE IMAGENS E GSD	60
5.1.1	FRENTE DE LAVRA DE ESTÉRIL – RPA DE ASA ROTATIVA.....	60
5.1.2	FRENTE DE LAVRA DE MINÉRIO – RPA DE ASA ROTATIVA	61
5.1.3	REGIÃO DA CAVA CENTRAL E SUL – RPA DE ASA FIXA.....	61
5.1.4	GSD (Tamanho do Pixel no Terreno).....	62
5.2	QUALIDADE DAS IMAGENS	63
5.3	ALINHAMENTO DAS IMAGENS APÓS CORREÇÃO COM PONTOS DE CONTROLE	64
5.3.1	FRENTE DE LAVRA DE ESTÉRIL – RPA DE ASA ROTATIVA.....	64

5.3.2	FRENTE DE LAVRA DE MINÉRIO – RPA DE ASA ROTATIVA	66
5.3.3	GRANDE ÁREA DA CAVA E PILHAS DE ESTÉRIL - RPA DE ASA FIXA.....	69
5.4	ANÁLISE DAS NUVENS DE PONTOS 3D.....	71
5.4.1	FRENTE DE LAVRA DE MINÉRIO E ESTÉRIL – RPA DE ASA ROTATIVA	71
5.4.2	GRANDE ÁREA DA CAVA E PILHA DE ESTÉRIL – RPA DE ASA FIXA	73
5.5	ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES E MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO MDE.....	75
5.5.1	FRENTES DE LAVRA DE ESTÉRIL E MINÉRIO – RPA DE ASA ROTATIVA.....	75
5.5.2	GRANDE ÁREA DAS CAVAS E PILHAS DE ESTÉRIL – RPA DE ASA FIXA	77
5.6	ANÁLISE DO MOSAICO DE IMAGENS.....	77
5.6.1	FRENTES DE LAVRA E GRANDE ÁREA DA CAVA E PILHA DE ESTÉRIL	78
6	ESTUDO DE CASO 1: RPA DE ASA ROTATIVA X LASER SCANNER TERRESTRE	80
6.1	NUVEM DE PONTOS.....	80
6.2	SUPERFÍCIE OU MALHA TRIANGULARIZADA	81
6.3	CURVAS DE NÍVEL.....	82
6.4	ORTOFOTO	83
6.5	ACURÁCIA.....	84
6.6	SEGURANÇA	86
6.7	TEMPO.....	87
7	ESTUDO DE CASO 2: RPA DE ASA FIXA X ESTAÇÃO TOTAL & RECEPTOR GNSS	90
7.1	NUVEM DE PONTOS.....	90
7.2	SUPERFÍCIE OU MALHA TRIANGULARIZADA	91
7.3	CURVAS DE NÍVEL.....	92
7.4	ORTOFOTO	93
7.5	ACURÁCIA.....	94
7.6	SEGURANÇA	96
7.7	TEMPO.....	97
7.8	VOLUME.....	100
8	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	102
8.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	104
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Escolha de <i>RPA</i> para cumprimento de objetivos da pesquisa	21
Tabela 3.2 Relação dos voos a serem realizados na pesquisa	21
Tabela 3.3 Estrutura da Pesquisa	22
Tabela 3.4 Equipamento Utilizado	23
Tabela 3.5 <i>Softwares</i> Utilizados	23
Tabela 3.6 Profissionais envolvidos	23
Tabela 3.7 Etapas do planejamento de voo na fase 1 da pesquisa.....	24
Tabela 3.8 Dados das câmeras fotográficas utilizadas em cada <i>RPA</i>	26
Tabela 3.9 Equipamentos utilizados	
27	
Tabela	3.10
<i>Softwares</i>	utilizados
.....	28
Tabela 3.11 Profissionais	
Envolvidos	28
Tabela 3.12 Dados	
obtidos durante a pesquisa pelos <i>RPA</i> s	32
Tabela 3.13	
Propriedades das imagens	33
Tabela 3.14 Dados obtidos durante a pesquisa pelo Laser Scanner Terrestre e Estação Total	33
Tabela 3.15 Equipamentos utilizados na fase 3 da pesquisa	34
Tabela 3.16 <i>Softwares</i> utilizados na fase 3 da pesquisa	34
Tabela 3.17 Profissionais envolvidos na fase 3 da pesquisa	35
Tabela 3.18 Etapas de trabalho no Agisoft Photoscam (<i>Workflow</i>)	36
Tabela 3.19 Principais produtos obtidos durante a fase 3 da pesquisa com os <i>RPA</i> s.....	37
Tabela 5.1 - <i>GSD</i> Planejada X Realizada	64
Tabela 5.2 Erro de Posição que permaneceu no local de cada ponto de controle	67
Tabela 5.3 Erro de Posição na imagem no local de cada ponto de controle.....	69
Tabela 5.4 Erro de Posição que permaneceu no local de cada ponto de controle	71
Tabela 5.5 Número de Pixels processados em cada área pesquisada	72
Tabela 5.6 Número de Pixels processados na área pesquisada	74
Tabela 6.1 - Comparativo sobre as nuvens de pontos. <i>RPA</i> X LST	81
Tabela 6.2 Nº de Faces presentes na superfície triangularizada. <i>RPA</i> X LST.	82
Tabela 6.3 Diferença da coordenada "H" entre Receptor <i>GNSS</i> X <i>RPA</i> , e Receptor <i>GNSS</i> X LST.	86
Tabela 6.4 Tempo gasto na realização de todas as atividades da pesquisa.	89
Tabela 6.5 Tempo gasto otimizando a realização de todas atividades da pesquisa.	89
Tabela 7.1 Comparativo sobre as nuvens de pontos. <i>RPA</i> ASA FIXA X ESTAÇÃO TOTAL	91
Tabela 7.2 Nº de Faces presentes na superfície triangularizada. <i>RPA</i> X Estação Total.	92
Tabela 7.3 Diferença de coordenada "H" Receptor <i>GNSS</i> X <i>RPA</i> , e Receptor <i>GNSS</i> X Est. Total	95
Tabela 7.4 Tempo gasto realizando todas as etapas da pesquisa.....	99
Tabela 7.5 Tempo gasto para gerar somente superfície e curvas de nível	100
Tabela 7.6 Volumes da Pilha de Estéril SW medido	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa de localização da Mina de Chapada (MMIC, 2014)	3
Figura 1.2 Imagem de Satélite da Mina de Chapada (Google Earth®)	4
Figura 2.1 Arquitetura de um “RPAS” "Remotely Piloted Aircraft System".	6
Figura 2.2 RPA para uso militar MQ-9 Reaper	8
Figura 2.3 RPA para uso profissional e científico E-BEE CLASSIC	8
Figura 2.4 RPA para uso recreativo e de lazer Holy Stone F181W	8
Figura 2.5 RPA de Asa Fixa utilizado na pesquisa.	9
Figura 2.6 Tela de telemetria do RPA μ VANT (Santos da Silva et al, 2015)	10
Figura 2.7 RPA de Asa Rotativa utilizado na pesquisa.	11
Figura 2.8 Esquema de funcionamento do LST - (Ferraz et al, 2016)	16
Figura 2.9 Equipamento Laser Scanner Terrestre LST (Mapket®)	17
Figura 2.10 Estação total Eletrônica (Leica Geosystems)	18
Figura 2.11 GNSS RTK representado por rover e estação base (Trimble)	19
Figura 2.12 Plano de sobreposição de imagens. (Oliveira P.N.B., 2011)	20
Figura 3.1 Parâmetros do plano de voo	25
Figura 3.2 Imagem do Ponto de Controle	29
Figura 3.3 Planejamento da disposição dos pontos de controle	30
Figura 4.1 Frente de Lavra de Estéril – Plano de Lavra Semanal de 19 a 25/01/2018	40
Figura 4.2 Frente de Lavra de Estéril – Plano de Voo com Phantom 4	40
Figura 4.3 Frente de Lavra de Minério – Plano de Lavra Semanal de 19 a 25/01/2018	41
Figura 4.4 Frente de Lavra de Minério - Plano de Voo com Phantom 4	41
Figura 4.5 Localização da Cava Norte dentro da Mina Chapada (MMIC)	42
Figura 4.6 Localização das Frentes de Lavra na Cava Norte (MMIC)	42
Figura 4.7 Frente de Lavra de Estéril na Cava Norte	43
Figura 4.8 Frente de Lavra de Minério na Cava Norte (MMIC)	44
Figura 4.9 Apresentação do RPA de Asa Rotativa utilizado na pesquisa.	44
Figura 4.10 Receptor GNSS VivaGS15 da fabricante Leica Geosystems®	45
Figura 4.11 Equipamento Laser Scanner Terrestre C10 Leica Geosystems®	46
Figura 4.12 Distribuição dos Pontos de Controle na Frente de Lavra de Estéril.....	46
Figura 4.13 Distribuição dos Pontos de Controle na Frente de Lavra de Minério	47
Figura 4.14 Locação e Retirada de Coordenada de Ponto de Controle	47
Figura 4.15 Decolagem do RPA de Asa Rotativa na frente de lavra de estéril	48
Figura 4.16 RPA de Asa Rotativa sobrevoando a frente de lavra de estéril	48
Figura 4.17 RPA de Asa Rotativa sobrevoando a frente de lavra de estéril	49
Figura 4.18 RPA de Asa Rotativa sobrevoando a frente de lavra de minério	49
Figura 4.19 LST e Receptor GNSS na frente de lavra de estéril	50
Figura 4.20 LST e Receptor GNSS na frente de lavra de minério	50
Figura 4.21 Alinhamento de imagens e correção da posição com pontos de controle	51
Figura 4.22 Nuvem de Pontos 3D	52
Figura 4.23 Superfície ou Malha da Nuvem de Pontos	52
Figura 4.24 Ortomosaico de imagens ou Superfície 3D Texturizada	53

Figura 4.25 Plano de voo para o <i>RPA</i> de Asa Fixa (Ardupilot adaptado pelo autor)	54
Figura 4.26 Área de pesquisa com <i>RPA</i> de Asa Fixa (Google Earth adaptado pelo autor)	55
Figura 4.27 <i>RPA</i> de Asa Fixa e Base de Voo utilizado na pesquisa	56
Figura 4.28 Estação Total modelo TS15 fabricado pela Leica Geosystems®	56
Figura 4.29 Pontos de Controle distribuídos sobre área de pesquisa com <i>RPA</i> de Asa Fixa	57
Figura 4.30 Decolagem do <i>RPA</i> de Asa Fixa para execução da pesquisa	58
Figura 4.31 Alinhamento de imagens e correção da posição com pontos de controle	59
Figura 4.32 Nuvem de Pontos 3D	59
Figura 4.33 Superfície ou Malha da Nuvem de Pontos	
59 Figura 4.34 Ortomosaico de imagens ou Superfície 3D Texturizada	
..... 60 Figura 5.1 Trajetória de voo e Sobreposição de Imagem	61
..... 61	
Figura 5.2 Trajetória de voo e Sobreposição de Imagem	62
Figura 5.3 Trajetória de voo e Sobreposição de Imagem	63
Figura 5.4 Verificação da qualidade das imagens utilizadas na pesquisa.	64
Figura 5.5 Pontos de Controle: Malha Planejada X Realizada. Frente de lavra de estéril.	65
Figura 5.6 Erro de posição na imagem mesmo após correção com ponto de controle	66
Figura 5.7 Pontos de Controle: Malha Planejada X Executada.	68
Figura 5.8 Erro de posição na imagem mesmo após correção com ponto de controle	68
Figura 5.9 Malha de Pontos: Planejada X Executada. Cavas e Pilhas de Estéril	70
Figura 5.10 Erro de posição na imagem mesmo após correção com ponto de controle	71
Figura 5.11 Nuvem de Pontos Densa. 1) Frente de lavra Estéril. 2) Frente de Lavra Minério	74
Figura 5.12 Nuvem de Pontos. Região das Cavas Central e Sul	76
Figura 5.13 Superfície/MDE da Frente de Lavra de Estéril – <i>RPA</i> de Asa Rotativa	77
Figura 5.14 Superfície/MDE da Frente de Lavra de Minério – <i>RPA</i> de Asa Rotativa	77
Figura 5.15 Superfície/MDE da Região das Cavas Central e Sul – <i>RPA</i> de Asa Fixa	78
Figura 5.16 Ortomosaico de Imagem Georeferenciado – Frente de Lavra de Estéril	80
Figura 5.17 Ortomosaico de Imagem Georeferenciado – Frente de Lavra de Minério	80
Figura 5.18 Ortomosaico de Imagem Georeferenciado – Região das Cavas Central e Sul	80
Figura 6.1 Distribuição dos pontos na nuvem. Pontos <i>RPA</i> (Azul) X Pontos LST (Vermelho)	81
Figura 6.2 Superfície ou Malha Triangularizada. <i>RPA</i> (1) X LST (2).	83
Figura 6.3 Curvas de nível geradas a partir da superfície. <i>RPA</i> (1) X LST (2)	84
Figura 6.4 Ortofoto gerada com o <i>RPA</i> de Asa Rotativa. Texturização da Nuvem de Pontos.	85
Figura 6.5 Comparativo de Posição dos Perfis Topográficos <i>RPA</i> e LST.	87
Figura 7.1 Distribuição dos pontos na nuvem. <i>RPA</i> (Azul) X Estação Total (Vermelho)	91
Figura 7.2 Superfície ou Malha Triangularizada. <i>RPA</i> Asa Fixa (1) X Estação Total (2).	92
Figura 7.3 Curvas de nível geradas a partir da superfície. <i>RPA</i> (1) X LST (2)	93
Figura 7.4 Ortofoto gerada com o <i>RPA</i> de Asa Rotativa. Texturização da Nuvem de Pontos.	94
Figura 7.5 Erro de Posição da Superfície gerada com <i>RPA</i> de Asa Fixa nos pontos de controle.	96
Figura 7.6 Comparativo de Posição dos Perfis Topográficos <i>RPA</i> X Estação Total.	97
Figura 7.7 - Relação área total pilha SW pela área levantada Estação Total & Receptor <i>GNSS</i>	99
Figura 7.8 Volumes da pilha de estéril tomado por cada equipamento	101
Figura 7.9 Tela do Software Minesight - Cálculo de Volume.	

LISTA DE ABREVIACÕES, NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIACÕES	SIGNIFICADO
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ASP	Sociedade para Fotogrametria
ASPRS CAVE	Sociedade para Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
DECEA	Certificado de Autorização de Voo Experimental
ET	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
GNSS	Estação Total
GPS	Sistema Global de Navegação por Satélites
GSD	Sistema de Posicionamento Global
IBRAM	Distância da Amostra no Terreno
LIDAR	Instituto Brasileiro de Mineração
LST	Deteção da Luz e Seu Alcance
MDE	Laser Scanner Terrestre
MDT	Modelo Digital de Elevação
MMIC	Modelo Digital de Terreno
PAE	Mineração Maracá Indústria Comércio Ltda.
PIXEL	Plano de Aproveitamento Econômico
RBAC	Elemento Unitário de Imagem
RPA	Regras Brasileiras da Aviação Civil Aeronave
RPAs	Remotamente Pilotada
RPAS	Aeronaves Remotamente Pilotadas
RSSI	Sistema da Aeronave Remotamente Pilotada
RTK	Indicador da Intensidade do Sinal Recebido
SW	Tempo Real Cinemático Sudoeste
UNB	Universidade de Brasília
VLOS	Linha Visual de Visão
E	Coordenada de Posição Latitude
N	Coordenada de Posição Longitude
H	Coordenada de Posição Altitude
3D	Terceira Dimensão

LISTA DE ABREVIACÕES, NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

SÍMBOLOS	SIGNIFICADO
cm	Centímetro
cm/pixel	Tamanho do Pixel no Terreno
g	Gramas
h	Hora
kg	Quilograma
km/h	Quilometros por Hora
ktpa	Milhares de Toneladas por Ano
m	Metro
Min	Minuto
mm	Milímetro
Mp	Megapixel
mtpa	Milhões de Toneladas por Ano
m ²	Metro Quadrado
m ³	Metro Cúbico
pontos/m ²	Pontos Tridimensionais por Metro Quadrado
t/m ³	Toneladas por Metro Cúbico
%	Porcentagem

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO GERAL

A mineração se destaca como um forte segmento produtivo e comercial no Brasil tendo em vista suas enormes jazidas de minério atualmente em operação e ao enorme potencial para descoberta de novos recursos minerais.

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2017) estão em regime de concessão de lavra no País 9415 minas. Deste total, 2% movimentam mais que 1 mtpa, 11% movimentam entre 100ktpa a 1mtpa, 30% movimentam entre 10 a 100ktpa e 57% movimentam menos que 10ktpa.

Ainda segundo dados do IBRAM para o ano de 2017, a mineração faturou 32 bilhões de dólares, gerou 180 mil empregos diretos e mais de 2 milhões de empregos indiretos, representou 16,7% do PIB industrial e de aproximadamente 4% do PIB brasileiro como um todo.

A atividade de mineração está ligada às raízes culturais do Brasil, sendo que desde o período colonial já se produzia bens minerais. A procura pelo ouro e outros bens minerais foi um dos fatores que impulsionaram e ainda impulsiona a ocupação de todo o território brasileiro.

Tem uma relação com fenômenos sociais como o desenvolvimento humano e tecnológico nos locais onde se instala, por promover geração de renda, de conhecimento e por demandar de insumos que vão aquecer diversos setores da economia.

O século XX se firmou como o período onde a indústria da mineração sofreu as maiores inovações tecnológicas, de mercado, de aplicação, de equipamentos, de desenvolvimento conjunto entre ramos da engenharia, geologia e meio ambiente.

O século XXI não podia ser diferente para a indústria da mineração, sendo que o avanço tecnológico cada vez mais acelerado em muitas vertentes, tem permitido reduzir custo, tempo e esforço de forma geral, em diversas atividades chave do seu ciclo produtivo.

Dentre as diversas tecnologias disponíveis atualmente, tem despertado a atenção o uso de aeronaves remotamente pilotadas, “RPA” do inglês “*Remotely Piloted Aircraft*”, como apoio às atividades de planejamento de mina e desenvolvimento de projetos em mineração.

1.2 MOTIVAÇÃO

O mercado do século XXI assim como no passado continua buscando maior produtividade nas operações de uma empresa, sempre no intuito de que esta possa produzir mais a custos mais baixos, sem deixar de lado a qualidade dos produtos e serviços prestados.

Neste mercado cada vez mais concorrido a tecnologia se consolida como uma ferramenta capaz de inovar e aprimorar as atividades do ciclo produtivo de uma empresa, tornando-a mais produtiva e competitiva.

Neste contexto, a motivação principal para o desenvolvimento desta dissertação, é a inovação tecnológica no uso de *RPA* (Drone) tanto de asa fixa quanto de asa rotativa, para realizar o levantamento topográfico em uma mineração a céu aberto com o intuito principal de gerar ganhos de produtividade e, no mínimo, manter a qualidade nos serviços de planejamento de mina.

1.3 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem o objetivo geral de avaliar a capacidade técnica, prática e os benefícios do uso de uma aeronave remotamente pilotada “*RPA*” nas atividades de levantamento topográfico dentro de uma mina com cava a céu aberto.

1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Fazer levantamento topográfico com *RPA* de Asa Rotativa em duas frentes de lavra e comparar seu resultado com os do Laser Scanner Terrestre (LST).
2. Fazer levantamento topográfico com *RPA* de Asa Fixa sobre uma grande área da cava a céu aberto, focando principalmente no levantamento de uma pilha de estéril, e comparar seus resultados com os do Receptor *GNSS* e Estação Total.

1.4 EMPRESA PARCEIRA NA REALIZAÇÃO DA PESQUISA

A empresa Mineração Maracá Indústria e Comércio S.A. (MMIC) constituída em 11/03/94 tem como atividade comercial a extração e beneficiamento de minério de cobre e ouro. Sua sede, e base de operação estão localizadas na Fazenda Genipapo, região rural do Município de Alto Horizonte, localizado no Estado de Goiás.

Em 2003, a MMIC foi adquirida pela Yamana Gold Inc., empresa canadense que possui diversas operações de mineração na América do Sul, principalmente no Brasil. Atualmente a Yamana possui 100% do capital acionário da MMIC.

As operações de lavra na mina de Chapada tiveram início em 2005, e a produção em escala comercial, em 2007, produzindo concentrado de cobre e ouro, comercializados principalmente no mercado externo. Os principais países consumidores são Índia, Espanha e Alemanha e em menor proporção o Brasil, representado pela Caraíba Metais S.A (PAE MMIC, 2014).

1.4.1 LOCALIZAÇÃO DA MINA DE CHAPADA (LOCAL DE PESQUISA)

A jazida em questão está localizada nos municípios de Alto Horizonte (Antigo povoado Chapada Grande) e Nova Iguaçu de Goiás, situados ao Norte do Estado de Goiás. Distam aproximadamente 320 km da capital do Estado, Goiânia, e 270 km do Distrito Federal, Brasília. O acesso pode ser feito através da rodovia BR-153, Figura 1.1.

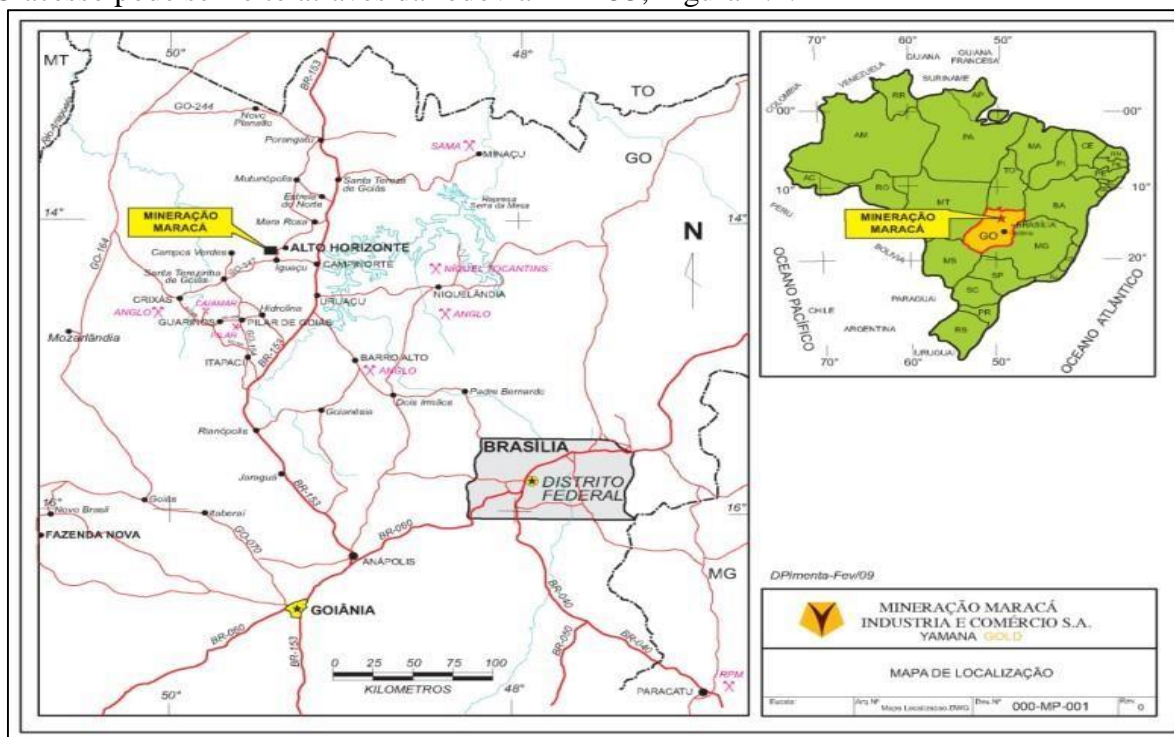


Figura 1.1 Mapa de localização da Mina de Chapada (MMIC, 2014)

Na Figura 1.2 é apresentada uma imagem de satélite da Mina de Chapada, local onde foi realizada a pesquisa.



Figura 1.2 Imagem de Satélite da Mina de Chapada (Google Earth®)

1.5 ESCOPO DA PESQUISA

A presente dissertação está organizada em oito capítulos. O Capítulo 1, como é visto, é composto por uma introdução sobre o contexto geral do tema em torno da atividade de mineração, além da motivação, objetivos, empresa parceira na pesquisa e escopo da dissertação.

O Capítulo 2 faz uma revisão da literatura lembrando a história das aeronaves remotamente pilotadas até sua atualidade. Também é apresentado de forma sucinta e objetiva as aeronaves utilizadas na pesquisa, a legislação brasileira para seu uso, os conceitos pertinentes da fotogrametria para o entendimento dos assuntos apresentados, e as técnicas mais utilizadas na mineração para a atividade de levantamento topográfico.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia planejada para realização da pesquisa, desde a escolha da aeronave a ser utilizada para cumprimento de cada objetivo, até o detalhamento das fases da pesquisa a se realizarem em escritório e em campo.

O Capítulo 4 apresenta como a pesquisa se realizou em escritório e em campo. Descrevendo e ilustrando com imagens os trabalhos para toda a coleta dos dados que foram necessários para gerar os resultados.

O Capítulo 5 representa o cumprimento do objetivo geral da dissertação, onde são apresentados os resultados obtidos pelo processamento dos dados obtidos em campo e escritório durante o Capítulo 4. Também são feitas as análises e discussões dos resultados.

O Capítulo 6 apresenta o cumprimento do primeiro objetivo específico da dissertação, que é fazer o levantamento topográfico com *RPA* de Asa Rotativa em duas frentes de lavra e comparar seu resultado com os do Laser Scanner Terrestre (LST).

O Capítulo 7 apresenta o cumprimento do segundo objetivo específico da dissertação, que é fazer o levantamento topográfico com *RPA* de Asa Fixa sobre uma grande área da cava a céu aberto, focando principalmente no levantamento de uma pilha de estéril, e comparar seus resultados com os do Receptor *GNSS* e Estação Total.

Por fim, o Capítulo 8 apresenta as conclusões da dissertação e apresenta uma sugestão para trabalho futuro.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 DEFINIÇÃO DE *RPA*

Um *RPA* “*remotely piloted aircraft*” é uma aeronave pilotada remotamente e, por conseguinte, o piloto da aeronave não está a bordo, mas controla esta por uma interface de comunicação externa qualquer como: computador, base de rádio controle, dispositivos eletrônicos e digitais. As aeronaves autônomas não podem ser consideradas *RPA*s pois não permitem a intervenção manual do piloto remotamente. Para voar no espaço aéreo sob responsabilidade do Brasil,

deverá seguir as normas estabelecidas pelas autoridades competentes da aviação nacional (ICAO Doc 10019 AN/507, 2015).

Mundialmente, as aeronaves remotamente pilotadas são mais conhecidas pelo nome de “drones” do inglês zangão, bem como veículos aéreos não tripulados (VANT), nomenclatura proveniente do termo “*unmanned aerial vehicle*” (UAV), termo este considerado obsoleto pela Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO Doc 10019 AN/507, 2015) a qual adotou o termo “RPA”, para denominar a aeronave pilotada remotamente, e o termo “RPAS” “*Remotely Piloted Aircraft System*” para denominar todo o sistema que acompanha o “RPA” em sua operação, sistema este que será mais bem apresentado na Figura 2.1.

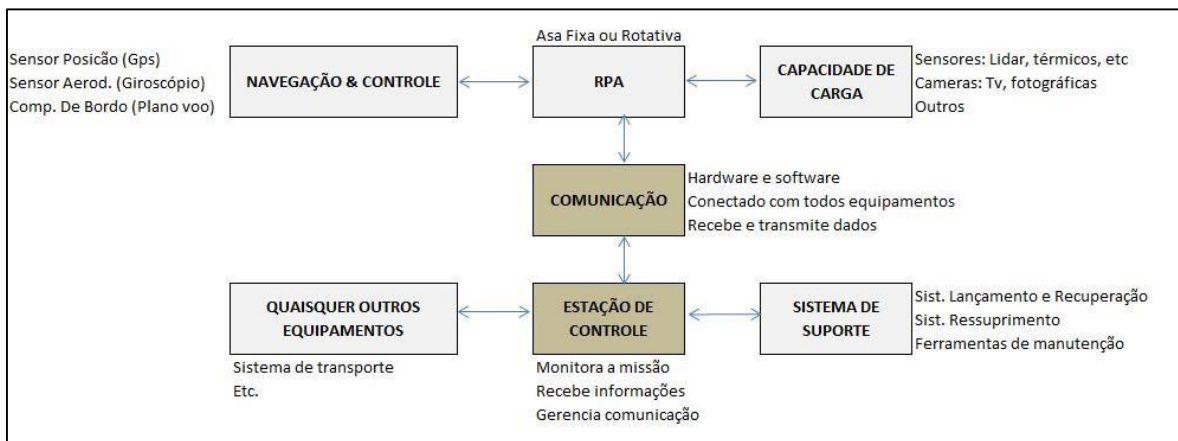


Figura 2.1 Arquitetura de um “RPAS” “Remotely Piloted Aircraft System”.

2.2 HISTÓRIA DOS RPAs

As aeronaves remotamente pilotadas também conhecidas como RPAs, foram idealizados inicialmente para fins militares, onde havia elevado risco de morte para seres humanos (Metcalf, 2013)

O primeiro emprego dos RPAs ocorreu em 1849, quando o exército austríaco utilizou balões carregados com explosivos para atacar a cidade de Veneza na Itália. Posteriormente, foram aprimorados e utilizados em todas as guerras modernas. Na Segunda Guerra Mundial entre 1939-45 houve por exemplo as chamadas bombas voadoras V1, e na Segunda Guerra do Golfo em 2003 seu sucesso das tropas dos Estados Unidos foi tamanho que cresceu o interesse de várias nações em desenvolver e adquirir tal tecnologia para o emprego militar.

Embora o desenvolvimento da tecnologia de aeronaves remotamente pilotadas esteja em crescimento desde o início do século XX, por questões de custo e complexidade, estes equipamentos se mantiveram restritos ao uso militar até início do século XXI.

No Brasil, de acordo com o Ministério da Indústria e Comércio, 2017, o primeiro registro do uso de *RPAs* se deu em 1982, quando houve a parceria entre o Centro Técnico Aeroespacial e Companhia Brasileira de Tratores (CBT) para o desenvolvimento de um protótipo a jato, mas o projeto acabou sendo encerrado antes do seu primeiro voo. Posteriormente, empresas investiram nessa tecnologia para suprir as necessidades do exército, marinha e aeronáutica.

Atualmente, em função da vasta aplicação dos *RPAs* em diversos segmentos da economia como mineração, agropecuária, construção civil, dentre outros, tem havido bastante investimento principalmente de empresas privadas na comercialização destas aeronaves. O que tem permitido à indústria, como também a população civil adquirir estas aeronaves com preços acessíveis.

2.3 TIPOS DE *RPAS*

Os tipos de *RPAs* atualmente disponíveis no mercado são muitos, e cada um deles tem uma finalidade na qual seu desempenho é melhor. Pode-se dizer que os principais usos dos *RPAs* são: militar, profissional, científico e para o lazer. A seguir serão apresentados alguns tipos de *RPA* e seu respectivo campo de aplicação.

MQ-9 REAPER	
FABRICANTE	GA-ASI (EUA)
PESO (Kg)	2223
MOTOR	Combustão
VELOCIDADE (km/h)	313 a 482
ALTITUDE (km)	7, 5
AUTONOMIA (h)	14
FINALIDADE	Militar




Figura 2.2 RPA para uso militar MQ-9 Reaper

E-BEE CLASSIC


FABRICANTE	senseFLY (FRANÇA)	
PESO (kg)	0,69	
MOTOR	Elétrico	
VELOCIDADE (km/h)	40 a 90	
ALTITUDE (m)	-	
AUTONOMIA (min)	50	
FINALIDADE	Profissional e Científico	

Figura 2.3 RPA para uso profissional e científico E-BEE CLASSIC


Holy Stone F181W		
FABRICANTE	HolyStone (CHINA)	
PESO (g)	152	
MOTOR	Elétrico	
ALCANCE SINAL (m)	50 a 100	
ALTITUDE (m)	30 a 80	
AUTONOMIA (min)	7 a 10	
FINALIDADE	Científico e Lazer	

Figura 2.4 RPA para uso recreativo e de lazer Holy Stone F181W

A diversidade de *RPAs* atualmente é tão grande que se torna inviável aqui apresentar todos os modelos e tipos, uma vez que este não é o objetivo principal da dissertação. Cabe acima uma apresentação mais geral e objetiva dos equipamentos disponíveis no mercado, sua aplicação e algumas características.

