UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PTR-DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

RODRIGO GONÇALES

Integração e controle de qualidade de Laser scanner terrestre e de Drone para levantamentos de edifícios, monumentos e ruínas arqueológicas.

São Paulo
2020

RODRIGO GONÇALES

Integração e controle de qualidade de Laser scanner terrestre e de Drone para levantamentos de edifícios, monumentos e ruínas arqueológicas.

Versão Corrigida

(Versão original encontra-se na unidade que aloja
o Programa de Pós-graduação)

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração
Engenharia de Transportes

Orientador:
Prof. Dr. Jorge Pimentel Cintra

São Paulo
2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 06 de janeiro de 2020.

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Gonçales, Rodrigo

Integração e controle de qualidade de Laser scanner terrestre e de Drone para levantamentos de edifícios, monumentos e ruínas arqueológicas. / R.

Gonçales -- versão corr. -- São Paulo, 2020.

270 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Drones 2.Laser Scanner 3.Nuvem de pontos 4.Controle de Qualidade
5.Topografia I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia de Transportes II.t.

DEDICATÓRIA

À minha família, pela compreensão, suporte, carinho e apoio ao longo do período de elaboração deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor e amigo Jorge Cintra pelo auxílio e orientação no desenvolvimento desse trabalho e pela contribuição ao meu crescimento científico e intelectual.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pela a oportunidade de desenvolvimento desse trabalho científico e por possibilitar que eu contribua de alguma maneira para o desenvolvimento da pesquisa nacional.

Aos professores do departamento de Topografia e Geodesia que desde do início do programa de Doutorado sempre foram muitos solícitos e me auxiliaram em tudo que foi possível.

Aos amigos Alex Sandoval e André Zanco pela a ajuda indireta no desenvolvimento desse trabalho.

Ao Amigo Danilo Rodrigues, pelas dicas e conselhos para a execução dos levantamentos aéreos.

À empresa Trimble pelo apoio durante a execução dos trabalhos de campo, fornecendo os equipamentos e programas necessários para o desenvolvimento da pesquisa.

RESUMO

O Laser Scanner Terrestre (LST) vem sendo empregado para diferentes aplicações topográficas. Entretanto locais de difícil acesso ou sem visibilidade direta a partir do equipamento (topo de estruturas e coberturas de ruínas), podem inviabilizar o levantamento, pois diversas regiões não são levantadas. Como alternativa, e principalmente complementação dos levantamentos pode-se realizar um recobrimento aéreo utilizando veículos não tripulados, comumente conhecidos como Drones, e também Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). Sabe-se que os equipamentos LST têm boa confiabilidade na coleta da nuvem de pontos e ao mesmo tempo pouca mobilidade. Para o Drone, a mobilidade e o levantamento de pontos de difícil acesso são uma vantagem, ainda que os dados processados possuam uma qualidade inferior ao LST em termos geométricos. Assim, a integração dos dados oriundos desses dois métodos de levantamentos pode ser uma alternativa, obtendo sinergia entre as duas formas de coleta: alta precisão posicional com o LST e maior cobertura com o Drone. Portanto, o desafio proposto para a presente tese é a integração das nuvens de pontos oriundas das duas tecnologias com diferentes precisões e diferentes sistemas de referência. Nesse processo pode ocorrer perda de informação e de qualidade, com a deterioração do produto e sua inviabilidade para muitas aplicações. Um controle de qualidade se faz necessário antes de realizar a integração, visando controlar os resultados alcançados e conhecer a qualidade de cada produto assim como do produto integrado. Quatro parâmetros, da metodologia clássica, serão considerados no controle da qualidade (Linhagem, completude, fidelidade semântica e consistência lógica), sendo necessário adaptar esses quesitos ao caso concreto em que se ocupa essa tese. Para a parte prática foram feitos quatro experimentos, levantamentos representativos, com a integração desses dois tipos de equipamentos: em sítios arqueológicos, construções civis, monumentos, esculturas mostrando a viabilidade da integração.

Palavras chave: Laser Scanner Terrestre; Drone; Integração de dados, Controle de qualidade; Nuvem de pontos; Levantamentos por Drone e Laser Scanner terrestre.

ABSTRACT

The Terrestrial Laser Scanner (LST) has been used for different topographic applications. Although difficult to reach or without direct visibility from the equipment (top of structures and roofs of ruins), they can be made unfeasible or raised, because several regions are not raised. Alternatively, and especially the complementation of surveys, an aerial backup can be performed using unmanned vehicles, commonly known as Drones, and also Unmanned Aerial Vehicle (UAV). Know if LST devices have good point cloud collection possibilities and at the same time poor mobility. For Drone, mobility and difficult access point survey are an advantage, even though the processed data is geometrically inferior to the LST. Thus, the integration of data from these two survey methods can be an alternative, obtaining synergy between two forms of collection: high positional accuracy with LST and greater coverage with Drone. Therefore, the proposed challenge for the present is the integration of point clouds from both technologies with different precision and different reference systems. In this process, loss of information and quality may occur, with product deterioration and unfeasibility for many applications. Quality control is required before integrating, monitoring the results achieved and knowing the quality of each product as well as the integrated product. Four parameters, from the classical methodology, will be considered without quality control (Lineage, conclusion, semantic fidelity and logical consistency), and it is necessary to adapt these requirements to the specific case in which they occupy these theses. For a part of the practice, four experiments were performed, representative surveys, with the integration of these two types of equipment: in archaeological filters, civil constructions, monuments, sculptures showing the feasibility of integration.

Keywords: Terrestrial Laser Scanner; Drone; Data integration, quality control; Point cloud; Drone Surveys and Terrestrial Laser Scanner.

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
CITI	Centro Interdisciplinar de Tecnologias Interativas USP
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DoD	<i>Department of Defense Americano</i>
DXF	<i>Drawing Exchange Format</i>
EXIF	<i>Exchangeable Image File Format</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GSD	<i>Ground Sampling Distance</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
INS	<i>Inertial Navigation System</i>
LAS	<i>Lidar Exchange Format</i>
LIDAR	<i>Light Detection Aand Ranging</i>
LST	Laser Scanner Terrestre
MDE	Modelo Digital de Elevações
MDS	Modelo Digital de Superfície
MED	Medidores Eletrônico de Distâncias
MMQ	Métodos dos Mínimos Quadrados
MVC	Matriz Variância-Covariância
NNSS	<i>Navy Navigation Satellite System</i>
ODLIS	<i>Online Dictionary for Library and Information Science</i>
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
PEC-PCD	Padrão de Exatidão Cartográfica de Produtos Cartográficos Digitais
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RC-H	<i>Remote Controlled Helicopter</i>

ROA	<i>Remotely Operated Aircraft</i>
RPV	<i>Remotely Piloted Vehicle</i>
RPA	<i>Remotely Piloted Aircraft</i>
TIN	Triangular Irregular Network
TOF	<i>Time of Flight</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
USP	Universidade de São Paulo
UVS	<i>Unmanned Vehicle Systems</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Classificação de equipamentos Laser Scanner.	37
Figura 2 - Técnicas de medição com a relação entre distância e precisão e algumas aplicações típicas.	38
Figura 3 – Esquema básico da técnica de medição TOF.	39
Figura 4 – Esquema das observações LS, com a medição de teta, alpha, ro.	40
Figura 5 – Laser Scanner Modelo VZ 6000.	41
Figura 6 – LST Modelo TX8 (Trimble).	42
Figura 7 - Exemplo de medição através da técnica <i>phase shift</i>	44
Figura 8 – Aeronave modelo empresa Hagi.	46
Figura 9 – Monotrilho The <i>Schwebbahn Wuppertal</i> documentado através de um levantamento utilizando um sistema não tripulado.	47
Figura 10 – <i>Phantom 4 Advanced</i> do fabricante DJI.	48
Figura 11 – Echar 20B.	49
Figura 12 – Esquema básico de um Sistema Inercial.	53
Figura 13 – Modelo Ricopter da fabricante alemã RIEGL.	55
Figura 14 – Vant Nauru 500B do fabricante brasileiro Xmobots.	56
Figura 15 – Esquema gráfico para definição do GSD.	58
Figura 16 – Planejamento de voo sendo apresentado graficamente em programas especializados, mostrando diversos dados.	60
Figura 17 – Metadados associados a uma imagem em formato jpg coletada por Drone.	62
Figura 18 – Levantamento do Monumento à Escola Politécnica (Templo estilizado de Minerva ou Palas Atenas).	65
Figura 19 – Nuvem de pontos sem pontos de sombra.	66
Figura 20 – Geometria da transformação ortogonal no plano: (a) rotação entre os sistemas bidimensionais; (b) rotação e translação entre os sistemas bidimensionais; (c) propriedades da transformação (mantém-se a forma do elemento).	69
Figura 21 – Geometria da transformação afim geral no plano.	70
Figura 22 – Determinação de coordenadas através de distâncias.	71
Figura 23 – Sistema de imagem.	81

Figura 24 – Sistema de imagem e sistema com origem no centro geométrico da imagem.....	81
Figura 25 – Sistema do espaço objeto, sistema fotogramétrico.	83
Figura 26 – Vetores ligando os pontos O (origem do sistema do espaço objeto), CP, P e p.....	84
Figura 27 – Representação de objetos tridimensionais através de rede irregular de triângulos (TIN), construída a partir de nuvem de pontos original. Edifício-Monumento do Museu do Ipiranga.....	88
Figura 28 – Duas nuvens de pontos antes do processo de registro. Cada cor apresenta uma estação levantada em campo.....	93
Figura 29 – Identificação dos pontos homólogos par em duas estações para execução do registro das nuvens de pontos.	94
Figura 30 – Registro finalizado e apresentação das nuvens de pontos num sistema único de coordenadas. Uma estação está representada em verde e outra em vermelho.....	95
Figura 31 – Apresentação da qualidade do processo de registro para o exemplo....	95
Figura 32 – Fluxograma proposto para testar o parâmetro de qualidade Linhagem.	98
Figura 33 – Fluxograma proposto para testar o parâmetro de qualidade de Completude.	100
Figura 34 – Fluxograma proposto para testar o parâmetro de qualidade de Fidelidade Semântica.	102
Figura 35 – Escultura Palas Atenas.	106
Figura 36 – Especificações técnicas dos equipamentos utilizados.	107
Figura 37 – Nuvem de pontos, vista de cima com a posição de cada estação de levantamento.....	108
Figura 38 – Nuvem de pontos da escultura em uma vista perspectiva.	109
Figura 39 – Esquema do levantamento, as pirâmides em verde mostram a posição das fotos tomadas (miniatura na base da pirâmide), com um ponto em verde na posição do centro perspectivo e sua projeção (em azul) no terreno.	109
Figura 40 – Análise do parâmetro de qualidade Linhagem do levantamento terrestre através do fluxograma proposto.	111
Figura 41 – Análise do parâmetro de qualidade Linhagem do levantamento aéreo através do fluxograma proposto.	112

Figura 42 - Vistas perspectivas da nuvem de pontos registrada e completa.	113
Figura 43 – Detalhe da parte superior da escultura, mostrando a inexistência de pontos nessa região.	114
Figura 44 – Análise do parâmetro de qualidade Completude do levantamento terrestre através do fluxograma proposto.	115
Figura 45 – Vista aérea da nuvem de pontos gerada pelo levantamento aéreo. A seta indica a região onde não há informação.	116
Figura 46 – Vista lateral da nuvem de pontos gerada pelo levantamento aéreo. A seta indica a região onde não há informação.	116
Figura 47 – Vista lateral da nuvem de pontos gerada com Drone. A seta indica o local onde a densidade de pontos é baixa.	117
Figura 48 – Nuvem de pontos gerada por correlação de imagens. As linhas em vermelho mostram as regiões de sombra / árvores.	118
Figura 49 – Análise do parâmetro de qualidade Completude do levantamento aéreo através do fluxograma proposto.	119
Figura 50 – Comparação entre imagens tiradas no local (figuras da esquerda) e a nuvem de pontos em cores reais (figuras da direita).	120
Figura 51 – Analise visual entre imagem tirada no local (figuras da esquerda) e a nuvem de pontos sem as cores reais (figuras da direita).	121
Figura 52 – Análise do parâmetro de qualidade Fidelidade Semântica do levantamento terrestre através do fluxograma proposto.	121
Figura 53 – Comparação entre as imagens coletadas em campo (figuras da esquerda) com a nuvem de pontos resultante do processamento das imagens (figuras da direita).	122
Figura 54 – Análise do parâmetro de qualidade Fidelidade Semântica do levantamento aéreo através do fluxograma proposto.	122
Figura 55 – Nuvem de pontos (LST) com os cortes gerados em verde.	123
Figura 56 – Nuvem de pontos (LST) com os perfis gerados nos degraus (em verde).	124
Figura 57 – Nuvem de pontos (LST) sobreposta com os perfis gerados nos três eixos.	124
Figura 58 – Local 1: Primeiro corte ou perfil ao longo do eixo Y (Distância: DY). ...	125
Figura 59 – Local 2: Primeiro corte ao longo do eixo X (Distância: DX).	125

Figura 60 – Local 3: Dimensões da estrutura regular localizada próxima a escultura (Distâncias: C1, C2 e C3).....	126
Figura 61 – Esquema de medição e nomenclatura das medições realizadas no perfil extraído e mostrado na figura 60.....	126
Figura 62 – Local 4: Degraus (Distâncias: D1 e D2).	127
Figura 63 – Detalhes e nomenclatura utilizada das medições realizadas no local 5.	127
Figura 64 – Levantamento realizado com equipamento TX5 da Trimble visto de cima e renderizada por elevação (coroplético por alturas).	131
Figura 65 – Disposição esquemática da coleta de imagens aéreas.....	132
Figura 66 – Vistas perspectivas do resultado do processamento das imagens.	133
Figura 67 – Comparação entre os resultados dos dois levantamentos.....	133
Figura 68 – Avaliação do parâmetro de qualidade Linhagem dos dados terrestres (LST) e aéreos (Drone).	135
Figura 69 – Vista de cima da nuvem de pontos (LST)	136
Figura 70 – Vistas perspectivas da nuvem de pontos (LST).	136
Figura 71 – Vista lateral da nuvem de pontos (LST)	137
Figura 72 – Vista de cima da nuvem de pontos (Drone).	138
Figura 73 – Vistas perspectivas da nuvem de pontos (Drone).	138
Figura 74 – Análise da Completude através do fluxograma proposto.	139
Figura 75 – Nuvem de pontos em tons de cinza do levantamento terrestre (LST)..	140
Figura 76 – Nuvem de pontos em tons de intensidade do levantamento terrestre (LST).	141
Figura 77 – Nuvem de pontos (LST) versus foto do local.	141
Figura 78 – Análise do detalhamento da face lateral da escultura.....	142
Figura 79 – Análise do parâmetro de qualidade Fidelidade Semântica do levantamento terrestre (LST).	143
Figura 80 – Nuvem de pontos gerada a partir do levantamento aéreo	144
Figura 81 – Nuvem de pontos (Drone) versus imagem do local.....	144
Figura 82 – Nuvem de pontos (Drone) da face lateral do monumento.....	145
Figura 83 – Nuvem de pontos (Drone) numa vista lateral, mostrando grandes ruídos na parede da escultura.....	145

Figura 84 – Avaliação do parâmetro de qualidade Fidelidade Semântica dos dados gerados a partir das imagens aéreas (Drone).....	146
Figura 85 – Nuvem de pontos oriunda do LST versus nuvem de pontos oriunda do levantamento aéreo (Drone).....	149
Figura 86 – Nuvem de pontos integrada, no mesmo sistema de coordenadas, distinguindo-se a origem dos pontos segundo a cor. Notar como os pontos cinzas (imagens) tiram a definição da escultura.....	150
Figura 87 – Integração das nuvens na parte superior do monumento.	151
Figura 88 – Localização aproximada dos pontos levantamentos com equipamentos GNSS e limites do Engenho.....	154
Figura 89 – Localização aproximada das estações de levantamentos LST	156
Figura 90 – Vista geral das ruínas do engenho.....	157
Figura 91 – Nuvem de pontos das paredes do entorno das ruínas do engenho, junto à antiga capela e sacristia.....	158
Figura 92 – Nuvem de pontos da região preservada do engenho, casa da moenda.	158
Figura 93 – Esquema do primeiro levantamento aéreo, indicando-se o centro perspectivos com pequenas bolas azuis e verdes a respectiva pirâmide fotográfica.	159
Figura 94 – Vista aérea do engenho com as faixas de voo projetadas, materializadas pelos centros das fotografias, representados por bolas vermelhas.....	160
Figura 95 – Vista perspectiva do Esquema dos dois levantamentos circulares realizados.....	161
Figura 96 – Par de imagens verticais do primeiro levantamento aéreo.....	161
Figura 97 – Exemplo de imagens inclinadas coletadas no segundo e terceiro levantamento aéreo.....	162
Figura 98 – Fluxograma de análise do parâmetro de qualidade Linhagem (Drone e LST).	164
Figura 99 – Vistas perspectivas da nuvem de pontos resultantes do levantamento terrestre.....	165
Figura 100 – Vistas perspectivas da nuvem de pontos resultantes do levantamento aéreo.	166

Figura 101 – Fluxograma de análise do parâmetro de qualidade Completude (Drone e LST).	166
Figura 102 – Foto (esquerda) e nuvem de pontos LST (direita) da área coberta do Engenho.....	168
Figura 103 – Foto (esquerda) e nuvem de pontos LST (direita) da área coberta do Engenho.....	168
Figura 104 – Foto (esquerda) e nuvem de pontos LST (direita) de um dos muros das ruínas do Engenho.....	168
Figura 105 – Foto (esquerda) e nuvem de pontos LST (direita) de um dos muros das ruínas do Engenho.....	169
Figura 106 – Foto (esquerda) e nuvem de pontos LST (direita) do local onde eram guardados os armamentos do Engenho.	169
Figura 107 – Foto (esquerda) e nuvem de pontos Drone (direita) da área coberta do Engenho.....	170
Figura 108 – Foto (esquerda) e nuvem de pontos Drone (direita).....	170
Figura 109 – Fluxograma de análise do parâmetro de qualidade Fidelidade Semântica (Drone e LST).....	171
Figura 110 – Locais escolhidos para análise da Qualidade Métrica.....	172
Figura 111 – Medições a partir do ponto de origem do processo de registro e detalhes.	175
Figura 112 – Integração entre as nuvens de pontos terrestre e aérea.....	178
Figura 113 – Integração entre as nuvens de pontos terrestre e aérea. Em detalhe a região da moeda do Engenho.	178
Figura 114 – Ponto de origem do processo de registro entre as nuvens de pontos.	179
Figura 115 – Região próxima ao ponto de origem do registro entre as nuvens de pontos.	180
Figura 116 – Visão geral do processo de integração e indicação dos detalhes a serem analisados.	181
Figura 117 – Detalhes A, B e C mostrando as diferenças entre as nuvens de pontos no processo de integração.	181

Figura 118 – Diferenças encontradas no processo de registro entre a nuvem de pontos do LST e a nuvem de pontos geradas a partir das imagens oblíquas coletadas. Vista transversal.....	182
Figura 119 – Fotografias antigas do museu paulista.....	187
Figura 120 – Vista perspectiva da nuvem de pontos do museu. A esquerda mostra a nuvem de pontos em cor real e a da direita a intensidade em tons de cinza.	188
Figura 121 – Vista perspectiva da nuvem de pontos do museu em cor real.	188
Figura 122 – Nuvem de pontos da região frontal do museu.....	189
Figura 123 – Modelo 3D gerado pela triangulação da nuvem de pontos do museu.	190
Figura 124 – Detalhes da triangulação gerada para a produção do modelo 3D do museu.	190
Figura 125 – Fluxograma de análise do parâmetro de qualidade Linhagem para o levantamento aéreo.....	192
Figura 126 – Nuvem de pontos do LST da região superior do museu.	193
Figura 127 – Nuvem de pontos do telhado do museu, com detalhe da passarela.	193
Figura 128 – Nuvem de pontos da entrada principal do museu	194
Figura 129 – Nuvem de pontos da região apostada a entrada principal do museu, em tons de cinza.	194
Figura 130 – Vista frontal da nuvem de pontos das imagens do voo circular a 40 metros de altura.	196
Figura 131 – Vista traseira da nuvem de pontos das imagens do voo circular a 40 metros de altura.	196
Figura 132 – Vistas laterais da nuvem de pontos das imagens do voo circular a 40 metros de altura.	197
Figura 133 – Fluxograma de análise do parâmetro de qualidade Completude da nuvem de pontos geradas a partir das imagens aéreas do voo a 40 metros.....	197
Figura 134 – Vistas frontal, traseira e laterais da nuvem de pontos das imagens do voo circular a 60 metros de altura.	198
Figura 135 – Fluxograma de análise do parâmetro de qualidade Completude da nuvem de pontos geradas a partir das imagens aéreas do voo a 60 metros.....	199
Figura 136 – Vistas frontal, traseira e laterais da nuvem de pontos das imagens dos voos circulares	200

Figura 137 – Fluxograma de análise do parâmetro de qualidade Completude da nuvem de pontos geradas a partir de todas as imagens dos voos circulares.	201
Figura 138 – Indicação da sobreposição longitudinal entre as imagens consecutivas coletadas por Drone.	202
Figura 139 – Nuvem de pontos resultante do processamento das imagens coletadas pelo voo tradicional.	203
Figura 140 – Fluxograma de análise do parâmetro de qualidade Completude da nuvem de pontos geradas a partir das imagens aéreas ortogonais.....	203
Figura 141 – Nuvem de pontos resultante do processamento de todas as imagens coletadas da região da entrada principal do museu	204
Figura 142 – Nuvem de pontos em detalhes da fachada do museu, mostrando a densidade resultante do processamento das imagens.	205
Figura 143 – Vista perspectiva de uma das fachadas do museu.	205
Figura 144 – Baixa densidade da nuvem de pontos na região da parte superior do museu.	206
Figura 145 – Resultado obtido pelo processamento das imagens coletadas da fachada da entrada principal do museu.	207
Figura 146 – Comparação da mesma região antes de depois da integração da nuvem de pontos do novo processamento.	207
Figura 147 – Fluxograma de análise do parâmetro de qualidade Completude, mostrando a necessidade de voltar a campo para complementar os dados previamente levantados.	208
Figura 148 – Comparação da imagem coletada em campo (esquerda) com a nuvem de pontos em cor real (direita).....	209
Figura 149 – Nuvem de pontos renderizada por intensidade do retorno do sinal ...	210
Figura 150 – Comparação da imagem coletada em campo (esquerda) com a nuvem de pontos em cor real (direita).....	211
Figura 151 – Comparação da imagem coletada em campo (esquerda) com a nuvem de pontos em cor real (direita).....	211
Figura 152 – Visão geral do resultado do levantamento aéreo	212
Figura 153 – Visão geral do resultado do levantamento aéreo	212
Figura 154 – Fluxograma de análise do parâmetro de qualidade Fidelidade Semântica para os dois levantamentos (terrestre e aéreo).....	213

Figura 155 – Regiões escolhidas para comparação entre as medições realizadas em campo com Estação Total e as realizadas sobre as nuvens de pontos (parte superior da entrada principal do museu).	214
Figura 156 – Regiões escolhidas para comparação entre as medições realizadas em campo com Estação Total e as realizadas sobre as nuvens de pontos (parte inferior esquerda da entrada principal do museu).	214
Figura 157 – Regiões escolhidas para comparação entre as medições realizadas em campo com Estação Total e as realizadas sobre as nuvens de pontos (parte inferior direta da entrada principal do museu).	215
Figura 158 – Regiões escolhidas para comparação entre as medições realizadas em campo com Estação Total e as realizadas sobre as nuvens de pontos (parte superior e lateral da entrada principal do museu).	215
Figura 159 – Regiões escolhidas para comparação entre as medições realizadas em campo com Estação Total e as realizadas sobre as nuvens de pontos (lateral direta da entrada fachada principal do museu).	216
Figura 160 – Integração entre as nuvens de pontos da região de uma das torres. Imagem da esquerda antes da integração (nuvem de pontos do LST) e da direita integrada com a nuvem de pontos do Drone.....	220
Figura 161 – Integração entre as nuvens de pontos da região entre as duas torres. Imagem da esquerda antes da integração (nuvem de pontos do LST) e da direita integrada com a nuvem de pontos do Drone.....	220
Figura 162 – Indicação do local do corte gerado sobre a nuvem de pontos	221
Figura 163 – Vista em corte (indicado na figura 162) e resultado para os diferentes produtos analisados.	221
Figura 164 – Detalhe do corte realizado sobre as nuvens de pontos com sobreposição dos dois produtos (LSD3 em verde e Drone em laranja).	222
Figura 165 – Nuvem de pontos isoladas da região da passarela (LST em verde e Drone em laranja).....	223
Figura 166 – Interface básica do programa de modelagem e reconhecimento de primitivas a partir da nuvem de pontos.....	223
Figura 167 – Resultado estatístico do processo de reconhecimento de primitivas a partir da nuvem de pontos (LST em verde e Drone em laranja).....	224

Figura 168 – Planos modelados e sobre as nuvens de pontos e visualizados conjuntamente.....	224
Figura 169 – Edifício Paula Souza (Prédio da Engenharia Civil).....	227
Figura 170 – Entrada principal do prédio da engenharia civil.....	228
Figura 171 – Vista externa do refeitório.	228
Figura 172 – Corredor interno do prédio.	228
Figura 173 – Resultado prévio do processamento das imagens aéreas. Voo circular.	229
Figura 174 – Resultado prévio do processamento das imagens aéreas. Voo tradicional.....	230
Figura 175 – Resultado prévio do processamento de todas as imagens coletadas.	230
Figura 176 – Resultado prévio do processamento das imagens coletadas na fachada do prédio.	230
Figura 177 – Fluxograma de análise do parâmetro de qualidade Linhagem para os levantamentos terrestre e aéreo.....	231
Figura 178 – Vista perspectiva e de detalhe da cobertura do prédio representada pela nuvem de pontos do processamento do voo realizado a 50m de altura.	232
Figura 179 – Vista perspectiva e de detalhe da cobertura do prédio representada pela nuvem de pontos do processamento do voo realizado a 80m de altura.	232
Figura 180 – Vista perspectiva e de detalhe da cobertura do prédio representada pela nuvem de pontos do processamento do voo realizado a 120m de altura.	233
Figura 181 – Vista geral do processamento do voo circular a 50 metros de altura.	234
Figura 182 – Vista geral do processamento do voo circular a 80 metros de altura.	234
Figura 183 – Vista geral do processamento de todas as imagens coletadas.....	234
Figura 184 – Disposição da tomada das imagens para o levantamento da fachada do prédio.	235
Figura 185 – Nuvem de pontos resultante do processamento das imagens coletadas da fachada do prédio.....	235
Figura 186 – Indicação dos locais onde foram realizados os voos manuais.....	236
Figura 187 – Integração entre nuvens de pontos para se obter a completude esperada.	236
Figura 188 – Vista geral da nuvem de pontos (LST) uma das fachadas do prédio.	237

Figura 189 – Vista em detalhe da nuvem de pontos (LST) uma das fachadas do prédio.	237
Figura 190 – Fluxograma de análise do parâmetro Completude para os dois produtos gerados (nuvem de pontos LST e Drone).	238
Figura 191 – Fluxograma de análise do parâmetro Fidelidade Semântica para os dois produtos gerados (nuvem de pontos LST e Drone).	239
Figura 192 – Local das medições realizadas na fachada do prédio (Região A apresentada na figura 186).	240
Figura 193 – Local das medições realizadas na entrada principal do prédio (Região B apresentada na figura 186).	241
Figura 194 – Nuvens de pontos do Drone na entrada principal do prédio (Região B apresentada na figura 186).	244
Figura 195 – Nuvens de pontos do LST na entrada principal do prédio (Região B apresentada na figura 186).	244
Figura 196 – Sobreposição entre as nuvens de pontos na entrada principal do prédio. Em vermelho a nuvem de pontos do LST e em amarelo a nuvem de pontos do Drone (Região B apresentada na figura 186).	245
Figura 197 – Nuvens de pontos do Drone na Região A apresentada na figura 186.	246
Figura 198 – Nuvens de pontos do LST Região A apresentada na figura 186.	246
Figura 199 – Sobreposição entre as nuvens de pontos na fachada do prédio. Em vermelho a nuvem de pontos do LST e em amarelo a nuvem de pontos do Drone.	247
Figura 200 – Nuvem de pontos do levantamento terrestre (LST) apenas.....	249
Figura 201 – Nuvem de pontos do levantamento aéreo (Drone) apenas.....	249
Figura 202 – Nuvem de pontos integrada em tons de cinza.	250
Figura 203 – Nuvem de pontos integrada. Em vermelho está representada a nuvem de pontos do levantamento aéreo e em amarelo a nuvem de pontos do levantamento terrestre.	251
Figura 204 – Nuvem de pontos integrada em diferentes pontos de vista e separadas por tipo de nuvem de pontos.	252
Figura 205 – Nuvem de pontos integrada na região próxima ao restaurante, com diferenciação de cores.	253

Figura 206 – Nuvem de pontos integrada na região próxima ao restaurante em tons de cinza	253

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Crescimento anual relativo ao ano anterior de publicações relacionadas ao tema <i>LiDAR</i>	29
Tabela 2 – Crescimento anual relativo ao ano anterior de publicações relacionadas ao tema <i>Unmanned aerial vehicle</i>	30
Tabela 3 – Alguns equipamentos para recobrimento fotogramétrico.	50
Tabela 4 – Resumo de alguns formatos de dados LST.	90
Tabela 5 – Erro absoluto e relativo entre as medições realizadas sobre as nuvens de pontos e as medições coletadas na escultura (trena digital).	128
Tabela 6 – Volumes calculados a partir das medidas extraídas e apresentadas na tabela 5.	129
Tabela 7 – Erro absoluto entre as medições realizadas sobre as nuvens de pontos e as medições coletadas na escultura (trena digital).	147
Tabela 8 – Volumes calculados a partir das medidas extraídas e apresentadas na tabela 7.	148
Tabela 9 – Coordenadas UTM dos pontos rastreados.	155
Tabela 10 – Coordenadas topográficas dos pontos rastreados.	155
Tabela 11 – Distâncias encontradas sobre as nuvens de pontos, erros absolutos e relativos.	173
Tabela 12 – Distâncias medidas sobre as nuvens de pontos a partir de um ponto de origem.	175
Tabela 13 – Erros absoluto encontrados quando se compara as mesmas distâncias nas nuvens de pontos.	176
Tabela 14 – Erros relativos encontrados quando se compara as mesmas distâncias nas nuvens de pontos.	176
Tabela 15 – Distâncias encontradas sobre as nuvens de pontos, erros absolutos e relativos.	184
Tabela 16 – Distâncias encontradas sobre as nuvens de pontos, erros absolutos e relativos.	217
Tabela 17 – Distâncias encontradas sobre as nuvens de pontos, erros absolutos e relativos.	242

Tabela 18 – Resumo dos resultados obtidos no segundo levantamento da escultura Palas Atenas.	254
Tabela 19 – Resumo dos resultados do levantamento executado no Engenho São Jorge dos Erasmos.	255
Tabela 20 – Resumo dos resultados do levantamento executado no Museu do Ipiranga.	255
Tabela 21 – Resumo dos resultados do levantamento executado no prédio da Engenharia Civil da Escola Politécnica da USP.	256
Tabela 22 – Resumo dos resultados obtidos no levantamento executado no prédio da Engenharia Civil da Escola Politécnica da USP, desconsiderando as medições sobre a fachada da entrada principal do prédio.	256
Tabela 23 – Resumo de todos os resultados obtidos dos levantamentos aéreos e comparação com os dados obtidos com o LST.	257