2.4 RPAS UTILIZADOS NA PESQUISA

Para o desenvolvimento da pesquisa apresentada nesta dissertação foram usados dois tipos de *RPAs*, a saber: *RPA* de Asa Fixa e *RPA* de Asa Rotativa. A seguir serão apresentadas as características de cada um.

2.4.1 RPA DE ASA FIXA

O RPA de Asa Fixa utilizado nesta dissertação, chamado μ VANT, tem o objetivo de levantar a topografia por meio de imageamento de uma grande área da Mina Chapada de propriedade da MMIC/Yamana Gold Inc., onde consta regiões de cava a céu aberto como também região com presença de pilhas de estéril.

Este equipamento foi desenvolvido pela equipe do Departamento de Engenharia Civil lotada na Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília UNB, na cidade de Brasília, DF, Brasil. Realizou vários estudos e projetos com sucesso pela equipe da UNB, e sua utilização foi principalmente devido apresentar confiabilidade nos resultados. Na Figura 2.5 é apresentado o RPA de asa fixa utilizado na pesquisa.

μ VANT	
FABRICANTE	UNB/DNPM (BRASIL)
PESO (kg)	2,36
MOTOR	Elétrico
VELOCIDADE (km/h)	≤ 100 ≤ 500
ALTITUDE MAX. (m)	25
AUTONOMIA (min)	Científico e Profissional
FINALIDADE	




Figura 2.5 RPA de Asa Fixa utilizado na pesquisa.

Segundo Santos da Silva et al 2015 e DNPM 2011 (Projeto μ VANT), este RPA possui uma base radio controle com enlace dos dados de telemetria de 4km com visada direta para o modelo VLOS. A telemetria disponível para o piloto do RPA em solo consta de informações do tipo: coordenadas latitude, longitude e altitude do RPA, distância em relação à base, velocidade de navegação, intensidade do sinal RECEPTOR GNSS, voltagem da bateria, intensidade do sinal de rádio (RSSI).

A seguir é apresentada a tela de telemetria disponível na base radio controle para o piloto do RPA em solo.

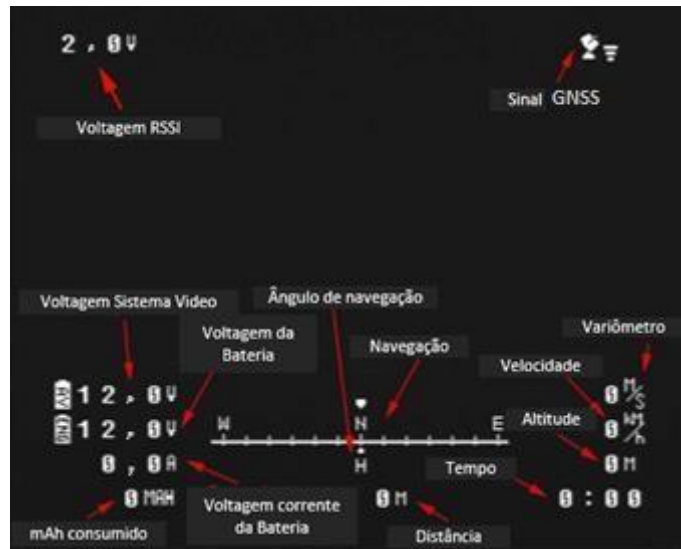


Figura 2.6 Tela de telemetria do RPA μ VANT (Santos da Silva et al, 2015)

Possui ainda dispositivo de piloto automático, câmera de navegação instalada no nariz da aeronave que permite acompanhamento em tempo real do voo pela base radio controle, e câmera para tomada de imagens Canon Powershot S100, com 12 Megapixel de resolução. Presença de barômetro, unidade inercial, diversos servomecanismos e Receptor GNSS.

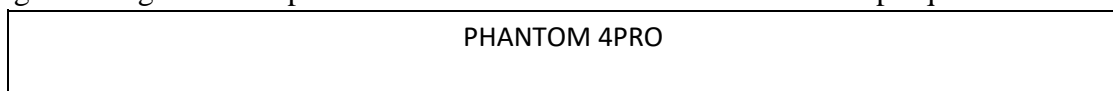
Foi projetado para voar em clima sem chuva, sem neve e sem neblina, e com velocidade de vento igual ou menor que 75km/h.

2.4.2 RPA DE ASA ROTATIVA

O RPA de Asa Rotativa Phantom4 utilizado nesta dissertação teve como objetivo levantar a topografia de duas frentes de lavra da Mina de Chapada de propriedade da MMIC/Yamana Gold Inc., onde uma frente de lavra é de material estéril e outra de material minério.

Este equipamento foi fabricado pela empresa chinesa DJI e tem histórico de sucesso na realização de trabalhos de pesquisa científica e profissionais. Apresenta no mercado boa aceitação pela praticidade e por gerar imagens de boa resolução.

A seguir na Figura 2.7 é apresentado o RPA de asa rotativa utilizado na pesquisa.



FABRICANTE	DJI (CHINA)	
PESO (g)	1380	
MOTOR	Elétrico	
VELOCIDADE (km/h)	<=72	
ALTITUDE MAX. (m)	<=500	
AUTONOMIA (min)	28	
FINALIDADE	Científico e Profissional	

Figura 2.7 RPA de Asa Rotativa utilizado na pesquisa.

Segundo o Manual de Uso DJI, 2014, este *RPA* possui uma base radio controle com enlace dos dados de telemetria de até 5km. A telemetria disponível para o piloto do *RPA* em solo consta de informações do tipo: coordenadas latitude, longitude e altitude do *RPA*, distância em relação à base, velocidade de navegação, intensidade do sinal Receptor *GNSS*, voltagem da bateria, intensidade do sinal de rádio *RSSI*.

Possui ainda dispositivo de piloto automático, câmera de navegação instalada que permite acompanhamento em tempo real do voo pela base radio controle, e câmera para tomada de imagens Canon DJI FC330, com 12 Megapixels de resolução. Presença de barômetro, unidade inercial, diversos servomecanismos e Receptor *GNSS*.

Foi projetado para voar em clima sem chuva, sem neve e sem neblina, e com velocidade de vento igual ou menor que 30km/h.

2.5 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA PARA USO DE RPAS

A legislação que o governo brasileiro aplica sobre a utilização dos *RPAs* é exercida por duas agências federais a ANATEL e ANAC, em conjunto com o Departamento de Controle do Espaço Aéreo DECEA, (ANAC RBAC-E N°94, 2017).

Como os *RPAs* utilizam comunicação via rádio e fazem transmissão de informação digital e eletrônica como imagens, dados e mensagens, todo *RPA* deve ser certificado pela ANATEL, Agência Nacional de Telecomunicações. Ou seja, toda comercialização destes equipamentos no território nacional, bem como aqueles fabricados em universidades e centros de pesquisas devem ter seus dispositivos por questões de segurança analisados pela ANATEL.

A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) se encarrega de definir as regras para utilização dos *RPA*s em território nacional. Administra o Registro Aeronáutico Brasileiro (RAB), faz o registro, certifica e autoriza os pilotos de “*RPA*s”, bem como recebe as solicitações para execução dos voos, seja profissional ou para pesquisa científica.

Uma vez que o operador ou piloto do *RPA* recebeu a autorização para execução do voo, o mesmo ainda precisa comunicar o DECEA, Departamento de Controle do Espaço Aéreo que estará realizando um voo com determinado equipamento, em determinado local, hora, dentre outras informações. Estando tudo dentro das normas, o DECEA libera a execução do voo.

Segundo o documento ANAC IS N°21-002 de 2012, para o desenvolvimento de pesquisa científica em área não densamente povoada, como uma mina a céu aberto por exemplo, utilizando *RPA* da classe 3 a qual limita o peso do *RPA* a no máximo 25kg e considerando altura de voo igual ou superior a 120m, um CAVE - Certificado de Autorização de Voo Experimental, é documento suficiente para cumprir a legislação brasileira. Para a pesquisa a ser apresentada nesta dissertação os *RPA*s utilizados se encaixam nesta situação.

2.6 FOTOGRAMETRIA E SENSORIAMENTO REMOTO

A palavra fotogrametria tem origem grega e pode ser dividida em três radicais: *photon* [luz], *graphos* [escrita] e *metron* [medições], e o seu significado de acordo com Coelho et al 2007 pode ser entendido como a “ciência e tecnologia de se reconstruir o espaço tridimensional, ou parte do mesmo, a partir de imagens bidimensionais, advindas da gravação de padrões de ondas eletromagnéticas, sem contato físico direto entre o sensor e o objeto ou alvo de interesse”.

Na visão mais moderna, considera-se que a fotogrametria esteja inserida no contexto geral da ciência do sensoriamento remoto, que de acordo com Menezes & Almeida 2012 pode ser definida como “a ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres”.

Muitas definições sobre fotogrametria foram feitas desde o século XIX, época em que foi desenvolvida a fotografia. A proximidade dos conceitos apresentados acima, fez com que no século XX a renomada *American Society for Photogrammetry* (ASP) trocasse de nome para *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS), permanecendo assim desde então. Considera-se que a fotogrametria e o sensoriamento remoto são ciências

complementares entre si, entretanto, a primeira sendo inserida no contexto da segunda por esta última ser mais ampla.

A fotogrametria ainda pode ser dividida em: fotogrametria terrestre, aérea e orbital. Podemos citar o laser scanner terrestre, a aeronave remotamente pilotada (*RPA – Remotely Piloted Aircraft*) e o satélite como equipamentos que representam cada um tipo respectivamente.

A seguir serão apresentados mais alguns conceitos sobre fotogrametria e sensoriamento remoto os quais são importantes para melhor entendimento da dissertação.

2.6.1 SENSORES REMOTOS

São quaisquer equipamentos capazes de transformar a energia eletromagnética em um sinal passível de ser convertido em informação sobre o ambiente, sem contato físico direto entre esses sensores e os alvos de interesse (Novo, 1992). Alguns exemplos simples de sensores comumente utilizados é a câmara fotográfica analógica ou digital. A primeira usa a sensibilização química no filme para gerar suas imagens, já a segunda usa sensores de varredura CCDs (*Charge Coupled Devices*) como detectores que convertem energia eletromagnética em corrente elétrica, gerando imagens do ambiente que podem ser armazenadas em cartões de memória.

2.6.2 IMAGEM DIGITAL

Uma imagem digital é uma representação em escala da superfície terrestre sobre um plano 2D, onde suas características naturais e artificiais são visualizadas pela medição e codificação da radiação eletromagnética (Menezes et al, 2012).

A imagem digital pode ser captada, armazenada e processada para gerar produtos úteis ao mundo moderno. De fato, a tecnologia de processamento de imagens digitais é atualmente muito útil em campos da ciência como a fotogrametria.

As imagens digitais tomadas por sensores e apresentadas em um plano 2D podem ser processadas com técnicas como a estereoscopia para reconstruir cenas 3D, e assim permitir o levantamento topográfico da superfície terrestre e de objetos.

Os formatos digitais mais conhecidos em que as imagens digitais são armazenadas são: BMP, GIF, JPEG e TIFF.

A imagem digital também pode ser entendida como um conjunto de pequenas partes chamadas pixel (unidade de pintura, do inglês *picture element*).

2.6.3 PIXEL DE UMA IMAGEM DIGITAL

O menor elemento da imagem, o pixel (*Picture Element*), é identificado segundo sua intensidade de nível de cinza ou por codificação de cores. Identificados, estes elementos são armazenados por códigos binários (0 ou 1) que podem ser reconhecidos pelo dispositivo de formação da imagem e apresentados novamente por um dispositivo de visualização, como um monitor de vídeo ou impressora (Balan, 2009).

Os códigos de cada pixel são armazenados em bits. Um bit é definido como sendo a menor unidade de informação digital. Geralmente cada pixel é constituído por 1 byte: 1 byte varia de 8 a 11bits dependendo da tecnologia empregada.

2.6.4 TAMANHO E RESOLUÇÃO DA IMAGEM DIGITAL

Uma imagem que apresenta alta resolução é uma imagem que é capaz de definir com grande detalhe as características naturais e ou artificiais da superfície da terra e de objetos, ou seja, quanto maior o número de pixel maior a sua resolução.

O tamanho de uma imagem é apresentado no formato de n° pixels X n° de pixels e pode ser entendido da seguinte forma: imagine uma imagem digital representada por uma matriz em um plano 2D do tipo XY, onde “X” representa o número de linhas da matriz e “Y” o número de colunas. Considerando por exemplo uma imagem de 300m em X por 400m em Y onde as amostras são uniformemente espaçadas, cada uma com o comprimento de 1m em X e 1m em Y, temos que cada amostra ou pixel possui o tamanho de 1m x 1m. Sendo assim, esta imagem tem 120.000 pixels.

Dessa forma, pode-se dizer que esta imagem possui um tamanho de 300 x 400 pixels e uma resolução de 120.000 pixels ou 120Kbytes (Balan, 2009).

2.7 LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO NA MINERAÇÃO

A atividade de levantamento topográfico na mineração é de suma importância para o planejamento e controle das operações em uma mina, quer seja a céu aberto ou subterrânea.

É com os levantamentos topográficos que se torna possível mensurar a quantidade em massa de material que foi lavrada e que ainda será. Entenda-se por lavra a atividade de escavar mecanicamente, por explosivos ou por outro meio qualquer um maciço rochoso.

Atualmente os métodos mais utilizados são levantamento topográfico com laser scanner terrestre, estação total e Receptor *GNSS*.

A aerofotogrametria, subdivisão da fotogrametria também é utilizada em escala menor, entretanto com a popularização das aeronaves remotamente pilotadas, os *RPA*s, estão ganhando mercado e espaço dentre os métodos tradicionais de levantamento topográfico.

A seguir estes três métodos serão apresentados com mais detalhe.

2.7.1 LASER SCANNER TERRESTRE (LST)

O LST é um sistema Lidar (*Light Detection and Ranging*) que pode ser entendido como detecção da luz e seu alcance, e é o método para levantamento topográfico mais utilizado atualmente nas mineradoras nacionais de grande porte.

É uma tecnologia que envolve sensores ativos que podem operar tanto na faixa do espectro eletromagnético visível até o infravermelho médio (Pinliang et al, 2018).

Um LST usa um laser para medir as coordenadas tridimensionais de uma superfície qualquer ou objeto. Cada local onde o laser passa fazendo sua varredura gera um ponto com coordenadas E, N e H (latitude, longitude, altitude), que vai integrar um conjunto de pontos ao fim da varredura denominada “nuvem de pontos” (Olsen, 2013).

O princípio de funcionamento mais comum nas minerações quando do uso do LST é o do tempo de voo do sinal. Um pulso laser é emitido à superfície de interesse que reflete um sinal paralelo até o receptor. Assim, a distância é medida pelo tempo decorrido entre a emissão e recepção do sinal, multiplicado pela velocidade da luz (Ferraz et al, 2016).

Na Figura 2.8 a seguir é representado como ocorre a medição da distância entre o LST e a superfície de interesse.

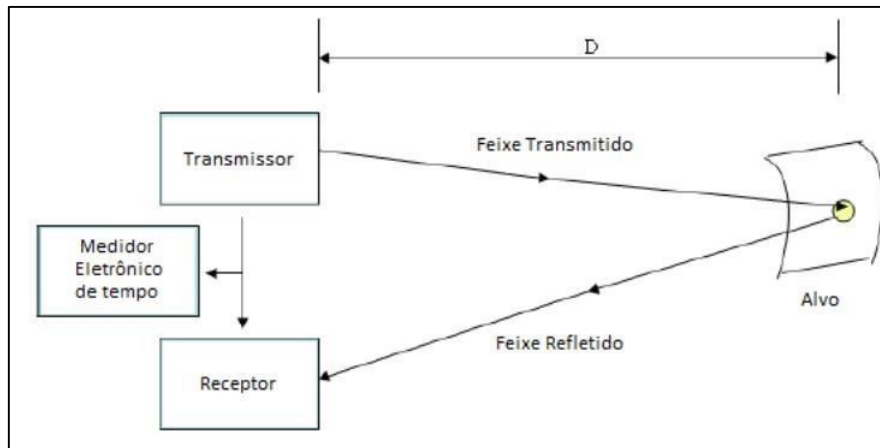


Figura 2.8 Esquema de funcionamento do LST - (Ferraz et al, 2016)

Uma vez que o LST registra o tempo, a intensidade da energia refletida pelo objeto escaneado, e os parâmetros de altitude do feixe, que são coordenadas polares do ponto em relação ao centro da fase do laser, é possível calcular a distância e as coordenadas cartesianas tridimensionais dos pontos medidos em relação ao centro de fase do sensor (Tommaselli, 2003).

Com o LST é possível gerar nuvem de pontos que posteriormente podem ser tratadas para produzir um modelo digital de elevação ou terreno. Também é possível tomar imagens reais da cena durante o levantamento topográfico. E dependendo das características do sistema LST pode-se adicionar cores à nuvem de pontos.

Abaixo é apresentado a imagem de um LST utilizado na mineração.



Figura 2.9 Equipamento Laser Scanner Terrestre LST (Maptek®)

2.7.2 ESTAÇÃO TOTAL E RECEPTOR GNSS

A Estação Total é um equipamento capaz de gerar a posição espacial de um ponto com o uso de um teodolito, um tripé para instalação do teodolito, uma mira (bastão) para locação dos pontos e em caso das estações totais eletrônicas, uma mira com um prisma para reflexão do laser recebido.

Nas estações totais, é recomendado ter no local um ponto georreferenciado para servir como ponto base de amarração. É a partir deste ponto que todos os outros pontos da área a ser levantada topograficamente serão medidos.

Independente da estação total a ser utilizada todos os pontos a terem sua posição medida precisam estar no campo de visão do equipamento. Caso alguns pontos não estejam no campo de visão da estação total, então deve-se deslocar a mesma para uma outra posição dentro da área a ser levantada, de onde é possível obter visada destes outros pontos que estavam escondidos.

Na estação total não automática a medição das coordenadas E, N e H de um ponto é determinada com a tomada da distância entre a posição onde está o equipamento e o local onde está o ponto de interesse. Depois, também são tomadas as coordenadas polares verticais e horizontais geradas devido ao posicionamento da visada. Em seguida, faz-se a conversão das coordenadas polares em coordenadas planas e obtém-se a posição E, N e H do ponto visado. Esta conversão geralmente é realizada em escritório.

Na estação total automática, depois de montada, basta fazer a visada de ré (coordenadas E, N e H conhecidas) atingindo o laser no prisma da mira e depois a de vante. O próprio programa da estação faz as conversões automaticamente das coordenadas polares em planas, calcula a distância entre o equipamento e o ponto e entrega a posição E, N e H de cada ponto visado.

Após todos os pontos medidos no terreno, tem-se uma nuvem de pontos 3D com a qual é possível gerar curvas de nível e superfícies da área por triangulação dos pontos.

Segundo Borges 1977, a estação total eletrônica é um complemento do teodolito eletrônico, porque além de fornecer as leituras dos círculos horizontais e verticais automaticamente, também lê a distância direta, já que é também um distanciômetro. O único trabalho do operador é atingir os alvos (refletores) a ré e a vante e apertar os botões correspondentes. O aparelho fornece então as leituras dos círculos e as distâncias. Esses valores podem aparecer no visor do

aparelho para anotação na caderneta ou podem ir diretos para um cartão de memória, que envia os dados para a programação de cálculo “software”.

Abaixo é apresentado a imagem de uma estação total utilizada na mineração.



Figura 2.10 Estação total Eletrônica (Leica Geosystems)

O Receptor *GNSS* (*Global Navigation Satellite System*) é um sistema de rádio navegação com cobertura global. Este termo foi utilizado pela primeira vez em 1991 pela Associação Internacional de Aviação Civil (*International Civil Aviation Organization – ICAO*). Atualmente um sistema de navegação pode ser chamado *GNSS* quando este possui um mínimo de 24 satélites posicionados na órbita terrestre, e de forma tal que um determinado receptor sobre a superfície terrestre esteja conectado a um mínimo de 4 satélites.

Apesar de o termo *GPS* (*Global Positioning System*) ser o termo mais conhecido para designar um sistema de navegação por satélite, este precisa para operar uma conexão com pelo menos três (3) satélites. Já o *GNSS* como dito necessita um mínimo de quatro (4), e conseqüentemente fornece melhor acurácia e precisão.

Devido à grande acurácia do sistema *GNSS* e disponibilização desta tecnologia à comunidade civil, surgiu-se um imenso campo de aplicação deste equipamento, como: construção civil, mineração, agricultura, controle de frotas de transporte e etc. (Parkinson, 1996).

O Receptor *GNSS* tem se mostrado um equipamento que realiza trabalhos de levantamento topográfico de forma rápida, acurada e precisa, além de reduzir custos de operação devido principalmente baixar o número de horas para execução dos levantamentos topográficos.

Este equipamento consegue calcular a sua posição a partir de dois receptores que se comunicam entre si e com a rede de satélites. Um receptor é chamado de estação base e geralmente fica em

um local com coordenadas conhecidas, e o outro receptor chamado de *rover* fica junto com o usuário executando a coleta dos dados.

Na mineração o Receptor *GNSS RTK (Real Time Kinematic)* é um equipamento bastante utilizado. Apresenta acurácia da ordem de centímetros ou milímetros. Este equipamento vem como uma opção à estação total, pois uma pessoa poderia realizar a atividade, diferente da estação total que precisaria de no mínimo duas pessoas.

Abaixo é apresentado a imagem de um Receptor *GNSS* utilizado na mineração.



Figura 2.11 GNSS RTK representado por *rover* e estação base (Trimble)

2.7.3 AEROFOTOGRAMETRIA (FOTOGRAMETRIA AÉREA)

A técnica da aerofotogrametria é a mais utilizada para o levantamento topográfico de áreas com grande extensão. E atualmente devido ao barateamento dos custos com a utilização das aeronaves remotamente pilotadas *RPA*s e desenvolvimento de novos *softwares* para processamento das imagens, consolidou-se ainda mais (Silva, D.C, 2015).

Para o estudo da aerofotogrametria é importante o conceito da estereoscopia, o qual pode ser definido como a percepção tridimensional induzida dos objetos ou superfícies a partir de duas imagens planas de uma mesma cena, tomadas de posições diferentes.

Chama-se cobertura aerofotogramétrica ao conjunto de operações necessárias para obtenção de imagens aéreas e planas que se superpõem e representam a área sobrevoada.

O recobrimento de uma área com imagens aéreas para fins de formar pares estereoscópios geralmente utiliza um valor de 60% de sobreposição longitudinal e de 30 % de sobreposição lateral das imagens.

Na figura a seguir é apresentado o processo de sobreposição das imagens.

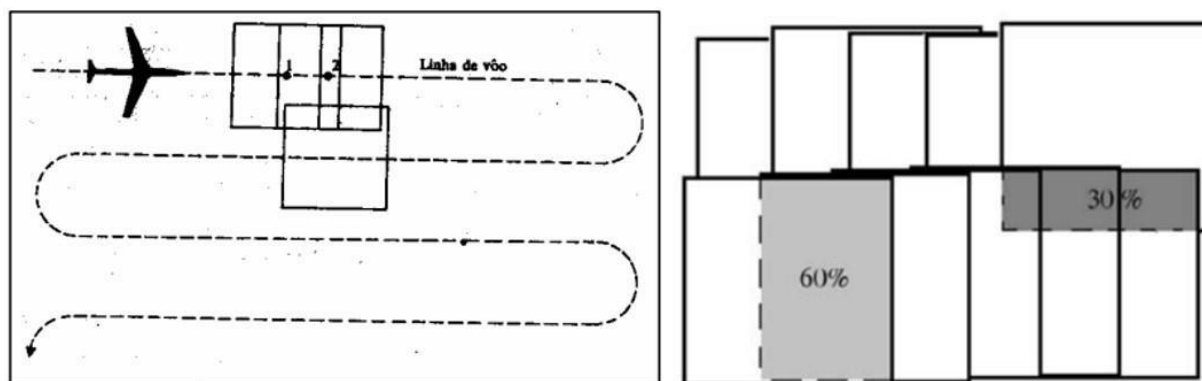


Figura 2.12 Plano de sobreposição de imagens. (Oliveira P.N.B., 2011)

Uma vez que a área de interesse é totalmente coberta por imagens da forma apresentada na figura anterior, então inicia-se o trabalho de processamento estereoscópico digital em computador, no intuito de reconstruir em terceira dimensão da área de interesse.

Esta reconstrução gera inicialmente uma nuvem de pontos em terceira dimensão que irá dar origem a uma série de produtos como principalmente: modelo digital de elevação e de terreno, curvas de nível e ortofotos.

Na mineração o uso da aerofotogrametria está sendo utilizado há décadas para auxiliar na realização de projetos de mina, infraestrutura, pesquisa mineral, dentre outros. Entretanto, atualmente as aeronaves remotamente pilotadas *RPA*s em conjunto com a técnica de estereocopia já apresentam uma concorrência real à aerofotogrametria tradicional com aeronave tripulada e varredura com laser scanner de acordo com MPDG, 2017.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentadas as premissas e a metodologia utilizada na execução da pesquisa.

3.1 ESCOLHA DO RPA PARA CADA OBJETIVO DA PESQUISA

Na Tabela 3.1 está apresentado qual RPA foi escolhido para executar cada objetivo da pesquisa.

Tabela 3.1 Escolha de RPA para cumprimento de objetivos da pesquisa

Objetivo Geral	RPA a ser utilizado	Justificativa
Levantamento Topográfico de frentes de lavra	Asa Rotativa	Maior capacidade de manobra em espaços limitados, consegue parar no ar, executa voos cruzando linhas paralelas e perpendiculares, capaz de realizar voos em altitudes menores.
Levantamento topográfico de uma grande área de “Cava e de uma Pilha de Estéril”	Asa Fixa	Maior autonomia de voo, maiores velocidades, cobre maiores áreas, atinge maiores altitudes.

3.2 REALIZAÇÃO DE VOOS PARA A PESQUISA

Ao todo foram 10 voos, os quais estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Relação dos voos a serem realizados na pesquisa

RPA	Nº de Voos	Local
Asa Rotativa	1	Frente Lavra Minério
	1	Frente Lavra Estéril Grande
Asa Fixa	8	área de Cava e de uma Pilha de Estéril

3.3 ESTRUTURA DE PESQUISA: RPA DE ASA FIXA E ROTATIVA

A utilização de uma aeronave remotamente pilotada RPA tem seguido uma estrutura comum de trabalho compreendida entre trabalhos de campo e escritório.

Na Tabela 3.3 é apresentada a estrutura que foi utilizada nesta dissertação para a realização da pesquisa com as aeronaves remotamente pilotadas.

Tabela 3.3 Estrutura da Pesquisa

FASE 1:	ESCRITÓRIO	FASE 2: CAMPO	FASE 3:	ESCRITÓRIO	
Item 1	Equipamentos Utilizados	Item 1	Equipamentos Utilizados	Item 1	Equipamentos Utilizados
Item 2	Profissionais Envolvidos	Item 2	Profissionais Envolvidos	Item 2	Profissionais Envolvidos
Item 3	Planejamento de Voo	Item 3	Preparação dos Pontos de	Item 3	Processamento dos Dados
Item 4	-	Item 4	Controle	Item 4	Produtos Obtidos
Item 5	-	Item 5	Execução da Fase de Campo	Item 5	-
			Dados Obtidos		

Cada fase é interdependente uma da outra, seguindo a sequência conforme se apresenta na Tabela 3.3, sendo a fase 1 primeiro, fase 2 na sequência e por fim a fase 3.

3.4 FASE 1 – ESCRITÓRIO

A fase 1 tem o objetivo de estudar a área alvo para fins de se criar principalmente os planos de voos. É estudado o relevo do local e suas características naturais e modificadas que podem favorecer ou dificultar a realização dos voos. Como exemplo: espaços confinados no interior de uma cava, acesso à área alvo, tamanho da área, etc.

Nesta fase foram feitas de uma única vez todos os planos de voos quer seja para o RPA de asa fixa ou rotativa, com o intuito de otimizar o tempo, a qualidade dos planos e o tamanho desejado do pixel no terreno (resolução da imagem).

3.4.1 OS EQUIPAMENTOS E SOFTWARES UTILIZADOS

O equipamento utilizado foi um computador com as configurações conforme pode ser visto na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Equipamento Utilizado

Equipamento	Marca	Modelo	Objetivo	Detalhes
Computador DeskTop	ASUS	All Series	Rodar o Software Agisoft de Processamento das Imagens, Manipular arquivos	Sistema Operacional: Windows 7 (64-bit) Processador: Intel® Core™ i7, 4770 @ 3,40Ghz Armazenamento Memória: 1 TB Memória Instalada RAM: 32 Gb Placa Vídeo: NVIDIA® GeForce® GTX 650
Computador Notebook	DELL	Precision 7510	Manipular Nuvem de Pontos, Gerar MDT e Curvas de Nível. Manipular Arquivos.	Sistema Operacional: Windows 7 Enterprise (64-bit) Processador: Intel® Core™ i7, 6820HQ @ 2,70Ghz Armazenamento Memória: 500GB Memória Instalada RAM: 32 Gb Placa Vídeo: NVIDIA® Quadro M1000M Placa Vídeo: Memória Dedicada 2048 MB GDDR5

Para confeccionar os planos de voos foram utilizados três *softwares* conforme apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 Softwares Utilizados

Software	Marca	Versão	Objetivo	Detalhes Relacionados à Dissertação
Minesight	Leica Geosystems / Hexagon Mining	v 12.0.-6 (64bit)	Estudo das cavas a céu aberto e do plano de lavra para definição das áreas alvo. Check de informação de infraestruturas, obras e obstáculos reais aos RPAs.	Manipular Topografia real 3D Definir áreas alvo e seus acessos Medir Comprimento, Largura e Áreas Estudar os locais para bases de voo Confeccionar o plano de voo Gerar de Mapas e Imagens Virtuais
Google Earth Professional	Google Inc.	7.1.5.1557	Georeferenciamento de Objetos, Estudos Locacionais, Verificação de Resultados	Estudar Relevos, Acessos e Estruturas Georeferenciar de Objetos Confeccionar Mapas e Imagens Virtuais Medir Comprimento, Largura e Áreas Confeccionar o plano de voo
Mission Planner	Ardupilot (Software Open Source)	32 e 64bits	Confeccionar plano de voo para os RPAs, comandar o RPA durante o voo, e armazenar dados	Planejar a missão ou plano de voo Acompanhar voo em tempo real Executar comandos durante o voo

				Infomar a posição espacial do RPA/Drone Armazenar dados do voo
--	--	--	--	--

3.4.2 PROFISSIONAIS ENVOLVIDOS

A confecção dos planos de voo foi feita de forma interdisciplinar para seu melhor resultado, onde houve a participação dos seguintes profissionais abaixo:

Tabela 3.6 Profissionais envolvidos

Profissional	Quantidade	Empresa / Instituição	Objetivo
Engenheiro de Minas	1	MMIC / UNB	Líder da Pesquisa, Suporte, controle dos dados, especialista em planejamento de lavra
Engenheiro Civil	1	UNB	Especialista em Aerofotogrametria com RPAs e sensoriamento remoto
Piloto de RPA	1	UNB	Especialista em Planejamento e Execução de Voo com aeronaves tripuladas e não tripuladas

3.4.3 PLANEJAMENTO DOS VOOS

Para o planejamento dos voos é costumeira a realização de algumas atividades que garantam que tais voos irão entregar com qualidade toda a informação requerida para os trabalhos futuros. Em suma, as principais atividades ou itens que são necessários para o planejamento de voo estão apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 Etapas do planejamento de voo na fase 1 da pesquisa

Planejamento de Voo	
Ordem #	Itens Principais
1	Estudo Área a ser Coberta
2	Tipo de RPA Utilizado
3	GSD
4	Altura do Voo
5	Sobreposições

Referente à área a ser coberta (1), as principais informações de interesse são: tamanho da área, acesso à área, obstáculos físicos e vegetação. Cada qual deve ser tratado de forma adequada.

Referente ao tipo de RPA a ser utilizado (2) no cumprimento de cada objetivo da pesquisa, a Tabela 3.1 apresentou qual RPA será utilizado em cada objetivo e por que.

Referente à *GSD* (*Ground Sample Distance*), (3), este representa o tamanho do pixel no terreno, por exemplo, se um *GSD* tem o tamanho de 10 cm então isso significa que na imagem do terreno gerada pela aerofotogrametria objetos menores que 10 cm não serão reconhecidos, pois este é o tamanho do pixel que corresponde à menor unidade da imagem.

Baseado no exposto acima todos os trabalhos de aerofotogrametria necessitam fazer a seguinte reflexão: quais são os objetos que tenho interesse que apareçam na imagem? Qual o seu tamanho? A partir da resposta a esta pergunta você então saberá qual deverá ser o *GSD* na sua imagem. Esta informação também terá influência direta em alguns parâmetros do planejamento de voo, como: características de desempenho da câmera fotográfica e da configuração da altura de voo.