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	28
1.1. O CONTEXTO DA PESQUISA.....	28
1.2. OBJETIVO.....	32
1.3. JUSTIFICATIVA.....	33
1.4. ORGANIZAÇÃO.....	33
I. PARTE TEÓRICA.....	35
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	35
2.1. LASER SCANNER TERRESTRE.....	35
2.1.1. Princípios de medição.....	37
2.1.1.1. <i>Time of flight</i> (TOF).....	39
2.1.1.2. Comparação de Fase (<i>Phase Shift</i>).....	42
2.2. DRONES/VANT/UAV/RPAS.....	44
2.2.1. Histórico.....	45
2.2.2. Características.....	48
2.2.3. Sistema inercial e de navegação (INS/GNSS).....	52
2.2.4. Sensores.....	54
2.2.5. Levantamento de campo.....	57
2.2.6. Produtos gerados.....	63
2.3. NUVEM DE PONTOS.....	64
2.3.1. Laser Scanner Terrestre.....	65
2.3.1.1. Registro das nuvens de pontos.....	67
2.3.1.1. Interseção a ré ou problema da estação livre.....	70
2.3.2. Fotogrametria e visão computacional.....	76
2.3.2.1. Visão computacional.....	78
2.3.2.2. Calibração de câmeras e orientação de imagens.....	78

2.3.2.3.	Densificação da nuvem de pontos	86
2.3.2.4.	Rede irregular triangular	87
2.4.	INTEROPERABILIDADE	89
2.5.	METODOLOGIA DE INTEGRAÇÃO DE DADOS	92
2.6.	CONTROLE DE QUALIDADE	96
2.6.1.	Linhagem	96
2.6.2.	Compleitude	99
2.6.3.	Fidelidade Semântica.....	101
2.6.4.	Consistência lógica	103
2.6.5.	Qualidade Métrica	103
II.	PARTE PRÁTICA	105
3.	ESCULTURA PALAS ATENAS (ESCOLA POLITÉCNICA DA USP)	105
3.1.	Levantamento de campo	106
3.1.1.	Primeira campanha de levantamento.....	108
3.1.1.1.	Levantamento terrestre com equipamento FARO.....	108
3.1.1.2.	Levantamento aéreo (Drone).....	109
3.1.1.3.	Análise dos resultados e controle de qualidade.....	110
3.1.1.3.1.	Linhagem.....	110
3.1.1.3.2.	Compleitude	112
3.1.1.3.3.	Fidelidade Semântica	120
3.1.1.3.4.	Qualidade Métrica.....	123
3.1.1.3.5.	Integração.....	130
3.1.2.	Segunda campanha de levantamento.....	130
3.1.2.1.	Levantamento terrestre com equipamento Trimble.....	130
3.1.2.1.	Levantamento aéreo (Drone).....	131
3.1.2.1.1.	Análise dos resultados e controle de qualidade	134

3.1.2.1.2.	Linhagem.....	134
3.1.2.1.3.	Compleitude	135
3.1.2.1.4.	Fidelidade Semântica	139
3.1.2.1.5.	Qualidade posicional e métrica.....	146
3.1.2.1.6.	Integração.....	148
4.	RUÍNAS ENGENHO SÃO JORGE DOS ERASMOS (MONUMENTO NACIONAL)	
	152	
4.1.	Breve histórico	152
4.2.	Levantamento Geodésico e Topográfico	153
4.3.	Levantamento da Nuvem de Pontos.....	156
4.4.	Levantamento aéreo (Drone).....	159
4.5.	Análise dos resultados e controle de qualidade.....	162
4.5.1.	Linhagem	163
4.5.2.	Compleitude.....	164
4.5.3.	Fidelidade Semântica.....	167
4.5.1.	Qualidade Métrica	171
4.5.1.	Integração	177
4.5.2.	Conclusões e levantamento alternativo.....	182
5.	MUSEU PAULISTA (MUSEU DO IPIRANGA).....	186
5.1.	Levantamento terrestre.....	187
5.2.	Levantamento aéreo (Drone).....	189
5.3.	Análise dos resultados e controle de qualidade.....	191
5.3.1.	Linhagem	191
5.3.1.	Compleitude.....	192
5.3.2.	Fidelidade Semântica.....	209
5.3.3.	Qualidade Métrica	213
5.3.4.	Integração	219

6. EDIFÍCIO PAULA SOUZA (PRÉDIO DA ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA USP).....	226
6.1.1. Levantamento terrestre	227
6.1.1. Levantamento aéreo	229
6.2. Análise dos resultados e controle de qualidade.....	231
6.2.1. Linhagem	231
6.2.2. Completude	232
6.2.3. Fidelidade Semântica.....	239
6.2.4. Qualidade Métrica	240
6.2.5. Integração	248
7. ANÁLISE FINAL, CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	254
7.1. Análise final	254
7.2. Conclusões	258
7.3. Trabalhos futuros.....	260
REFERÊNCIAS.....	264

1. INTRODUÇÃO

1.1. O CONTEXTO DA PESQUISA

A presente tese situa-se na área de Informações Espaciais/Topografia e estuda a integração e o controle de qualidade de dados provenientes de equipamentos relativamente recentes: Laser Scanner Terrestre e Drone, pensando em soluções de baixo custo.

Com o desenvolvimento tecnológico recente, surgiram técnicas e equipamentos de medição com a finalidade de facilitar a obtenção de dados para posterior geração de mapas, cartas topográficas e outros produtos. A história da Topografia e da Geodésia comprovam que advento de alguns equipamentos modificaram profundamente os métodos de levantamento, propiciando medições mais precisas, confiáveis, cômodas e muitas vezes mais econômicas (GONÇALES, 2007), basta pensar nas Estações Totais, em tecnologias que usam *Light Detection And Ranging (LiDAR)* e no *Global Navigation Satellite System (GNSS)*.

Com o advento do laser, medições de distâncias puderam ser realizadas remotamente, com mais rapidez e precisão. Essa evolução tecnológica fez com que os levantamentos se tornassem mais rápidos (aumentando a produtividade) e precisos.

Nos últimos anos (tipicamente a partir de 2003), o uso de equipamentos de levantamento através de um sistema de varredura a laser, comumente chamado de *Laser Scanner Terrestre (LST)* vem sendo empregado para diferentes aplicações topográficas. Esse equipamento utiliza uma tecnologia óptica de detecção remota que mede propriedades da luz refletida para obter a distância e/ou outras informações a respeito de um determinado objeto distante.

Segundo SCOPUS (2019) um crescimento de 42% na quantidade de publicações realizadas desde 2010 em temas relacionados com a palavra-chave *LiDAR* (pesquisa realizada em fevereiro de 2019). A tabela 1 mostra o crescimento de publicações relacionadas ao tema.

Tabela 1 – Crescimento anual relativo ao ano anterior de publicações relacionadas ao tema *LiDAR*.

Ano	Publicações	Aumento anual
2010	1696	-
2011	2005	15,41%
2012	2191	8,49%
2013	2419	9,43%
2014	2482	2,54%
2015	2836	12,48%
2016	3278	13,48%
2017	3293	0,46%
2018	3797	13,27%

Aliado ao crescimento de publicações científicas, o aumento do uso dessa tecnologia para a Engenharia é evidente. Devido à rapidez e à grande/vasta quantidade de informação adquirida com essa tecnologia, a área de aplicação se estende, mas não está limitada a:

- a) levantamentos de como construído (*as-built*);
- b) restauração e preservação de monumentos históricos;
- c) sítios arqueológicos;
- d) monitoramento de estruturas;
- e) engenharia reversa;
- f) controle de qualidade na indústria;
- g) criação de maquetes eletrônicas para realidade virtual;
- h) levantamentos planialtimétricos;
- i) *retrofit* no âmbito da arquitetura;
- j) cálculo de volumes.

Embora esse tipo de equipamento possa ser utilizado para uma diversidade de aplicações, algumas características físicas podem dificultar ou até inviabilizar seu uso para alguns tipos de aplicações.

Locais altos, de difícil acesso ou sem visibilidade direta a partir do equipamento, podem inviabilizar um determinado tipo de levantamento, pois diversas regiões não são levantadas, como topo de estruturas e coberturas de ruínas.

Uma solução para um recobrimento total desses tipos de elementos pode ser a instalação de estruturas auxiliares (por exemplo, andaimes) para situar o equipamento em posição mais alta. Essa alternativa nem sempre é a melhor solução, pois demanda tempo para a montagem dos andaimes, existem riscos no transporte do equipamento e o caso mais grave, acidentes de pessoas como quedas.

Como alternativa, ou complementação dos levantamentos, pode-se realizar um recobrimento aéreo utilizando veículos não tripulados equipados com câmeras de alta resolução, sistema GNSS e sistema inercial. Tais equipamentos são conhecidos como Drones, Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) sigla que foi criada da expressão em inglês *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) e segundo a legislação brasileira, *Remotely Piloted Aircraft* (RPA). No presente trabalho, esses termos serão utilizados indistintamente e também Drones, por comodidade.

Esses equipamentos podem coletar tanto nuvens de pontos do local como imagens digitais, dependendo do tipo de sensor instalado no veículo. Para o caso de imagens digitais (fotos aéreas com sobreposição), pode-se obter uma nuvem de pontos por meio de pós processamento.

Uma pesquisa realizada em fevereiro de 2019, segundo SCOPUS (2019) a palavra-chave *Unmanned aerial vehicle* mostra que as publicações de artigos científicos relacionadas a veículos não tripulados tiveram um crescimento significativo desde 2010. A tabela 2 mostra essa evolução.

Tabela 2 – Crescimento anual relativo ao ano anterior de publicações relacionadas ao tema *Unmanned aerial vehicle*.

Ano	Publicações	Aumento anual
2010	1266	-
2011	1303	2,84%
2012	1509	13,65%
2013	1975	23,59%
2014	2170	8,99%
2015	3375	35,70%
2016	4020	16,04%
2017	5246	23,37%
2018	6094	13,92%

Analisando a tabela acima nota-se que em 2015 houve um aumento de 36%, 16% em 2016, 23% em 2017 e no ano de 2018 um acréscimo de 14%, quando comparado ao ano anterior.

O aumento no interesse acadêmico relativo a esse assunto está associado (em parte) ao crescimento comercial e profissional na utilização de equipamentos autônomos para mapeamentos. Sistemas aéreos autônomos estão sendo utilizados para os mais diversos tipos de aplicações, dentre elas está o levantamento para fins de mapeamentos, com a característica de acesso fácil a locais e pontos inacessíveis ao LST, podendo ser assim uma fonte de dados complementar.

Sabe-se que os equipamentos LST têm ótima confiabilidade na coleta da nuvem de pontos e pouca mobilidade. Com o Drone a mobilidade e o alcance em pontos de difícil acesso são uma grande vantagem, mas os dados processados possuem uma qualidade inferior em termos geométricos, como se mostrará na presente pesquisa. A integração dos dados oriundos desses dois métodos de levantamentos podem ser uma alternativa, obtendo o melhor de cada tecnologia: precisão com o LST terrestre e maior cobertura com o Drone.

Alguns trabalhos científicos que fazem essa integração foram publicados mas ainda não há uma metodologia que comprove e padronize a qualidade dos resultados que podem ser obtidos, dentre eles pode-se citar Adna, et al. (2019), Aicardi et al. (2019) e Brum et al. (2017).

Portanto, o desafio é a integração de nuvens de pontos oriundas das duas tecnologias com diferentes precisões e sistemas de referência. Tratando-se de tecnologias e métodos de coleta diferentes pode ocorrer perda de informação e de qualidade, e como consequência uma deterioração do produto.

No presente trabalho procura-se uma solução de baixo custo e que exija pouco conhecimento especializado do usuário, situação que é muito comum em nosso meio. Soluções mais precisas poderiam ser pensadas e pesquisadas, pensando-se por exemplo na utilização de GPS relativo ou diferencial, ou mesmo utilizando pontos de apoio de campo, pré-sinalizados em campo, caracterizando o voo apoiado, como na aerofotogrametria clássica. Mas isso exigiria um nível de conhecimento não acessível ao usuário médio em que se está pensando. A ideia é pesquisar e fornecer a esses usuários os limites dessa tecnologia, nessas condições, para que possa orientar-se quanto ao atendimento ou não das necessidades das aplicações concretas. Caso não

atenda aos requisitos necessários de qualidade (posicional, de integridade e outros), esse usuário teria que conscientizar-se da necessidade de procurar uma solução mais robusta, como as apontadas.

A hipótese de trabalho é que, integrando de forma satisfatória os dados desses dois sistemas, diversas aplicações em engenharia podem tornar-se viáveis e econômicas, mais do que cada uma em separado e não exigindo uma solução mais dispendiosa e exigente em termos de conhecimentos de fotogrametria, geodésica e cartografia. Para isso, impõe-se o desenvolvimento de uma metodologia de integração, com um adequado controle e avaliação de qualidade do produto, como se propõem no presente trabalho.

1.2. OBJETIVO

Como objetivo geral, espera-se realizar a integração dos dados entre LST e Drones e definir métodos de controle de qualidade na integração dos mesmos, na solução tecnológica imaginada, sem pontos de apoio de campo nem GPS diferencial.

Quatro parâmetros, adaptados da metodologia clássica, podem ser considerados no controle da qualidade de dados para a cartografia, são eles (LIMA, 2012 ou BURITY et al., 1999):

Linhagem: contém o detalhamento dos passos seguidos na criação dos dados, tudo que se refere à descrição do material de origem, métodos de derivação utilizados, transformações executadas e comentários;

Compleitude: O conceito de Compleitude pode ser aplicado tanto às feições quanto aos atributos desta. Quando aplicado às feições, indica se todas as feições que devem ser representadas numa base cartográfica estão presentes ou não. Para os atributos, o nível de conhecimento sobre estes indica a Compleitude do mesmo;

Fidelidade Semântica: Descreve a diferença semântica entre objetos geográficos e a percepção da realidade;

Consistência lógica: Manutenção de relações lógicas e topológicas consistentes na base de dados correspondente ao mapa, nuvem de pontos, modelo digital ou Sistema de Informação Geográfica.

Como dito, será necessário adaptar esses quesitos ao caso concreto de que em que se ocupa a presente tese.

Para a parte prática serão feitos alguns levantamentos representativos com esses dois tipos de equipamentos: em sítios arqueológicos, construções civis, monumentos, esculturas. E com eles poderão ser testados e implementados os objetivos específicos desta tese, que são:

- a) analisar a qualidade da nuvem de pontos gerada pelo LST, quantificando a qualidade geométrica;
- b) analisar a qualidade da nuvem de pontos gerada pelas imagens coletadas com o levantamento aéreo (Drone), quantificando a qualidade geométrica;
- c) analisar e propor uma metodologia de integração das nuvens de pontos;
- d) avaliar a qualidade do produto final comparando-o com os dois produtos originais isoladamente.
- e) avaliar demais quesitos de qualidade dos diversos produtos.

1.3. JUSTIFICATIVA

Pelo número crescente de publicações científicas relacionada aos temas que serão discutidos nessa tese de doutorado e popularização do uso dessas tecnologias, o desenvolvimento desse trabalho se justifica pela falta de estudos referentes à integração dos dados provenientes dessas duas tecnologias (LST e VANTs/Drones), identificando que produtos podem ser gerados, que precisões podem ser alcançadas e para que finalidades a integração atende. Além disso, há compatibilidade entre outras pesquisas que estão sendo realizadas pelo Laboratório de Topografia e Geodesia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LTG/POLI/USP).

No ano de 2018 uma parceria entre a fabricante de equipamentos e softwares Trimble e a Escola Politécnica da USP foi firmado possibilitando o uso de equipamentos e programas para o desenvolvimento da tese.

1.4. ORGANIZAÇÃO

A presente tese foi dividida em duas partes, a parte teórica apresenta, no capítulo 2, toda a revisão bibliográfica necessária para o desenvolvimento da mesma,

mostrando as tecnologias envolvidas na coleta e processamento de dados, produtos gerados e tecnologias de transferência de informação entre os programas (interoperabilidade), bem como as transformações matemáticas para a integração dos dados.

A segunda parte, prática, apresenta 4 capítulos detalhando os levantamentos e análises realizados sobre os campos de provas utilizados. Foram escolhidos quatro locais para desenvolver a pesquisa: Escultura Palas Atenas, Engenho São Jorge dos Erasmos, Edifício-Monumento do Museu do Ipiranga e o prédio da Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Em todos os locais, foram realizados levantamentos terrestres e aéreos e uma análise completa foi realizada quanto ao controle de qualidade dos produtos gerados assim como testes de integração de dados.

Por último, o capítulo 7 apresenta as conclusões finais e as recomendações para trabalhos futuros.

I. PARTE TEÓRICA

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. LASER SCANNER TERRESTRE

Um problema clássico da Topografia é o levantamento de coordenadas tridimensionais com rapidez e precisão. A integração de medidores eletrônico de distâncias (MED) e direções (teodolitos) fez com que fosse possível coletar as coordenadas tridimensionais de objetos. Esses equipamentos são as conhecidas Estações Totais.

Os medidores a laser foram significativamente melhorados e passaram a realizar a medição de distância sem a necessidade de refletores, o que permitiu a determinação remota de coordenadas. A evolução tecnológica de controladores e servo mecanismos, aplicada a estes equipamentos, desenvolveu a estação total robotizada, permitindo a medição programada de pontos, mesmo sem operador, como destaca Tommaselli (2003).

Com o aperfeiçoamento destes princípios foi desenvolvido um equipamento próprio para vários tipos de levantamentos. Caracteriza-se pela coleta de informação remota (sem a necessidade de refletores) e por obter pontos de todo o objeto automaticamente, ao contrário de estações totais, onde as medidas são efetuadas em pontos específicos (WUKTE, 2006).

O sistema LST coleta, além da distância entre o aparelho e o objeto, um ângulo horizontal e outro vertical para poder calcular as coordenadas tridimensionais de cada ponto coletado.

As coordenadas tridimensionais dos pontos sobre uma superfície são geradas através de pulsos de laser gerados e emitidos pelo sistema, e com auxílio de um espelho de varredura são direcionados, atingindo a superfície dos objetos em vários pontos. Estes objetos refletem o pulso incidente e parte do pulso volta para o sistema. Com isto, a distância entre o sensor e o objeto é determinada através do intervalo de tempo entre a emissão e a reflexão (retorno) do pulso (DALMOLIN; SANTOS, 2004), sendo possível também servir-se da fase para essa operação, como pode ser visto no decorrer deste capítulo.

Algumas características importantes desse tipo de equipamento são citadas por Tommaselli (2003):

- a) é um método ativo que não depende da luz visível refletida;
- b) a operação é remota, o que significa que o objeto não precisa ser tocado;
- c) o princípio geométrico de cálculo das coordenadas pode ser a triangulação ou irradiação, dependendo do modelo, mas em ambos os casos a varredura pode ser feita com apenas uma estação por visada;
- d) a resposta é disponibilizada em tempo real, ou seja, após o término da varredura o operador tem à sua disposição milhões de pontos com coordenadas conhecidas, estando apto a fornecer respostas sobre os objetos, como distâncias entre peças, dimensões, volumes, verticalidade de superfícies, etc.;
- e) alta densidade de pontos coletados e, conseqüentemente, boa redundância para a descrição dos objetos;
- f) é possível realizar o controle de qualidade durante a coleta e refazer a varredura, se necessário;
- g) a acurácia das coordenadas é homogênea, ou seja, a qualidade dos pontos depende fundamentalmente da distância do laser ao objeto;
- h) Operação *stand-alone* simples e flexível; basta um operador para posicionar e operar o sistema;
- i) é possível combinar vários modelos numéricos (nuvens de pontos) gerados de diferentes posições, o que permite cobrir a superfície visível dos objetos;
- j) alguns sistemas possuem programas para a obtenção de descrições paramétricas dos objetos por ajuste da nuvem de pontos, o que permite uma qualidade ainda maior que a dos pontos isolados; além disto, devido à alta densidade de pontos as ferramentas automáticas de alguns sistemas fazem a busca pelos pontos pertencentes aos mesmos objetos ou superfícies com pouca interveniência do operador, o que aumenta substancialmente a produtividade.

Como resultado final, um levantamento com LST fornece uma nuvem de pontos de todo o objeto ou região escaneada. A densidade e precisão dessa nuvem de pontos

é dependente do método de coleta, do tipo/modelo de equipamento e da metodologia de campo empregada.

2.1.1. Princípios de medição

O levantamento de campo e a nuvem de pontos gerada são diretamente influenciados pelo tipo de equipamento que será utilizado. Segundo Schulz (2007), os sistemas óticos de medição utilizados nos equipamentos LST podem ser divididos tecnicamente em três categorias: Interferometria; *time-of-flight* (TOF) e triangulação.

A figura 1 mostra a classificação desses equipamentos quanto ao método de medição.

Figura 1- Classificação de equipamentos Laser Scanner.

Fonte: Adaptado de Schulz (2007)

A operação dos sistemas LST depende da técnica de medição. Interferometria e triangulação são utilizadas para levantamentos de curtas distâncias. A frequência modulada está indicada para levantamentos de pequenas e médias distâncias, a amplitude modulada opera em médias distâncias e o método TOF é utilizado para grandes distâncias entre o equipamento e o objeto (SCHULZ, 2007).

A triangulação é adequada para a reconstrução de objetos pequenos ou com muitos detalhes (por exemplo: estátuas e esculturas) e a distância máxima de operação depende da base entre o sensor laser e o sensor denominado *charge coupled device* (CCD). Como a base não é ajustável, essa distância máxima é limitada para atender a precisão, sendo no máximo 10 metros. Nesse caso, a acurácia está no nível submilimétrico (KASPAR et al., 2004).

A figura 2 mostra a relação entre a distância e a precisão para algumas aplicações, indicando também o tipo de técnica de medição indicada e, abaixo a aplicação típica.

Figura 2 - Técnicas de medição com a relação entre distância e precisão e algumas aplicações típicas.

Fonte: Adaptado de Schulz (2007).

Analisando a figura 2, conclui-se que a precisão é inversamente proporcional a alcance do levantamento, aproximadamente.

Através da técnica TOF, o levantamento pode ser realizado utilizando as observações diretas ou indiretas. O método considerado como levantamento direto utiliza como observação principal, o tempo que o sinal emitido e refletido demora para retornar ao sensor. O método indireto utiliza a modulação da amplitude ou frequência

da onda eletromagnética enviada e comparada com a amplitude ou frequência recebida pelo sensor.

No presente trabalho serão abordados apenas os métodos de levantamentos utilizados em Topografia/Geodésia, ou seja, as técnicas de medição TOF e *phase shift* (comparação de fase). Para mais informações sobre os métodos de triangulação, Interferometria e de frequência modulada, pode-se consultar GONÇALES (2007), SCHULZ (2007), WUTKE (2006) e TOMMASELLI (2003).

2.1.1.1. *Time of flight* (TOF)

O método conhecido pelo termo em inglês *Time of flight* assume que a velocidade do pulso laser emitido é constante durante todo o percurso e determina a distância do sensor ao objeto através da medição do tempo entre a emissão e retorno do pulso laser (LIM et al., 2005).

As medições realizadas por esse princípio fazem com que o pulso eletromagnético seja emitido pelo transmissor ao mesmo tempo em que um contador eletrônico é iniciado. O pulso é refletido pelo objeto e retorna ao receptor, momento em que o contador interrompe a contagem. Desse modo, conhecendo a velocidade de propagação do sinal, é possível determinar a distância percorrida pelo pulso laser, que é o dobro da distância ao objeto. A figura 3 exemplifica essa operação.

Figura 3 – Esquema básico da técnica de medição TOF.

A distância é obtida pela expressão matemática abaixo:

$$\rho = \frac{c}{2} \cdot \Delta t \quad (1)$$

Onde:

ρ é a distância do sensor ao objeto;

c é a velocidade da luz no vácuo e;

Δt é o tempo de ida e volta do pulso laser.

A variável tempo deve ser medida com bastante precisão para que não resulte em incerteza na distância. Como exemplo, considerando que a velocidade de propagação do pulso é de 3×10^8 m/s (velocidade da luz), para uma distância de 30 m, o tempo de retorno do sinal é de 1×10^{-7} s. Um erro de 1×10^{-11} s, implicaria num erro de 3 mm, o que pode ser muito para determinadas aplicações. (GONÇALES, 2007).

Além da distância (ρ), o equipamento coleta informações angulares da visada, que correspondem à inclinação da visada (α) com relação ao referencial do equipamento e a rotação (θ) com relação a uma origem, como mostra a figura 4.

Figura 4 – Esquema das observações LS, com a medição de teta, alpha, ro.

Fonte: Adaptado de Gordon et al., (2004).

A partir dessas coordenadas polares do ponto P, é possível calcular as coordenadas X, Y, Z do ponto, no sistema com origem no centro do equipamento, conforme a equação 2.

$$\begin{aligned} X &= \rho * \cos\alpha * \sin\theta \\ Y &= \rho * \cos\alpha * \cos\theta \\ Z &= \rho * \sin\alpha \end{aligned} \quad (2)$$

Esses equipamentos também coletam a intensidade da energia refletida pelo objeto e com isso se obtém uma imagem digital (colorida), que pode ser útil para diversas aplicações, como se pode ver em TOMMASELLI (2003).

Os pulsos laser são direcionados através de um sistema de espelhos que, por rotação ou oscilação, o emitem para todas as direções. Um servo motor auxilia nesse processo, rotacionando o equipamento em torno de seu eixo.

A vantagem na utilização desse método sobre os demais consiste na possibilidade de conseguir levantar pontos de centenas de metros a quilômetros de distância a partir do sensor.

A figura 5 mostra um exemplo de equipamento do fabricante Riegl (modelo VZ 6000), que coleta dados a uma distância máxima de 6000 metros com uma taxa de gravação de 222.000 pontos por segundo.

Figura 5 – Laser Scanner Modelo VZ 6000.

Fonte: <http://www.riegl.com>

Outro exemplo que pode ser citado é o modelo TX8 da fabricante Trimble (Figura 6). Esse equipamento coleta pontos numa taxa que pode chegar até 1.000.000 de pontos por segundo a no máximo 120 metros de distância.

Figura 6 – LST Modelo TX8 (Trimble).

Fonte: www.trimble.com

2.1.1.2. Comparação de Fase (*Phase Shift*)

Essa técnica de medição compara a fase da onda laser emitida pelo sensor com a refletida pelo objeto para calcular a distância e assim as coordenadas X, Y, Z dos pontos.

Esse método é denominado pelo termo inglês *Phase Shift* ou pela expressão em português conhecida como diferença de fase. O feixe de laser (com seu comprimento de onda conhecido) é emitido a partir de uma fonte. Uma parte deste feixe laser é refletido do alvo para o equipamento.

O sinal retornado é então comparado, quanto à fase, com o sinal emitido. A diferença entre os dois sinais é a diferença de fase. A distância s entre o sensor e o objeto é proporcional à diferença de fase ($\Delta\phi$), e o tempo de viagem do pulso laser é dados pela equação abaixo:

$$\Delta t = \frac{\Delta\phi}{2\pi f} \quad (3)$$

Desse modo a distância entre o sensor e o objeto é determinado pela seguinte equação:

$$s = \frac{c}{2} \cdot \frac{\Delta\phi}{2\pi f} \quad (4)$$

Onde f é a frequência da onda do sinal e c é a velocidade da luz.

Segundo Schulz (2007), se a onda que define o intervalo máximo de tempo é maior do que um período, um múltiplo de N do comprimento de onda (λ) deve ser adicionado ao intervalo.

Portanto a distância absoluta é obtida através da expressão:

$$s = \frac{1}{2} \left(N \cdot \lambda + \lambda \frac{\Delta\phi}{2\pi} \right) \quad (5)$$

Onde:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (6)$$

N = Número inteiro de comprimento de ondas

$\Delta\phi$ = Diferença de fase

Para não haver ambiguidade na medição da distância, equipamentos que coletam informação usando essa metodologia geralmente utilizam diferentes comprimentos de onda do feixe laser. A determinação da distância é feita comparando as ondas emitidas e as mesmas ondas recebidas no equipamento.

Como exemplo, a figura 7 mostra o equipamento do fabricante Faro, que utiliza três comprimentos de ondas diferentes para determinar a distância do sensor ao objeto ($\lambda = 76 \text{ m}$, $\lambda = 9,6 \text{ m}$ e $\lambda = 1,2 \text{ m}$).

Figura 7 - Exemplo de medição através da técnica *phase shift*.

Fonte: Gonçalves (2007).

De acordo com as informações técnicas do modelo Focus 3DX 330 HDR, o equipamento coleta dados entre 0,6 m e 330 m de distância do sensor. Por exemplo, e acompanhando pela figura 7, um objeto a uma distância de 2,000 metros é medido na modulação 1,2 metros, sendo composto por um ciclo completo (1,200 m) mais 0,800 metros no segundo ciclo. Outro para um objeto a 13,000 metros de distância da fonte de radiação laser será registrado no segundo ciclo de 9,600 metros, sendo que a precisão é conseguida através da medição feita na modulação de 1,200 m, mais a fração de 1,000 m, ou seja, $9,600 + 2 \times 1,200 + 1,000 = 13,000$ metros.

2.2. DRONES/VANT/UAV/RPAS

Na literatura inglesa, todo o veículo aéreo sem nenhuma pessoa a bordo para controlá-lo é denominada de *Unmanned Aerial vehicles* (UAVs). Outros termos também são utilizados pela comunidade científica, tais como: *Remotely Piloted Vehicle* (RPV), *Remotely Operated Aircraft* (ROA), *Remote Controlled Helicopter* (RC-H) e *Unmanned Vehicle Systems* (UVS).

No Brasil utilizam-se fundamentalmente dois termos: Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), quando a aeronave possui asas fixas e Drones, quando a propulsão é feita por hélices. A termo *Remotely Piloted Aircraft Systems* (RPA), é o nome utilizado pela legislação brasileira (ICA 100-40) e regulamentadas pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). Apenas a título de curiosidade, o nome Drone tem origem na literatura inglesa, significa zangão. Essa nomenclatura surgiu devido ao barulho feito por suas hélices serem parecidas com a do inseto.

Austin (2011), comenta que os VANT's não devem ser confundidos com Drones, como geralmente é difundido na mídia. Apesar de um Drone realizar um voo sem tripulação o sistema não possui inteligência. Apenas é lançado através uma missão pré-programada e retorna à sua base. Os dados obtidos (por exemplo, imagens ou nuvem de pontos) geralmente só são recuperados após seu retorno ao ponto de partida.

Segundo esse mesmo autor, VANT's são capazes de se comunicar com a estação de controle, transmitir informações de suas condições, tais como, temperatura de seus componentes, motores e eletrônica, quantidade de combustível ou bateria. Tais sistemas são ainda capazes de tomar ações corretivas durante o voo e alertar o operador sobre esse evento.

Como observação final, vale dizer que um sistema não tripulado é composto por um número de subsistemas que incluem a aeronave, sua carga útil, estação de controle, estação de controle remoto, equipamentos de decolagem e pouso das aeronaves (quando aplicável), subsistemas de comunicação, transportes e etc. (AUSTIN, 2011)

2.2.1. Histórico

Assim como muitas outras tecnologias, o desenvolvimento de VANTs foi fortemente motivado por aplicações militares. Segundo Eisenbeiss (2004), durante a segunda guerra mundial, muitas nações iniciaram programas secretos para desenvolver sistemas de voos não tripulados com o objetivo primário de segurança, reconhecimento, e penetração em terrenos hostis. Isso evitava os riscos a que estavam sujeitos os pilotos e eventual tripulação.