Para os voos dos *RPA*s de asa fixa e rotativa realizados nesta dissertação o *GSD* não necessita ser muito pequeno, pois na exploração de ouro na MMIC uma imagem com um *GSD* de pelo menos 15,24 cm o que é equivalente a 6" (tamanho da abertura da peneira) de tamanho já seria suficiente em termos de detalhe para a aerofotogrametria realizada nas frentes de lavra de minério, uma vez que este é o tamanho planejado que as rochas de minério devam possuir após detonadas por explosivos para fins de produtividade na alimentação da britagem primária dentro do processo de beneficiamento mineral. E um *GSD* de pelo menos 25,4 cm o que equivale a 10" de tamanho para a aerofotogrametria nas frentes de lavra de estéril e sobre as pilhas de estéril, pois este é o valor que as rochas de estéril devam ter após detonadas por explosivo para fins de diminuição de custo no desmonte e aumento de produtividade das escavadeiras no carregamento de caminhões.

Sendo assim o alvo nesta dissertação para o *GSD* a ser usado nas frentes de lavra de minério será de no máximo 15,24 cm ou 6" e para as frentes de lavra de estéril ou sobre pilhas de estéril um *GSD* de no máximo 25,4 cm ou 10". Isto quer dizer que o *GSD* só não pode ser maior do que os valores apresentados em cada frente de lavra devido não ser possível identificar o objeto se o mesmo possuir tamanho menor que o pixel, mas o *GSD* pode ser menor.

Referente à altura do voo (4), este é um parâmetro do planejamento que está em função da área alvo do voo, da configuração da câmera fotográfica acoplada no equipamento e especialmente em função do *GSD* necessário no terreno.

Todos estes parâmetros estão apresentados na Figura 3.1 e devem ser relacionados na Equação

3.1.

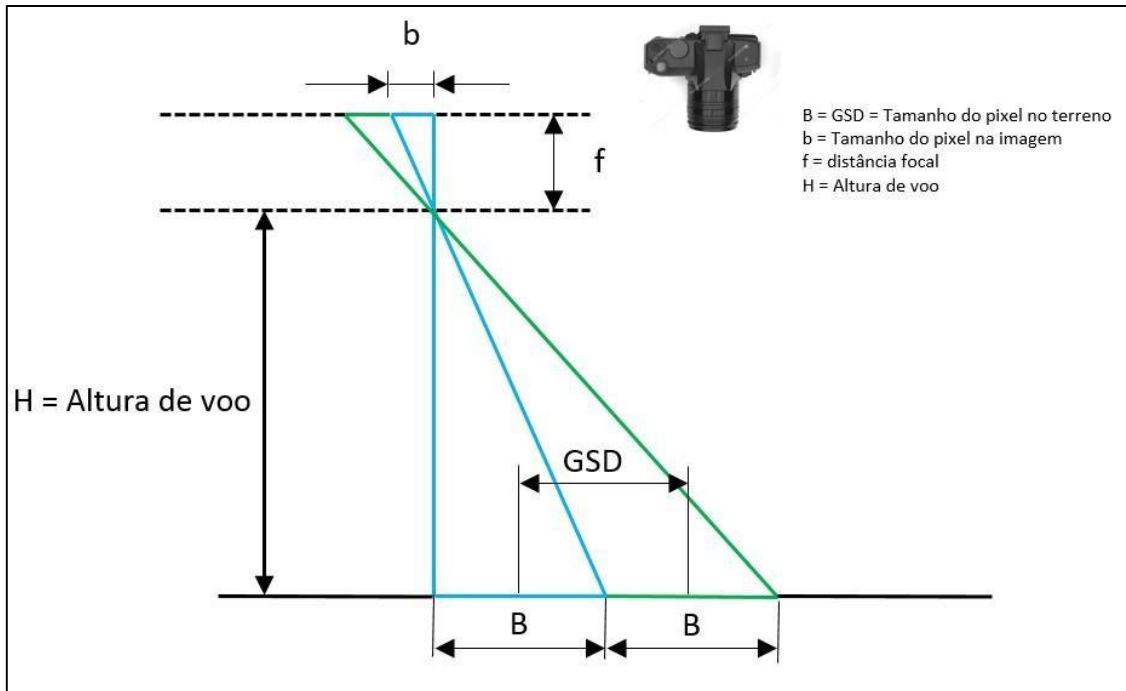


Figura 3.1 Parâmetros do plano de voo

$$B = \frac{bxH}{f} \quad (3.1)$$

Assim, para se determinar a altura de voo basta encontrar o valor de “H” na Equação 3.1. Os outros parâmetros presentes na equação são: tamanho do pixel na imagem “b”, tamanho do pixel no terreno “B” e distância focal da câmera “f”.

O tamanho do pixel na imagem, “b”, pode ser determinado conforme Equação 3.2:

$$\text{Tamanho do Pixel Imagem, } b \text{ (m)} = \frac{\frac{\text{Largura Sensor (mm)}}{1000}}{\text{Largura Imagem (pixels)}} \quad (3.2)$$

Na equação acima o tamanho da largura do sensor (mm) e o tamanho da largura da imagem (pixels) são informações que já vem de fábrica das câmeras fotográficas que foram utilizadas em cada um dos RPAs nesta dissertação. Tais informações podem ser encontradas na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 Dados das câmeras fotográficas utilizadas em cada RPA

Parâmetros	RPA Asa Fixa	RPA Asa Rotativa
Fabricante & Modelo Câmera	Canon PowerShot S100	DJI FC330

Tamanho Sensor, LxA ¹ (mm)	7,44 X 5,58	6,31 X 4,74
Tamanho Imagem, LxA ¹ (pixel)	4000 X 3000	4000 X 3000
Distância Focal (mm)	5	4

¹ LxA = Largura x Altura

O tamanho do pixel no terreno, “B” ou *GSD*”, é um valor definido pelo “interessado” vamos assim dizer, ou seja, é determinado conforme já explicado no item anterior, *GSD*. O qual será mínimo de 6” (152,4mm) para as frentes de lavra de minério e de 10” (254 mm) para a frente de lavra de estéril e pilhas de estéril.

Na tabela 3.8 a distância focal “f”, também é uma informação que vem de fábrica das câmeras fotográficas.

De posse de todos os parâmetros apresentados na Equação 3.1 é possível calcular a altura de voo. Sendo que após determinada, uma análise adicional deverá ser realizada para se ter certeza que seu valor garanta uma operação segura sem risco de choque do *RPA* com estruturas do local, bem como a entrega de elevado desempenho e qualidade durante o voo e na obtenção dos dados da aerofotogrametria. Referente à sobreposição de imagens (5), como já mencionado na revisão da literatura, em levantamento topográfico na mineração é peça chave para que ocorra o fenômeno da estereoscopia, com a qual se obtém uma visão tridimensional de uma área de interesse.

No caso desta dissertação, as sobreposições de imagens em todos os voos independentes do tipo de *RPA* utilizado foram de 60% de recobrimento longitudinal e de 30% de recobrimento lateral. Estas porcentagens são porcentagens comumente utilizadas nos trabalhos de aerofotogrametria apresentando resultados muito bons.

Na Figura 2.12 foi apresentado um esquema das sobreposições planejadas para os voos.

3.5 FASE 2 – CAMPO

Conforme apresentado na Tabela 3.3, os itens são apresentados abaixo para a fase 2 de campo.

3.5.1 EQUIPAMENTOS E SOFTWARES UTILIZADOS

Os equipamentos e *softwares* utilizados nas atividades de campo da pesquisa estão apresentados na Tabela 3.9 e 3.10.

Tabela 3.9 Equipamentos utilizados

Equipamento	Marca	Modelo	Objetivo	Detalhes
Notebook	Samsung	ATIV Book 2 270E5J-XD2BR	Manipular arquivos (armazenar, criar, salvar, transferir), Fazer alterações no Plano de Voo, etc.	Sistema Operacional: Windows 10 (64-bit) Memória: 8 GB DDR3L (1600 MHz) Armazenamento: 1 TB S-ATA III (5400 RPM) Processador: Intel® Core™ i7, 4510U Processador: 2,0 GHz até 3,1 GHz, 4 MB L3 Cache Placa Vídeo: NVIDIA® GeForce® 710 M Graphics Placa Vídeo: 2 GB gDDR3 dedicada (Optimus™)
RPA de Asa Rotativa	DJI	Phantom 4	Fazer Levantamento Topográfico das Frentes de Lavra.	Comunicação com Satélite: GPS, Glonass Autonomia Máx. Voo: 28 min Limite Altitude Software: 500m Max. Velocidade: Voo 20m/s ou 72km/h Modelo Câmera/ Resolução: DJI, 12,1Mbp Tamnho da Imagem: 4000 X 3000 pixels Tamnanho Sensor de Imagem: 1/2,3"
RPA de Asa fixa	UNB	µvant	Fazer Levantamento Topográfico de grande área da cava e pilha de estéril	Comunicação com Satélite: GPS, Glonass Autonomia Máx. Voo: 25 min Limite Altitude Software: 500m Max. Velocidade: Voo <=100 km/h Modelo Câmera/ Canon Powershot S100, 12,1Mbp Tamnho da Imagem: 4000 X 3000 pixels Tamnanho Sensor de Imagem: 1/2,3"
Receptor GNSS	Leica Geosystems	Viva GS15	Gerar os Pontos de Controle dos voos, auxiliar no levantamento topográfico com Estação Total.	Tecnologia GNSS - Leica RTK Plus Captação Sat.: GPS, Galileo, Glonass, Beidou Nº máx. de satélites conectados: 60 Precisão: < 0,5mm / Confiabilidade 99% Tempo para inicialização: 4s Memória interna: 1 Gb
Estação Total	Leica Geosystems	TS15	Fazer Levantamento Topográfico das Pilhas de Estéril.	Alcance, Precisão e Tempo de Medição: Com Prisma: 3500m, 1mm e 2,4s Sem Prisma: 1000m, 2mm e 3s Longa Distância: >10000m, 5mm e 2,5s Campo de visão: 1° 30' / 2,7 m a 100 m Memória interna: 1 Gb
Laser Scanner Terrestre	Leica Geosystems	C10	Fazer Levantamento Topográfico das Frentes de Lavra.	Precisão de Posição: 6mm Precisão de Distância: 4mm Nuvem de Pontos: 50000 pontos/ seg. Campo de visão: Hz. 360º max., V 270º max. Alcance: 300m @90%, 134m@18% albedo Memória interna: 80Gb

Tabela 3.10 Softwares utilizados

Software	Marca	Versão	Objetivo	Detalhes Relacionados à Dissertação
Minesight	Leica Geosystems / Hexagon Mining	v 12.0.-6 (64bit)	Estudo das cavas a céu aberto e do plano de lavra para definição das áreas alvo. Check de informação de infraestruturas, obras e obstáculos reais aos RPAs.	Manipular Topografia real 3D Definir áreas alvo e seus acessos Medir Comprimento, Largura e Áreas Estudar os locais para bases de voo Confeccionar o plano de voo Gerar de Mapas e Imagens Virtuais
Google Earth Professional	Google Inc.	7.1.5.1557	Georeferenciamento de Objetos, Estudos Locacionais, Verificação de Resultados	Georeferenciar de Objetos Estudar Relevos, Acessos e Estruturas Confeccionar Mapas e Imagens Virtuais Medir Comprimento, Largura e Áreas Confeccionar o plano de voo

Mission Planner	Ardupilot (Software Open Source)	32 e 64bits	Confeccionar plano de voo para os RPAs, comandar o RPA durante o voo, e armazenar dados	Planejar a missão ou plano de voo Acompanhar voo em tempo real Executar comandos durante o voo Informar a posição espacial do RPA/Drone Armazenar dados do voo
-----------------	----------------------------------	-------------	---	--

3.5.2 PROFISSIONAIS ENVOLVIDOS

Basicamente, para a realização da pesquisa em campo foi planejado profissionais da equipe de topografia da Mineração Maracá Indústria e Comércio (MMIC) para realizar os levantamentos topográficos com a metodologia tradicional, a qual utiliza a estação total, laser scanner terrestre e o Receptor *GNSS* de precisão.

Por outro lado, foi necessário um piloto profissional de aeronaves não tripuladas para que pudesse realizar os levantamentos topográficos com base na aerofotogrametria utilizando os *RPAs* de Asa Fixa e Rotativa.

Completando o quadro a pesquisa contou com um engenheiro de minas que liderou cada etapa dando suporte, fazendo ajustes e fazendo o controle dos dados gerados. Na Tabela 3.11 são apresentados os profissionais envolvidos:

Tabela 3.11 Profissionais Envolvidos

Profissional	Quantidade	Empresa / Instituição	Objetivo
Engenheiro de Minas	1	MMIC / UNB	Líder da Pesquisa, Suporte, controle dos dados
Piloto de RPA	1	UNB	Aerofotogrametria com RPA de Asa Fixa e Rotativa
Topógrafos	3	MMIC	Laser Scanner, Estação Total, GPS Geodésico, Suporte

3.5.3 PREPARAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE

No caso da aerofotogrametria com os *RPAs* de Asa Fixa e Rotativa a preparação da área de pesquisa não demanda muitos cuidados. Basicamente, a principal preparação tem a ver com a alocação dos pontos de controle. A qual deve sempre que possível cobrir de maneira simétrica e bem distribuída toda a área alvo da pesquisa.

A principal função dos pontos de controle é corrigir os erros que possam surgir durante a fase de processamento das imagens. Isto porque as coordenadas dos pontos de controle espalhados

em campo e que serão importadas posteriormente para o *software* de processamento de imagens, são coordenadas obtidas com o Receptor *GNSS* de alta precisão, com erro de poucos milímetros, garantindo ao processamento uma referência adicional.

Os pontos de controle podem ser feitos de várias formas como marcos de concreto, desenhos com tinta spray, com papéis impressos, usar locais de referência do próprio terreno etc.. Entretanto devem ser capazes de serem identificados posteriormente nas imagens fotográficas realizadas pelos voos dos *RPA*s.

Nesta dissertação os pontos de controle foram feitos de papel A3 nas cores brancas e vermelha conforme pode ser observado na Figura 3.2:

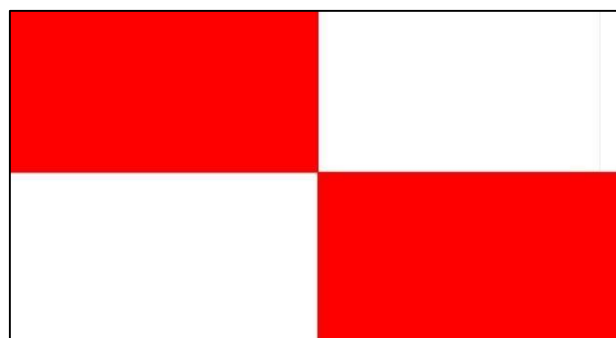


Figura 3.2 Imagem do Ponto de Controle

Na Figura 3.3 está apresentado um esquema do que seria uma boa disposição dos pontos de controle na área alvo de aerofotogrametria.

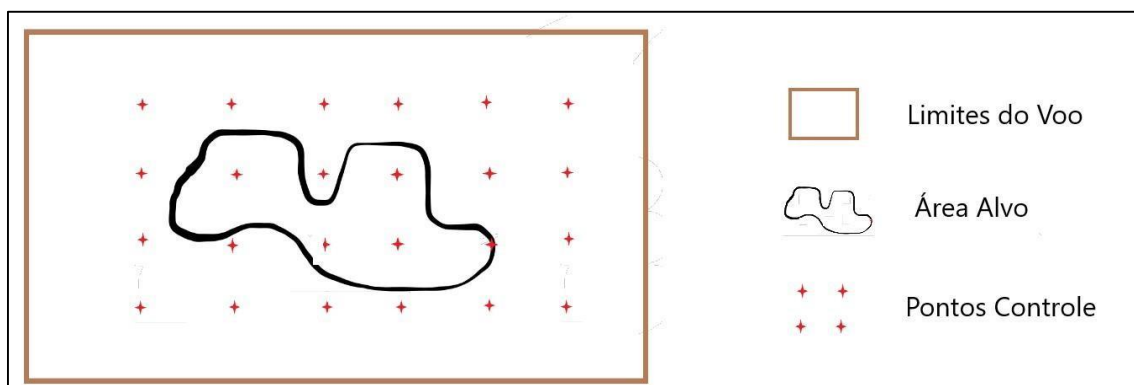


Figura 3.3 Planejamento da disposição dos pontos de controle

Na figura 3.3 é possível perceber que os pontos de controle estão de forma simétrica sobre a área alvo, o que é recomendável. Já o limite do voo é maior que a área alvo, pois as distorções

de posição nos pixels da imagem geralmente se apresentam nas extremidades. Dessa forma, a área alvo estaria fora da área de distorção e bem suportada por pontos de controle.

3.5.4 EXECUÇÃO DA FASE DE CAMPO

A execução da fase de campo é o momento em que se inicia o levantamento topográfico em questão.

Conforme apresentado no início deste capítulo metodologia, foram dois (2) voos planejados com o *RPA* de Asa Rotativa e mais oito (8) voos com o *RPA* de Asa Fixa.

Planejou-se que a equipe de topografia da mina fizesse o levantamento topográfico nas mesmas áreas que os *RPA*s para fins de comparação de resultados.

A seguir é apresentado como foi planejado cada levantamento topográfico.

□ Levantamento Topográfico Frente de Lavra: *RPA* Asa Rotativa X Laser Scanner Terrestre

Tanto na frente de lavra de minério quanto na frente de lavra de estéril foram planejados para uso o *RPA* de Asa Rotativa e o laser scanner terrestre para o levantamento topográfico. Posteriormente foram planejados confrontar os resultados.

Planejou-se que o levantamento topográfico com o *RPA* de Asa Rotativa e com o Laser Scanner Terrestre iniciassem as atividades no mesmo horário.

No caso do *RPA*, a execução da pesquisa se inicia alocando os pontos de controle sobre a área alvo. Uma vez todos os pontos de controle estejam alocados, o piloto do *RPA* inicia o voo seguindo o plano de voo confeccionado na fase 1 da pesquisa, o qual foi importado para a memória interna da aeronave.

No caso do laser scanner terrestre é necessário antes de iniciar o levantamento topográfico, fazer o georreferenciamento de sua posição em campo (amarração) com o Receptor *GNSS*. Uma vez o ponto de visada do laser scanner estando georreferenciado, inicia-se a varredura a laser da área. Geralmente são necessários de dois a três pontos de visada para que o laser scanner possa cobrir toda a área alvo, eliminando com isso pontos cegos no levantamento.

Todo o tempo gasto para a execução do levantamento topográfico pelas equipes é guardado para análises futuras.

□ Levantamento Topográfico de Grande Área da Cava e Pilha de Estéril: *RPA* Asa Fixa X Estação Total & Receptor *GNSS*

O levantamento topográfico com o *RPA* de Asa Fixa foi planejado para abranger uma grande área da mina, especificamente a parte da Cava Central e Sul a céu aberto, abrangendo ainda estruturas laterais da cava como pilhas de estéril.

Para a cobertura total da área foram planejados oito voos, isto por que a aeronave não tem autonomia de voo suficiente para cobrir toda a área de uma única vez. Foi confeccionado um plano de voo para cada um destes oito voos.

Da mesma forma como no levantamento das frentes de lavra, o levantamento com o *RPA* de Asa Fixa se inicia alocando os pontos de controle sobre a área alvo. Uma vez os pontos de controle estejam alocados, o piloto do *RPA* inicia o primeiro voo seguindo o plano de voo confeccionado na fase 1 da pesquisa, o qual foi importado na memória interna da aeronave. Finalizado o primeiro voo, inicia-se o segundo voo e assim por diante até completar os oito voos.

O levantamento da área pela equipe de topografia foi realizado anteriormente aos voos com o *RPA* de Asa Fixa, de forma fracionada e dispersa, dependendo da necessidade. De forma que os arquivos topográficos das cavas e pilha de estéril provenientes da equipe de topografia da mina já estavam disponíveis para análises.

O tempo gasto com o levantamento topográfico da área é guardado somente para o *RPA* de Asa Fixa, pois conforme mencionado acima não é possível rastrear com exatidão qual foi o tempo gasto pela equipe de topografia, entretanto este foi estimado para comparação de resultados.

3.5.5 DADOS OBTIDOS

Pode-se dizer que os dados principais para o levantamento topográfico é a nuvem de pontos, uma vez que de posse da nuvem de pontos, é possível fazer as curvas de nível e modelo digital de terreno (triangularização) das áreas alvo.

Entretanto, somente o Laser Scanner Terrestre, Estação Total e Receptor *GNSS* são capazes de gerarem tal nuvem de pontos diretamente do trabalho realizado em campo. No caso dos *RPAs*

que trabalham com o processo de estereoscopia para posterior geração da nuvem de pontos, os dados obtidos durante os voos são basicamente imagens da área alvo.

Sendo assim, a seguir está a descrição dos dados os quais foram planejados para serem obtidos por cada equipamento durante os trabalhos de campo.

□ Dados obtidos pelos *RPA*s de Asa Fixa e Rotativa

Na Tabela 3.12 estão apresentados os dados obtidos em campo pelas aeronaves remotamente pilotadas.

Tabela 3.12 Dados obtidos durante a pesquisa pelos *RPA*s

LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO	
Equipamento	Dados obtidos
RPA Asa Fixa e Rotativa	Imagens Georeferenciadas

Dependendo do tipo de *RPA* e de sua tecnologia embarcada, é possível extrair mais informações das imagens em suas propriedades, veja Tabela 3.13:

Tabela 3.13 Propriedades das imagens

PROPRIEDADES DA IMAGEM	
Origem	Autor da imagem Data de tiragem
Imagem	Tamanho da imagem em pixel (largura X altura) Resolução horizontal e vertical em DPI (dots per inch) Intensidade de Bits Representação de cores em sRGB Bits por pixel compactado
Câmera	Fabricante da câmera fotográfica Modelo da câmera fotográfica Escala de número f Velocidade ISO Tempo de exposição Distância focal em mm
GPS do RPA	Latitude em graus/min./seg. Longitude em graus/min./seg. Altitude em graus/min./seg.

Arquivo	Nome Extensão do arquivo de imagem Tamanho em Mb
---------	--

As informações adicionais apresentadas acima são úteis para realização de análises e posteriores pesquisas.

□ Dados obtidos pelo Laser Scanner Terrestre , pela Estação Total & Receptor *GNSS*

Na Tabela 3.14 estão apresentados os dados obtidos em campo por cada um dos equipamentos.

Tabela 3.14 Dados obtidos durante a pesquisa pelo Laser Scanner Terrestre e Estação Total

LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO	
Equipamento	Dados obtidos
Laser Scanner Terrestre	Nuvem de Pontos
	Imagem da área
Estação Total e GPS Geodésico	Nuvem de Pontos

3.6 FASE 3 – ESCRITÓRIO

Por fim, conforme a Tabela 3.3, os itens referentes à fase 3 de escritórios são descritos a seguir.

3.6.1 EQUIPAMENTOS E SOFTWARES UTILIZADOS

Os equipamentos e softwares planejados para serem usados nas atividades de campo da pesquisa estão apresentados na Tabela 3.15 e 3.16:

Tabela 3.15 Equipamentos utilizados na fase 3 da pesquisa

Equipamento	Marca	Modelo	Objetivo	Detalhes
Computador DeskTop	ASUS	All Series	Rodar o Software Agisoft de Processamento das Imagens, Manipular arquivos	Sistema Operacional: Windows 7 (64-bit) Processador: Intel® Core™ i7, 4770 @ 3.40Ghz Armazenamento Memória: 1 TB Memória Instalada RAM: 32 Gb Placa Vídeo: NVIDIA® GeForce® GTX 650
Computador Notebook	DELL	Precision 7510	Manipular Nuvem de Pontos, Gerar MDT e Curvas de Nível. Manipular Arquivos.	Sistema Operacional: Windows 7 Enterprise (64-bit) Processador: Intel® Core™ i7, 6820HQ @ 2.70Ghz Armazenamento Memória: 500GB Memória Instalada RAM: 32 Gb Placa Vídeo: NVIDIA® Quadro M1000M Placa Vídeo: Memória Dedicada 2048 MB GDDR5

Tabela 3.16 Softwares utilizados na fase 3 da pesquisa

Software	Marca	Versão	Objetivo	Detalhes Relacionados à Dissertação
Agisoft PhotoScan Professional	Agisoft LLC.	1.4 (64bit)	Processamento Fotogramétrico de Imagens Digitais para Gerar Dados Espaciais em 3D	Alinhamento de Imagens Nuvem Densa de Pontos Malhas Texturas Ortofotos e Ortomosaicos Modelo Digital de Elevação e Terreno
Minesight	Leica Geosystems / Hexagon Mining	v 12.0.-6 (64bit)	Fazer Levantamento Topográfico das Pilhas de Estéril.	Edição Pontos e Nuvem de Pontos Edição linhas e Curvas de Nível Edição de Superfícies e Triangulações Calculos de Volumes e Tonelagens Medir Comprimento, Largura e Áreas Geração de Mapas e Imagens Virtuais Verificação de Resultados
Google Earth Professional	Google Inc.	7.1.5.1557	Georeferenciamento de Objetos, Estudos Locacionais, Verificação de Resultados	Georeferenciamento de Objetos Estudo de Relevos, Acessos e Estruturas Imagens Virtuais Medir Comprimento, Largura e Áreas Verificação de Resultados

3.6.2 PROFISSIONAIS ENVOLVIDOS

Nesta fase, os trabalhos foram planejados para serem realizados em escritório utilizando os dados obtidos da pesquisa em campo.

Basicamente foi planejado que os profissionais envolvidos, engenheiro de minas e especialista em processamento de imagem, trabalhassem juntos para gerar os resultados de levantamento topográficos com dados provenientes das aeronaves remotamente pilotadas *RPA*s, bem como controlar os resultados gerados pela equipe de topografia da MMIC referente aos levantamentos topográfico realizados com laser scanner terrestre e estação total e Receptor *GNSS*.

Na Tabela 3.17 são apresentados os profissionais envolvidos nesta fase da pesquisa, as instituições das quais fazem parte e os objetivos principais de suas atividades.

Tabela 3.17 Profissionais envolvidos na fase 3 da pesquisa

Profissional	Quantidade	Empresa / Instituição	Objetivo
			Processamento Fotogramétrico de Imagens 2D e 3D
	1	MMIC / UNB	
Engenheiro de Minas			Manipulação de Pontos, Linhas e Superfícies 2D e 3D Verificação de resultados
	1	UNB	Controle dos resultados
Especialista			Suporte Processamento Fotogramétrico de Imagens 2D e 3D
Processamento Imagens	1	MMIC	Suporte Verificação de resultados Suporte resultados levantamento topográfico LST e Estação Total
Topógrafos			Suporte resultados levantamento topográficos com <i>RPA</i> s

3.6.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Uma vez obtido os dados de campo com os *RPA*s de asa fixa e rotativa, inicia-se a etapa de processamento.

O processamento dos dados foi planejado para utilizar imagens digitais geradas pelos *RPA*s durante seus voos sobre a área de interesse. Para tal, foi planejado o uso do *software* chamado *Agisoft Photoscan*.

O *software Agisoft Photoscan* é um *software* para processamento de imagens digitais, provenientes de aeronaves remotamente pilotadas ou popularmente *drones*, a partir de algoritmo computacional.

De uma forma simplificada, entretanto suficiente para os objetivos desta dissertação, na Tabela 3.18 segue uma sequência das etapas para obtenção principalmente da nuvem de pontos georreferenciada, malha ou superfície do modelo digital de elevação (MDE) e ortomosaico de imagens georreferenciado utilizando este *software*.

Tabela 3.18 Etapas de trabalho no Agisoft Photoscam (*Workflow*)

Etapa	Descrição da Etapa
1	Criação Projeto
2	Importação Imagens
3	Importação Pontos de Controle
4	Alinhamento das Imagens
5	Ajuste Alinhamento Imagem com Pontos Controle
6	Construir Nuvem de Pontos Densa
7	Construir Malha do MDE
8	Construir Textura do Ortomosaico de Imagens

- Criação de Projeto no *Software*

Basta abrir o *software* e criar o projeto dando um nome apropriado.

- Importação das Imagens Digitais

Cada voo realizado pelos *RPA*s geraram um grande número de imagens as quais necessitam ser importadas no *Agisoft* para processamento.

Quando o número de imagens é muito grande e a configuração do computador não é suficientemente potente, é interessante realizar o processamento em dois ou mais projetos.

- Importação dos Pontos de Controle

Para fins de correção da posição das imagens é necessário importar os pontos de controle. A importação é muito simples e muito parecida com a importação das imagens.

- Alinhamento das Imagens

Devido às imagens possuírem informação de posição no plano (latitude e longitude) obtida durante o voo, esta etapa tem a finalidade de alinhar estas imagens da forma como foram tiradas durante execução do voo. Além disso, há um processo inicial de estereoscopia nesta etapa o qual gera uma nuvem de pontos considerada esparsa.

- Ajuste Alinhamento das Imagens com Pontos de Controle

Esta etapa tem a finalidade de melhorar o alinhamento realizado na etapa anterior com base na utilização de pontos de controle espalhados pela área alvo e cujas coordenadas de posição são coordenadas extremamente precisas, tomadas com o Receptor *GNSS*. Uma vez realizado o ajuste do alinhamento das imagens, estará preparado para aumentar a densidade da nuvem de pontos.

- Construção de Nuvem de Pontos Densa

Baseado no alinhamento das imagens feito nas etapas anteriores o programa adensa a informação de profundidade com base na estereoscopia. Entretanto, nesta etapa é possível definir filtro para ruídos, baixa textura e foco dos elementos da imagem. Dependendo do nível de detalhes que se espera na nuvem de pontos estes filtros podem ser usados.

- Construir Malha do Modelo Digital de Elevação (MDE)

Esta etapa é responsável por reconstruir a geometria da área com base na nuvem de pontos, formando uma superfície ou malha. A reconstrução é feita por polígonos ou triangulações sugeridas pelo *software* com base em interações geoestatísticas. Neste processo pode-se ainda optar por ativar processo de interpolação entre pontos da nuvem para cobrir áreas sem informação ou buracos na nuvem de pontos.

Esta atividade é necessária para posterior construção de ortomosaico de fotos.

- Construir Textura

Nesta etapa o processo de texturização usa os níveis de cinza (cores) dos pixels das imagens, e a malha do MDE para alocar os pixels sem posições 3D verdadeiras e coincidentes com a superfície gerada.

O resultado é uma imagem com os pixels georeferenciados

3.6.4 PRODUTOS OBTIDOS

Após o processamento dos dados obtidos na pesquisa com os *RPA*s os produtos principais obtidos estão apresentados na Tabela 3.19.

Tabela 3.19 Principais produtos obtidos durante a fase 3 da pesquisa com os *RPA*s

Produtos	Descrição dos Produtos
1	Nuvem de Pontos Densa
2	Malha do Modelo Digital de Elevação
3	Ortomosaico de Imagens

O Agisoft Photoscan permite exportar os produtos integralmente, separados por partes e de forma esparsa, diminuindo o tamanho dos arquivos. Ainda permite vários formatos de saída como .txt, .dxf, .las, .kmz, dentre outros, e em sistemas de coordenadas variados.

Estes produtos acima após exportados serão manipulações no *software* de planejamento de mina Minesight, principalmente para a geração de curvas de nível e superfície triangularizada (malha). A manipulação neste *software* será apresentada mais adiante.

Os produtos gerados com o LST, ET e Receptor *GNSS* são os mesmos obtidos com os *RPA*s e são basicamente nuvem de pontos. Seus resultados serão apresentados e comparados mais a frente.

4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA REALIZADA

Este capítulo tem a finalidade de apresentar como ocorreu na prática a pesquisa de campo e escritório, compartilhando imagens e relatando de forma mais objetiva as impressões do autor em relação ao desenvolvimento das atividades mais importantes e relevantes detalhadas no capítulo anterior.

4.1 PESQUISA COM *RPA* DE ASA ROTATIVA

Serão apresentadas a execução de todas as fases da pesquisa com o *RPA* de asa rotativa.

4.1.1 FASE 1 – ESCRITÓRIO

1. Planejamento de voo

O planejamento de voo com o *RPA* de asa rotativa foi realizado contemplando duas frentes de lavra como mencionado no capítulo anterior, uma frente de lavra de minério e outra para estéril.

As duas frentes de lavra foram escolhidas de acordo com o plano de lavra semanal realizado entre os dias 19 e 25/01/2018.

- Frente de lavra de Estéril

Na Figura 4.1 é apresentada a topografia da frente de lavra de estéril selecionada para realização da pesquisa. Mais especificamente a área de lavra está dentro do polígono vermelho na imagem.