Durante muitos anos o foco de pesquisa dos Estados Unidos em grandes sistemas (e caros) para as diversas aplicações estava na contração de países como Israel e África do Sul, que o foco principal das pesquisas estava em VANTs de pequenos formatos que seriam utilizados para aplicações específicas. Desde 1995 uma nova diretriz do *Department of Defense* americano (DoD) promove e financia o avanço conceitual e tecnológico de veículos aéreos não tripulados de diferentes tamanhos que servem para diferentes aplicações. Desde então o número de VANTs têm crescido consideravelmente com o auxílio e apoio de universidades, organizações militares e empresas privadas (ECK, 2001).

Segundo Eisenbeiss (2004), em Fotogrametria, o primeiro experimento com VANT foi desenvolvido em 1979 por Przybilla e Wester-Ebbinghaus. Os primeiros testes foram realizados com uma aeronave da empresa Hegi. Essa aeronave possuía 3 metros de comprimento, envergadura de 2,6 metros e conseguia carregar 3 kg de equipamentos. Os equipamentos de navegação utilizados foram da empresa *Lindhof Technika*.

Foi realizado um levantamento aéreo com escala da imagem de 1:1000 ou superior, com velocidade de abertura do obturador de 1/1000s. A velocidade da aeronave foi estabelecida para que essas características resultassem numa boa qualidade das imagens. Os resultados não foram satisfatórios devido às vibrações causadas pelo rotor da aeronave. A figura 8 mostra o modelo criado em 1979.

Figura 8 – Aeronave modelo empresa Hegi.

Fonte: (EISENBEISS, 2004)

Os voos foram feitos a 150 metros de altura com uma velocidade de 40km/h em um sítio arqueológico e algumas regiões com construções civis. Levantamentos terrestres também foram realizados. Entretanto, devido à grande vibração da aeronave, os autores propuseram o uso de um sistema que minimizava esse problema.

Devido a isso, em 1980 Wester-Ebbinghaus usou o primeiro helicóptero (de pequeno porte) não tripulado para Fotogrametria. Esse helicóptero era do modelo Schlueter Bell 222 com capacidade de transportar até 3 kg de equipamentos. Para compensar as vibrações, foram instaladas paredes de poliestireno. Câmeras de médio formato modelos *Rolleiflex* SLX ou *Hasselblad* MK 20 podiam ser instaladas no helicóptero. Todo o voo era controlado por um operador, inclusive a altitude e o disparo da câmera instalada.

O helicóptero era capaz de voar de 10 a 100 metros de altura e a altura programada de voo podia ser mantida dentro de um grau de confiança de 90% usando o mesmo sistema de navegação da aeronave. Uma estrutura metálica (Figura 9), datada de 1890 localizada na cidade de *Wuppertal*, Alemanha, foi documentada utilizando esse sistema não tripulado.

Figura 9 – Monotrilho The *Schwebebahn Wuppertal* documentado através de um levantamento utilizando um sistema não tripulado

2.2.2. Características

Sistemas aéreos não tripulados podem ser classificados de acordo com suas características. Peso, resistência, altitude máxima, velocidade, tipo de motor e a capacidade de transporte (peso que pode ser carregado) são importantes especificações que podem distinguir os sistemas e possibilitam ao usuário final escolher o melhor equipamento para sua necessidade.

Muitas dessas classificações são importantes para aplicações militares, em que as aeronaves são maiores, mais pesadas e com grande autonomia de voo. No presente capítulo serão analisados apenas os aspectos importantes em VANTS/Drones utilizados para levantamentos.

Equipamentos com propulsão de multirotores são os mais populares e além do uso em projetos de Engenharia são amplamente utilizados em produções cinematográficas, publicitárias e até em atividades recreativas. Esses equipamentos têm decolagem e pouso na vertical e possuem uma autonomia média de voo de 25 minutos. A figura 10, mostra o equipamento do fabricante DJI, modelo *phantom 4 Advanced*, utilizado na presente pesquisa

Figura 10 – *Phantom 4 Advanced* do fabricante DJI.

Fonte: <https://www.dji.com/br>

Os VANTS de asa fixas têm uma autonomia de voo de cerca de 50 minutos em média e o sistema de decolagem geralmente emprega uma catapulta. O pouso, por sua vez é feito com o auxílio de paraquedas ou através de sua projeção direta ao solo. A figura 11 mostra o VANT modelo Echar do fabricante Xmobots

Figura 11 – Echar 20B.

Fonte: <https://xmobots.com.br>

A tabela 3 lista os principais equipamentos disponíveis pesquisados em maio de 2019. Foi montada para o presente trabalho através da consulta ao site dos fabricantes e de acordo com os critérios escolhidos (colunas). É importante salientar que a evolução dos equipamentos é constante e os fabricantes, em busca de diferenciação comercial e tecnológica, lançam novos equipamentos constantemente.

Tabela 3 – Alguns equipamentos para recobrimento fotogramétrico.

Fabricante	Modelo	Alcance da telemetria	Velocidade máxima	Autonomia de Voo	Imagem	Dimensões	Tipo de Asa	Navegação	Peso	Sensores
DJI	Phantom 4	7 km	72 km/h	30 min	20 mp RGB	350 mm (diagonal)	Multirotor	GPS / GLONASS	1380 g	RGB
DJI	Phantom 3	4 km	58 km/h	25 min	12 mp RGB	350 mm (diagonal)	Multirotor	GPS / GLONASS	1236 g	RGB
DJI	Mavic Air	10 km	68 km/h	20 min	12 mp RGB	213 mm (diagonal)	Multirotor	GPS / GLONASS	430 g	RGB
DJI	Inspire 2	7 km	94 km/h	27 min	Variável	605mm (diagonal)	Multirotor	GPS / GLONASS	4250 g	RGB/Infravermelho
HEXAGON	Aibot	5 km	64 km/h	24 min	Variável	2225 mm (diagonal)	Multirotor	GPS	15,1 kg	Variável
XMOBOTS	Arator 5B	ND	57,6 km/h	87 min	Variável	1,2 m de envergadura	Fixa	GPS / GLONASS	3,5 KG	Variável
XMOBOTS	Echar 20D	ND	60 km/h	180 min	Variável	2,13 m de envergadura	Fixa	GPS / GLONASS	7,8 kg	Variável
XMOBOTS	Nauru 500B	ND	108 km/h	10 horas	Variável	ND	Fixa	GPS / GLONASS	25 kg	Variável
TRIMBLE	ZX5	2 km	ND	20 min	Variável	980 mm (diagonal)	Multirotor	GPS / GLONASS	5 kg	Variável
TRIMBLE	UX5HP	5 km	88 km/h	35 min	36 mp	1 metro de envergadura	Fixa	GPS / GLONASS/BEIDOU/GALILEO	2,9 kg	RGB
TRIMBLE	UX5	5 km	80 km/h	50 min	24 mp	1 metro de envergadura	Fixa	GPS / GLONASS/BEIDOU/GALILEO	2,5 kg	RGB
SKYDRONES	Quantix	ND	65 km/h	45 mim	ND	1 metro de envergadura	Fixa	GPS	2,3 kg	RGB/Multiespectral
SANTOS LAB	Parrot	2 km	46,8 km/h	30 min	ND	1,2 m de evergradura	Fixa	ND	940 g	RGB/Multiespectral
RIEGL	Ricopter	3 km	50 km/h	30 min	Variável	2640 mm (diagonal)	Multirotor	ND	11 kg	Variável

De acordo com a tabela 3, percebe-se que a oferta desse tipo de equipamento é muito grande. Existem equipamentos que podem ser utilizados para diferentes finalidades, usando diferentes sensores e metodologia de voos.

Analisando a tabela 3 nota-se que equipamentos com asa fixa se deslocam com mais velocidade e por consequência necessitam de um alcance de controle maior (telemetria). O peso do equipamento não está relacionado a capacidade de carga útil. Para equipamentos que possibilitam a troca de sensores, por exemplo, é necessário conhecer qual a capacidade de carregamento possível sem prejudicar o voo. Os sensores mais comuns utilizados são as câmeras com três bandas espectrais (RGB), no entanto outros sensores podem ser utilizados alterando as aplicações em que podem ser empregados. Alguns possibilitam utilizar sensores *LiDAR* para coleta direta de nuvem de pontos, por exemplo: Ricopter da fabricante Riegl.

Alguns equipamentos, além de armazenar as imagens coletadas, também guardam os dados auxiliares coletados durante o voo, como por exemplo a posição do centro perspectivo das imagens coletadas e informações referentes ao voo executado. Isso possibilita melhoria nos resultados, podendo-se considerar um voo apoiado, segundo analogia com a aerofotogrametria clássica (a posição do centro perspectivo de cada foto é conhecida com certa precisão, bem como a orientação/atitude da câmera).

Pensando em obras lineares, o equipamento deve fazer ao menos uma faixa de voo com superposição para obter a estereoscopia. Então a distância máxima de ida e volta se obtém multiplicando a velocidade (v) pela autonomia (a), segundo a fórmula (1)

$$d = v \cdot a \quad (7)$$

Por exemplo, o Phantom 4 tem autonomia de voo de 30 min e velocidade de cruzeiro de 72 km/h, dessa forma consegue voar no máximo 36 km em linha reta. No entanto, o alcance máximo da telemetria limita essa distância a 7 km. Para o equipamento Ricopter, consegue-se uma distância linear máxima de 25 km, enquanto o alcance da telemetria é limitado a 3 km.

Para equipamentos de asa fixa, a velocidade máxima obtida e a autonomia de voo são superiores aos equipamentos multirotores. Para o Echar 20D a distância máxima que pode ser voada para um mapeamento linear é de 180 km.

Pensando em obras retangulares, a conta pode ser feita a partir das distâncias máximas lineares, fazendo algumas considerações adicionais de segurança, como por exemplo:

- tempo gasto para que o equipamento decole e entre nas faixas programadas de voo;
- tempo para transição entre uma faixa de voo e a subsequente;
- tempo necessário para retorno da aeronave ao ponto de partida, ao término do recobrimento aéreo;
- ventos no momento do voo podem fazer com que o equipamento perca velocidade ou gaste mais bateria para que o sistema inercial o mantenha na linha de voo programada;

Cabe ao usuário identificar sua necessidade e encontrar o equipamento mais adequando para suas aplicações, analisando o tipo de sensor a ser utilizado, a autonomia de voo, alcance da telemetria entre outros.

2.2.3. Sistema inercial e de navegação (INS/GNSS)

Sistemas inerciais e de navegação estão presentes em sistemas de voo autônomo. Tais sistemas dão suporte aos levantamentos fotogramétricos através da aquisição dos parâmetros de atitude da câmera no momento de sua tomada e também das coordenadas do centro perspectivo da imagem adquirida.

Aplicações de navegação diferentes têm requisitos muito distintos em termos de precisão, taxa de atualização, confiabilidade, orçamento, tamanho e massa, e se uma solução de atitude é necessária ou não, bem como a posição do centro perspectivo e a velocidade da aeronave.

Um sistema de navegação inercial, também conhecido pelo nome e sigla inglesa, *Inertial Navigation System* (INS), é um sistema de navegação tridimensional. Compreende um conjunto de sensores inerciais, conhecidos como unidade de medição inercial, em ingles *Inertial Measurement Unit* (IMU), juntamente com um sistema de navegação (GNSS). Os sensores inerciais

geralmente são compostos por três acelerômetros mutuamente ortogonais e três giroscópios alinhados com os acelerômetros. O sistema de navegação integra as saídas do IMU para informar a posição, velocidade e atitude (GROVES, 2013). A Figura 12 ilustra isso.

Figura 12 – Esquema básico de um Sistema Inercial.

Fonte: (GROVES, 2013).

O primeiro sistema de navegação por satélite do mundo foi o sistema Transit da marinha dos EUA. O desenvolvimento começou em 1958, com o primeiro satélite experimental lançado em 1961 e com sistema operacional em 1964. O sistema foi aberto para uso civil em 1967 e foi desativado em 1996 (GROVES, 2013).

Com o avanço da eletrônica, muitos sistemas foram desenvolvidos, mas sempre apresentavam algum tipo de problema. Sistemas como o *Loran*, *Decca*, *Omega* e o *Navy Navigation Satellite System* (NNSS) sempre apresentavam boas soluções, mas não ofereciam facilidade de uso e custo acessíveis aos usuários. Para mais detalhes sobre esses sistemas, ver MONICO (2007).

Na década de 1970, com o lançamento do NAVSTAR-GPS, muitas atividades que dependiam da determinação de posição foram beneficiadas. Em paralelo foi desenvolvido o GLONASS pela antiga União Soviética e em 1990 iniciou-se um programa de desenvolvimento pela Agência Espacial Europeia denominado Galileo que já está operacional.

Utilizando satélites artificiais e as tecnologias envolvidas, atribuir coordenadas a um objeto (posicioná-lo) uma tarefa que pode ser realizada com relativa simplicidade em nossos dias, quando se utilizam os equipamentos apropriados disponíveis (MONICO, 2007).

Em 1991, durante a 10ª Conferência de Navegação Aérea, esses sistemas foram denominados de GNSS e o uso integrado dessas tecnologias passou a ser feito.

Segundo Groves (2013), o GNSS oferece uma precisão de posicionamento de 1,0 a 3,9 m no plano horizontal e 1,6 a 6,3 m na direção vertical, dependendo do serviço, do receptor e da geometria do sinal. Técnicas diferenciais (método relativo) podem melhorar significativamente esse resultado, fazendo uso de estações de base em locais conhecidos para minimizar alguns erros. O posicionamento pela fase da portadora pode dar precisão de centímetros para navegação em tempo real e precisão milimétrica para aplicações de levantamento em Geodesia com pós processamento.

Para mais informações a respeito de sistemas Inerciais embarcados ver GROVES (2013) e MONICO (2007).

2.2.4. Sensores

Segundo Tomaselli (2011), a utilização de câmeras digitais para aquisição de informações espaciais é tendência reconhecida devido a certas vantagens, como a disponibilidade imediata da informação e a redução de custos devidos à eliminação do suporte físico (filme) e das etapas posteriores (revelação e digitalização).

Sistemas autônomos podem ser utilizados para diferentes aplicações; no entanto deve-se identificar o propósito do levantamento para utilizar o sensor mais indicado para a aplicação específica.

A grande maioria dos VANTs/Drones utiliza câmera embarcada com três bandas espectrais (RGB), gerando desse modo, imagens nesse sistema de cor.

Alguns sensores trabalham na região espectral do infravermelho próximo, ou seja, com comprimento de onda que varia de 0,75 μm a 3 μm . Imagens nessa

janela espectral são utilizadas na agricultura para criar, por exemplo, índices de vegetação, e assim informações sobre a saúde da vegetação.

No entanto, existem muitos veículos não tripulados em que os sensores podem ser trocados, sendo limitado apenas à capacidade de carregamento do Vant/Drone.

Alguns equipamentos podem ser citados, por exemplo, o modelo Ricopter da fabricante alemã RIEGL. Esse equipamento tem capacidade de carregar até 16 kg. A figura 13 mostra esse equipamento com um sensor LiDAR instalado.

Figura 13 – Modelo Ricopter da fabricante alemã RIEGL.

Fonte: <http://www.riegl.com>

Segundo seu fabricante, existe a possibilidade de instalar no lugar do sensor LIDAR, câmeras ou sensores batimétricos. Outros equipamentos, além de ter a possibilidade de trocar o sensor, possuem a capacidade de carregar mais de um e coletar dados para diferentes finalidades num único levantamento.

Para esse exemplo pode-se citar o VANT modelo Nauru 500B do fabricante brasileiro Xmobots (figura 14), que pode ser configurado para coletar dados simultaneamente com câmeras NIR e Térmicas ou câmeras hiperspectrais.

Figura 14 – Vant Nauru 500B do fabricante brasileiro Xmobots.

Fonte: <https://xmobots.com.br>

A escolha do sensor está relacionada ao objetivo do levantamento, ou seja, os sensores devem ser escolhidos de acordo com o tipo de aplicação.

No entanto, existem limitadores físicos que impedem ou dificultam que qualquer sensor seja instalado em qualquer equipamento. Esses limitadores podem estar relacionados com o peso que o Drone pode carregar e arranjo de montagem do sensor entre outros. Com tais limitadores a escolha ideal de um equipamento deve levar em conta para qual aplicação ele será utilizado e se o sensor instalado está adequado para tal objetivo.

Segundo Barbosa (2016) a unidade básica das imagens digitais é chamada de pixel, que é o menor elemento que compõe uma imagem digital que contém cor, sendo que o conjunto de milhares de *pixels* forma a imagem inteira. Na prática, o número de *pixels* de uma imagem depende do número de unidades fotossensíveis no sensor da câmera. A resolução pode ser apresentada fazendo se inferência à proporção de *pixels* na largura e altura de uma imagem digital (ex. 1280x720), onde o primeiro número e o segundo representam o número de *pixels* em cada coluna e linha, respectivamente.

Toda informação coletada é armazenada num dispositivo de carga acoplada ou CCD. Trata-se de um sensor semicondutor para captação de imagens formado por um circuito integrado que contém uma matriz de capacitores acoplados. Sob o controle de um circuito externo, cada capacitor pode transferir sua carga elétrica para um outro capacitor vizinho. Os CCDs são peças de grande destaque na tecnologia de imageamento digital, usados em fotografia digital, e imagens de satélites (FERNANDES, 2002).

A capacidade de resolução ou detalhe da imagem depende do tamanho e número de células fotoelétricas do CCD. Expressa-se este número em *pixels*. Quanto maior o número de pixels, maior a área que pode ser imageada; quanto menor o tamanho dos pixels maior a resolução da imagem.

Por exemplo, para a apresentação de cores em sistemas digitais onde o CCD é o sensor principal, cada pixel se caracteriza por um espaço espectro tridimensional, contendo cada uma das três cores primárias (RGB), onde a interpolação dessas três cores resulta em uma cor por pixel. As imagens digitais em 8 bits possuem pixels onde cada uma das três cores (RGB) apresenta 256 tonalidades, assim, é possível a obtenção de mais de 16,7 milhões de cores ($256 \times 256 \times 256$) (RICKER, 2004).

Quanto maior a quantidade de bits, maior é a quantidade cores que são possíveis de serem coletadas pelo sensor. Dessa forma os processos computacionais podem ser realizados de forma mais eficiente mesmo que essa quantidade enorme de cores não seja identificável ao olho humano.

2.2.5. Levantamento de campo

Basicamente há dois métodos de levantamento: a primeira opção é quando o voo é planejado e o Drone faz uma rota pré-estabelecida, respeitando a sobreposição longitudinal e lateral configurada; a segunda é um voo sem planejamento em que o operador direciona o Drone para a região em que deseja fazer a coleta das imagens e, de maneira automática, o equipamento vai coletando as imagens com espaçamentos definidos anteriormente. Por exemplo, se configurado um espaçamento de 5 metros, o Drone registra uma imagem

quando a distância para com o ponto anterior atinge esse espaçamento. O operador deve controlar a direção de deslocamento horizontal e vertical.

Existem uma grande variedade de aplicativos disponíveis para utilização em *tablets* e *Smartphones*, dentre eles é possível citar o *Drone Deploy*, *Pix4D capture* e *Maply*. Alguns fabricantes de equipamentos possuem seu próprio sistema de controle de voo e planejamento, principalmente os equipamentos de asa fixa.

Para planejar um voo o usuário deve indicar, sobre um mapa na tela de seu dispositivo, a área de interesse, tipo de equipamento que será utilizado e a porcentagem de sobreposição longitudinal e lateral. Os aplicativos, com base numa velocidade padrão de voo e tipo do sensor, calculam a trajetória e os locais exatos das tomadas de fotos. Essa informação é enviada ao Drone (por conexão sem fio) e, dessa forma, o equipamento está apto a realizar o voo, iniciando-se com um comando do operador. Ao término do voo o equipamento volta ao ponto de decolagem automaticamente.

Com base na altura de voo, tamanho físico do sensor, distância focal da câmera e tamanho das imagens em pixels é possível determinar previamente o *Ground Sampling Distance* (GSD) aproximado das ortoimagens resultante do processamento das imagens, ou seja, o tamanho físico de cada pixel em cm, no terreno.

Considerando a figura 15, tem-se:

S_w é a largura do sensor da câmera (mm)
 F_r é a distância focal da câmera (mm)
 H é altura de voo (metros)
 D_w é a largura da imagem

Figura 15 – Esquema gráfico para definição do GSD.

O GSD é dado por:

$$GSD = \frac{Sw \cdot H(cm)}{Fr \cdot Dw} \quad (8)$$

Na teoria, para planejar o voo alguns parâmetros devem ser definidos a priori, tais como:

1. intervalo de tempo entre duas imagens consecutivas;
2. distância focal da câmera;
3. altura de voo;
4. tamanho da imagem;
5. tamanho e forma da área a ser fotografada;
6. determinar a posição das linhas de voo;
7. sobreposição longitudinal e lateral;
8. velocidade da aeronave;
9. GSD aproximado requerido.

Considerando que em alguns equipamentos não é possível alterar o tipo do sensor (como no caso dos Drones da fabricante DJI, linha Phantom), alguns elementos necessários para o planejamento do voo já estão definidos (segundo a numeração dos itens acima); distância focal; tamanho da imagem; e, definindo-se a altura de voo, tem-se o GSD aproximado resultante desse levantamento.

Utilizando os aplicativos disponíveis, toda essa configuração é feita graficamente, ou seja, primeiro define-se na tela do dispositivo móvel (celulares ou tablets) qual equipamento será utilizado (alguns aplicativos já reconhecem isso automaticamente), em seguida indica-se a área de interesse do voo e a altura de voo (com isso já é mostrada o GSD resultante). Configura-se as sobreposições longitudinais e laterais que serão aplicadas a esse voo e como já se sabe a velocidade de voo (por já ter sido definido o equipamento que vai ser utilizado), o plano de voo é mostrado graficamente na tela do dispositivo. Cabe ao usuário, nesse momento, validar ou não o resultado e caso atenda às necessidades do projeto, executar o levantamento.

A figura 16 apresenta o resultado de um planejamento de voo executado no programa *Maply*. Na caixa de seleção em vermelho estão as informações referentes ao equipamento e características do voo e na parte da direita, o polígono em azul é definido graficamente pelo usuário e o programa calcula e indica as faixas de voo, mostrando-as automaticamente. Ainda na parte direita da imagem, destacados por dois círculos vermelhos, estão indicados onde o levantamento se inicia e onde termina.

Figura 16 – Planejamento de voo sendo apresentado graficamente em programas especializados, mostrando diversos dados.

Com o GSD definido é possível definir o comprimento que será recoberto no sentido da faixa de voo, multiplicando a quantidade de pixel pelo tamanho do GSD.

$$T = GSD \cdot tpx \quad (9)$$

Onde:

T é o tamanho da imagem em escala no sentido de voo

GSD é o tamanho do pixel em escala

T_{px} é o tamanho da imagem em pixel no sentido de voo.

Com esse valor e a sobreposição longitudinal definida é possível calcular quantos metros a aeronave deve se movimentar até a tomada da próxima imagem.

$$d = T \cdot (100 - SL) \quad (10)$$

d é deslocamento no sentido da faixa de voo

T é o tamanho da imagem em escala

SL é a sobreposição longitudinal

Tendo a área de voo definida, as coordenadas do início do levantamento, a direção da faixa de voo e o deslocamento necessário para coletar cada imagem, a posição de tomada de cada imagem é calculada, conforme as fórmulas de (11) a (14).

$$X_i = X_{i-1} + \Delta x \quad (11)$$

$$Y_i = Y_{i-1} + \Delta y \quad (12)$$

Sendo

$$\Delta x = d \cdot \sin(Az) \quad (13)$$

$$\Delta y = d \cdot \cos(Az) \quad (14)$$

Onde:

Δx é deslocamento em X considerando o azimuth da faixa de voo

Δy é deslocamento em Y considerando o azimuth da faixa de voo

X é a coordenada X da tomada da imagem

Y é a coordenada Y da tomada da imagem

As coordenadas são enviadas ao equipamento que, utilizando o sistema de navegação embarcado, vai até a posição definida e coleta a imagem. O processo é feito automaticamente ao longo das faixas de voo programadas.

As imagens são armazenadas no cartão de memória do equipamento, juntamente com os metadados importantes para o processamento das imagens.

Tais metadados são gravados seguindo uma especificação definida por fabricantes de câmeras digitais, sobre as condições técnicas de captura de imagens e também o arquivo da imagem propriamente dita. São chamados de metadados etiquetados e seguem um padrão criado pela *Japan Electronic Industries Development Association* e denominado padrão *Exchangeable image file format* (EXIF).

Esses dados podem ser facilmente consultados em sistemas operacionais Windows. A figura 17 mostra essas informações de uma imagem coletada com drone.

Figura 17 – Metadados associados a uma imagem em formato jpg coletada por Drone.

Para sistemas de asa fixa, o planejamento de voo pode ser um pouco diferente. O equipamento voa a velocidades maiores e se comporta em voo de maneira semelhantemente a uma aeronave convencional, e assim seu planejamento deve ser executado seguindo os procedimentos normais de planejamento de voo, calculado a trajetória e o intervalo entre as exposições e não o valor das coordenadas no caso de equipamentos multirotores.

2.2.6. Produtos gerados

A partir das imagens coletadas, podem ser gerados dois produtos básicos, utilizando programas especializados: O modelo digital de superfície (MDS), representado pela nuvem de pontos e o ortomosaico.

As feições na natureza são fenômenos contínuos variando de ponto a ponto. Para representá-las, são utilizadas técnicas de amostragem espacial. Tais amostras devem representar de forma fiel as características do mundo real.

LI, et al. (2004) descrevem o MDS e MDE como sendo é uma particularização do MDT quando se trabalha com o atributo altitude. O MDT é um conjunto ordenado de pontos de dados amostrados que representam a distribuição espacial de vários tipos de informação no terreno. MDE representam a superfície do terreno (altitude) imersa ou emersa (sem cobertura vegetal ou edificações); já o MDS considera as elevações do terreno e de qualquer objeto acima dele.

O ortomosaico se forma a partir da junção de várias ortofotos geradas a partir das imagens coletadas em campo, parâmetros de orientação resultante do processamento realizado e o MDE.

Segundo Idoeta (2007), uma ortofoto é uma fotografia mostrando imagens de objetos na sua verdadeira posição ortográfica, ou seja, em planta. Ortofotos então, são geometricamente equivalentes aos mapas convencionais de linhas e símbolos que também mostram as posições ortográficas dos objetos. Devido à sua correção planimétrica, as ortofotos podem ser utilizadas como mapas, para que nela se façam diretamente medidas de ângulos, distâncias, posições e áreas, já que foram efetuadas correções devido ao deslocamento da imagem em função do relevo e da inclinação da tomada.

Tais teorias não serão abordadas nessa tese e poderão ser consultadas em WOLF E DEWITT (2000), MIKHAIL et al (2001), ANDRADE (1998) e ACKERMANN (1996).

A partir da nuvem de pontos, outros produtos podem ser gerados, uma vez que se possui toda a representação de um objeto ou local num sistema digital. A geração de vídeos demonstrativos, animações para análise preditiva de catástrofes, construção de ambientes em realidade virtual e/ou aumentada e

construção de maquetes eletrônica e voos feitos sobre ela, são apenas alguns exemplos do que se pode criar com esses dados.

Como amostra, comentam-se alguns produtos gerados durante o desenvolvimento da presente tese na região do Museu do Ipiranga. No primeiro link, um vídeo foi criado da nuvem de pontos geradas sobre o Museu; no segundo, um sobrevoo sobre o Riacho do Ipiranga, e no terceiro, um voo digital sobre a maquete eletrônica de todo o Parque da Independência e por último, um vídeo institucional realizado sobre o Engenho dos Erasmos. Todos os produtos apresentados foram confeccionados a partir das imagens coletadas com Drones:

a) Museu paulista:

<https://www.youtube.com/watch?v=ATNznFd58K4>

b) Riacho do Ipiranga:

<https://www.youtube.com/watch?v=mfAi6ykUVQA>

a) Exposição Território, Edifício e Museu do Ipiranga:

<https://www.youtube.com/watch?v=D60whmdBGh4&t=2s>

b) Engenho dos Erasmos. Além do produto, propõe o uso de tecnologia para preservar a história:

<https://www.youtube.com/watch?v=ROJ248eAWTU>

Também é possível encontrar esses mesmos vídeos fazendo uma pesquisa no *Youtube* com as palavras chaves citadas nos itens, a), b), c) e d).

2.3. NUVEM DE PONTOS

Conforme apresentado, um dos produtos oriundos do processamento de um levantamento terrestre (LST) ou aéreo (Drone/Vant) é a nuvem de pontos. Para os levantamentos com LST a nuvem de pontos é o produto primário fornecido nesse levantamento. Já a nuvem de pontos gerada a partir das imagens aéreas é produzida indiretamente, ou seja, a partir do processamento das imagens coletadas a nuvem de pontos é gerada através de técnicas específicas que serão detalhadas nos tópicos a seguir, com o uso de correlação de imagens e cálculo de coordenadas de terreno dos pontos.

As precisões alcançadas dependem diretamente do tipo de sensor que está sendo utilizado e das técnicas de processamento.

2.3.1. Laser Scanner Terrestre

A construção de modelos 3D, análise visual, vídeos de reconhecimento e divulgação, análise de estruturas complexas, auxílio nos projetos de engenharia dependem de uma nuvem de pontos precisa e num sistema de coordenadas único.

Segundo Groetelaars (2011), a nuvem de pontos é a representação mais básica obtida diretamente pelo LST. Cada ponto, que forma a nuvem, é representado por suas coordenadas cartesianas (X, Y, Z) e um ou mais atributos ou informações adicionais associadas ao mesmo, por exemplo: a intensidade de retorno do sinal ou a cor (Sistema RGB). Estas, sendo armazenadas, podem ser utilizadas durante o processamento de dados.

As coordenadas de cada ponto são coletadas por meio de medições laser, portanto entre o equipamento LST e o objeto a ser levantamento não pode haver barreiras visuais. Em muitos casos, para levantar todo o objeto é necessário estacionar o equipamento em vários pontos para que toda a área seja recoberta, minimizando as áreas de sombra (oclusão). A figura 18 ilustra essa necessidade e como o equipamento deve ser posicionado para eliminar as áreas de sombra.

Figura 18 – Levantamento do Monumento à Escola Politécnica (Templo estilizado de Minerva ou Palas Atenas).

A imagem da esquerda mostra uma vista perspectiva da nuvem de pontos a partir da posição de onde foi realizado o escaneamento. Dá a impressão de que todo o objeto foi escaneado, entretanto quando a nuvem é rotacionada e o ponto de vista é alterado, fica claro que existem regiões onde não foram coletados pontos (indicado pela seta vermelha na figura da direita), gerando dessa forma as regiões ocultas indesejadas em qualquer levantamento. Vê-se uma elipse em primeiro plano, correspondendo ao local em que se estacionou o equipamento e, dessa forma, pontos não são coletados nessa região, pelo fato de o equipamento não conseguir apontar para seu entorno imediato.

Para solucionar esse problema, outra nuvem de pontos, a partir de outra estação, pode ser levantada fazendo com que todo o objeto de estudo seja recoberto. A figura 19 mostra a nuvem de pontos completa em cores reais, sem perda de informação e com todo o objeto de estudo presente na nuvem de pontos, restando ainda alguns resquícios de sombras.

Figura 19 – Nuvem de pontos sem pontos de sombra.

No exemplo acima, seis estações foram utilizadas para recobrir toda a área. Percebe-se que para coletar informações de todo o objeto (a escultura) apenas uma estação de levantamento não é suficiente.