Como o local onde se encontra esta frente é no topo da cava norte em região de encosta, não havia obstáculos que representassem risco de colisão para o *RPA* de asa rotativa (Phantom 4).

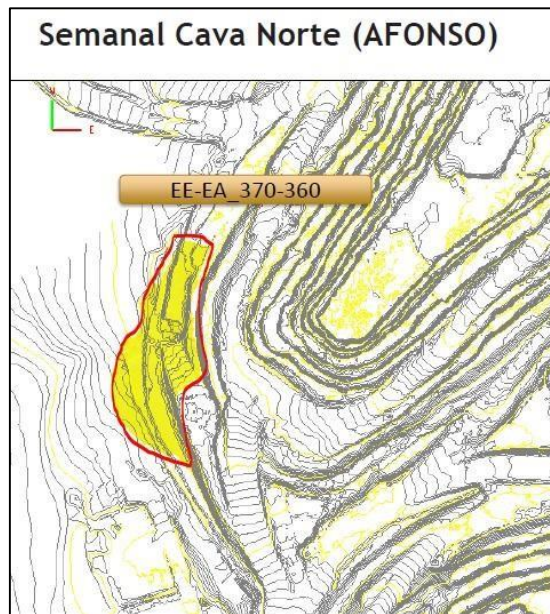


Figura 4.1 Frente de Lavra de Estéril – Plano de Lavra Semanal de 19 a 25/01/2018

Na Figura 4.2 é apresentada a tela do *software* Ardupilot com o plano de voo planejado para ser executado na frente de lavra de estéril.



Figura 4.2 Frente de Lavra de Estéril – Plano de Voo com Phantom 4

- Frente de lavra de Minério

Na Figura 4.3 é apresentada a frente de lavra de minério planejada de acordo com o plano de lavra semanal. Mais especificamente a área de lavra está dentro do polígono vermelho na imagem.

Esta frente de lavra é no fundo da cava norte, devido a isso foi necessário maior cuidado com a altura de voo e limites do plano de voo, uma vez que o *RPA* poderia colidir com as paredes ou taludes da cava.

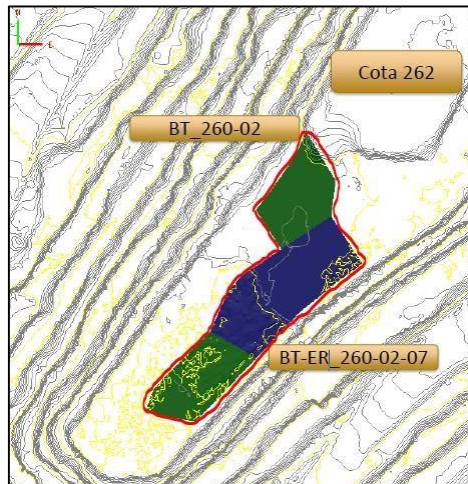


Figura 4.3 Frente de Lavra de Minério – Plano de Lavra Semanal de 19 a 25/01/2018

Na Figura 4.4 é apresentada a tela do *software* Ardupilot com o plano de voo planejado para a frente de lavra de minério.



Figura 4.4 Frente de Lavra de Minério - Plano de Voo com Phantom 4

4.1.2 FASE 2 – CAMPO

1. Local de realização da pesquisa

O local de realização da pesquisa com os *RPA*s de asa rotativa e com o Laser Scanner Terrestre foi o local denominado Cava Norte conforme pode ser visto na Figura 4.5.



Figura 4.5 Localização da Cava Norte dentro da Mina Chapada (MMIC)

Na Figura 4.6 estão apresentadas as duas frentes de lavra representadas pelos polígonos vermelhos. A frente de lavra de estéril está numerada com o número 1 e a frente de minério numerada com o número 2.



Figura 4.6 Localização das Frentes de Lavra na Cava Norte (MMIC)

A frente de lavra de estéril na Cava Norte estava no dia da pesquisa sendo operada por caminhões rodoviários de vários fabricantes. Em média estes caminhões medem em torno de 3 metros de altura e transportam aproximadamente 30 toneladas de material cada um por viagem. Também havia nesta frente de lavra retroscavadeiras de vários fabricantes. Em média estas retroscavadeiras têm capacidade de carga de aproximadamente 10 toneladas por caçambada ou passada.

Na Figura 4.7 é apresentada a frente de lavra de estéril na Cava Norte operada por uma empresa terceirizada pela MMIC no dia da pesquisa.



Figura 4.7 Frente de Lavra de Estéril na Cava Norte

A frente de lavra de minério na Cava Norte estava, no dia da pesquisa, sendo operada por caminhões de grande porte *off roads* de vários fabricantes. Em média estes caminhões medem em torno de 7 metros de altura e transportam aproximadamente 80 toneladas de material cada um por viagem.

Também havia nesta frente de lavra retroescavadeiras de grande porte de vários fabricantes. Em média estas retroescavadeiras têm capacidade de carga de aproximadamente 40 toneladas por caçambada ou passada.

Na Figura 4.8 é apresentada a frente de lavra de minério na Cava Norte operada por frota própria e terceirizada pela Mineração Maracá (MMIC).



Figura 4.8 Frente de Lavra de Minério na Cava Norte (MMIC)

2. Equipamentos Utilizados

Os equipamentos utilizados nesta fase da pesquisa foram diferentes para cada uma das equipes.

A equipe de pesquisa da UnB utilizou em campo os seguintes equipamentos:

□ *RPA* de Asa Rotativa

O *RPA* utilizado foi o Phantom 4 fabricado pela empresa chinesa DJI®. Detalhes deste equipamento bem como o objetivo do seu uso foram apresentados na Tabela 3.9.

Este equipamento não possui dimensões grandes, é leve, de fácil montagem e inicialização. Na Figura 4.9 é apresentado o equipamento. Mais ao fundo na imagem está à frente de lavra de estéril onde foi utilizado.



Figura 4.9 Apresentação do *RPA* de Asa Rotativa utilizado na pesquisa. Além do *RPA* de Asa Rotativa também foram utilizados outros equipamentos auxiliares como *tablet* para o acompanhamento e controle do voo conforme apresentado na Figura 4.9, cronômetro para medição de tempos de voos, carregadores de bateria, materiais para tomar nota de informações pertinentes e marcos topográficos feitos com papel A3 para servirem como pontos de controle.

A equipe de topografia da MMIC utilizou os seguintes equipamentos em campo:

- Receptor *GNSS*

Foi utilizado o Receptor *GNSS* Viva GS15 da fabricante Leica®. Na Tabela 3.9 foram apresentados mais detalhes deste equipamento bem como seu objetivo na pesquisa.

Este equipamento é um equipamento de pequenas dimensões sendo que seu receptor mede aproximadamente 20 x 20cm, fora a haste ou tripé que pode ser instalado. Leve com aproximadamente 1,5 kg e de fácil transporte, uso e manuseio. Na Figura 4.10 é apresentado o equipamento.



Figura 4.10 Receptor GNSS VivaGS15 da fabricante Leica Geosystems®

- Laser Scanner Terrestre

O equipamento laser scanner terrestre utilizado foi o modelo C10 da fabricante Leica Geosystems®. Na Tabela 3.9 foram apresentados mais detalhes do equipamento bem como seu objetivo na pesquisa.

Este equipamento é feito para ser posicionado sobre uma base tripé conforme apresentado na Figura 4.11. Sua dimensão em profundidade, largura e altura é de aproximadamente 24x36x40 centímetros, e pesa em torno de 13kg. Possui facilidade no transporte, entretanto seu uso e manuseio não é tão simples como o Receptor GNSS.



Figura 4.11 Equipamento Laser Scanner Terrestre C10 Leica Geosystems®

3. Preparação dos pontos de Controle

No caso da frente de lavra de estéril e minério foram alocados aproximadamente 10 pontos de controle.

Na Figura 4.12 e 4.13 é apresentada a distribuição dos pontos de controle na frente de lavra de estéril e minério, ambas situadas na Cava Norte.

Os pontos de controle estão apresentados nas figuras na cor azul enquanto as frentes de lavra de estéril e minério são delimitadas por um polígono vermelho.

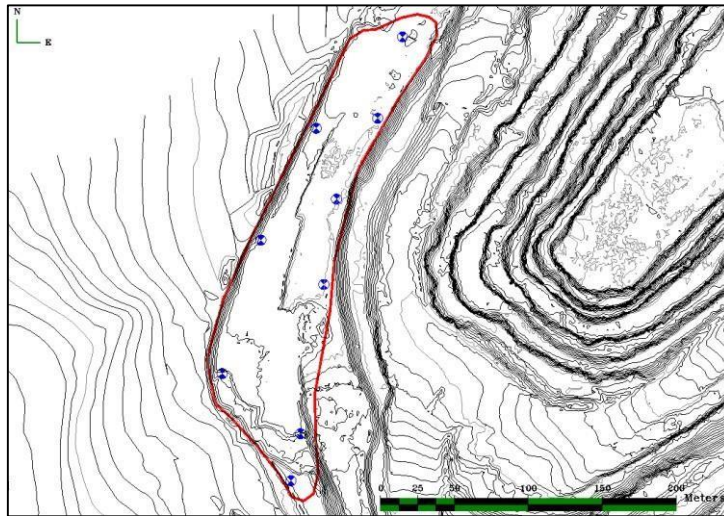


Figura 4.12 Distribuição dos Pontos de Controle na Frente de Lavra de Estéril

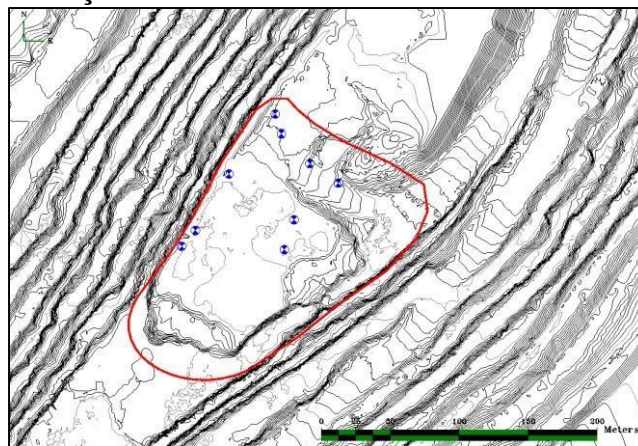


Figura 4.13 Distribuição dos Pontos de Controle na Frente de Lavra de Minério

Para que os pontos de controle fossem identificados nas imagens geradas pelo *RPA*, estes foram feitos em papel A3 e em cada um foi impresso de forma cruzada as cores vermelhas e branca.

Em cada local onde foi disposto este papel A3 se retirou um ponto com Receptor *GNSS* de alta acurácia com variação menor que 0,5mm e precisão de 99% da posição. A alta acurácia e precisão são necessárias para que a coordenada de cada ponto de controle possa ser usada com segurança como ponto de referência para correções de posicionamento da nuvem de pontos durante a fase de processamento das imagens.

Na Figura 4.14 é apresentado o procedimento de locação dos pontos de controle com Receptor *GNSS* de alta acurácia e precisão da fabricante Leica® modelo Viva GS15 nas frentes de lavra de estéril e minério na Cava Norte.



Figura 4.14 Locação e Retirada de Coordenada de Ponto de Controle

4. Execução da Pesquisa

Uma vez que o plano de voo estava pronto para as duas frentes de lavra e seus pontos de controle alocados, iniciou-se a pesquisa com finalidade de levantar topograficamente estas áreas.

O *RPA* de asa rotativa executou o plano de voo sem nenhum problema tanto na frente de lavra de minério quanto na de estéril.

Nas Figuras 4.15 e 4.16 é apresentado o momento em que o *RPA* decolou para executar a pesquisa e uma imagem do mesmo sobrevoando a frente de lavra de estéril.



Figura 4.15 Decolagem do *RPA* de Asa Rotativa na frente de lavra de estéril

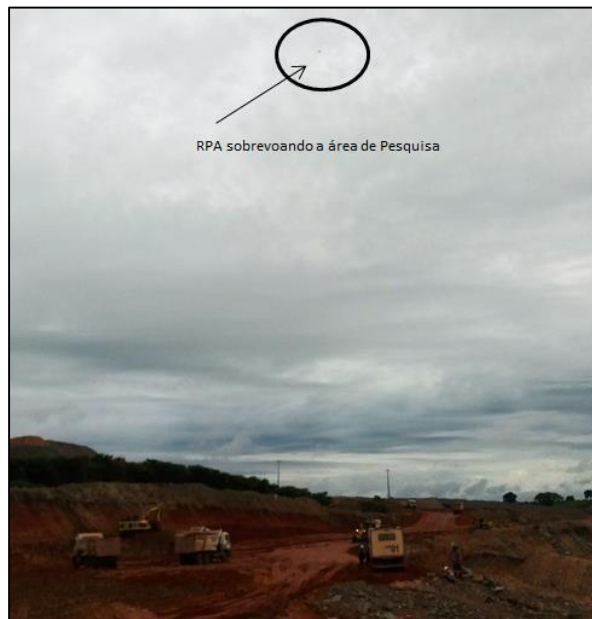


Figura 4.16 *RPA* de Asa Rotativa sobrevoando a frente de lavra de estéril A base do voo com a qual se realizou a decolagem do *RPA* se manteve a uma distância de aproximadamente 300m das frentes de lavra, de onde os equipamentos como caminhões de transporte e retroescavadeiras de carga estavam operando. Na Figura 4.15 é possível observar esta distância.

Nas Figuras 4.17 e 4.18 são apresentados alguns momentos da pesquisa na frente de lavra de minério.



Figura 4.17 RPA de Asa Rotativa sobrevoando a frente de lavra de estéril



Figura 4.18 RPA de Asa Rotativa sobrevoando a frente de lavra de minério

Ao mesmo tempo em que o RPA de Asa Rotativa estava executando a pesquisa, a equipe de topografia da MMIC também iniciou seu levantamento topográfico com o LST.

Na Figura 4.19 é apresentado um dos pontos de visada que foi utilizado por esta equipe para fazer a varredura a laser da frente de lavra de estéril, e na figura 4.20 a mesma situação na frente de lavra de minério.



Figura 4.19 LST e Receptor GNSS na frente de lavra de estéril



Figura 4.20 LST e Receptor GNSS na frente de lavra de minério

A execução da pesquisa nas frentes de lavra de estéril e minério pelas duas equipes ocorreu simultaneamente e sem nenhuma dificuldade ou atraso.

Foi possível obter todos os dados necessários para o levantamento topográfico seja com o *RPA* de asa rotativa ou com o Laser Scanner Terrestre nas mesmas condições e locais. Também foi possível medir o tempo gasto com a execução da pesquisa em cada um dos levantamentos.

4.1.3 FASE 3 – ESCRITÓRIO

1. Processamento dos Dados

A seguir serão apresentadas algumas imagens das etapas de processamento realizadas com o *software* Agisoft Photoscan. Porém, estas imagens são apenas parte do trabalho. Todos os resultados serão discutidos no próximo capítulo.

Na Figura 4.21 é apresentada a tela do *software* Photoscan após processo de alinhamento georreferenciado das imagens e correção deste posicionamento com base nos pontos de controle.

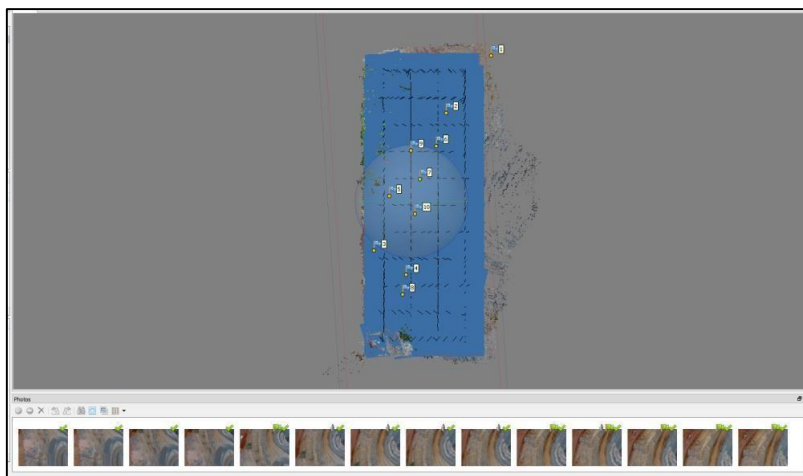


Figura 4.21 Alinhamento de imagens e correção da posição com pontos de controle

Na sequência do processamento, as imagens após ter sua posição “E” longitude e “N” latitude alinhadas e corrigidas pelos pontos de controle são processadas usando o fenômeno da estereoscopia para receberem a coordenada “H” altitude. Como este processo é realizado para cada um dos pixels de cada uma das imagens, é gerada então uma nuvem de pontos georeferenciada e tridimensional, Figura 4.22.

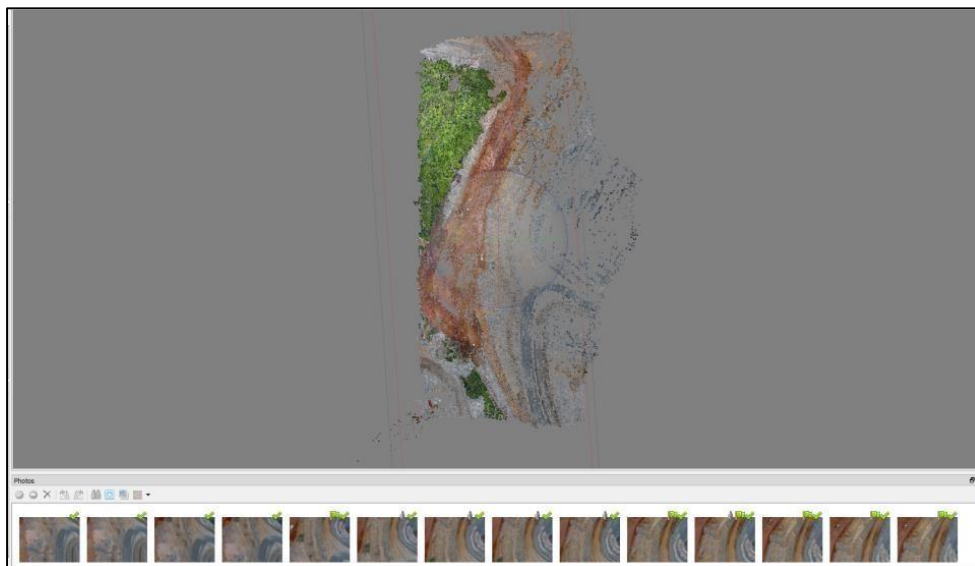


Figura 4.22 Nuvem de Pontos 3D

De posse da nuvem de pontos a próxima etapa é realizar o *mesh* ou malha do inglês que tem a finalidade de criar planos triangularizados entre os pontos da nuvem de pontos. Este processo dá origem a uma superfície conforme apresentado na Figura 4.23.

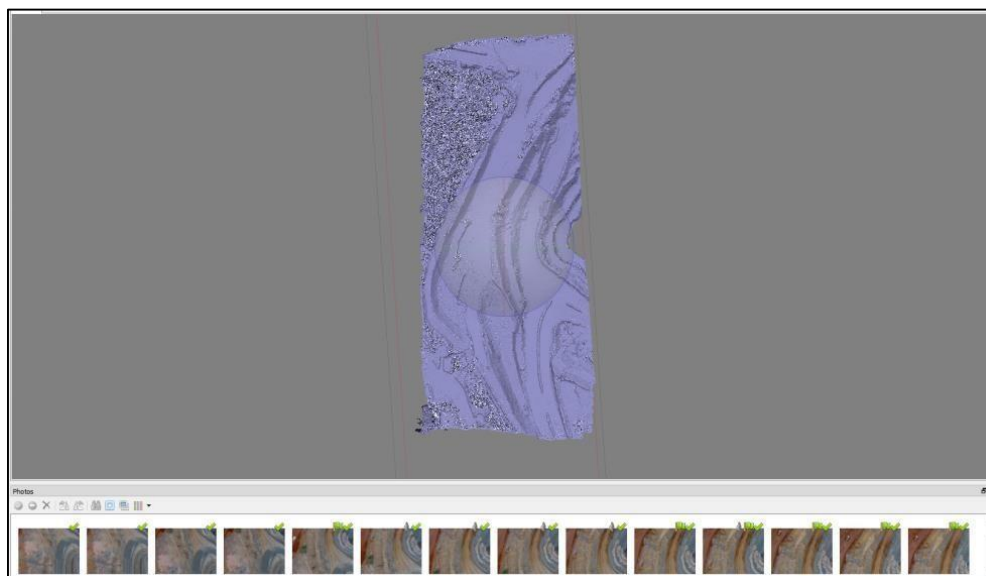


Figura 4.23 Superfície ou Malha da Nuvem de Pontos

Para gerar o ortomosaico georreferenciado, é realizado o processo de texturização que é atribuir a cada ponto da nuvem de pontos seu pixel ou cor correspondente da imagem que o gerou, Figura 4.24.

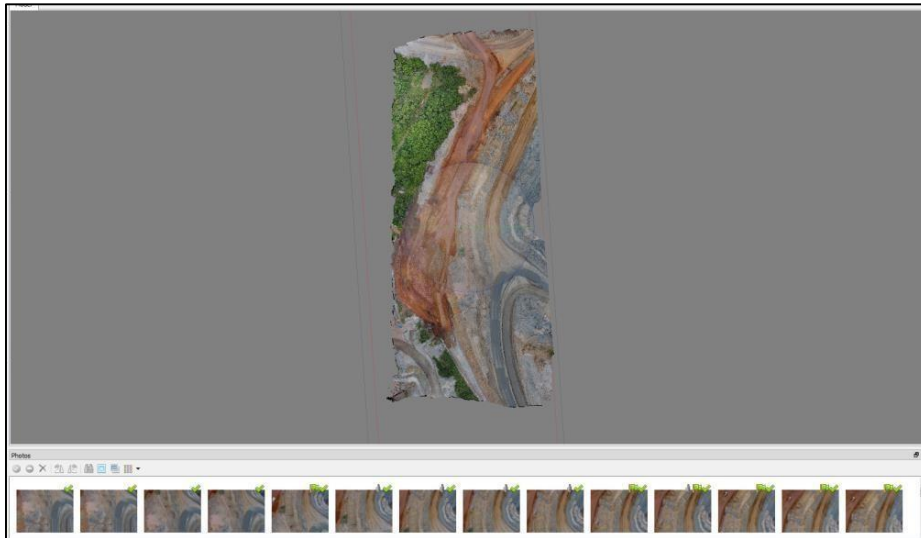


Figura 4.24 Ortomosaico de imagens ou Superfície 3D Texturizada

Após finalizado o processamento das imagens no Agisoft Photoscan, a nuvem de pontos e o ortomosaico georreferenciado das imagens são exportados para utilização no Minesight e no Google Earth Pro respectivamente.

No Minesight a nuvem de pontos é tratada ou processada para gerar as curvas de nível das frentes de lavra. E no Google Earth Pro o ortomosaico é usado para visualizar todas as imagens da área de pesquisa em uma só imagem georreferenciada.

4.2 PESQUISA COM RPA DE ASA FIXA

Serão apresentadas a execução de todas as fases da pesquisa com o RPA de asa fixa.

4.2.1 FASE 1 – ESCRITÓRIO

1. Planejamento de voo.

O planejamento de voo com o RPA de asa fixa foi realizado contemplando uma grande região da cava a céu aberto da Mina de Chapada onde há estruturas diversas como acessos, regiões de lavra, estacionamentos de equipamentos de lavra, pilhas de estéril e minério, região de barragem e etc.

Durante a execução do plano de voo foi necessário considerar uma altura mínima de voo de 300m para garantir que o RPA pudesse sobrevoar as estruturas sem risco de colisão.

Como a área de pesquisa é grande, foi necessário dividir o voo em oito etapas. Cada etapa teve o tamanho adequado à capacidade de bateria do *RPA* de Asa Fixa para que este pudesse decolar e pousar com segurança, algo em torno de 25 minutos cada etapa.

Para diminuir a distância que o *RPA* precisa voar da sua base até o início da linha de voo do plano propriamente dito, houve a necessidade de definir duas bases de voo.

Na Figura 4.25 é apresentada a tela do *software Mission Planner* da fabricante Ardupilot® o qual foi utilizado para criar o plano de voo.

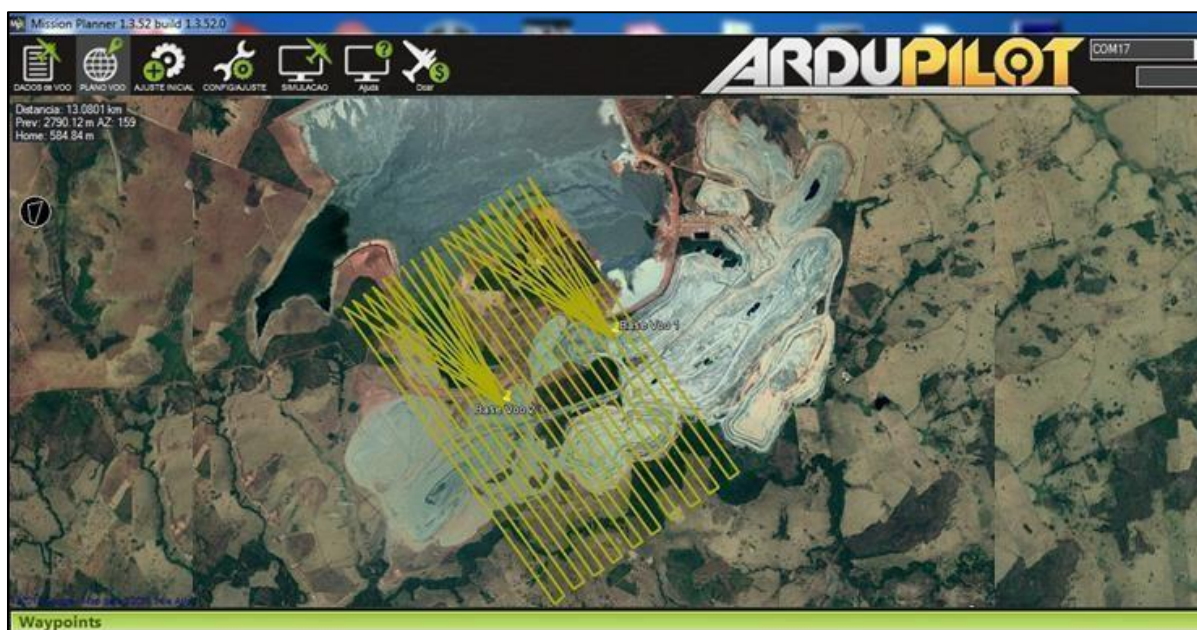


Figura 4.25 Plano de voo para o *RPA* de Asa Fixa (Ardupilot adaptado pelo autor)

4.2.2 FASE 2 – CAMPO

1. Local de realização da pesquisa

Na Figura 4.26 o limite branco pontilhado representa a área de cava e arredores a qual foi escolhida para ser pesquisada com *RPA* de Asa Fixa.



Figura 4.26 Área de pesquisa com *RPA* de Asa Fixa (Google Earth adaptado pelo autor)

Dentro desta área há regiões de cava como também de pilhas de estéril e de minério, acessos, área de barragem, estacionamento de equipamentos e etc.

Em particular a Pilha de Estéril SW apresentada na Figura 4.26 foi alvo de um estudo de caso que será apresentado no Capítulo 5.

2. Equipamentos Utilizados

RPA de Asa Fixa

O *RPA* de Asa Fixa utilizado foi um *RPA* fabricado pela equipe de pesquisa do Departamento de Engenharia Civil da UnB. Detalhes deste equipamento foram apresentados na Tabela 3.9.

Na Figura 4.27 é apresentado o *RPA* de Asa Fixa usado na pesquisa, bem como a sua base de voo que contém um tripé para apoio do comunicador de rádio e tela de vídeo onde é possível observar imagens da câmera de vídeo que vai acoplada no bico frontal da fuselagem da aeronave. Também nesta tela de vídeo é possível acompanhar os dados de capacidade da bateria, posição do *RPA* durante o voo, velocidade, e etc.



Figura 4.27 RPA de Asa Fixa e Base de Voo utilizado na pesquisa

O RPA de Asa Fixa tem a sua decolagem realizada por lançamento manual. Também foi necessário encontrar uma área plana com pelo menos 20 metros quadrados para que a aeronave pudesse aterrissar de forma segura. Sua montagem é fácil e foi feita pelo próprio piloto no local de pesquisa.

A equipe de topografia da MMIC usa os seguintes equipamentos para levantamento topográfico de pilhas de estéril.

□ Estação Total

A estação total é um equipamento utilizado pelos topógrafos da MMIC para realizar levantamento topográfico nas pilhas de estéril e minério. Detalhes do equipamento foram apresentados na Tabela 3.9. Na Figura 4.28 é apresentado o equipamento utilizado pela equipe de topografia da MMIC.



Figura 4.28 Estação Total modelo TS15 fabricado pela Leica Geosystems®

3. Preparação de Pontos de Controle

Os pontos de controle nesta pesquisa têm a mesma finalidade apresentada anteriormente e foram alocados em campo seguindo a mesma metodologia.

Na Figura 4.29 são apresentados os pontos de controle. Note pela escala presente na Figura 4.29 que a área pesquisada é muito grande, sendo assim optou-se por fazer duas malhas de pontos de controle, uma mais densa sobre a Pilha de Estéril SW (pontos azuis) e outra mais dispersa sobre a área toda (pontos vermelhos).

O motivo de fazer duas malhas é porque as áreas foram estudadas de forma diferente. Foi realizado um processamento de imagens somente com os pontos vermelhos para verificar o erro de posição obtido considerando uma área grande com poucos pontos de controle. E outro processamento mais detalhado sobre a pilha de estéril SW, o qual foi objeto de estudo de caso no capítulo 7. A diferença é que neste processamento sobre a pilha, a área é menor e tem o dobro de pontos de controle. Assim foi possível verificar os erros obtidos em cada uma das duas situações.

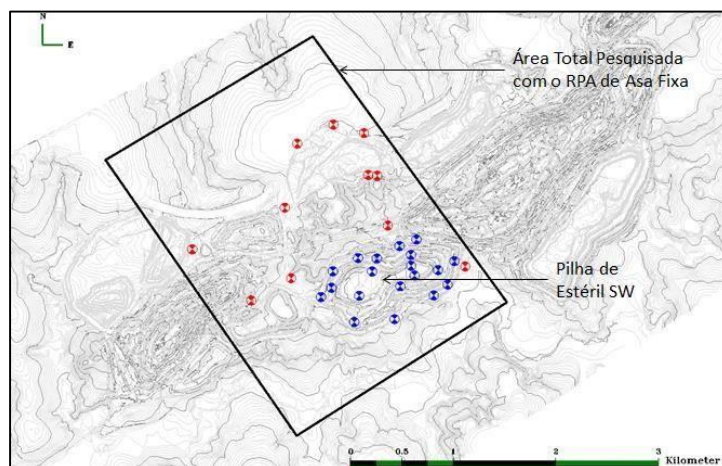


Figura 4.29 Pontos de Controle distribuídos sobre área de pesquisa com *RPA* de Asa Fixa

4. Execução da Pesquisa

Uma vez que o plano de voo estava pronto para sua execução deu-se início a pesquisa com o *RPA* de Asa Fixa.

O *RPA* decolou da base 1 apresentada na Figura 4.25 e voou para executar a primeira etapa do plano de voo.

Na Figura 4.30 é apresentado o momento em que o *RPA* foi lançado para seu primeiro voo.

Ao fundo é possível ver a Pilha de Estéril SW.



Figura 4.30 Decolagem do *RPA* de Asa Fixa para execução da pesquisa

Os voos seguiram uma sequência do primeiro ao quarto voo realizado decolando da base de voo 1, e a partir do quinto ao oitavo decolando da base de voo 2.

De maneira geral a pesquisa com o *RPA* de Asa Fixa ocorreu sem maiores problemas e os dados foram coletados para processamento posterior.

A equipe de topografia da MMIC também realizou levantamento topográfico de toda a área pesquisada com o *RPA* de Asa Fixa, ora utilizando Receptor *GNSS* e ora utilizando a Estação Total, entretanto em data anterior à data da pesquisa com o *RPA*. No caso, a equipe de topografia da MMIC vem realizando levantamentos topográficos nesta área em questão por anos, e estes levantamentos são sempre realizados quando há alguma modificação na superfície, seja devido à lavra ou devido a deposições de material.