2.3.1.1. Registro das nuvens de pontos

Durante o trabalho de campo, cada posição em que o equipamento for estacionado gera um novo sistema de coordenadas, sendo que a origem do sistema se situa no encontro do eixo do equipamento, ou seja, o eixo de rotação horizontal (z) com o plano horizontal passando pelo centro ótico. Nesse caso o sistema de referência que é criado automaticamente durante o trabalho de campo não tem informação (angular) em relação ao Norte (Azimute), mas sua origem é arbitrária. O processo de registro ou consolidação é feito para que todo o levantamento (diversas nuvens) seja referido a um sistema único de coordenadas, que pode ser tanto um sistema de coordenadas definido (UTM, por exemplo) ou arbitrário.

Gonçales (2007) explica que essa transformação sempre é feita com referência a alguma estação levantada em campo. Por exemplo: num levantamento com 10 estações utiliza-se a estação número 1 como referência; dessa forma todas as demais serão transladadas e rotacionadas para que fique no mesmo sistema de coordenadas da primeira estação, ou seja, instalam-se alvos planos ou esféricos visíveis em estações consecutivas e as posições definidas na estação de referência são considerados fiduciais para a segunda; os novos alvos dessa segunda, com coordenadas calculadas a partir da primeira, são consideradas fiduciais para a terceira e assim por diante. Alguns programas possuem ferramentas automáticas para esse processo, identificando de forma automática alguns pontos homólogos em diferentes estações, simulando e substituindo os alvos físicos. Ainda há a possibilidade de realizar esse processo identificando os pontos homólogos em duas nuvens de pontos consecutivas visualmente.

A transformação ortogonal, a ser aplicada, consiste em determinar 6 parâmetros: três translações (ΔX , ΔY , ΔZ) e três rotações (ϖX , ϖY , ϖZ).

No espaço, o modelo matemático matricial dessa transformação é dado por:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (15)$$

Onde X, Y, Z, X', Y' e Z' , são as coordenadas de pontos homólogos nos dois sistemas envolvidos, $\Delta X, \Delta Y$ e ΔZ são as diferenças entre a origem dos dois sistemas nos três eixos e R é a matriz de rotação.

A matriz de rotação é dada por:

$$R = R_X R_Y R_Z \quad (16)$$

Onde:

$$R_X = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varpi_X & \sin \varpi_X \\ 0 & -\sin \varpi_X & \cos \varpi_X \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$R_Y = \begin{pmatrix} \cos \varpi_Y & 0 & -\sin \varpi_Y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varpi_Y & 0 & \cos \varpi_Y \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$R_Z = \begin{pmatrix} \cos \varpi_Z & \sin \varpi_Z & 0 \\ -\sin \varpi_Z & \cos \varpi_Z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (19)$$

Com ϖ_X, ϖ_Y e ϖ_Z sendo as rotações em torno de seus eixos correspondentes.

Essa transformação pode ser realizada, pois cada estação possui alvos escaneados, sendo que esses alvos também foram escaneados de outras estações, tendo suas coordenadas bem definidas em sistemas de coordenadas distintos. São seis parâmetros a serem determinados: os ângulos de rotação ($\varpi_X, \varpi_Y, \varpi_Z$) e os três parâmetros de translação ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$). Cada ponto gera 3 equações e, portanto, são necessários, no mínimo, 2 pontos em comum (alvos planos ou esféricos). Com mais pontos, como se costuma fazer nos levantamentos, é possível aplicar o método dos mínimos quadrados. Caso exista a necessidade de trabalhar num sistema de coordenadas conhecido, é necessário realizar uma nova transformação de coordenadas, utilizando o mesmo modelo matemático, impondo coordenadas referidas a esse sistema.

A figura 20 mostra um exemplo de dois sistemas planos de coordenadas x, y (Origem O) e x', y' (Origem O') com origens deslocadas (Δx e Δy), na figura

b), além de um sistema se encontrar rotacionado em relação ao outro com um ângulo relativo β , porém com mesma escala.

Figura 20 – Geometria da transformação ortogonal no plano: (a) rotação entre os sistemas bidimensionais; (b) rotação e translação entre os sistemas bidimensionais; (c) propriedades da transformação (mantém-se a forma do elemento).

Fonte: Santos (2013)

Adicionando uma translação no eixo Z e uma rotação sobre esse mesmo eixo, (ΔZ e ϖZ , respectivamente), essa transformação passa a ser realizada no espaço.

Os seis parâmetros (ΔX , ΔY , ΔZ , ϖX , ϖY , ϖZ) apresentados acima da transformação ortogonal podem ser expandidos para 9 parâmetros, ou seja, 3 fatores de escala (λ_x , λ_y , λ_z) mais um fator de não ortogonalidade entre os eixos (δ). Santos (2013) informa que fator de não ortogonalidade entre os eixos é muito pequeno na prática e por isso pode ser considerado algumas aproximações ($\delta = 0$ e $\cos \delta = 1$). A figura 21 ilustra essa condição no plano.

Figura 21 – Geometria da transformação afim geral no plano.

Fonte: Santos (2013)

A transformação afim no espaço não é utilizada no processo de registro pois considera-se que não há diferença em escala em diferentes nuvens de pontos, no entanto a teoria foi brevemente detalhada na presente pesquisa pois o processo de integração a ser estudado considera nuvens de pontos de diferentes fontes e pode ser necessário aplicar fatores de escala nessa transformação. Enquanto a transformação afim não preserva os comprimentos nem os ângulos a transformação ortogonal preserva a ângulos e comprimentos.

2.3.1.1. Interseção a ré ou problema da estação livre

O sistema de coordenadas pode ser definido através de um levantamento topográfico tradicional complementar, em que o sistema de coordenadas é definido e referenciado à nuvem de pontos. Pode ser o UTM, o Plano Topográfico Local ou um arbitrário.

A prática mostra que o método mais indicado para realizar esse tipo de levantamento é a intersecção a ré também conhecida como estação livre (CINTRA e GONÇALES, 2017).

Esse processo consiste em medir, a partir de uma estação desconhecida as distâncias aos outros três (pelo menos) pontos de posição conhecida, isto é,

consegue-se obter as coordenadas de um ponto com relação a uma rede materializada por três outros (COSTA e SILVA, 1995).

Em campo, o procedimento é o seguinte: estaciona-se a estação total em algum local do qual que se possam visualizar três ou mais pontos com coordenadas conhecidas. Utilizando as opções disponíveis na estação total e utilizando o método da estação livre, determinam-se as coordenadas do ponto da estação através de visadas a pelos menos três pontos de coordenadas conhecidas.

Com as coordenadas da estação determinada fazem-se visadas para os alvos planos que foram coletados com o LST, e desse modo determina-se as coordenadas dos alvos planos. Numa segunda etapa, estaciona-se a estação total num outro ponto de onde sejam visíveis os três alvos que já foram levantados e de maneira análoga, determinam-se as coordenadas da estação. Com essas coordenadas conhecidas é possível determinar as coordenadas de outros alvos que agora estão visíveis para a estação seguinte. Esse procedimento é feito para toda a área.

Segundo a figura 22, considere o ponto P_0 , como sendo o desconhecido (estação total), e P_i , $i = 1, 2, 3, \dots, n$, os pontos de posição conhecida. As distâncias Db_i , $i = 1, 2, 3, \dots, n$ também são conhecidas, pois foram determinadas pelas observações feitas com a estação total.

Figura 22 – Determinação de coordenadas através de distâncias.

Fonte: Gonçalves (2007)

Para encontrar as coordenadas do P0, utiliza-se o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). Para realizar o ajustamento de observações ou medidas, é necessário que os dados excedam o mínimo (4, no caso) requerido para a solução do problema, ou seja, devem existir observações redundantes.

Segundo Gemael (1994), a partir das observações redundantes sujeitas a flutuações probabilísticas e de uma estimativa de sua precisão, o ajustamento tem por objetivo estimar, mediante a aplicação de modelos matemáticos adequados e do MMQ, um valor único para cada uma das incógnitas (Xa) do problema a partir de amostras observadas (Lb) com precisão ($\sum Lb$) e estimar a precisão de tais incógnitas ($\sum x$) e a eventual correlação entre elas.

Dados: ($Lbe \sum Lb$) $\Rightarrow$ estimar: ($Xe \sum x$)

O cálculo por mínimos quadrados produz estimativas atualizadas (ajustadas) de todas as variáveis do modelo, bem como a sua MVC (Matriz Variância - Covariância). Têm-se três incógnitas para esse problema. As coordenadas X, Y e Z do ponto P0. As observações (amostras) que serão utilizadas no ajustamento são as distâncias coletadas (Dbi).

O modelo matemático usado para realizar o ajustamento das observações pode ser expresso por:

$$Dbi = [(Xp_{i-1} - Xp_i)^2 + (Yp_{i-1} - Y_i)^2 + (Zp_{i-1} - Z_i)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

Utilizando uma das coordenadas já conhecidas, um azimuth e uma distância correspondente, podem-se descobrir as coordenadas aproximadas do ponto P0. Dependendo das variáveis (observações e ou parâmetros) envolvidas a solução pode ser obtida usando o Método Correlato, Método Combinado e Método Paramétrico.

Nesse pode-se utilizar o Método Paramétrico, pois a equação de condição envolve observações e parâmetros, mas as observações são funções explícitas dos parâmetros, isto é:

$$La = F(Xa) \quad (21)$$

onde:

L_a – Vetor das observações ajustadas ($n \times 1$)

X_a – vetor dos parâmetros ajustados ($n \times 1$)

F – Função que relaciona L_a e X_a , podendo ser linear ou não

Um modelo matemático inconsistente torna-se consistente pela introdução do vetor dos resíduos.

$$V = AX - Lb \quad (22)$$

onde Lb é o vetor ($n \times 1$) dos valores das observações;

X é o vetor ($u \times 1$) dos parâmetros incógnitos;

A é a matriz ($n \times u$) de escalares conhecidos;

V é o vetor ($u \times 1$) dos resíduos.

Das equações normais, obtidas através dos multiplicadores de Lagrange, que minimizam os resíduos, tem-se:

$$X = N^{-1}U \quad (23)$$

$$Xa = X_0 + X \quad (24)$$

onde:

Xa - vetor dos parâmetros ajustados ($u \times 1$)

X_0 - vetor dos parâmetros aproximados ($u \times 1$)

X - vetor das correções aos parâmetros ($u \times 1$)

sendo que:

$$N = A^T P A \quad (25)$$

$$U = A^T P L_b \quad (26)$$

$$P = \sigma_0^2 (\sum L_b)^{-1} \quad (27)$$

sendo P a matriz peso;

σ_0^2 é o fator de variância *a priori* e

$\sum L_b$ a matriz das incertezas das observações.

O vetor das observações ajustadas e dos resíduos pode ser escrito como:

$$La = AX \quad (28)$$

$$V = AX - L_b \quad (29)$$

O número de observações dependerá diretamente do número de pontos com coordenadas conhecidas que serão levantados. Para que se possa realizar o ajustamento deve se ter ao menos 4 pontos, para que se tenham observações superabundantes, pois o número de parâmetros a se determinar sempre será 3, ou seja, as coordenadas X, Y e Z do ponto P0.

No caso em que se tenha apenas 3 pontos disponíveis será possível obter um resultado, mas não será possível realizar o ajustamento de observações através do MMQ, pois o grau de liberdade seria nulo (3 incógnitas (u) para 3 observações (n)).

Para n distâncias observadas, tem-se um sistema de n equações com três incógnitas ($X_{P0}; Y_{P0}; Z_{P0}$).

$$D_1 = [(X_{P0} - X_{P1})^2 + (Y_{P0} - Y_{P1})^2 + (Z_{P0} - Z_{P1})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

$$D_2 = [(X_{P0} - X_{P2})^2 + (Y_{P0} - Y_{P2})^2 + (Z_{P0} - Z_{P2})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (31)$$

$$D_3 = [(X_{P0} - X_{P3})^2 + (Y_{P0} - Y_{P3})^2 + (Z_{P0} - Z_{P3})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (32)$$

$$D_n = [(X_{P0} - X_{Pn})^2 + (Y_{P0} - Y_{Pn})^2 + (Z_{P0} - Z_{Pn})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (33)$$

O sistema anterior não é linear, necessitando ser linearizado aplicando o desenvolvimento de Taylor.

A matriz A, para esse caso é dada por:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial D_1}{\partial X_{P0}} & \frac{\partial D_1}{\partial Y_{P0}} & \frac{\partial D_1}{\partial Z_{P0}} \\ \frac{\partial D_2}{\partial X_{P0}} & \frac{\partial D_2}{\partial Y_{P0}} & \frac{\partial D_2}{\partial Z_{P0}} \\ \frac{\partial D_3}{\partial X_{P0}} & \frac{\partial D_3}{\partial Y_{P0}} & \frac{\partial D_3}{\partial Z_{P0}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial D_n}{\partial X_{P0}} & \frac{\partial D_n}{\partial Y_{P0}} & \frac{\partial D_n}{\partial Z_{P0}} \end{bmatrix} \quad (34)$$

Definida a matriz A, a solução se dá através das formulações matemáticas acima apresentadas.

Em decorrência da aproximação introduzida na linearização do modelo é requerida uma fase de iterações e testes ao final do ajustamento. A omissão dos termos na série de Taylor e a adoção de valores iniciais aproximados implicam na necessidade de iterações até a convergência, mas em princípio, nem todos os sistemas iterativos convergem. Alguns podem divergir, outros oscilar em torno de um valor e outros convergir, porém para uma solução incorreta.

Para saber se o ajustamento das observações realizado esta coerente e confiável, deve-se realizar uma análise estatística, utilizando o valor que foi arbitrado na determinação da Matriz Peso, ou seja, o fator de variância a priori.

O fato de arbitrar-se um valor para o fator de variância a priori (σ_0^2), não acarretara nenhum efeito no ajustamento. Esta escolha é feita antes do ajustamento, para fixação dos pesos e, portanto, designado como fator de variância a *priori* (GEMAEL, 1994).

Após o ajustamento pode-se estimar um valor ($\hat{\sigma}_0^2$) em função dos resíduos, chamado de fator de variância a *posteriori*, que é dado por:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{n-u} \quad (35)$$

Com valores de σ_0^2 e $\hat{\sigma}_0^2$ pode-se fazer uma análise do ajustamento através da estatística Qui-quadrado (χ^2), onde se testa a hipótese básica

$$H_0: \sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2 \quad (36)$$

contra a hipótese alternativa:

$$H_1: \sigma_0^2 \neq \hat{\sigma}_0^2 \Rightarrow \text{teste bilateral} \quad (37)$$

ou

$$H_1: \sigma_0^2 > \hat{\sigma}_0^2 \Rightarrow \text{teste unilateral} \quad (38)$$

Para a verificação de uma das hipóteses compara-se o valor calculado por:

$$\chi_C^2 = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} (n - u) = \frac{V^T P V}{\sigma_0^2} \quad (39)$$

com os valores teóricos (tabela Qui-quadrado) com $v = n - u$ graus de liberdade.

A hipótese básica não é rejeitada, ao nível de significância α , num teste bilateral, se:

$$\chi_C^2 < \chi_{v,1-\alpha/2}^2 \text{ ou } \chi_C^2 > \chi_{v,\alpha/2}^2 \quad (40)$$

que corresponde a:

$$\chi_{v,\alpha/2}^2 < \chi_C^2 < \chi_{v,1-\alpha/2}^2 \quad (41)$$

No caso de um teste unilateral, a hipótese não é rejeitada a um nível de significância α , se:

$$\chi_C^2 < \chi_{v,1-\alpha}^2 \quad (42)$$

Caso contrário, significa que há problemas no ajustamento. Assim uma análise deve ser feita para verificar as possíveis fontes de erros, tais como: erros grosseiros, erros sistemáticos, matriz variância-covariância (MVC) não condizente com a precisão das observações, modelo funcional não consistente com as observações ou sistema mal condicionado.

Informações adicionais sobre o processo de registro da nuvem de pontos podem ser encontradas em GEMAEL (1994), GONÇALES (2007) e WUTKE (2006).