4.2.3 FASE 3 – ESCRITÓRIO

1. Processamento dos dados

Seguindo a mesma linha de raciocínio apresentada na fase de processamento dos dados obtidos com o *RPA* de Asa Rotativa, temos nas figuras de 4.31 a 4.34 uma apresentação sucinta de como foram as etapas do trabalho com o *software* Agisoft Photoscan® para o processamento dos dados obtidos com o *RPA* de Asa Fixa.

Toda a lógica por trás de cada uma das etapas no *software* Agisoft Photoscan® não será novamente escrita aqui neste subcapítulo e pode ser lembrada voltando ao descritivo apresentado na fase 3 da pesquisa anterior com *RPA* de asa rotativa, em processamento dos dados.

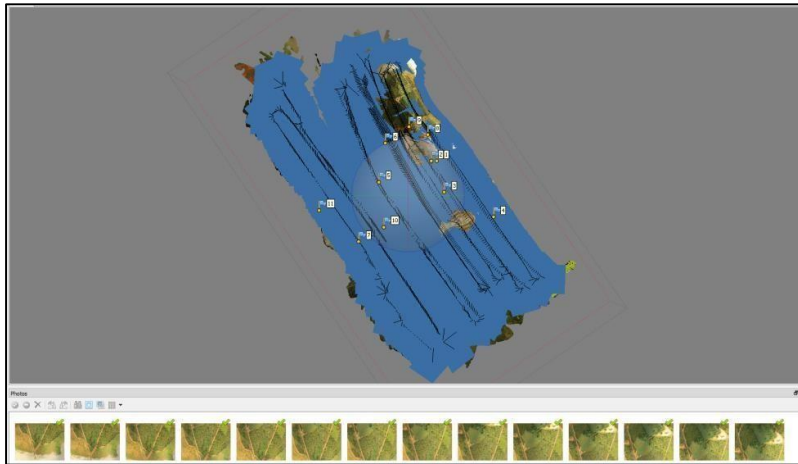


Figura 4.31 Alinhamento de imagens e correção da posição com pontos de controle

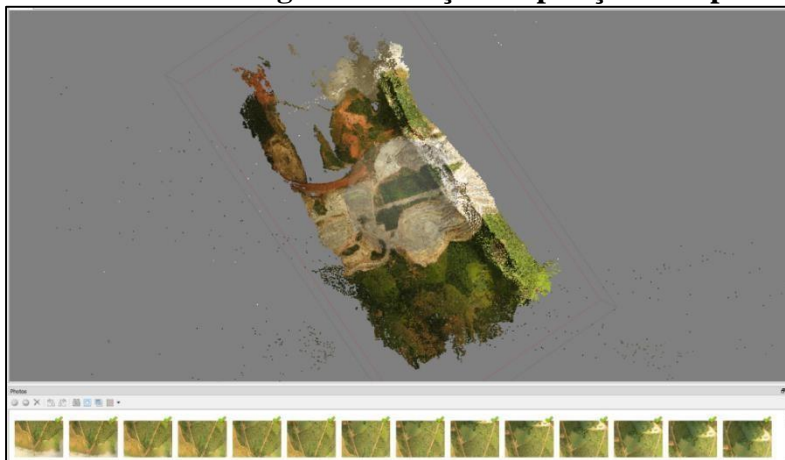


Figura 4.32 Nuvem de Pontos 3D

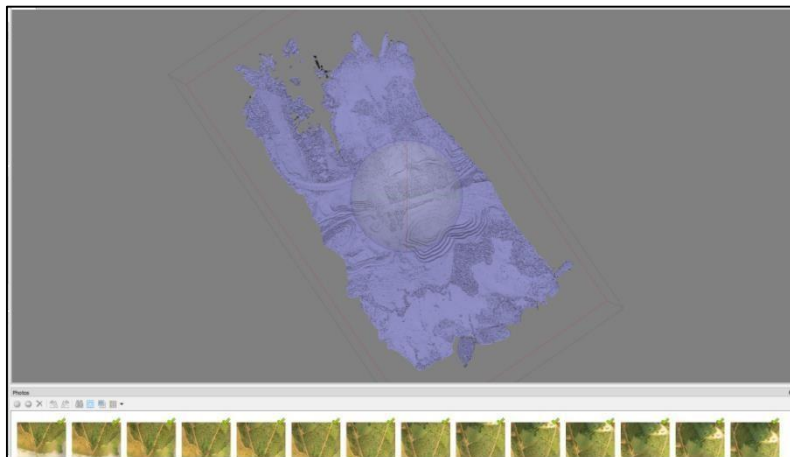


Figura 4.33 Superfície ou Malha da Nuvem de Pontos

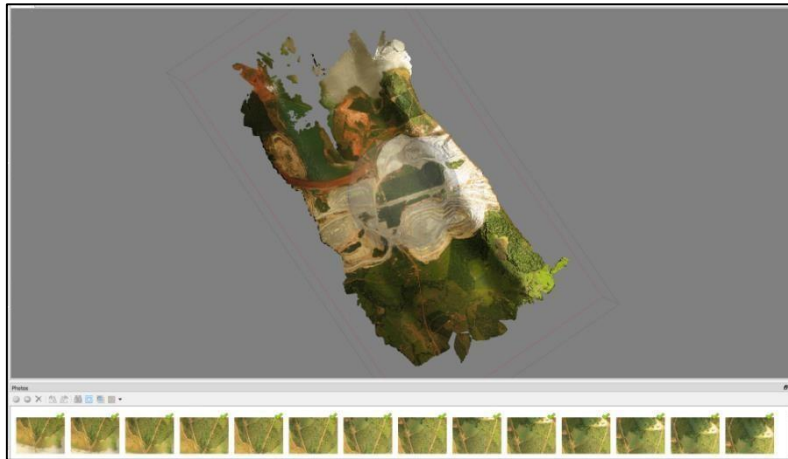


Figura 4.34 Ortomosaico de imagens ou Superfície 3D Texturizada

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo tem a finalidade de apresentar os resultados obtidos durante a pesquisa e fazer sua análise, verificar se foi um resultado satisfatório ou o que poderia ser feito para obter melhores resultados.

5.1 TRAJETÓRIA DOS RPAs NO VOO, SOBREPOSIÇÃO DE IMAGENS E GSD

Saber como ocorreu a trajetória de voo dos RPAs é importante para saber se os mesmos seguiram a linha de voo planejada, pois desvios podem prejudicar as tomadas de topografias e consequentemente a sobreposição de imagens. A seguir serão apresentados estes resultados.

5.1.1 FRENTE DE LAVRA DE ESTÉRIL – RPA DE ASA ROTATIVA

Na Figura 5.1 é apresentada a trajetória de voo e sobreposição de suas imagens.

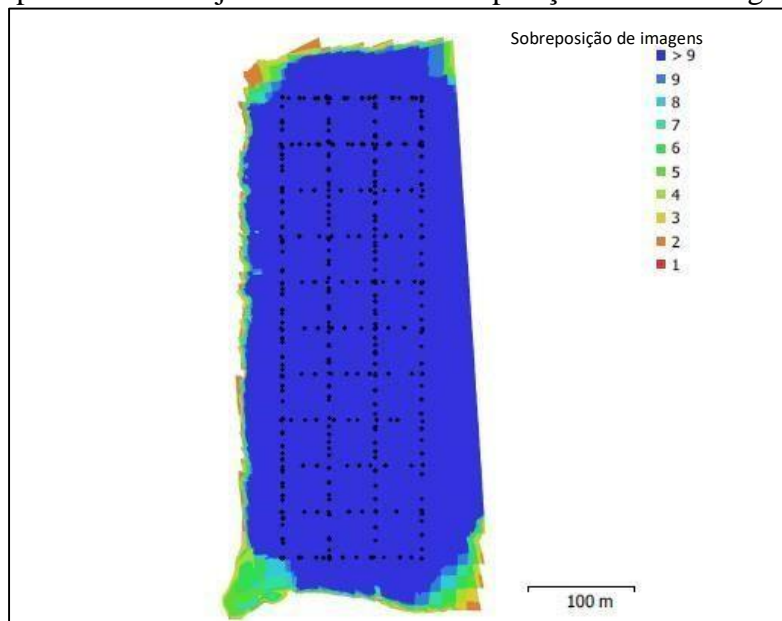


Figura 5.1 Trajetória de voo e Sobreposição de Imagem

Como pode ser visto na Figura 5.1 o RPA seguiu uma trajetória simétrica e cruzada representada pelos pontos pretos e bem aderente ao plano de voo apresentado na Figura 4.2.

A sobreposição das imagens foi muito boa e cada imagem presente na área de interesse teve mais de nove sobreposições, como pode ser observado na legenda da Figura 5.1. Isso ajuda muito o processo de estereoscopia e reconstrução 3D da cena.

Ainda sobre esta pesquisa, a altura de voo foi de 60m, a área de cobertura foi de 0,114 km², foram realizadas 538 imagens com resolução no solo (*GSD*) de 2,3cm/pixel.

5.1.2 FRENTE DE LAVRA DE MINÉRIO – RPA DE ASA ROTATIVA

Na Figura 5.2 é apresentada a trajetória de voo e sobreposição de suas imagens.

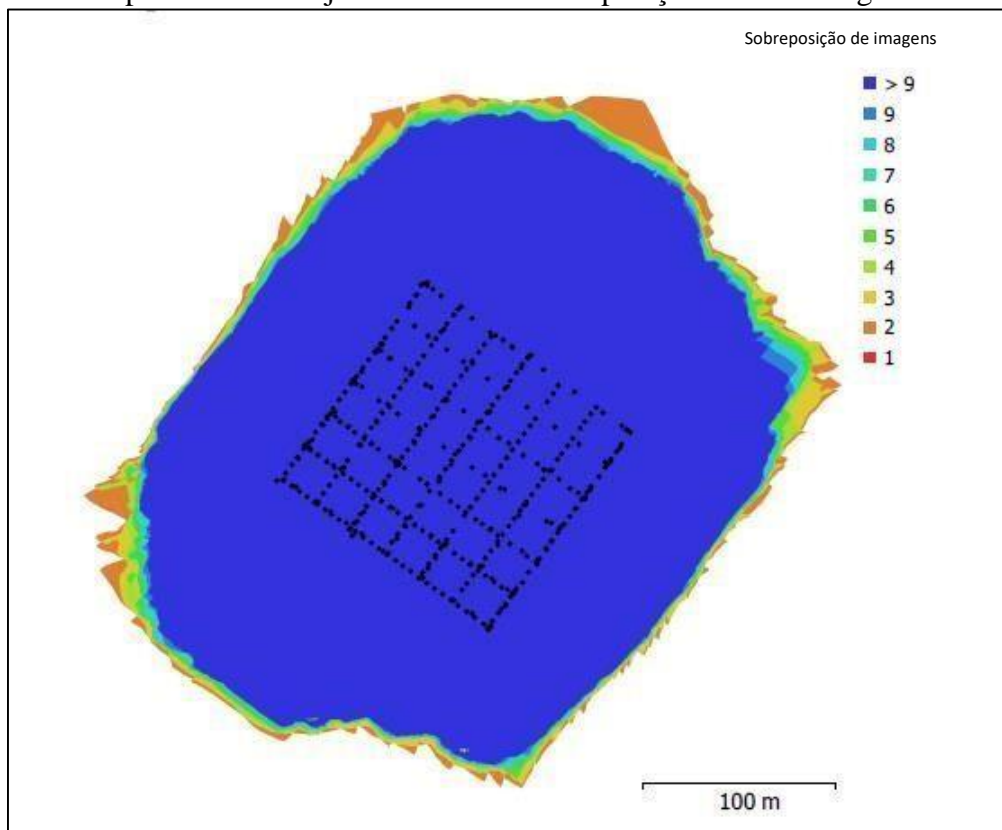


Figura 5.2 Trajetória de voo e Sobreposição de Imagem

Como pode ser visto na Figura 5.2 o RPA seguiu uma trajetória simétrica e cruzada representada pelos pontos pretos e bem aderentes ao plano de voo conforme apresentado na Figura 4.4. A sobreposição das imagens foi muito boa e cada imagem presente na área de interesse teve mais de nove sobreposições.

Ainda sobre esta pesquisa, a altura de voo foi de 120m, a área de cobertura foi de 0,089 km², foram realizadas 405 imagens com resolução no solo (GSD) de 4,7 cm/pixel.

5.1.3 REGIÃO DA CAVA CENTRAL E SUL – RPA DE ASA FIXA

Na Figura 5.3 é apresentada a trajetória de voo e sobreposição de suas imagens.

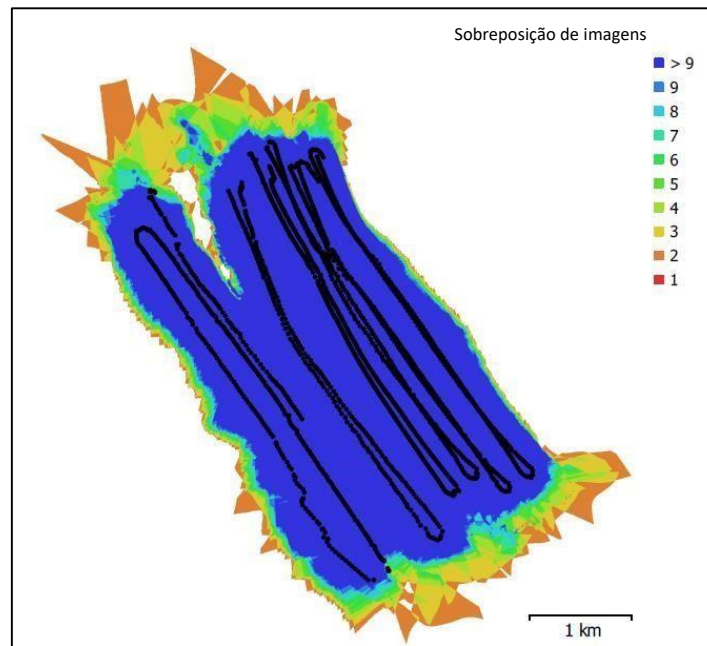


Figura 5.3 Trajetória de voo e Sobreposição de Imagem

Como pode ser visto na Figura 5.3 o *RPA* não seguiu uma trajetória simétrica representada pelos pontos pretos e também não foi muito aderente ao plano de voo apresentado na Figura 4.25. Isto ocorreu principalmente devido ao vento forte presente no dia da pesquisa.

A sobreposição das imagens foi boa apesar da trajetória irregular, com exceção da região mais noroeste da imagem que não teve nenhuma sobreposição de imagem.

Ainda sobre esta pesquisa, a altura de voo foi de 300 m, a área de cobertura foi de 14,6 km², foram realizadas 1684 imagens com resolução no solo (*GSD*) de 45,9 cm/pixel.

5.1.4 *GSD* (Tamanho do Pixel no Terreno)

Pode-se concluir que o *GSD* foi atingido com sucesso nos voos com o *RPA* de asa rotativa e não foi atingido com sucesso no voo do *RPA* de asa fixa. Na tabela 5.1 é apresentado o comparativo *GSD* planejado X realizado.

Tabela 5.1 - *GSD* Planejada X Realizada

<i>GSD</i> (cm/pixel)

RPA	Local	Planejado	Realizado
Asa Rotativa	Frente Lavra Estéril	25,4	2,3
Asa Rotativa	Frente Lavra Minério	15,2 Pilha	4,7
Asa Fixa	Estéril	25,4	45,9

5.2 QUALIDADE DAS IMAGENS

O software Agisoft Photoscan® tem uma ferramenta que verifica a qualidade de uma imagem a partir da análise de parâmetros como: foco pobre ou baixa resolução, imagens com paisagem vaga e sem referenciais, ruídos na imagem do tipo efeito de cores e reflexos, etc. Todas estas situações problemáticas influenciam no alinhamento das imagens e conseqüentemente todas as etapas seguintes do processamento das imagens.

O *software* então sugere uma estimativa automática da qualidade da imagem onde confere uma pontuação de 0 a 1, sendo que se a imagem recebe pontuação de 0,5 para baixo, é considerada imagem de baixa qualidade e deve ser retirada do processamento.

Na Figura 5.4 é apresentada uma verificação de qualidade das imagens. Veja dentro do retângulo vermelho que há várias imagens com qualidade inferior a 0,5. Todas estas imagens foram retiradas do processamento.

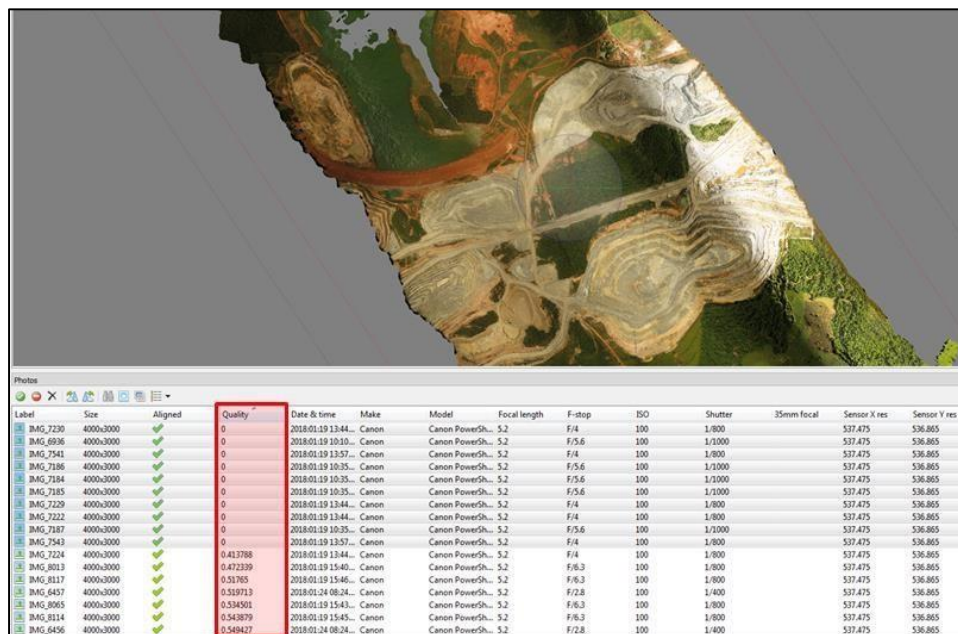


Figura 5.4 Verificação da qualidade das imagens utilizadas na pesquisa. Todas as imagens em cada uma das pesquisas realizadas passaram por este controle de qualidade da forma como apresentado na imagem da Figura 5.4

5.3 ALINHAMENTO DAS IMAGENS APÓS CORREÇÃO COM PONTOS DE CONTROLE

Esta etapa foi importante para ajudar o *software* Agisoft Photoscan a melhor alinhar as imagens geograficamente, permitindo que a nuvem de pontos gerada a partir das imagens também alinhe melhor as coordenadas E, N, H (latitude, longitude, altitude) de cada ponto.

A seguir serão apresentados os resultados.

5.3.1 FRENTE DE LAVRA DE ESTÉRIL – RPA DE ASA ROTATIVA

Na Figura 3.4 foi apresentado um esquema de como seria uma malha de distribuição ideal dos pontos de controle sobre a área de pesquisa.

Seguindo a linha de raciocínio da Figura 3.4, quando comparamos a malha planejada de distribuição dos pontos de controle com a malha realizada, vemos logo de imediato que estes pontos não foram tão bem distribuídos pela área de pesquisa, veja na Figura 5.5.

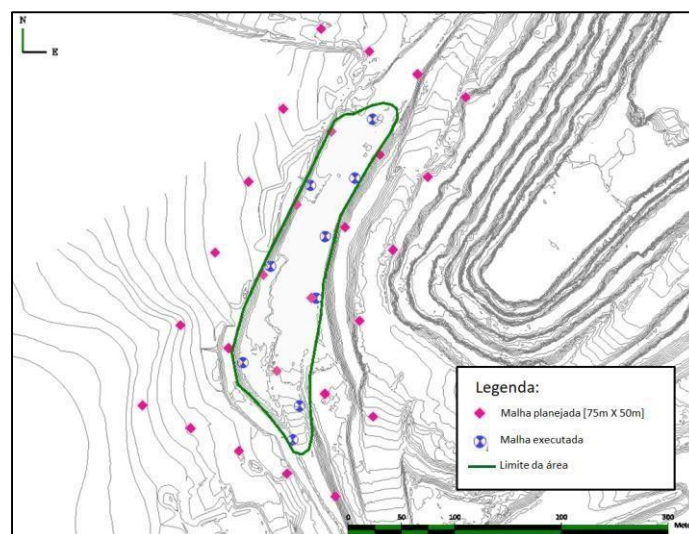


Figura 5.5 Pontos de Controle: Malha Planejada X Realizada. Frente de lavra de estéril.

Esta situação indica que haverá melhor correção dos pontos de controle na porção nordeste da Figura 5.5, uma vez que nesta região há mais pontos de controle distribuídos.

Os motivos principais para a distribuição dos pontos de controle fora do planejado foram: dificuldade de acesso às áreas planejadas, máquinas operando ou transitando sobre os locais aonde iriam ser alocados pontos de controle, pouco tempo disponível no dia da pesquisa para alocação dos pontos de controle.

Na Figura 5.6 é apresentada a localização de cada ponto de controle sobre a frente de lavra de estéril pesquisada. Também é apresentado o erro de posição que permaneceu em cada imagem onde o ponto de controle foi alocado, mesmo após correção do alinhamento utilizando o *software* Agisoft Photoscan®.

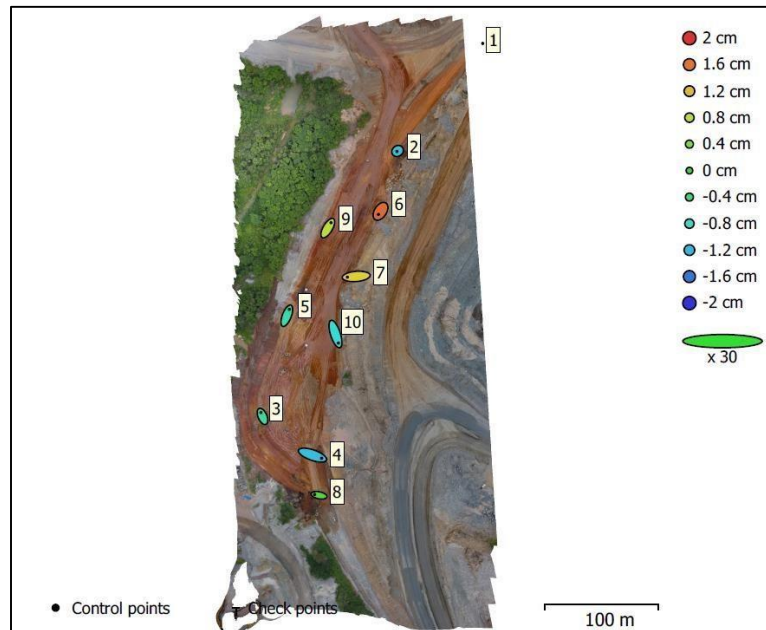


Figura 5.6 Erro de posição na imagem mesmo após correção com ponto de controle

Na Figura 5.6 o erro de altitude é representado pela cor do local onde se encontra o ponto de controle. Na lateral direita a legenda apresenta este erro em centímetros. Quando o valor é negativo é porque o valor da altitude ficou abaixo da cota do ponto de controle, e quando o valor é positivo, é porque o valor ficou acima da cota deste ponto de controle.

O erro de posição no local do ponto de controle referente à longitude e latitude será o valor da cor multiplicado pelo formato de sua elipse, ou seja, quanto mais elíptico maior o erro. A escala da elipse está na lateral direita (X30) da legenda.

Na Tabela 5.2 é apresentado de forma numérica o cálculo do erro que permaneceu nas imagens em cada local onde se encontra o ponto de controle, mesmo após correção do alinhamento.

Tabela 5.2 Erro de Posição que permaneceu no local de cada ponto de controle

<u>Pontos de Controle</u>	<u>Erro E (cm)</u>	<u>Erro N (cm)</u>	<u>Erro H (cm)</u>
---------------------------	--------------------	--------------------	--------------------

1	-	-	-
2	-4,097	-2,884	-1,149
3	-9,628	22,689	-0,666
4	53,239	-18,480	-1,168
5	14,713	37,802	-0,693
6	-12,113	-18,694	1,668
7	-52,096	-4,293	1,081
8	-26,088	5,137	0,135
9	18,926	31,890	0,821
10	17,119	-52,861	-0,970
Media Aritmética	-0,003	0,034	-0,105
Desvio Padrão	28,583	26,872	1,005

A Tabela 5.2 mostra que na média aritmética os erros para mais e para menos se cancelaram e permaneceram em torno de zero (0) para as três coordenadas. Entretanto, quando se observa o desvio padrão em torno desta média, a dispersão em relação à coordenada “E” foi de 28,5 cm, em relação à “N” foi de 26,9 cm, e em relação a “H” 1,00 cm. Sendo assim é prudente considerar que os erros de posição para “E” e “N” estão variando em torno de 29 e 27 cm respectivamente e para “H” em torno de 1cm. Estes valores de erros para fins de levantamento topográfico para mineração e planejamento de mina são aceitáveis, pois não causam impacto significativo no cálculo dos volumes planejados para lavra (exploração mineral).

Estes resultados também nos mostra que embora a distribuição dos pontos de controle não tenha seguido o plano de distribuição, ainda assim foi eficiente para correção da posição das imagens.

5.3.2 FRENTE DE LAVRA DE MINÉRIO – RPA DE ASA ROTATIVA

Na Figura 5.7 abaixo é apresentada a malha dos pontos de controle planejada em comparação com a malha que foi realizada em campo.

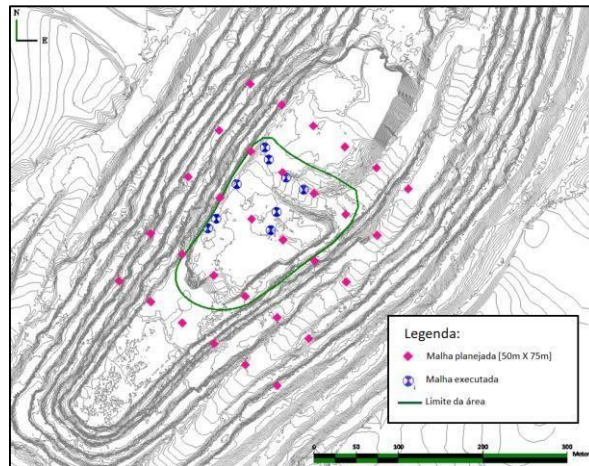


Figura 5.7 Pontos de Controle: Malha Planejada X Executada.

Houve maior concentração de pontos de controle em um dos lados da área pesquisada. Isto fará com que a área com maior número de pontos tenha uma melhor correção de posição nas imagens.

As causas da distribuição irregular dos pontos dentro da área planejada fora da área de planejamento foram principalmente devidas à dificuldade de acesso às áreas planejadas, máquinas operando ou transitando sobre os locais onde iriam ser alocados pontos de controle e pouco tempo disponível no dia da pesquisa para alocação dos pontos de controle.

Na Figura 5.8 é apresentada a localização de cada ponto de controle sobre a frente de lavra de minério. Também é apresentado o erro de posição que permaneceu em cada imagem onde o ponto de controle foi alocado, mesmo após correção do alinhamento utilizando o software Agisoft Photoscan®.

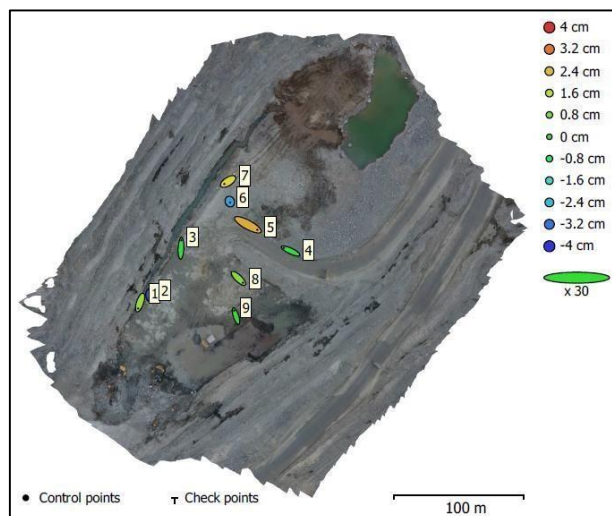


Figura 5.8 Erro de posição na imagem mesmo após correção com ponto de controle O erro de altitude é representado pela cor do local onde se encontra o ponto de controle. Na lateral direita a legenda apresenta este erro em centímetros. Quando o valor é negativo é porque o valor da altitude ficou abaixo da cota do ponto de controle, e quando o valor é positivo, é porque o valor ficou acima da cota deste ponto de controle.

O erro de posição no local do ponto de controle referente à longitude e latitude será o valor da cor multiplicado pelo formato de sua elipse, ou seja, quanto mais elíptico maior o erro. A escala da elipse está na lateral direita (X30) da legenda.

Na Tabela 5.3 é apresentado de forma numérica o cálculo do erro que permaneceu nas imagens em cada local onde se encontra o ponto de controle, mesmo após correção do alinhamento.

Tabela 5.3 Erro de Posição na imagem no local de cada ponto de controle

Pontos de Controle	Erro E (cm)	Erro N (cm)	Erro H (cm)
1	-10,394	-30,7839	1,185
2	-2,024	9,028	-3,644
3	2,006	41,566	-0,203
4	-34,216	16,020	-0,190
5	47,933	-26,009	2,585
6	1,693	-4,457	-2,678
7	-19,794	-12,632	2,068
8	22,969	-21,874	0,941
9	-9,583	28,961	-0,035
Media Aritmética	-0,157	-0,020	0,003
Desvio Padrão	22,604	24,006	1,937

A Tabela 5.3 mostra que na média aritmética os erros para mais e para menos se cancelaram e permaneceram em torno de zero (0) para as três coordenadas. Entretanto, quando se observa o desvio padrão em torno desta média, a dispersão em relação à coordenada “E” foi de 22,6 cm, em relação à “N” foi de 24,01 cm, e em relação a “H” 1,94 cm. Sendo assim é prudente considerar que os erros de posição para “E” e “N” estão variando em torno de 23 e 24 cm respectivamente e para “H” em torno de 2cm. Estes valores de erros para fins de levantamento topográfico para mineração e planejamento de mina são aceitáveis, pois não causam impacto significativo no cálculo dos volumes planejados para lavra (exploração mineral).

Estes resultados também nos mostra que embora a distribuição dos pontos de controle não tenha seguido o plano de distribuição, ainda assim foi eficiente para correção da posição das imagens.

5.3.3 GRANDE ÁREA DA CAVA E PILHAS DE ESTÉRIL - RPA DE ASA FIXA

Na Figura 5.9 é apresentada a malha dos pontos de controle planejada em comparação com a malha que foi realizada em campo.

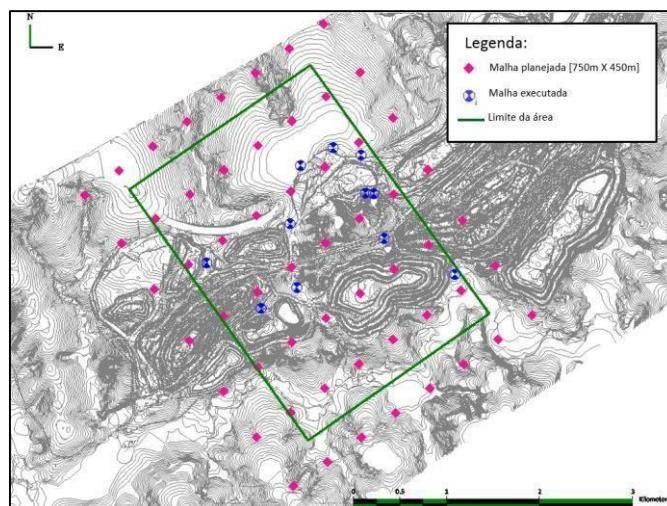


Figura 5.9 Malha de Pontos: Planejada X Executada. Cavas e Pilhas de Estéril

Conforme pode ser visto na figura 5.9 há onze (11) pontos de controle distribuídos pela área alvo, a qual é muito grande.

O motivo principal para a não marcação dos pontos conforme planejamento foi o pouco tempo disponível para marcação, grande tamanho da área, e interesse de observar a grandeza do erro de posição médio que permanecerá nas imagens devido a área ser grande e ter pontos distribuídos de forma irregular, ou seja, sobre a pilha de estéril SW haverá alta densidade de pontos de controle e nas outras áreas haverá menos.

Na Figura 5.10 é apresentada a localização de cada ponto de controle sobre a região da Cava Central e Sul e pilhas de estéril. Também é apresentado o erro de posição que permaneceu em cada imagem onde o ponto de controle foi alocado, mesmo após correção do alinhamento utilizando o *software* Agisoft Photoscan®.

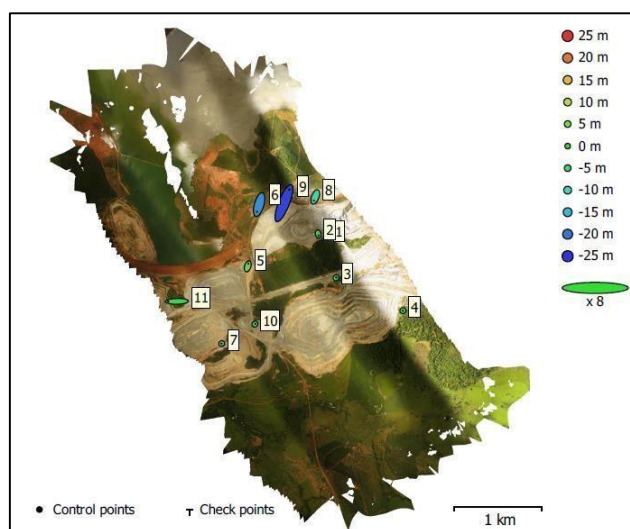


Figura 5.10 Erro de posição na imagem mesmo após correção com ponto de controle

O erro de altitude é representado pela cor do local onde se encontra o ponto de controle. Na lateral direita a legenda apresenta este erro em metros. Quando o valor é negativo é porque o valor da altitude ficou abaixo da cota do ponto de controle, e quando o valor é positivo, é porque o valor ficou acima da cota deste ponto de controle.

O erro de posição no local do ponto de controle referente à longitude e latitude será o valor da cor multiplicado pelo formato de sua elipse, ou seja, quanto mais elíptico maior o erro. A escala da elipse está na lateral direita (X8) da legenda.

Na Tabela 5.4 é apresentado de forma numérica o cálculo do erro que permaneceu nas imagens em cada local onde se encontra o ponto de controle, mesmo após correção.

Tabela 5.4 Erro de Posição que permaneceu no local de cada ponto de controle

Pontos de Controle	Erro E (m)	Erro N (m)	Erro H (m)
1	-1,749	-1,982	0,940
2	1,043	-4,003	-0,188
3	0,688	0,859	0,243
4	-0,396	-0,141	1,671
5	2,209	7,434	3,130
6	-5,836	-20,770	-18,150
7	-0,446	-0,178	-0,841
8	-3,879	-10,609	-8,085
9	15,313	38,614	-23,777
10	0,705	0,655	0,510
11	-24,767	-0,564	-0,746

Media Aritmética	-1,556	0,847	-4,118
Desvio Padrão	8,948	13,830	8,468

A Tabela 5-3 mostra que na média aritmética os erros apresentaram valores da ordem de metros para as três coordenadas. E quando se observa o desvio padrão em torno desta média, a dispersão também se manteve na ordem de metros, sendo que para a coordenada “E” o erro foi de 8,95 m, em relação à “N” foi de 13,83 m, e em relação a “H” 8,47 m. Sendo assim é prudente considerar que os erros de posição para “E” e “N” estão variando em torno de 9 e 14 m respectivamente e para “H” em torno de 9 m. Estes valores de erros para fins de levantamento topográfico para mineração e planejamento de mina não são aceitáveis, pois causam impacto significativo no cálculo dos volumes planejados para lavra (exploração mineral).

Estes resultados também nos mostra a distribuição dos pontos de controle e processamento dos dados não foram bons.

5.4 ANÁLISE DAS NUVENS DE PONTOS 3D

A análise das nuvens de pontos é importante para se ter uma prévia da qualidade do levantamento topográfico, pois é a partir da nuvem de pontos que será gerada a superfície ou malha triangularizada, bem como posteriormente as curvas de nível.

A seguir serão apresentados como foi feita a análise das nuvens de pontos 3D.

5.4.1 FRENTE DE LAVRA DE MINÉRIO E ESTÉRIL – RPA DE ASA ROTATIVA

As nuvens de pontos geradas para as frentes de lavra de minério e estéril foram confeccionadas através do processamento dos pixels de cada área no *software* Agisoft Photoscan®.

Na Tabela 5.5 são apresentados o número de pixels presentes em cada área, a serem processados com o *software* Agisoft Photoscan.

Tabela 5.5 Número de Pixels processados em cada área pesquisada

Frente de Lavra	Área Imageada (m ²)	Área do Pixel (m ²)	Nº de Pixels
Estéril	114000	0,0005	228 000 000
Minério	89000	0,0022	40 454 545

A equação 5.1 foi utilizada para obtenção do número de pixels a serem processados.

$$\text{Número de Pixels} = \frac{\text{Área imageada (m}^2\text{)}}{\text{Área do Pixel (m}^2\text{)}} \quad (5.1)$$

Este processamento utilizou a qualidade alta ou “*high*”, a qual promoveu um melhor detalhamento da geometria da área, quer dizer, esta opção gerou uma nuvem de pontos que melhor reconstruiu a geometria da área pesquisada. Em compensação, esta opção de qualidade fez com que se gastasse um tempo maior de processamento das imagens. Este tempo ficou na casa de 12 horas para frente de minério e de 16 horas para frente de estéril, representando um tempo considerado demorado em comparação com o tempo que se esperava em torno de 1 a 2 horas.

Foi utilizado também durante o processo de geração da nuvem de pontos um filtro para acelerar o processamento, denominado de “*agressive*” (agressivo) o qual desconsidera pequenos detalhes específicos da imagem na ordem de tamanho de 2 pixels, o que equivale no caso da frente de lavra de estéril dizer que o tamanho do pixel no terreno (*GSD*) passou de 2,3 cm/pixel para 4,6cm/pixel e para a frente de lavra de minério passou de 4,7cm/pixel para 9,4 cm/pixel. Considerando que o mínimo de detalhe na frente de estéril e minério é de 25,4cm/pixel e de 15,24cm/pixel respectivamente, conforme já havíamos detalhado no capítulo 4 devido necessidade de controlar o tamanho dos fragmentos da rocha desmontada por explosivo, este filtro atendeu bem às expectativas.

Uma importante informação também para saber se a nuvem de pontos foi bem construída é a presença de falhas ou vazios na mesma.

No caso das nuvens de pontos das frentes de lavra de minério e estéril, não houve vazios principalmente porque a qualidade das imagens passou pelo teste que o *software* Agisoft Photoscan® faz para excluir imagens que apresentam ruídos, partes sem foco ou com pobre resolução de pixel, e também porque a sobreposição de imagens foi muito boa, da ordem de mais de nove imagens sobrepostas por cada pixel conforme apresentado nos dados iniciais do voo no início deste capítulo.

Em termos de número de pontos, a nuvem referente à frente de lavra de estéril foi construída com 53,9 milhões de pontos ou 473 pontos/m², e a frente de lavra de minério foi construída com 10,1 milhões de pontos ou 114 pontos/m².

Basicamente, houve maior número de pontos na nuvem da frente de lavra de estéril por que a altura do voo foi menor, diminuindo o tamanho do *GSD* no solo, e devido a área também ser maior do que a frente de lavra de minério em torno de 22%.

Estes resultados podem ser considerados como muito bons, pois vão gerar um detalhamento da superfície satisfatório para os fins de lavra em uma mineração. Na Figura 5.11 são apresentadas as nuvens de pontos.



Figura 5.11 Nuvem de Pontos Densa. 1) Frente de lavra Estéril. 2) Frente de Lavra Minério

5.4.2 GRANDE ÁREA DA CAVA E PILHA DE ESTÉRIL – RPA DE ASA FIXA

A nuvem de pontos para a região das cavas central e sul a qual contém a pilha de estéril SW foi confeccionada no *software* Agisoft Photoscan® utilizando a qualidade média ou “*Medium*”, opção que não gera uma nuvem de pontos com detalhamento tão bom quanto apresentado nas frentes de lavra.

O número de pixels a serem processados para esta área está apresentado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 Número de Pixels processados na área pesquisada

Local	Área Imageada (m ²)	Área do Pixel (m ²)	Nº de Pixels
Grande Área da Mina e Pilha de Estéril	146 000 000	0,2107	692 928 334

A equação utilizada para calcular o número de pixels a serem processados é a Equação 5.1.

A decisão de usar a qualidade de processamento média ou “*medium*” foi tomada também por que o número de pixels para serem processados é em média 5 vezes maior do que o número de pixels processados para as frentes de lavra. E uma vez que o tempo gasto no processamento das frentes de lavra foi em média de 14 horas, o tempo gasto para processamento desta grande área da mina e pilhas de estéril se tornaria inviável.

Para acelerar o processamento foi utilizado o filtro denominado como “*agressive*” e que desconsidera detalhes específicos da imagem conforme foi explicado no tópico anterior. Isto se revela adequado uma vez que a área é imensa e não tem sentido se ater a detalhes muito pequenos.

O tempo total de processamento para geração da nuvem de pontos foi de 9 horas.

No caso da confecção desta nuvem de pontos também foi observada a presença de falhas ou vazios. Isto ocorreu por que durante o voo do *RPA* de Asa Fixa este sofreu desvios em sua trajetória devido à ação do vento, e a área mais a noroeste da região não teve sobreposições de imagens e conseqüentemente não foi possível aplicar a estereoscopia (Figura 5.12).

Outro motivo de falhas na nuvem de pontos foi por que várias imagens da área não passaram ao controle de qualidade do *software*. Uma vez que estas imagens de baixa qualidade foram retiradas do processamento, contribuíram para que mais zonas permanecessem sem sobreposição de imagens.

Em termos de número de pontos, a nuvem referente à grande área das cavas central e sul e pilhas de estéril foi construída com 69,3 milhões de pontos ou 2,10 pontos/m². O número de pontos é superior aos da frente de lavra conforme já se esperava, entretanto só não foi ainda maior por que a altura de voo foi de 300m, e, portanto, o *GSD* ou tamanho do pixel no solo foi de 45,9 cm/pixel, ou seja, 20 vezes maior do que o *GSD* da frente de lavra de estéril e 10 vezes maior que o da frente de lavra de minério.

O resultado da nuvem de pontos nesta grande área das cavas e pilhas de estéril embora tenha coberto quase toda a área sobrevoada, apresentou falhas. Este resultado está de acordo com o que já havia sido observado na Figura 5.4.

Na Figura 5.12 é apresentada a nuvem de pontos.



Figura 5.12 Nuvem de Pontos. Região das Cavas Central e Sul

5.5 ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES E MODELOS DIGITAIS DE ELEVÇÃO MDE

A análise das superfícies e modelos digitais de elevação é importante para verificar onde as nuvens de pontos apresentaram medições incorretas e que não foi possível identificar previamente antes de gerar a superfície triangularizada e modelo digital de elevação. Os MDE foram criados no sistema de referência *South American Datum 69 22S* ou *SAD 69 22S* e sistema métrico UTM.

A seguir será apresentada a análise das superfícies e dos MDE.

5.5.1 FRENTES DE LAVRA DE ESTÉRIL E MINÉRIO – RPA DE ASA ROTATIVA

O modelamento das superfícies para cada uma das frentes de lavra utilizou a opção de processamento arbitrário ou “*arbitrary*” no *software* Agisoft Photoscan, o que causou um maior tempo de processamento, no caso da frente de lavra de estéril gastou-se 1,1 hora e para frente de minério 0,15 hora, ou seja, nove (9) minutos. Este maior tempo é devido o *software* não iniciar o modelamento já sabendo que tipo de superfície o usuário espera, e sim o mesmo apenas interpreta todos os pontos da nuvem. A diferença de tempo de processamento entre as frentes de lavra foi devido à frente de lavra de estéril possuir mais pontos do que a frente de minério.

A configuração do modelamento das superfícies também fez com que o *software* fizesse interpolação entre pontos da nuvem em locais onde está é esparsa ou sem informação. Também usou filtro agressivo (*agressive*) para descartar detalhes muito pequenos uma vez que já era

sabido que esta opção não iria alterar a qualidade do resultado. Também foi otimizado o número de faces da superfície utilizando a qualidade alta ou “*high*”, para que o número de faces fosse o mais acurado possível, diminuindo seu tamanho em memória e facilitando sua manipulação em outros *softwares*.

Por fim, a superfície gerada não classificou os pontos da nuvem de pontos durante seu processamento, de forma que todas as estruturas presentes na área de pesquisa e que foram imageadas foram modeladas junto com a superfície, como equipamentos que estavam na área durante o voo, vegetação como árvores, construções e etc., ou seja, a superfície gerada pode ser entendida então por um todo como um modelo digital de elevação MDE, e não um modelo digital de terreno MDT, apesar de que nos locais mais importantes da superfície, ou seja, nos locais de lavra, a superfície mesmo sem classificação é um MDT.

Qualquer necessidade de transformação de um MDE em MDT seria feita no *software* Minesight®, no qual é possível de maneira muito rápida e acurada, deletar as faces que não servem ao trabalho, e fazer interpolação destes vazios.

Nas Figura 5.13 e 5.14 são apresentadas as superfícies geradas para as frentes de lavra.

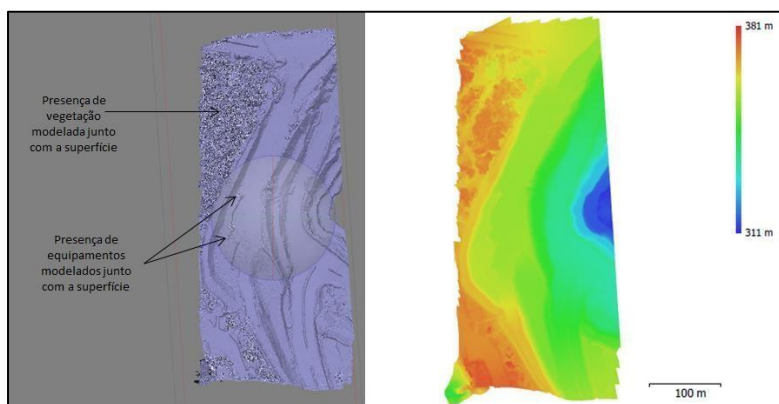


Figura 5.13 Superfície/MDE da Frente de Lavra de Estéril _ RPA de Asa Rotativa

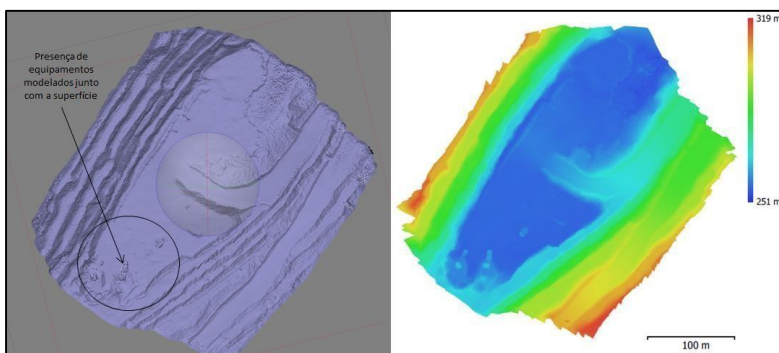


Figura 5.14 Superfície/MDE da Frente de Lavra de Minério _ RPA de Asa Rotativa

5.5.2 GRANDE ÁREA DAS CAVAS E PILHAS DE ESTÉRIL – RPA DE ASA FIXA

O modelamento da superfície da região das cavas usou quase a mesma configuração que a das frentes de lavra, sendo que a única diferença se deu em relação à modalidade de processamento que foi sempre “*medium*” e não “*high*”. A qualidade do número de faces que compõem a superfície também foi processada na modalidade “*medium*”. Este procedimento foi necessário principalmente devido ao número de pontos presente na sua nuvem, que é muito grande, assim o tempo gasto no processamento foi aproximadamente dez (10) vezes menor que o tempo gasto com o processamento das frentes de lavra na modalidade “*high*”. Entretanto a modalidade “*medium*” além de diminuir o tempo de processamento, também diminui a qualidade da superfície e MDE. Todo o procedimento levou 1,05 horas.

Este modelamento também não classificou os pontos da nuvem, não separando os pontos que são de terreno dos que são, por exemplo, de vegetação. Assim a superfície gerada por um todo é um modelo digital de elevação ou MDE, conforme apresentado na Figura 5.15.

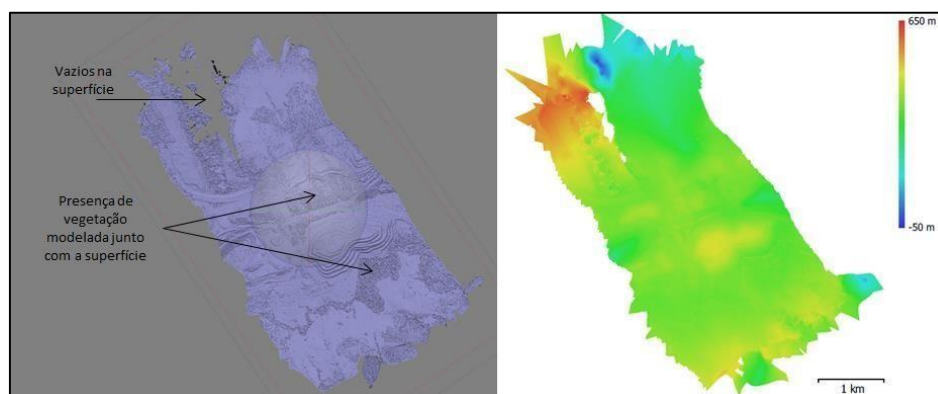


Figura 5.15 Superfície/MDE da Região das Cavas Central e Sul – RPA de Asa Fixa

5.6 ANÁLISE DO MOSAICO DE IMAGENS

A análise do mosaico de imagens é importante para saber se a imagem integrada com todas as imagens tomadas com o RPA apresenta correto georreferenciamento e se não possui erros nos tons de cinza (cores) dos pixels. Os ortomosaicos foram criados em South American Datum 69 22S ou SAD 69 22S.

A seguir será apresentada a análise dos ortomosaicos.

5.6.1 FRENTES DE LAVRA E GRANDE ÁREA DA CAVA E PILHA DE ESTÉRIL

Para ambas as frentes de lavra pesquisadas com o *RPA* de asa rotativa, quanto para a região das cavas central e sul e pilhas de estéril pesquisadas com o *RPA* de asa fixa, o procedimento para gerar o ortomosaico georreferenciado de imagens foi o mesmo.

Para cada uma das áreas pesquisadas, projetaram-se os pixels de sua própria nuvem de pontos contra a superfície de seu modelo digital de elevação criado na etapa anterior. O resultado é uma imagem única ou ortomosaico que representa todas as imagens da área pesquisada.

O sistema de coordenadas utilizado para georreferenciar o ortomosaico foi o mesmo definido durante a criação do modelo digital de elevação, a saber: *South American Datum 1969 ou SAD69 22S*. Este sistema de coordenadas foi utilizado por que a imagem do ortomosaico foi importada posteriormente no *software* de mineração *Minesight* para realização de um estudo de caso a ser apresentado nos capítulos 6 e 7, e porque este Datum é o oficial utilizado pela MMIC.

O *software* Agisoft Photoscan oferece ainda a oportunidade de exportar os ortomosaicos em extensão kmz para ser aberto no Google Earth®, o qual possui o sistema de coordenadas WGS84. Todos os ortomosaicos foram exportados nesta extensão. A vantagem de poder atualizar as imagens do Google Earth® com o ortomosaico de imagens é que esta plataforma é gratuita e de fácil acesso.

Após verificar o posicionamento dos ortomosaicos de imagens de cada pesquisa no Google Earth foi possível observar que os mesmos se encaixaram muito bem na imagem, conectando acessos, áreas de vegetação, escavações, pilhas de estéril, instalações e etc.

Nas figuras de 5.16 a 5.18 são apresentados os ortomosaicos de imagens criados em cada pesquisa, bem como após serem importados no Google Earth® para atualização da imagem do mesmo.

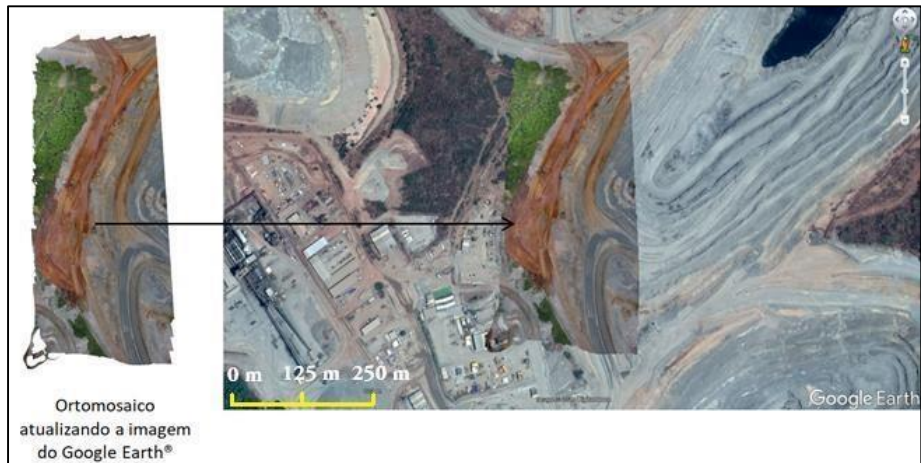


Figura 5.16 Ortomosaico de Imagem Georeferenciado – Frente de Lavra de Estéril

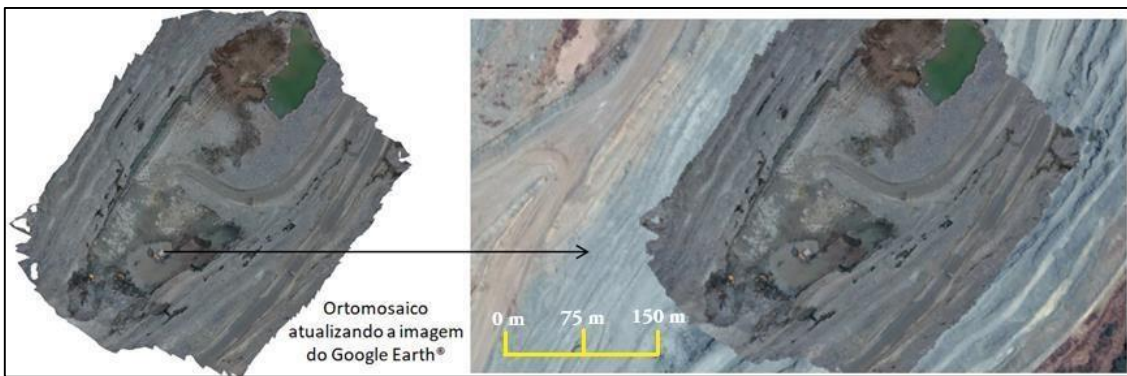


Figura 5.17 Ortomosaico de Imagem Georeferenciado – Frente de Lavra de Minério

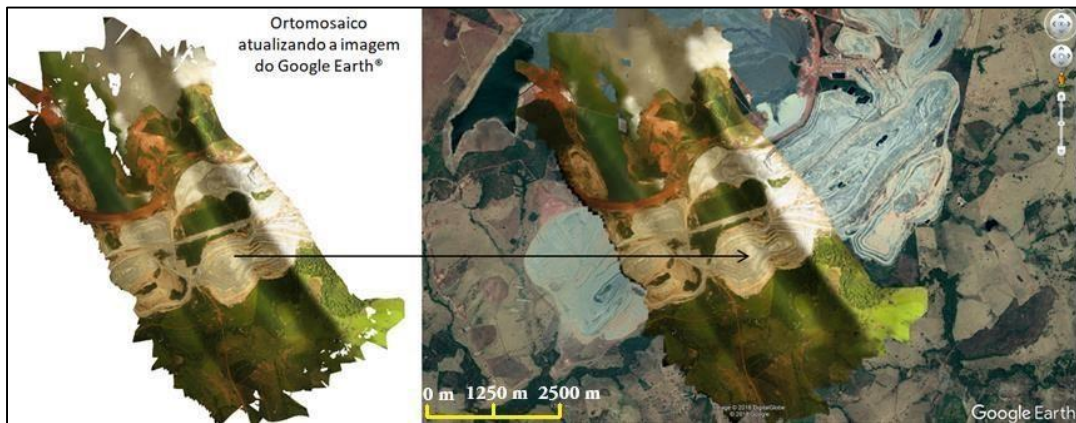


Figura 5.18 Ortomosaico de Imagem Georeferenciado – Região das Cavas Central e Sul

Nos locais onde não houve aderência do ortomosaico de imagem com o Google Earth® foi devido a imagem de satélite deste último estar desatualizada. Pode-se considerar a função de atualização de imagem do Google Earth® com as de aerofotogrametria com *RPA*s foi um sucesso.

6 ESTUDO DE CASO 1: RPA DE ASA ROTATIVA X LASER SCANNER TERRESTRE

6.1 NUVEM DE PONTOS

Este estudo de caso tem por objetivo comparar os resultados de atualização da topografia ou levantamento topográfico de uma frente de lavra de estéril, utilizando um equipamento comumente encontrado nas mineradoras brasileiras que é o Laser Scanner Terrestre ou LST, com os resultados encontrados com uma Aeronave Remotamente Pilotada ou RPA do Tipo Asa Rotativa, equipamento que já é uma opção para executar este tipo de trabalho. A seguir apresentaremos o comparativo entre estes dois equipamentos.

6.1 NUVEM DE PONTOS

Foi feito um comparativo entre as nuvens de pontos geradas pelo LST e pelo RPA de Asa Rotativa. Estas nuvens de pontos são as nuvens de pontos usadas para fazer a atualização da topografia da frente de lavra de estéril.

O número de pontos presentes em cada nuvem de pontos, bem como a sua distribuição estão apresentados na Tabela 6.1 e Figura 6.1.

Tabela 6.1 - Comparativo sobre as nuvens de pontos. RPA X LST

	RPA	LST	RPA/LST
Nº de pontos	870.212	31.819	27
Área (m ²)	114.758	114.758	1
Pontos/m ²	7,58	0,28	27

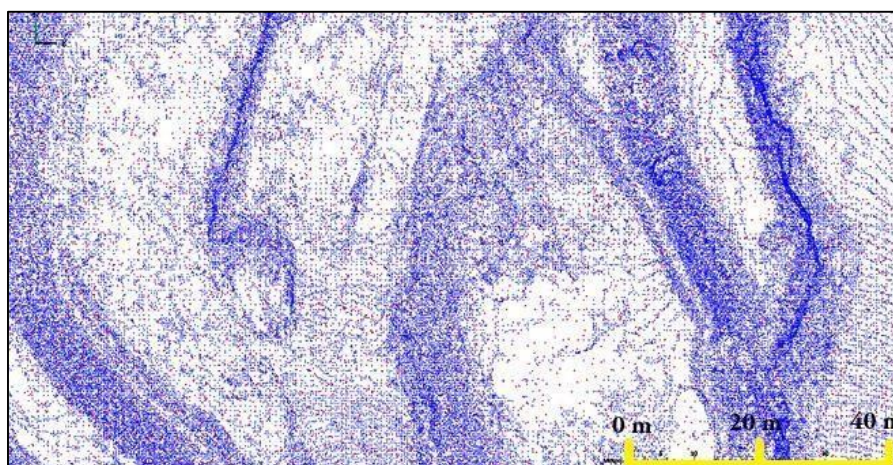


Figura 6.1 Distribuição dos pontos na nuvem. Pontos RPA (Azul) X Pontos LST (Vermelho)

Conforme Tabela 6.1 e Figura 6.1, a nuvem de pontos gerada pelo *RPA* de Asa Rotativa apresenta 27 vezes mais pontos que a nuvem gerada pelo *LST*.

Isto ocorreu porque a nuvem de pontos do *LST* sofreu um filtro antes de ser importada no *Minesight* para manipulação. Este é um procedimento feito pela equipe de topografia de mina da *MMIC* no intuito de deixar a topografia com um tamanho menor de memória e conseqüentemente mais leve para manipulação nos computadores dos usuários.

Em alguns locais dentro da nuvem de pontos do *RPA* há vazios de até 10m de comprimento. Isto ocorreu devido a falhas na interpolação dos pontos, uma vez que pela análise de sobreposição de imagens, toda a área imageada apresentou sobreposição de mais que 9 imagens por pixel, conforme pode ser visto na Figura 5.1. Embora tenha havido alguns locais com vazios na nuvem de pontos do *RPA*, estes locais são locais de áreas planas, não gerando erros que pudessem prejudicar a qualidade da nuvem de pontos.

A nuvem de pontos do *LST* apresentou melhor distribuição de pontos do que a do *RPA* conforme Figura 6.1, entretanto, sua qualidade ainda é menor devido ter 27 vezes menos pontos, não detalhando regiões de maior interesse como faces de talude e irregularidades do terreno.

6.2 SUPERFÍCIE OU MALHA TRIANGULARIZADA

Com as nuvens de pontos foram geradas as superfícies ou malhas triangulares. A triangularização da nuvem de pontos gera planos formados cada um a partir da união de três pontos. Estes planos também são chamados de faces da triangularização. Na Tabela 6.2 e Figura 6.2 são apresentados o número de faces e as superfícies triangularizadas respectivamente.

Tabela 6.2 N° de Faces presentes na superfície triangularizada. *RPA* X *LST*.

	RPA	LST	RPA/LST
Nº de Faces	1.716.766	61.196	28

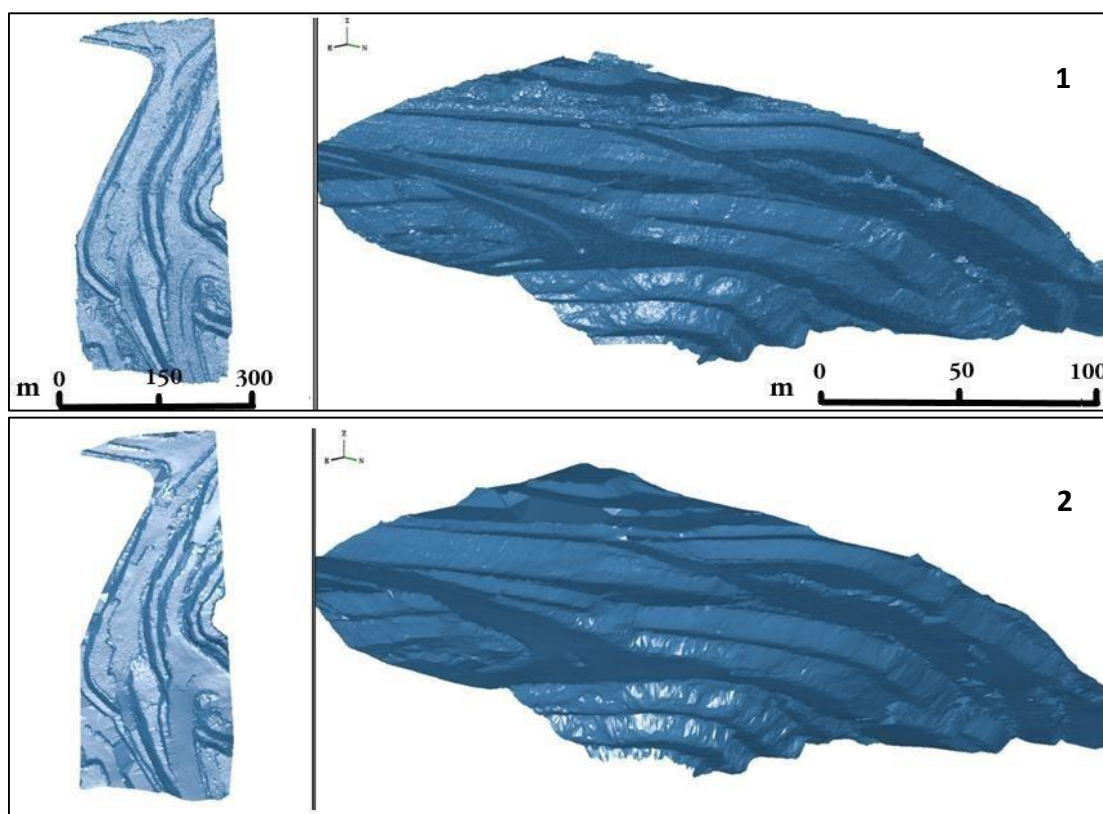


Figura 6.2 Superfície ou Malha Triangularizada. *RPA* (1) X *LST* (2).

Como pode ser observado na Tabela 6.2 e Figura 6.2, devido a superfície do *RPA* ter sido construída com uma nuvem de pontos com mais pontos do que a nuvem do *LST*, esta superfície possui maior número de faces e conseqüentemente maior detalhamento da topografia ou relevo da frente de lavra de estéril.

6.3 CURVAS DE NÍVEL

As duas topografias foram geradas considerando a sua cota mais baixa e mais alta, 310m e 390m respectivamente. As curvas mestras foram feitas a cada 10m de altura e está em cor preta na imagem. As curvas intermediárias que estão entre as curvas mestras têm espaçamento de 0,5m de altura e estão na cor cinza. Na Figura 6.3 são apresentadas as curvas de nível geradas a partir das superfícies do *RPA* e do *LST*.

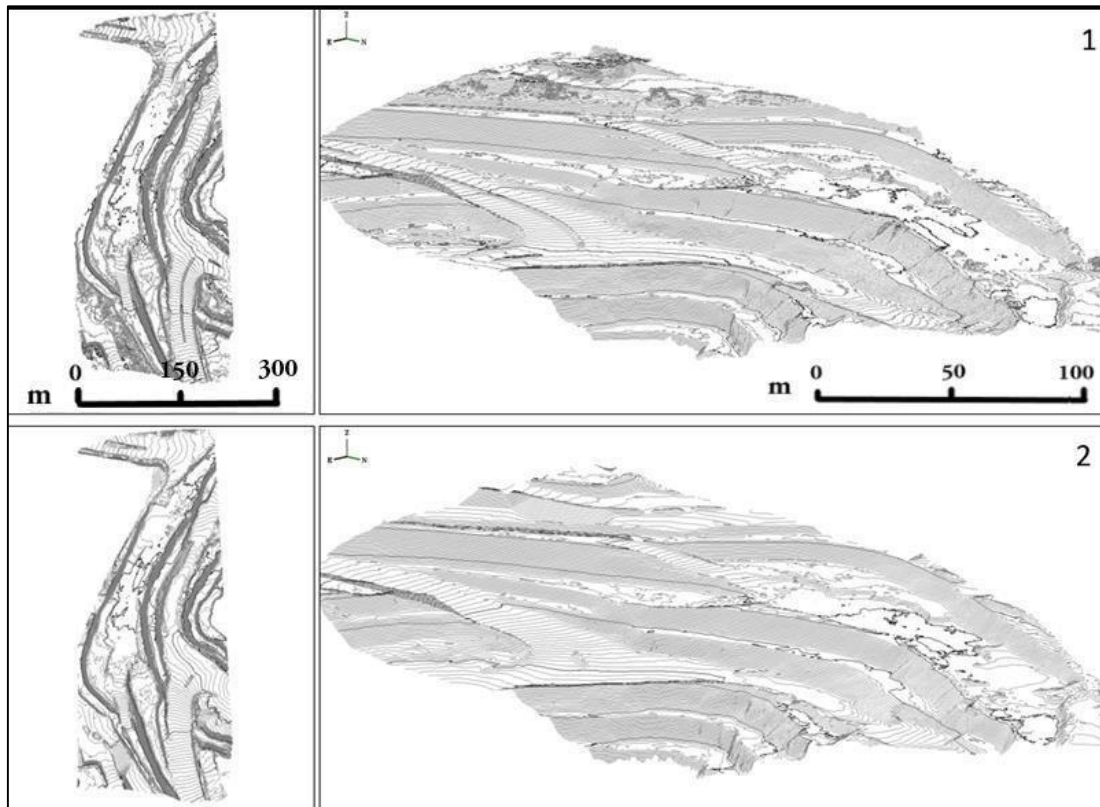


Figura 6.3 Curvas de nível geradas a partir da superfície. *RPA* (1) X *LST* (2)

Uma vez que a superfície gerada com o *RPA* de Asa Rotativa é mais detalhada e aderente ao relevo real da topografia do que a superfície gerada com o *LST*, suas curvas de nível também têm mais detalhes. Estes detalhes podem ser observados qualitativamente tanto na imagem em planta quanto na em perspectiva 3D. Mas também podem ser observados numericamente na Tabela 6.3 no subcapítulo 6.5.

6.4 ORTOFOTO

É sabido que o *LST* pode gerar imagens ou ortofotos georreferenciadas do local onde o mesmo fez escaneamento. Entretanto, para esta pesquisa não foi gerada ortofoto com o *LST*, somente com o *RPA*.

A ortofoto gerada pelo *RPA* é georreferenciada e apresenta uma qualidade muito boa. É possível com ela observar detalhes que não são observados na superfície e nem nas curvas de nível, por isso a sua grande utilidade para gerenciamento das operações de lavra e infraestrutura de mina.

Na Figura 6.4 é apresentada a ortofoto da frente de lavra de estéril gerada com o *RPA* de Asa Rotativa, a qual apresenta um detalhamento visual da Figura 6.3, fator informação importante

para tomadas de decisão. Observe como a mesma se encaixa perfeitamente nas curvas de nível, isto mostra uma qualidade muito boa de produto.

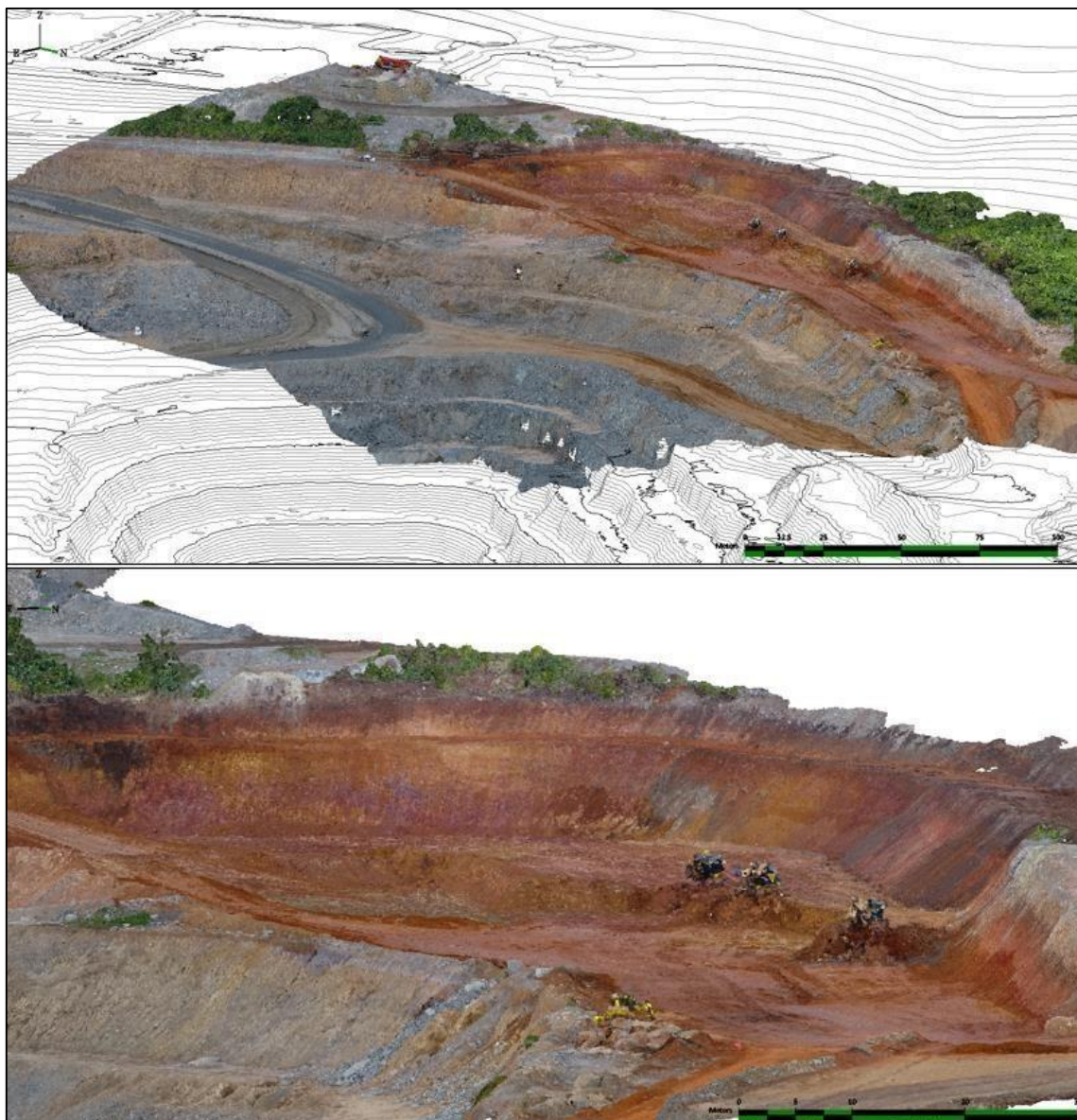


Figura 6.4 Ortofoto gerada com o *RPA* de Asa Rotativa. Texturização da Nuvem de Pontos.

6.5 ACURÁCIA

A acurácia das superfícies geradas para a frente de lavra de estéril utilizando os métodos *RPA* de Asa Rotativa e *LST*, foi calculada fazendo uma comparação do valor encontrado para a coordenada “H” altitude em cada uma destas superfícies, nos locais onde foram tomados os pontos de controle com o Receptor *GNSS*.

Como o Receptor *GNSS* é um equipamento de alta acurácia e precisão (Ficha de Dados, Leica Geosystems 2015) as suas coordenadas foram consideradas como sendo o valor real que se espera obter nas duas metodologias.

Na Tabela 6.9 abaixo são apresentadas as coordenadas dos nove pontos de controle medidos no sistema de referência e projeção SAD69 22S e UTM respectivamente, com o Receptor *GNSS*, na frente de lavra de estéril. O sistema de referência SAD 69 22S é o sistema oficial de referência utilizado na Mina de Chapada.

Nesta tabela também se encontra em centímetros, a diferença entre o valor da coordenada “H” obtido com o Receptor *GNSS* e o valor desta mesma coordenada obtido em cada um dos métodos *RPA* e *LST*. Esta diferença foi expressa em módulo, ou seja, o valor sempre é positivo para haver acumulação dos erros e melhor mensurá-los.

Tabela 6.3 Diferença da coordenada "H" entre Receptor *GNSS* X *RPA*, e Receptor *GNSS* X *LST*.

Receptor GNSS (coordenadas em UTM SAD 69 22S)				GNSS X RPA		GNSS X LST	
Pontos de Controle	E (m)	N (m)	H (m)	ΔZ (cm)	AZ (%)	ΔZ (cm)	AZ (%)
1	675796,57	8426648,50	368,44	-5,00	-1,4%	0,00	0,0%
2	675803,02	8426680,26	363,98	-13,00	-3,6%	-8,00	-2,2%
3	675818,59	8426781,48	359,81	-3,00	-0,8%	3,00	0,8%
4	675827,04	8426839,37	359,66	-1,00	-0,3%	22,00	6,1%
5	675854,83	8426894,22	360,04	1,00	0,3%	2,00	0,6%
6	675871,55	8426949,47	360,47	3,00	0,8%	9,00	2,5%
7	675813,18	8426887,38	360,39	10,00	2,8%	111,00	30,8%
8	675775,80	8426811,48	362,46	-3,00	-0,8%	1,00	0,3%
9	675749,90	8426720,95		-2,00	-0,6%	7,00	1,9%
Média Aritmética	-	-	363,47	-1,44	-0,39%	16,33	4,53%
Desvio Padrão	-	-	-	5,85	1,61%	34,34	9,53%

Como pode ser observado na Tabela 6.3, a média aritmética dos erros em “H” no comparativo do *RPA* de Asa Rotativa e *LST* contra o *GNSS* podem ser considerados pequenos e aceitáveis dentro dos padrões de operação da Mina de Chapada.

Quando se observa o desvio padrão em torno da média aritmética vemos que a dispersão para o *RPA* ainda continua pequeno, já para o *LST* este desvio embora ainda seja aceitável, começa a ser um valor para ser acompanhado pois para valores maiores que este as diferenças de volumes podem se tornarem impactantes e consideráveis durante o planejamento de lavra.

O valor mais acurado encontrado para a superfície gerada com o *RPA* de Asa Rotativa já era esperado, pois esta foi gerada com uma nuvem de pontos com 27 vezes mais pontos do que a nuvem de pontos do LST.

Na Figura 6.5 são apresentados os perfis topográficos das superfícies geradas com o *RPA* de Asa Rotativa e o LST para a frente de lavra de estéril.

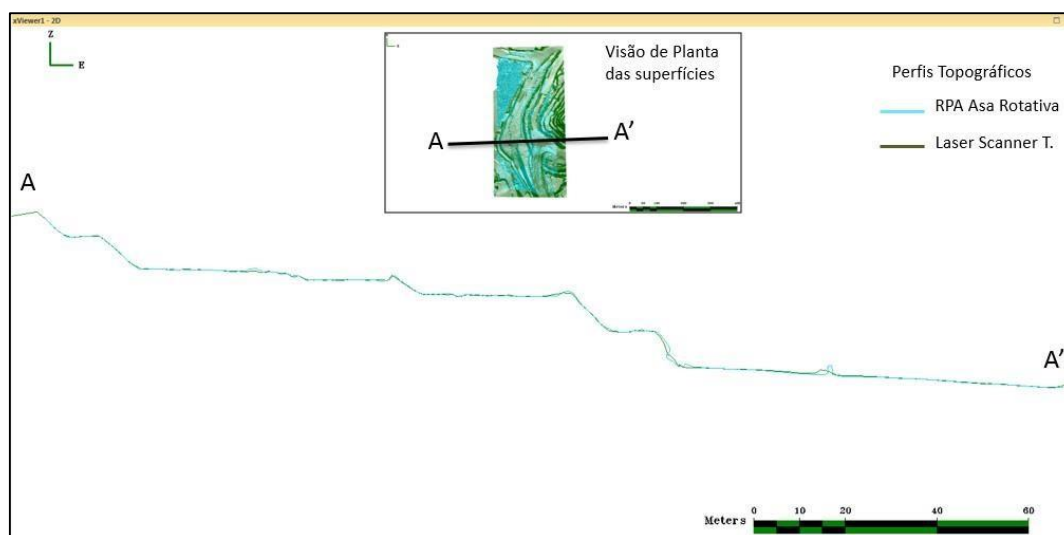


Figura 6.5 Comparativo de Posição dos Perfis Topográficos *RPA* e LST.

Como pode ser observado na Figura 6.5, a aderência de posição E, N, H das superfícies geradas com o *RPA* de Asa Rotativa e LST ficou muito próxima uma da outra, o que nos leva a crer uma vez que o erro de posição em relação ao Receptor *GNSS* é aceitável, que as duas metodologias atendem à necessidade da engenharia da Mina de Chapada para gerar superfícies topográficas. Lembrando que entre as duas superfícies geradas a mais acurada e que mais se adere à forma natural do relevo é aquela gerada pelo *RPA* de Asa Rotativa, embora apresente alguns erros como reentrâncias no talude e pequenos montes que podem ser checados e corrigidos com idas ao campo ou de análise do ortomosaicos de imagens. Estes erros são devido a falha na geração da nuvem de pontos ou durante a triangularização da superfície.

6.6 SEGURANÇA

De uma forma geral pode-se dizer que o trabalho executado com o *RPA* de Asa Rotativa apresentou melhor segurança em campo do que o trabalho executado com o LST.

Com exceção do momento o qual foi necessário à equipe do *RPA* entrar na área onde os equipamentos de lavra estavam operando, para alocar os pontos de controle, todo o trabalho foi executado à uma distância de aproximadamente 300m da frente de lavra de estéril.

Também vale destacar que a alocação de pontos de controle na área de operação só foi necessária por que o *RPA* utilizado não é dotado de Receptor *GNSS* responsável por fazer alocação de pontos de controle remotamente, pois uma vez que fosse, a equipe do *RPA* não necessitaria adentrar em nenhum momento na área de lavra entre os equipamentos em operação.

A equipe do *LST* necessitou estar todo o tempo necessário para fazer o levantamento topográfico dentro da área de operação ou ligeiramente afastado. Isto ocorre pois precisam fazer a amarração dos pontos de visada no local, mudar o ângulo de visão do equipamento e por que este não pode fazer escaneamento a distâncias grandes. Apesar da equipe que utiliza este equipamento na Mina de Chapada ter todo o treinamento necessário segundo normas vigentes para manter segurança total na atividade, o risco de um acidente ainda existe.

6.7 TEMPO

O tempo gasto no levantamento topográfico da frente de lavra de estéril de maneira mais otimizada deve compreender somente as etapas de planejamento da atividade, geração da nuvem de pontos, tratamento da nuvem de pontos, geração da superfície ou malha triangularizada e criação das curvas de nível. Pois estas atividades compreendem os passos essenciais sem quais na tecnologia de hoje não se pode fazer um levantamento topográfico.

Na Tabela 6.4 e 6.5 são apresentados o tempo gasto em todas as atividades realizadas durante a pesquisa com o *RPA* e *LST*, e na sequencia o tempo gasto na realização do levantamento topográfico com o *RPA* de maneira customizada, ou seja, somente as atividades necessárias para atender às demandas do Departamento de Planejamento de Mina da Mina Chapada.

Tabela 6.4 Tempo gasto na realização de todas as atividades da pesquisa.

<u>RPA DE ASA ROTATIVA</u>		<u>LASER SCANNER TERRESTRE</u>	
Fase1: Planejamento em Escritório	Tempo (h)	Fase1: Planejamento em Escritório	Tempo (h)

Estudo da Área Alvo	0,50	Estudo da Área Alvo	0,50
Planejamento do Voo	0,50	Planejamento do Escaneamento	0,50
Total	1,00	Total	1,00
Fase 2: Pesquisa em Campo		Fase 2: Pesquisa em Campo	
Alocação dos Pontos de Controle	0,50	Amarração dos Pontos Visada	0,50
Realização do Voo de Pesquisa	0,33	Escaneamento	1,00
Total	0,83	Total	1,50
Fase 3: Processamento dos Dados		Fase 3: Processamento dos Dados	
Alinhamento das Imagens	1,33	Tratamento da Nuvem de Pontos	1,66
Nuvem de Pontos Densa	16,75	Malha\Superfície no Minesight	0,33
Malha Triangularizada/Superfície	1,67	Curvas de Nível no Minesight	0,10
Modelo Digital de Elevação	1,96	Total	2,09
Ortomosaico	0,17		
Total	21,88	Tempo Total Gasto na Pesquisa	Tempo (h)
		Fases 1 + 2 + 3	4,59
Tempo Total Gasto na Pesquisa		Tempo (h)	
Fases 1 + 2 + 3	23,71		

Tabela 6.5 Tempo gasto otimizando a realização de todas atividades da pesquisa.

RPA DE ASA ROTATIVA	
Fase1: Planejamento em Escritório	Tempo (h)
Estudo da Área Alvo	0,50
Planejamento do Voo	0,50
Total	1,00
Fase 2: Pesquisa em Campo	
Alocação dos Pontos de Controle	0,50

Realização do Voo de Pesquisa	0,33
Total	0,83
Fase 3: Processamento dos Dados	Tempo (h)
Alinhamento das Imagens	1,33
Nuvem de Pontos Densa	16,75
Malha\Superfície no Minesight	0,33
Curvas de Nível no Minesight	0,10
Total	18,51
Tempo Total Gasto na Pesquisa	Tempo (h)
Fases 1 + 2 + 3	20,34

Conforme pode ser visto na Tabela 6.4, o tempo gasto pelo *RPA* é 5,2 vezes maior que o *LST*, sendo que o maior tempo gasto é com a criação de nuvem de pontos no *software* Agisoft Photoscam®.

Na Tabela 6.5 é possível observar que as etapas de geração de modelo digital de elevação e de ortofoto foram retiradas das atividades da equipe do *RPA*, pois não são atualmente necessárias, seriam neste momento um complemento. Além disso, uma vez a nuvem de pontos é gerada pelo *software* Agisoft Photoscam® ela é importada no Minesight® para gerar a superfície e curvas de nível. Neste caso, o tempo gasto pela equipe do *RPA* é 4,4 vezes maior que a equipe do *LST*.

7 ESTUDO DE CASO 2: RPA DE ASA FIXA X ESTAÇÃO TOTAL & RECEPTOR GNSS

Este estudo de caso tem por objetivo comparar os resultados de atualização da topografia de uma Pilha de Estéril chamada “Pilha de Estéril SW”, utilizando um equipamento comumente encontrado nas mineradoras brasileiras que é a Estação Total & Receptor *GNSS*, com os resultados encontrados com uma Aeronave Remotamente Pilotada ou *RPA* do tipo Asa Fixa, equipamento que já é uma opção para executar este tipo de trabalho. A seguir apresentaremos o comparativo entre estes dois equipamentos.

7.1 NUVEM DE PONTOS

Foi feito um comparativo entre as nuvens de pontos geradas pela Estação Total & Receptor *GNSS* e pelo *RPA* de Asa Fixa. Estas nuvens de pontos são as nuvens de pontos usadas para fazer a atualização da topografia da Pilha de Estéril SW.

O número de pontos presentes em cada nuvem de pontos, bem como a sua distribuição estão apresentados na Tabela 7.1 e Figura 7.1.

Tabela 7.1 Comparativo sobre as nuvens de pontos. RPA ASA FIXA X ESTAÇÃO TOTAL

	RPA ASA FIXA	ESTAÇÃO TOTAL	RPA/ESTAÇÃO TOTAL
Nº de pontos	1.852.436	5.081	365
Área (m ²)	1.114.163	1.114.163	1
Pontos/m ²	1,663	0,005	365

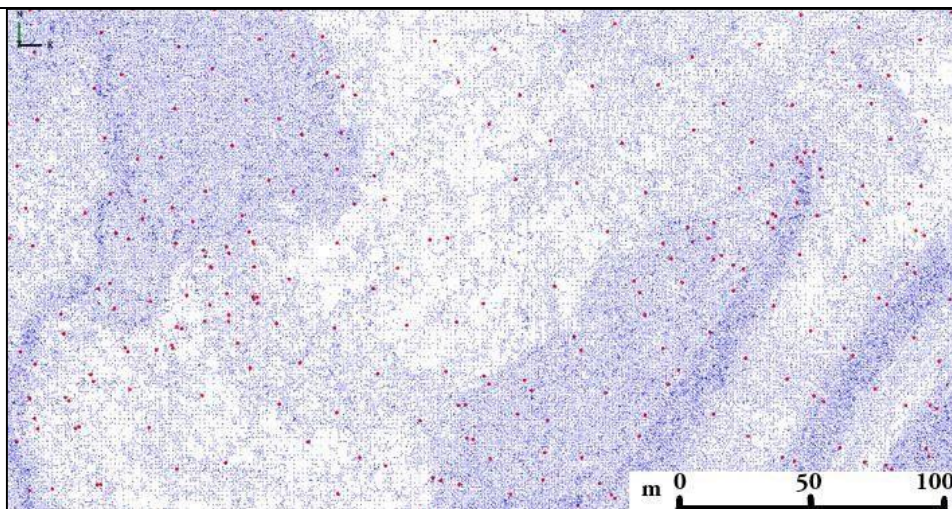


Figura 7.1 Distribuição dos pontos na nuvem. RPA (Azul) X Estação Total (Vermelho)
 Conforme Tabela 7.1 e Figura 7.1, a nuvem de pontos gerada pela Estação Total & Receptor GNSS apresenta 365 vezes menos pontos que a nuvem gerada pelo RPA de Asa Fixa. Isto ocorre porque a nuvem de pontos da Estação Total tem que ser realmente, por questões operacionais, bem menor uma vez que cada ponto presente na sua nuvem de pontos é medido por posicionamento manual de um bastão que serve de referência para o operador da Estação Total fazer a leitura de sua coordenada. O que torna o procedimento demorado e trabalhoso.

7.2 SUPERFÍCIE OU MALHA TRIANGULARIZADA

Com as nuvens de pontos foram geradas as superfícies ou malhas triangularizadas.

Na Tabela 7.2 e Figura 7.2 são apresentados o número de faces em cada superfície, bem como estas superfícies triangularizadas, respectivamente.

Tabela 7.2 N° de Faces presentes na superfície triangularizada. RPA X Estação Total.

	RPA ASA FIXA	ESTAÇÃO TOTAL	RPA/ESTAÇÃO TOTAL
N° de Faces	3.693.045	9.666	382

Figura 7.2 Superfície ou Malha Triangularizada. RPA Asa Fixa (1) X Estação Total (2).

Como pode ser observado na Tabela 7.2 e Figura 7.2, devido a superfície do *RPA* ter sido construída com uma nuvem de pontos contendo muito mais pontos do que a nuvem da Estação Total & Receptor *GNSS*, esta superfície possui maior número de faces e consequentemente maior detalhamento da topografia ou relevo da Pilha de Estéril. Dentre estruturas detalhadas pode ser visto as descidas d'água, melhor contorno das bermas, rampas, faces de talude e montes de estéril depositados no topo da pilha.

7.3 CURVAS DE NÍVEL

As duas topografias foram geradas considerando a sua cota mais baixa e mais alta, 330m e 450m respectivamente. As curvas mestras foram feitas a cada 10m de altura e está em cor preta na imagem. As curvas intermediárias que estão entre as curvas mestras têm espaçamento de 1m de altura e estão na cor cinza.

Na Figura 7.3 abaixo são apresentadas as curvas de nível geradas a partir das superfícies do *RPA* de Asa Fixa e da Estação Total & Receptor *GNSS*.

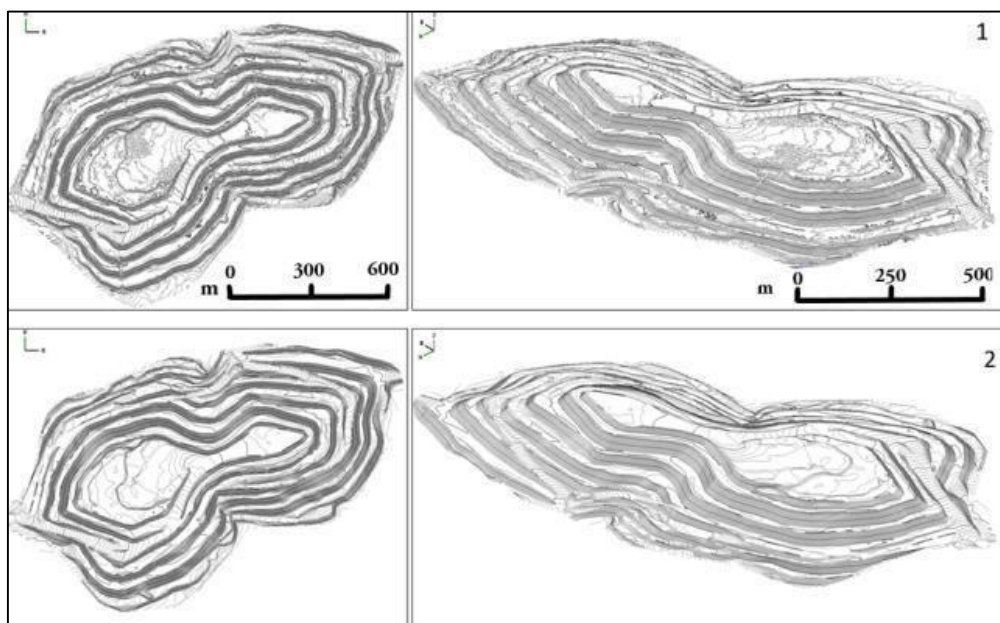


Figura 7.3 Curvas de nível geradas a partir da superfície. *RPA* (1) X *LST* (2)

Uma vez que a superfície gerada com o *RPA* de Asa Fixa é mais detalhada e aderente ao relevo real da topografia do que a superfície gerada com a Estação Total & Receptor *GNSS*, suas curvas de nível também têm mais detalhes. Estes detalhes podem ser observados tanto na imagem em planta quanto na em perspectiva 3D da Figura 7.3.

7.4 ORTOFOTO

É sabido que a Estação Total & Receptor *GNSS* não pode gerar imagens ou ortofotos georreferenciadas do local onde a mesma fez levantamento topográfico. Dessa forma neste Estudo de Caso 2 só será apresentado ortofoto gerado pelo *RPA* de Asa Fixa.

A ortofoto gerada pelo *RPA* de Asa Fixa é georeferenciada e apresenta uma qualidade muito boa. É possível com ela observar detalhes que não são observados na superfície e nem nas curvas de nível, por isso a sua grande utilidade para gerenciamento das operações de lavra e infraestrutura de mina. Na Figura 7.4 é apresentada a ortofoto da Pilha de Estéril SW gerada com o *RPA* de Asa Fixa.

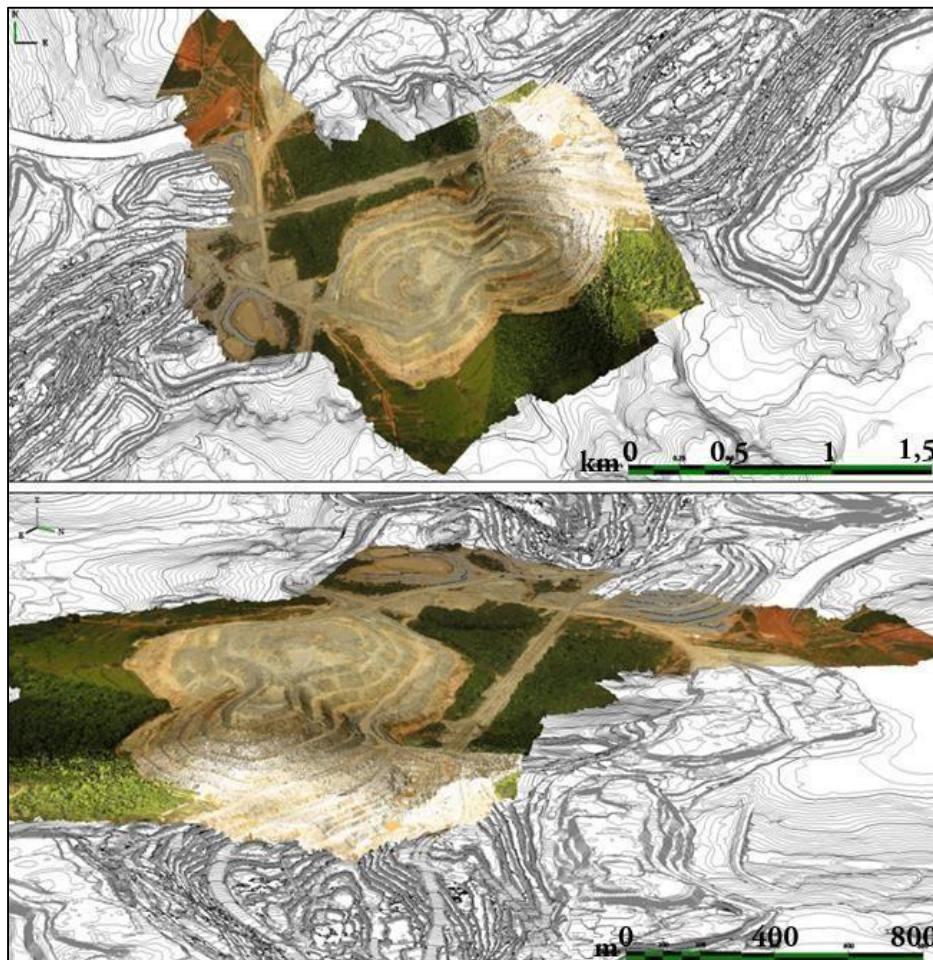


Figura 7.4 Ortofoto gerada com o *RPA* de Asa Rotativa. Texturização da Nuvem de Pontos.

Pela imagem é possível observar que a aderência da ortofoto georeferenciada em 3D é muito boa, conectando acessos, áreas de lavra, pilhas de estéril, estoques de minério, região de barragem e dentre outras estruturas presentes no local pesquisado.

7.5 ACURÁCIA

A acurácia das superfícies geradas para a frente de lavra de estéril utilizando os métodos *RPA* de Asa Fixa e Estação Total, foi calculada fazendo uma comparação do valor encontrado para a coordenada “H” altitude em cada uma destas superfícies, nos locais onde foram tomados os pontos de controle com o Receptor *GNSS*.

Como o Receptor *GNSS* é um equipamento de alta acurácia e precisão, as suas coordenadas foram consideradas como sendo o valor real que se espera obter nas duas metodologias.

Na Tabela 7.3 abaixo são apresentadas as coordenadas dos vinte (20) pontos de controle medidos no sistema métrico SAD69 22S com o Receptor *GNSS*, sobre a pilha de estéril.

Nesta tabela também se encontra, em centímetros, a diferença entre o valor da coordenada “H” obtido com o Receptor *GNSS* e o valor desta mesma coordenada obtido em cada um dos métodos *RPA* de Asa Fixa e Estação Total & Receptor *GNSS*, nos locais onde foram tomados pontos de controle. Esta diferença é apresentada em módulo.

Tabela 7.3 Diferença de coordenada "H" Receptor *GNSS* X *RPA*, e Receptor *GNSS* X Est. Total

Receptor <i>GNSS</i> (coordenadas em UTM SAD 69 22S)				<i>GNSS</i> X <i>RPA</i>		<i>GNSS</i> X ESTAÇÃO TOTAL	
Pontos de Controle	E (m)	N (m)	H (m)	Δ H (cm)	AH (%)	Δ H (cm)	AH (%)
1	673849,15	8423812,54	353,72	-56,00	-	-143,00	-40,43%
					15,83%		
2	674181,88	8424113,92	351,45	6,00	1,71%	3,00	0,85%
3	674371,41	8424189,74	353,95	-11,00	-3,11%	-64,00	-18,08%
4	674597,05	8424581,80	351,21	34,00	9,68%	-326,00	-92,82%
5	674399,19	8424511,58	409,77	-4,00	-0,98%	92,00	22,45%
6	674167,24	8424359,37	438,97	16,00	3,64%	-64,00	-14,58%
7	674029,36	8424252,33	412,26	-19,00	-4,61%	110,00	26,68%
8	673589,12	8423889,54	405,45	-18,00	-4,44%	-344,00	-84,84%
9	673627,84	8424140,23	442,23	-31,00	-7,01%	-69,00	-15,60%
10	673628,98	8424153,45	446,89	-29,00	-6,49%	-310,00	-69,37%
11	674130,35	8424453,04	438,36	-18,00	-4,11%	-38,00	-8,67%
12	674083,35	8424524,40	410,46	-32,00	-7,80%	74,00	18,03%
13	674168,76	8424710,21	352,70	-6,00	-1,70%	-171,00	-48,48%
14	674013,57	8424643,06	364,01	6,00	1,65%	-105,00	-28,85%
15	673787,21	8424554,90	390,15	-12,00	-3,08%	-32,00	-8,20%
16	673792,89	8424518,08	409,76	35,00	8,54%	54,00	13,18%
17	673716,00	8424410,46	446,59	-11,00	-2,46%	-33,00	-7,39%
18	673620,41	8424480,05	409,71	-29,00	-7,08%	-159,00	-38,81%

19	673390,83	8424373,79	390,11	-34,00	-8,72%	-115,00	-29,48%
20	673272,52	8424184,40	389,47	1,00	0,26%	-9,00	-2,31%
Média Aritmética	-	-	-	-10,60	-2,60%	-82,45	-21,34%
Desvio Padrão	-	-	-	22,21	5,77%	128,36	32,72%

Como pode ser observado na Tabela 7.3, a média aritmética dos erros em “H” no comparativo do *RPA* de Asa Rotativa e Estação Total contra o GNSS pode ser considerado pequeno para o *RPA* e significativo para a Estação Total. Embora os dois resultados sejam aceitáveis dentro dos padrões de operação da Mina de Chapada.

Quando se observa o desvio padrão em torno da média aritmética vemos que a dispersão para o *RPA* ainda continua pequeno, entretanto para a Estação Total o erro fica ainda mais significativo.

Este valor mais acurado encontrado para a superfície gerada com o *RPA* de Asa Fixa já era esperado, pois esta foi gerada com uma nuvem de pontos com 365 vezes mais pontos do que a nuvem de pontos gerada com a Estação Total & Receptor *GNSS*.

Na Figura 7.5 é apresentado um detalhamento sobre o erro de posição da superfície gerada com o *RPA* de Asa Fixa sobre os locais onde foram alocados os pontos de controle. Na legenda à direita na figura, as cores representam o erro na coordenada “H”, e a forma da elipse (X150) representa o erro de posição no plano “EN”, quanto maior a elipse, maior o erro.

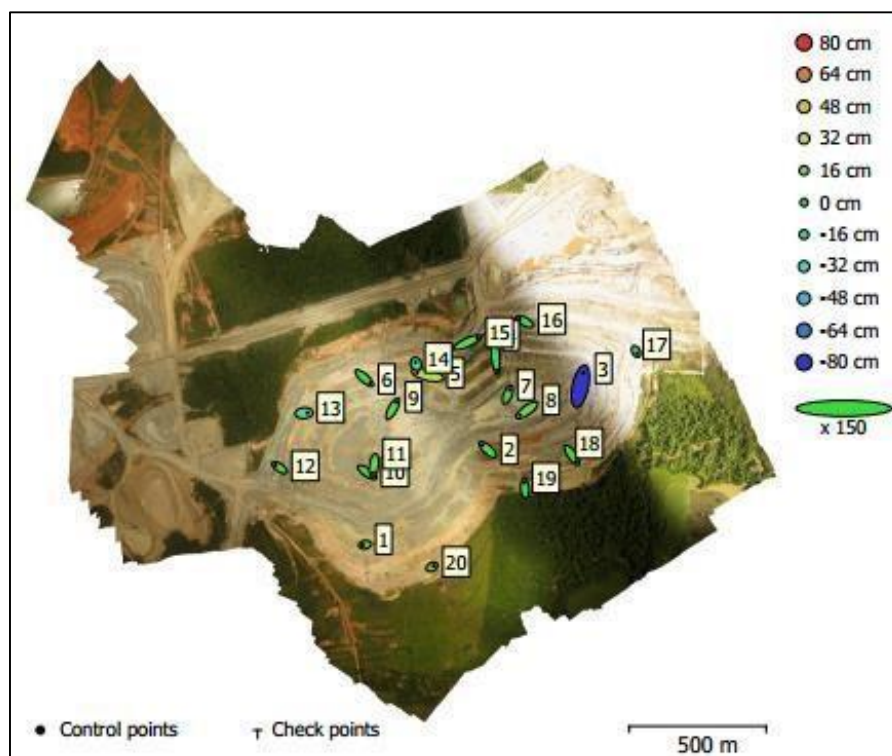


Figura 7.5 Erro de Posição da Superfície gerada com *RPA* de Asa Fixa nos pontos de controle.

Na Figura 7.6 são apresentados os perfis topográficos das superfícies geradas com o *RPA* de Asa Fixa e a Estação Total & Receptor *GNSS* para pilha de estéril.

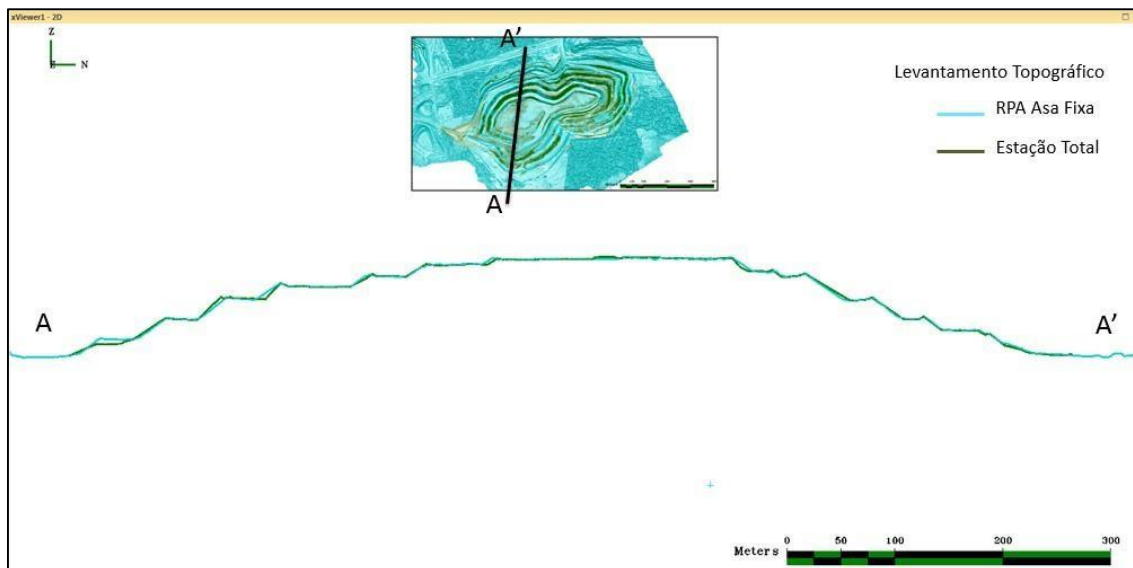


Figura 7.6 Comparativo de Posição dos Perfis Topográficos *RPA* X Estação Total.

Como pode ser observado na Figura 7.6, a aderência de posição E, N, H das superfícies geradas com o *RPA* de Asa Fixa e Estação Total ficou muito próxima uma da outra, o que nos leva a crer que o resultado gerado pelo *RPA* atende às necessidades da empresa, e mais, apresentou um erro em torno de 8 vezes menor quando se compara com o resultado gerado pela Estação Total & Receptor *GNSS*.

7.6 SEGURANÇA

De uma forma geral pode-se dizer que o trabalho executado com o *RPA* de Asa Fixa apresentou melhor segurança em campo do que o trabalho executado com a Estação Total.

Entendeu-se que o trabalho de levantamento topográfico com Estação Total & Receptor *GNSS* ainda expõe mais o profissional às condições de risco do que quando o levantamento é realizado com o *RPA* de Asa Fixa. Nestes levantamentos ocorre uma maior exposição aos equipamentos que transitam sobre a pilha de estéril, necessidade de posicionar o bastão de medição de coordenadas em locais de altitude elevada como “cristas” e “faces de talude”, risco de queda de blocos sobre o profissional, risco de queda no mesmo nível ou em níveis diferentes devido piso irregular, etc.

O operador do *RPA* de Asa Fixa ficou muito menos exposto às situações de risco mencionadas acima, apesar de ter necessitado entrar na área da pilha de estéril para fazer a alocação dos pontos de controle. Entretanto, este operador do *RPA* necessitou entrar na área da pilha por que o *RPA* não tinha Receptor *GNSS* para alocação de pontos de controle remotamente, caso tivesse, não precisaria entrar na área da pilha em nenhum momento.

7.7 TEMPO

O tempo gasto no levantamento topográfico da Pilha de Estéril SW pode ser apresentado de duas formas: quando é feito de maneira mais otimizada, ou seja, quando compreende somente as etapas realmente necessárias para se entregar uma superfície triangularizada junto com as suas curvas de nível. E quando é feito considerando além do mencionado, texturização da nuvem de pontos, modelo digital de elevação e ortofoto 3D georeferenciada das imagens.

Um ponto muito importante e que deve ser levado em consideração na contabilização do tempo, é que o tempo gasto pelo *RPA* e que será apresentado é referente ao levantamento da área total da pilha de estéril, e o tempo gasto no levantamento da pilha pela Estação Total & Receptor *GNSS* considera somente uma pequena área da mesma, considerando que a pilha já estava formada no momento da pesquisa, e que foi necessário fazer somente levantamento de um pequeno local onde houve deposição.

Considerando o exposto no parágrafo anterior, teremos que fazer a relação entre o tamanho da área levantada pelo *RPA* (área total da pilha) pela área levantada pela Estação Total & Receptor *GNSS* (pequena área da pilha). O valor desta relação será multiplicado pelo valor do tempo total gasto pela Estação Total & Receptor *GNSS*, para fins de melhor estimar qual seria o tempo total gasto por este equipamento no levantamento topográfico da área total da pilha.

Na Figura 7.7 está apresentada a imagem da área levantada pela Estação Total e Receptor *GNSS* em relação à área total da pilha, bem como a sua relação.

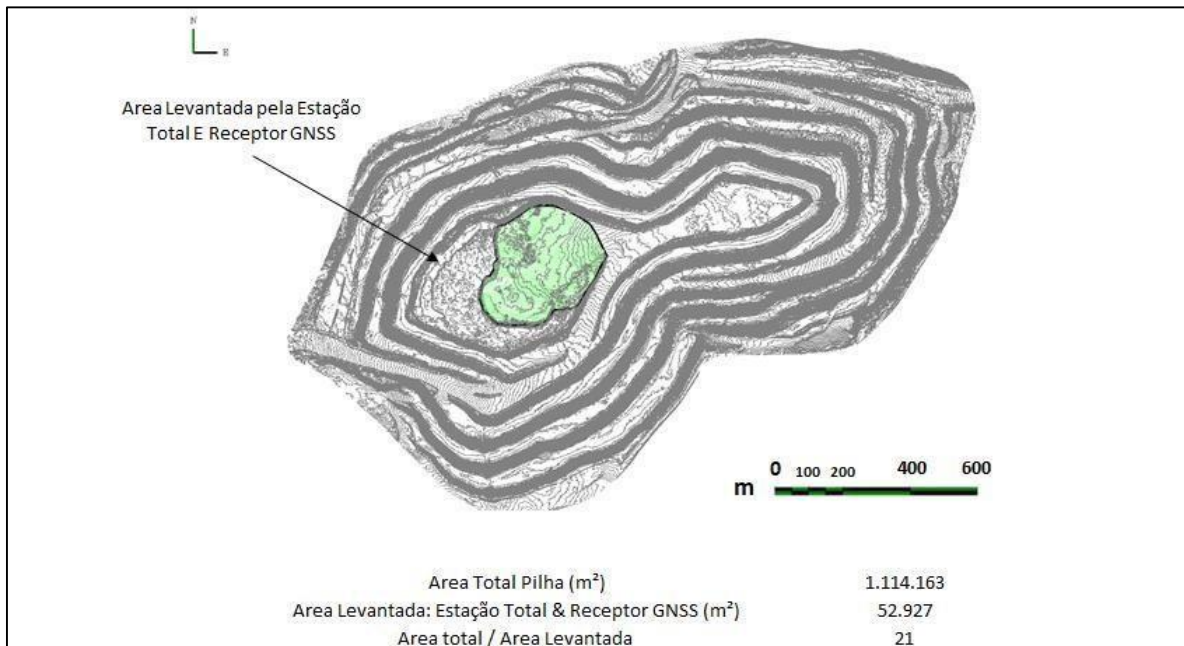


Figura 7.7 - Relação área total pilha SW pela área levantada Estação Total & Receptor GNSS

Na Tabela 7.4 e 7.5 são apresentados o tempo gasto realizando as duas formas mencionadas no primeiro parágrafo deste subcapítulo, bem como o tempo estimado se a Estação Total e Receptor GNSS levantasse toda a área da pilha de estéril.

Tabela 7.4 Tempo gasto realizando todas as etapas da pesquisa

RPA DE ASA FIXA		ESTAÇÃO TOTAL & GPA GEODÉSICO	
Fase1: Planejamento em Escritório		Fase1: Planejamento em Escritório	
	Tempo (h)		Tempo (h)
Estudo da Área Alvo	0,50	Estudo da Área Alvo	0,50
Planejamento do Voo	0,50	Planejamento do Levantamento	0,50
Total	1,00	Total	1,00
Fase 2: Pesquisa em Campo		Fase 2: Pesquisa em Campo	
	Tempo (h)		Tempo (h)
Alocação dos Pontos de Controle	1,00	Tomada de Pontos para nuvem de pontos	0,50
Realização do Voo de Pesquisa	0,33		
Total	1,33	Total	0,50

Fase 3: Processamento dos Dados	Tempo (h)	Fase 3: Processamento dos Dados	Tempo (h)
Alinhamento das Imagens	0,71	Tratamento da Nuvem de Pontos	1,66
Nuvem de Pontos Densa	11,05	Malha\Superfície no Minesight	0,33
Malha Triangularizada/Superfície	1,61	Curvas de Nível no Minesight	0,10
Modelo Digital de Elevação	0,50	Total	2,09
Ortomosaico	0,13		
Curvas de Nível no Minesight	0,10		
Total	14,10		
		Tempo Total Gasto na Pesquisa	Tempo (h)
		Fases 1 + 2 + 3	3,59
		Tempo Estimado considerando Area Total	75,39 Pilha
Tempo Total Gasto na Pesquisa	Tempo (h)		
Fases 1 + 2 + 3	16,43		

Tabela 7.5 Tempo gasto para gerar somente superfície e curvas de nível

RPA DE ASA ROTATIVA	
Fase1: Planejamento em Escritório	
Tempo (h)	
Estudo da Área Alvo	0, 50
Planejamento do Voo	0, 50
Total	1, 00
Fase 2: Pesquisa em Campo	
Tempo (h)	
Alocação dos Pontos de Controle	0, 50
Realização do Voo de Pesquisa	0, 33
Total	0, 83
Fase 3: Processamento dos Dados	
Tempo (h)	
Alinhamento das Imagens	0, 71
Nuvem de Pontos Densa	11, 05
Malha\Superfície no Minesight	0, 33
Curvas de Nível no Minesight	0, 10
Total	12, 19
Tempo Total Gasto na Pesquisa	Tempo (h)
Fases 1 + 2 + 3	14, 02

Conforme pode ser visto na Tabela 7.4 o tempo gasto pelo *RPA* de asa fixa é 4,6 vezes menor que o tempo estimado que seria gasto pela Estação Total e Receptor *GNSS* para levantar toda a área da pilha de estéril.

Na Tabela 7.5 seguindo o mesmo raciocínio anterior, o tempo gasto pelo *RPA* de asa fixa é 5,4 vezes menor que a Estação Total e Receptor *GNSS*.

7.8 VOLUME

Baseado nas superfícies geradas da pilha de estéril SW com o *RPA* de asa fixa e com a Estação Total & Receptor *GNSS*, foi calculado o volume da pilha nas duas situações.

Os volumes foram calculados considerando cada superfície gerada para a pilha com relação à topografia natural do terreno antes da construção da pilha, esta mesma metodologia também foi usada por Silva C.A. da, 2015.

Na Figura 7.8 e Tabela 7.6 são apresentados os volumes, seus valores e suas diferenças em porcentagem de uma metodologia em relação a outra.

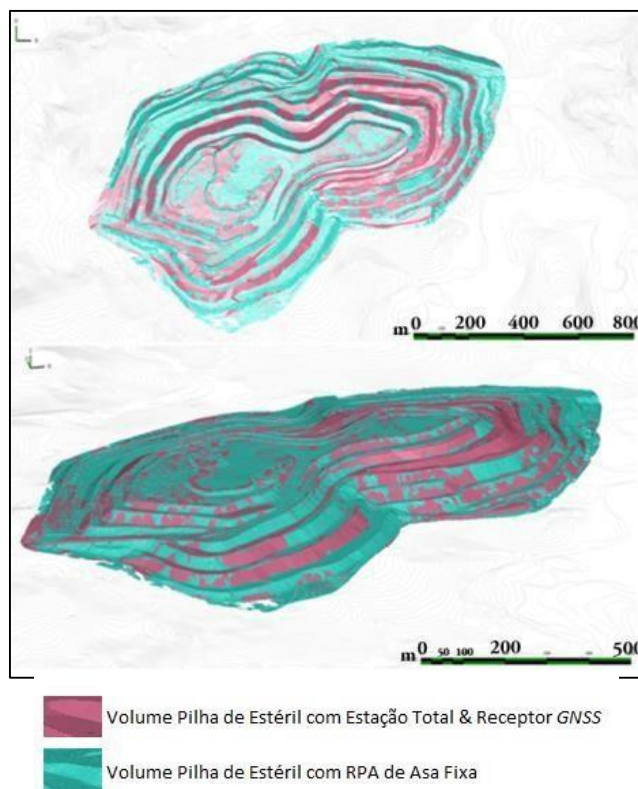


Figura 7.8 Volumes da pilha de estéril tomado por cada equipamento

Na Figura 7.8 as duas superfícies geradas com o *RPA* de asa fixa e com a Estação Total & Receptor *GNSS* foram abertas na mesma imagem dentro do *software* de mineração *Minesight*. Assim é possível observar que a cor que sobressai na Figura 7.8 é referente à superfície que está por cima da outra naquele local. Ou seja, há diferenças de levantamento topográfico nesta pilha de estéril em termos de coordenadas E, N e H entre uma metodologia e outra.

Estas diferenças de posição das superfícies geradas em cada metodologia também irão gerar diferenças no cálculo do volume. Como dito anteriormente o volume é calculado levando-se em consideração o espaço entre a superfície gerada em cada metodologia e a superfície natural do terreno antes da construção da pilha de estéril, veja a Tabela 7.6.

Devido a nuvem de pontos gerada com o *RPA* de asa fixa apresentar melhor acurácia e se aderir melhor à realidade, o seu volume da pilha calculado foi tomado como o valor de volume mais próximo da realidade.

Tabela 7.6 Volumes da Pilha de Estéril SW medido

Equipamento	Volume (m ³)	Δ (m ³)	Δ (%)
RPA de Asa Fixa	35.904.609	-	-
Estação Total & Receptor <i>GNSS</i>	32.790.322	3.114.287	9%

Pela tabela 7.6 o volume calculado pela superfície gerada com o *RPA* apresenta 9% a mais de volume, o que representa 3 114 287m³. Considerando densidade empolada do material estéril de 2,3 t/m³, esta diferença em toneladas é de 7 162 860 toneladas.

Estas medições de volume foram realizadas com o *software* de mineração *Minesight* o qual nos permite gerar os volumes e fazer as medições.

A Figura 7.9 apresenta uma tela do *software* *Minesight* no momento do cálculo de volume.

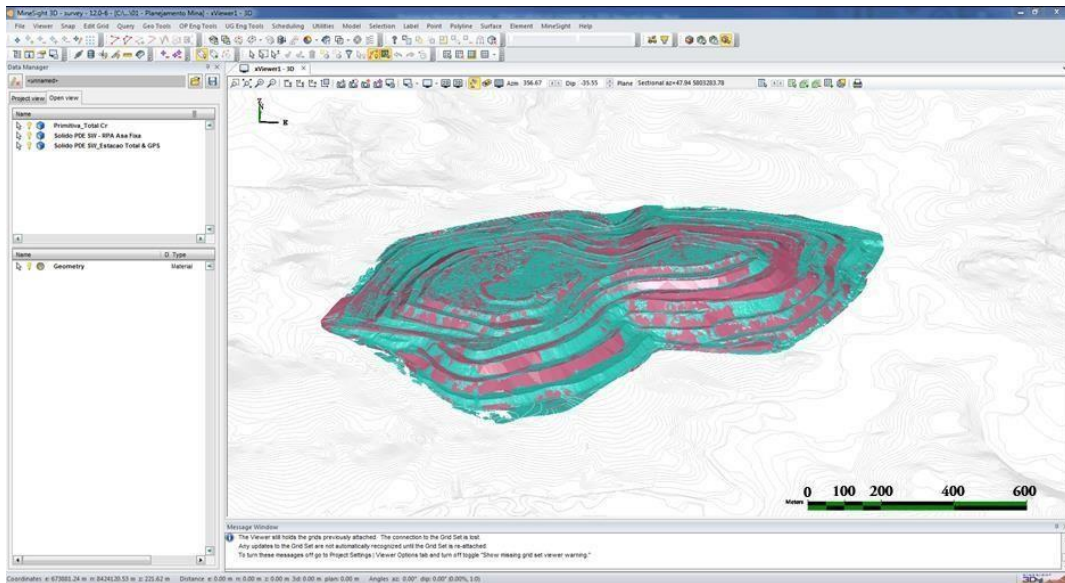


Figura 7.9 Tela do Software Minesight - Cálculo de Volume.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Sobre os objetivos gerais, os dois *RPA*s utilizados na pesquisa: asa fixa e rotativa, apresentaram boa capacidade técnica em obter dados de campo (imagens) em quantidade, qualidade, posição EN, dentre outras informações com sucesso. Estes dados foram suficientes para que posteriormente com o processamento digital com o *Software* Agisoft Photoscan e Minesight, pudesse ser gerado os produtos esperados, a saber: nuvem de pontos, superfícies (malha), curvas de nível, modelo digital de elevação e ortofotos.

Em campo, os *RPA*s de asa fixa e rotativa apresentaram desempenho operacional satisfatório. Cumpriram o plano de voo e sua operação ocorreu de forma amigável e fácil, nas mesmas condições a que outros equipamentos tradicionais foram expostos e apresentaram flexibilidade operacional diante de imprevistos.

Com a constatação que os *RPA*s são capazes de realizar principalmente levantamento topográfico e ortomosaico de imagens, estes se tornam opções na realização destes serviços

frente o LST, Estações Totais, Receptor *GNSS*s e aeronaves tripuladas. Dependendo da área de interesse e do tempo disponível para a geração dos resultados, os *RPA*s se tornam uma opção mais atrativa em termos de custo e qualidade do que seus concorrentes mencionados.

Sobre os objetivos específicos, pode-se concluir que quando se compara o estudo de caso do *RPA* de Asa Rotativa versus Laser Scanner Terrestre, O tempo gasto pelo *RPA* considerando todos os trabalhos de campo e escritório até a geração dos produtos levou em média 5 vezes mais tempo que o LST. Entretanto, o tempo gasto em campo pelo *RPA* foi mais curto do que o LST. A diferença maior foi em relação ao processamento das imagens pelo *Software* Agisoft Photoscan. Esta situação configura uma barreira tecnológica do processamento digital, e pode ser entendido que com o avanço da tecnologia o tempo total gasto com o *RPA* em campo e escritório se equipare ao dos equipamentos tradicionais. E isso o tornará muito competitivo.

O LST foi pior no quesito segurança da operação, visto que a operação do *RPA* foi feita na maioria do tempo à distância e longe do alcance dos equipamentos.

O número de pessoas necessárias para a operação do *RPA* também se mostrou menor quando comparado com o LST.

Os produtos do *RPA* apresentaram qualidade superior ao do LST, além de maior versatilidade dos produtos entregues, visto que além do levantamento topográfico, o *RPA* entregou superfície texturizada, modelo digital de elevação e ortomosaico de imagem.

Ainda sobre o objetivo específico, quando se compara o estudo de caso do *RPA* de Asa Fixa versus Estação Total & Receptor *GNSS*, o *RPA* de asa fixa sem sombra de dúvidas consegue realizar o levantamento topográfico de grandes áreas em um tempo consideravelmente menor que a Estação Total & Receptor *GNSS*. E pode-se concluir que não há comparação entre estes equipamentos neste quesito, mesmo considerando o maior tempo de processamento digital das imagens.

O resultado em termos de acurácia da superfície também favorece o *RPA* de asa fixa, visto que a superfície apresentou mais detalhes das suas estruturas de formação, acessos, drenagens, deposições e etc., conseqüentemente apresentou também maior confiabilidade no cálculo do volume de estéril presente na pilha.

A metodologia de levantamento topográfico da pilha usando *RPA* também promoveu maior segurança nas atividades, e necessitou menos trabalhadores para realizar a atividade.

Por fim, entende-se que a dissertação cumpriu os seus objetivos gerais e específicos sob o ponto de vista científico e prático, apresentando informações que serão muito úteis para a comunidade acadêmica, como também para a indústria da mineração, uma vez que a disponibilidade de estudos com estas aeronaves ligadas de forma aplicada ao setor da mineração ainda pode ser considerada escassos no Brasil.

Esta dissertação e seus resultados fortalecem a tendência da indústria da mineração e em geral, em usar equipamentos controlados remotamente em suas atividades para ganho de produtividade, qualidade da informação, inovação tecnológica e diminuição de custos.

8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Frente à imensa aplicação das aeronaves remotamente pilotadas na indústria da mineração, e ainda dentro da linha do seu uso como apoio técnico nas atividades de planejamento de mina e projetos de mineração em mina a céu aberto, recomenda-se pesquisar uma melhor manipulação da nuvem de pontos, para que esta possa considerar limites de lavra definidos em um plano de mina prévio, realizado em software de mineração como o Minesight.

A finalidade seria usar os limites de lavra para excluir os pontos da nuvem de pontos que estiverem dentro deste limite, os quais representam os locais onde a lavra ocorrerá. Para posteriormente encaixar os avanços de lavra nos vazios existentes nesta nuvem de pontos e gerar uma superfície considerando o levantamento topográfico e o plano de mina.

Esta situação iria criar uma melhor maneira de apresentar o plano de mina, melhorar o nível das discussões técnicas referentes à operação de mina, geotecnia, infraestrutura, planejamento de mina e realidade virtual na mineração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANAC, Agência Nacional de Aviação Civil. Emissão de Certificado de Autorização de Voo Experimental para Veículos Aéreos Não Tripulados, Instrução Suplementar IS N° 21002 Revisão A, Diário Oficial da União n° 205/S/1, Brasília, DF, Brasil, 2012, 31p.
- ANAC (2017), Agência Nacional de Aviação Civil, Requisitos Gerais para Veículos Aéreos Não Tripulados e Aeromodelos, Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial RBAC-E n° 94, Brasília, DF, Brasil, 26p.
- ANATEL, Agência Nacional de Telecomunicações (2017), Manual do Usuário de Solicitação de Conformidade para Drone Versão 1.2, Website Anatel, Brasília, DF, Brasil, 28p.
- BALAN, Willians Cerozzi (2009), A Imagem Digital, Apostila, UNESP, São Paulo, SP, Brasil, 14p.
- BORGES, Alberto de Campos (1977), Topografia Aplicada à Engenharia Civil, Editora Edgard Blucher, São Paulo, SP, Brasil 192p.
- COELHO, Luiz; BRITO, Jorge Nunes (2007), Fotogrametria Digital, Apostila, Editora da Universidade do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 196p.

- DECEA, Departamento de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (2017), Ica 100-40 Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro, Portaria Decea no 282/Dgcea BCA nº 019, Brasília, DF, Brasil, 56p.
- DONG, Pinliang; CHEN, Qi (2018), Lidar Remote Sensing and Applications, CRC Press, Florida, USA, 197p.
- DNPM, Departamento Nacional de Produção Mineral, UNB, Universidade de Brasília (2011), Projeto μ VANT – uma parceria DNPM/UNB para desenvolvimento e uso de μ VANTs na fiscalização de atividades minerais não tituladas, Seminário Departamento Engenharia Civil UNB/FT Brasília, DF, Brasil, 8p.
- FERRAZ, R. da Silva; SOUZA, S. Florêncio de; REIS, M.L. Lopes (2016), Laser Scanner Terrestre: teoria, aplicações e prática, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 11p.
- IBRAM (2017), Instituto Brasileiro de Mineração, Relatório Anual de Atividades, Brasília, DF, Brasil, 36p.
- ICAO (2015), Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS) DOC 10019, International Civil Aviation Organization, Québec, Canada, 166p.
- LEICA GEOSYSTEMS, Ficha de Dados, Leica Viva GS15, Heerbrugg, Switzerland, 2015, 2p.
- MAPTEK (2018), I-Site SR3 Scanner, Maptek Inc., www.maptek.com, 2p.
- MENESES, P. R., ALMEIDA, T. de (2012), Instituto de Geociências da UNB, Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto, Brasília, DF, Volume 1, 276p.
- METCALFE, P.J (2013), Evaluation of Remotely Piloted Aircraft in Surveying Application, Bachelor Degree, Faculty of Health, Engineering & Sciences, University of Southern Queensland, Toowoomba, Australia, 247p.
- MMIC (2014), PAE – Plano de Aproveitamento Econômico, Mineração Maracá Indústria e Comércio Ltda, Alto Horizonte, GO, Brasil, 453p.
- MPDG, Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão, DELBRA, Delegação da União Europeia no Brasil (2017), Estudo sobre a Indústria Brasileira e Europeia de Veículos Aéreos Não Tripulados, Website Diálogos Setoriais UE – Brasil, 92p.
- OLIVEIRA, P.N.B. (2011), Método para Obtenção de Ortofotos a partir de Fotografias Aéreas Digitais, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 86p.
- OLSEN, Michael J.; WILLIAMS Keith (2013), Synthesis of Transportation Applications of Mobile LIDAR, Remote Sensing Journal MDPI, School of Civil and Construction Engineering, Oregon, USA, 41p.

PARKINSON, B. W. (1996), Global Positioning System: Theory and Applications V. 1, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., Washington, DC, USA, 125p.

PHANTOM 4 (2017), User Manual, DJI Inc., www.dji.com, 70p.

PPGG, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia (2017), Normas de Redação e Apresentação de Seminário G.DG-008B/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / FT, UNB, Brasília, DF, 8p.

SILVA, Cristiano Alves da (2015), Avaliação dos ortomosaicos e modelos digitais do terreno gerados por VANT e sua aplicação no cálculo de volumes de pilhas de rejeito da Pedra Cariri, Dissertação Mestrado, UFCE, Departamento de Geologia, Fortaleza, CE, 148p.

SILVA, Daniel Carneiro da (2015), Evolução da Fotogrametria no Brasil, Revista Brasileira de Geomática V.3 N.2, Pato Branco, PR, Brasil, 17p.

SILVA, Lenildo Santos da, Projeto μ Vant Cordem/Dnpm – Micro Veículo Aéreo Não Tripulado para aplicação em monitoramento e fiscalização de atividades não autorizadas. Manual de Voo da Aeronave μ Vant PP ZKR – Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília DF, 2014, 14p.

TOMMASELLI, A.M.G. (2003), Um Estudo sobre as Técnicas de Varredura a Laser e Fotogrametria para Levantamentos 3d a Curta Distância, UNESP, Presidente Prudente, SP, Brasil, 17p.