2.3.2. Fotogrametria e visão computacional

O termo Fotogrametria deriva das palavras gregas *photos*, que significa luz, e depois fotografia, *gramma*, que significa algo desenhado ou escrito e

metron, que significa "medir". Portanto, Fotogrametria, de acordo com suas origens, significaria "medir graficamente usando luz ou fotografias".

Tradicionalmente, a Fotogrametria pode ser definida como a arte, ciência e tecnologia para obter informações confiáveis sobre objetos físicos e o meio ambiente através de processos de gravação, medição e interpretação de fotografias e padrões gravados a partir de radiações de energias eletromagnéticas (WOLF, 1974).

A Fotogrametria pode ser dividida historicamente entre analógica, analítica e digital. Na Fotogrametria analógica, os dados de entrada eram fotografias analógicas (filmes), os processamentos dos dados eram feitos em equipamentos óticos/mecânicos e o resultado final obtido eram mapas em papel. No processo analítico, os filmes ainda eram os produtos de entrada. No entanto todos os processamentos de dados eram realizados computacionalmente, onde se obtinham fotolitos para produção de mapas em série e os produtos finais poderiam ser apresentados em papel ou em sistemas CAD. Com o advento das câmeras digitais e seu uso em Fotogrametria, o processo passa ser considerado digital. Como entrada de dados tem-se as imagens digitais, o processamento é todo computacional e o resultado final é apresentado em sistemas CAD/CAE, SIG, web, servidores na nuvem entre outros. Segundo Brito e Coelho (2007), a aerofotogrametria digital tem como objetivo principal a reconstrução automática do espaço tridimensional (espaço-objeto), a partir de imagens bidimensionais (espaço-imagem).

A facilidade em executar levantamentos aéreos utilizando Vant's/Drones trouxe novos desafios ao processamento das imagens e geração de produtos cartográficos com alta qualidade geométrica.

Souza (2017), destaca que ainda existem algumas limitações quanto ao uso destes veículos em levantamentos de dados, como a instabilidade e o uso de sensores mais simples. As câmeras geralmente não métricas de pequeno porte aliada a falta de técnicas e metodologias adequadas, podem transformar o que seria uma saída mais econômica e prática em soluções insatisfatórias.

Para que o processamento das imagens seja executado de forma automática e que possibilite a geração de dados confiáveis na área da Engenharia, é necessário a utilização de técnicas matemáticas e computacionais

conhecidas como visão computacional. Para a Fotogrametria, o grande desafio nesse tipo de levantamento é a identificação de pontos homólogos nas diferentes imagens coletadas de forma automática e com um nível de acurácia compatível com as necessidades. A partir da identificação desses pontos, tais técnicas visam a geração de informações complementares para a geração de uma nuvem de pontos que possibilite a produção de produtos cartográficos.

2.3.2.1. Visão computacional

De acordo com Milano e Honorato (2010), visão computacional é a ciência responsável pela forma como um computador enxerga o meio à sua volta, extraindo informações significativas a partir de imagens capturadas por câmeras de vídeo, sensores, scanners, entre outros dispositivos. Estas informações permitem reconhecer, manipular e pensar sobre os objetos que compõem uma imagem. Todas transformações são realizadas a partir da definição de um objetivo específico (BRADSKI; KAEHLER, 2008).

Na prática, dois passos são necessários para a geração da nuvem de pontos a partir de imagens. O primeiro passo é a calibração da câmera utilizada no voo. Essa calibração é feita através de modelos matemáticos específicos que serão explorados a seguir. Com essa primeira etapa concluída e contando com parâmetros iniciais de posição do centro perspectivo e de orientação exterior é possível ajustar as observações e gerar uma densa nuvem de pontos. A terceira etapa do processamento, na maioria das aplicações, é a criação da rede irregular triangular TIN (*triangular irregular network*), de modelos digitais de elevação e de ortomosaicos.

2.3.2.2. Calibração de câmeras e orientação de imagens

Em 1837, o físico e pintor francês *Louis J. M. Daguerre* apresentou a primeira fotografia à Academia Francesa de Artes e Ciência. Desde então inúmeros experimentos foram desenvolvidos. O efeito fotoelétrico foi apresentado pelo físico alemão *Heinrich Rudolf Hertz* por volta de 1827, que na sequência teve contribuições de outros cientistas, como *Albert Einstein* em um trabalho apresentado em 1905, pesquisa que lhe rendeu o prêmio Nobel em

Física no ano de 1921. Este desenvolvimento aliado à física dos semicondutores permitiu a invenção do CCD na década de 70 pelos cientistas *Willard S. Boyle* e *George E. Smith* (que foram dois dos três ganhadores do prêmio Nobel de Física de 2009). Essa evolução nos diferentes ramos da Física permitiu o desenvolvimento de modernos sensores digitais de imageamento, que hoje podem ser utilizados em inúmeras aplicações, sendo que o problema fundamental é a determinação das características geométricas e radiométrica do sensor (PITERI e RODRIGUES, 2011).

Para a geração de produtos de qualidade através da Fotogrametria são necessários sensores com alta qualidade geométrica com os parâmetros de orientação interior especificados através de um certificado de calibração, permitindo, dessa forma, que as coordenadas medidas sobre as imagens sejam corrigidas de erros sistemáticos. No entanto, os sensores instalados em Drones nem sempre possuem o certificado de calibração e geralmente não são construídos com finalidades métricas e para que possam ser utilizados em Fotogrametria, deve-se determinar os parâmetros de orientação interior através do procedimento de calibração de câmaras.

Segundo Piteri e Rodrigues (2011), a calibração da câmara é necessária pois não se conhecem os parâmetros de orientação interior. Apesar dos sistemas óticos utilizados serem de alta definição geométrica, não são produzidos com o propósito métrico, ou seja, em áreas como a Fotogrametria, os parâmetros intrínsecos à câmara (parâmetros de orientação interior) que permitem a correção dos erros sistemáticos, devem ser especificados em um certificado de calibração que não existe. Sem isso a qualidade da imagem coletada fica deteriorada pelo deslocamento dos pontos projetados no plano imagem, não corrigidos. Tais aberrações podem ser provocadas pela curvatura e polimento não uniforme das lentes que compõem o sistema ótico e pela homogeneidade e pureza do material que compõe a lente, característica que influencia na mudança do índice de refração.

Andrade (1998) conceitua a calibração geométrica de câmeras como sendo a determinação da distância focal calibrada, do deslocamento do ponto principal e dos parâmetros que permitem modelar as distorções das lentes, ou

seja, determinar os parâmetros que permitam a reconstrução do feixe de raios que gera as imagens.

Em termos práticos, como os Drones possuem sistemas de posicionamento GNSS embarcados, durante a captura de imagens essas informações são armazenadas no cabeçalho de cada imagem fazendo com que os programas que processam esse tipo de informação já utilizem esses dados como injeções no processamento inicial, aumentando a correlação entre as imagens e facilitando o processamento de dados.

Por exemplo, programas como o *Agisoft Photoscan*, que foi desenvolvido pela empresa russa *Agisoft LCC* e utiliza algoritmos de visão computacional, como o SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*), de modo a identificar pontos correspondentes entre as imagens e orientá-las a um sistema de coordenadas arbitrário, dando possibilidade de gerar (a priori) uma nuvem de pontos esparsos. Utilizando esses dados correlacionais é feita a autocalibração da câmara e um ajustamento dos ângulos de atitude da câmara e coordenadas dos centros perspectivos que foram previamente estimados através dos sensores embarcados. Todo o processamento pode ser feito com ou sem pontos de apoio em solo, sendo que o resultado e qualidade quando se utilizam pontos de apoio são melhores (SOUSA, 2017).

Segundo Nex e Remondino (2014), processos de orientação e calibração da câmara requerem a extração (pontos de ligação) de elementos em comum no maior número de imagens possíveis através de processos automáticos. Usando técnicas de visão computacional, é possível determinar os parâmetros de orientação interior e exterior da câmara e a estrutura 3D da região do levantamento.

Para a realização da calibração de câmeras devem ser feitas diversas medidas sobre o plano imagem, sendo envolvidos neste processamento diferentes sistemas de referência. Considerando uma imagem adquirida a partir de uma câmara digital a origem é definida no centro do pixel situado no canto superior esquerdo, com o eixo x coincidente com a direção das linhas e o eixo y coincidente com a direção das colunas, como ilustra a figura 23. Enquanto que o sistema equivalente ao fiducial de uma imagem métrica, pode ser considerado como sendo o sistema com origem no centro geométrico da matriz de sensores,

cuja posição é representada por (C_x, C_y) , ilustrado pela figura 24 (PITERI e RODRIGUES, 2011).

Figura 23 – Sistema de imagem.

Fonte: (PITERI e RODRIGUES, 2011).

Figura 24 – Sistema de imagem e sistema com origem no centro geométrico da imagem.

Fonte: (PITERI e RODRIGUES, 2011).

Considerando que a imagem adquirida possua W colunas e H linhas, a posição do centro geométrico da matriz de sensores (C_x, C_y) é dada por:

$$\begin{cases} Cx = \frac{W-1}{2} \\ Cy = \frac{H-1}{2} \end{cases} \quad (43)$$

Determinando a posição de um pixel na posição coluna/linha (c, l) é preciso transformar essa informação para o sistema (x', y') através de translações em c e em l e também uma reflexão no eixo y . A equação 13 apresenta essa transformação:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c - C \\ -(l - Cy) \end{bmatrix} \quad (44)$$

O resultado dessa operação está em unidade de pixel e deve ser transformada para grandezas métricas. Para tal é necessário conhecer as dimensões dos pixels em x e y (S_x e S_y , respectivamente). Desse modo, as coordenadas (x', y') podem ser calculadas por:

$$\begin{bmatrix} xF \\ yF \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x(c - \frac{W-1}{2}) \\ -S_y(l - \frac{H-1}{2}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 \\ 0 & -S_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c - \frac{W-1}{2} \\ l - \frac{H-1}{2} \end{bmatrix} \quad (45)$$

Até o momento o sistema apresentado é cartesiano bidimensional (2D). Considerando o plano imagem e o centro perspectivo (CP), a projeção ortogonal ao CP sobre o plano imagem define o ponto principal (pp) que não coincide com o centro geométrico da imagem. A partir do CP, pode-se considerar um sistema cartesiano tridimensional (3D) onde o eixo z tem a direção normal ao plano imagem e os eixos (x, y) são paralelos ao sistema (x', y') . Este sistema é denominado Sistema Fotogramétrico. A componente z de quaisquer pontos que estão sobre o plano imagem é igual a $-f$, onde f é a distância focal (PITERI; RODRIGUES, 2011).

Considerando que a posição do ponto principal no sistema (x', y') seja (x_0, y_0) e assumindo que são conhecidas as coordenadas de um ponto qualquer

sobre o quadro fotográfico (no sistema (x', y')), pode-se determinar as coordenadas desse ponto no sistema fotogramétrico através da equação (15):

$$\begin{aligned}x &= x' - x_0 \\y &= y' - y_0 \\z &= -f\end{aligned}\tag{46}$$

As equações da colinearidade criam uma relação entre as coordenadas no espaço objeto e espaço imagem e são consideradas como sendo as equações fundamentais da Fotogrametria e também da Visão 3D e podem ser deduzidas baseando-se na condição de colinearidade envolvendo um ponto imagem, o centro perspectivo e o ponto objeto correspondente.

Figura 25 – Sistema do espaço objeto, sistema fotogramétrico.

Fonte: (PITERI; RODRIGUES, 2011).

A figura 25 mostra a relação entre as coordenadas do espaço objeto $P(X, Y, Z)$, seu ponto correspondente no plano imagem (p) e as coordenadas do centro perspectivo no espaço objeto (X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp}) . Com esses pontos definidos, alguns vetores podem ser identificados para a dedução das equações de colinearidade através da seguinte igualdade vetorial.

$$\overrightarrow{OP} = \overrightarrow{OC_P} + \overrightarrow{C_P P} \quad (47)$$

Essa mesma igualdade pode ser definida como sendo o produto de um escalar k pelo vetor definido por CP e p , ou seja $\overrightarrow{C_P P} = k\overrightarrow{C_P p}$, assim a equação 48 pode ser escrita como:

$$\overrightarrow{OP} = \overrightarrow{OC_P} + k\overrightarrow{C_P p} \quad (48)$$

Ou

$$k\overrightarrow{C_P p} = \overrightarrow{OP} - \overrightarrow{OC_P} \quad (49)$$

A figura 26 apresenta de forma gráfica a geometria desses vetores.

Figura 26 – Vetores ligando os pontos O (origem do sistema do espaço objeto), CP, P e p.

Fonte: (PITERI; RODRIGUES, 2011).

Deve-se aplicar rotações no sistema de coordenadas do espaço objeto para que os sistemas se tornem paralelos. Desse modo definem-se as matrizes

de rotação em torno dos eixos $X(\omega)$, $Y(\emptyset)$ e $Z(\kappa)$ e pode se escrever a seguinte matriz de rotação.

$$M = [m_{c1} \ m_{c2} \ m_{c3}] \quad (50)$$

Onde:

$$m_{c1} = \begin{bmatrix} \cos \emptyset \cos \kappa \\ -\cos \emptyset \sin \kappa \\ \sin \emptyset \end{bmatrix} \quad (51)$$

$$m_{c2} = \begin{bmatrix} \sin \omega \sin \emptyset \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa \\ -\sin \omega \sin \emptyset \sin \kappa + \cos \omega \cos \kappa \\ -\sin \omega \cos \emptyset \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$m_{c3} = \begin{bmatrix} -\cos \omega \sin \emptyset \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa \\ \cos \omega \sin \emptyset \sin \kappa + \sin \omega \cos \kappa \\ \cos \omega \cos \emptyset \end{bmatrix} \quad (53)$$

Que podem ser obtidas pelo produto $M = R_z(\kappa) R_y(\emptyset) R_x(\omega)$.

Considerando a matriz M, os componentes de cada um dos vetores apresentados, e substituindo-os na equação (18), obtém-se:

$$k = \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X - X_{cp} \\ Y - Y_{cp} \\ Z - Z_{cp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_{cp} \\ Y - Y_{cp} \\ Z - Z_{cp} \end{bmatrix} \quad (54)$$

Desenvolvendo o produto matricial apresentado acima, as seguintes equações podem ser obtidas para (x, y, z) :

$$\begin{aligned} x &= k^{-1}[m_{11}(X - X_{cp}) + m_{12}(Y - Y_{cp}) + m_{13}(Z - Z_{cp})] \\ y &= k^{-1}[m_{21}(X - X_{cp}) + m_{22}(Y - Y_{cp}) + m_{23}(Z - Z_{cp})] \\ -f &= k^{-1}[m_{31}(X - X_{cp}) + m_{32}(Y - Y_{cp}) + m_{33}(Z - Z_{cp})] \end{aligned} \quad (55)$$

Dividindo as duas primeiras equações pela terceira, fazendo as devidas simplificações e lembrando ainda da Equação 15, pode-se finalmente escrever as equações de colinearidade:

$$x' = x_0 - f \left(\frac{m_{11}(X - X_{cp}) + m_{12}(Y - Y_{cp}) + m_{13}(Z - Z_{cp})}{m_{31}(X - X_{cp}) + m_{32}(Y - Y_{cp}) + m_{33}(Z - Z_{cp})} \right) \quad (56)$$

$$y' = y_0 - f \left(\frac{m_{21}(X-X_{CP}) + m_{22}(Y-Y_{CP}) + m_{23}(Z-Z_{CP})}{m_{31}(X-X_{CP}) + m_{32}(Y-Y_{CP}) + m_{33}(Z-Z_{CP})} \right) \quad (57)$$

As equações mostradas acima não consideram as influências da refração atmosférica e nem das distorções inerentes ao sensor, portanto refletem um caso ideal no qual apenas a posição do ponto principal é considerada.

Para mais detalhes sobre sistemas de referência utilizados em Fotogrametria recomenda-se a leitura das seguintes obras: LUGNANI (1987), ANDRADE (2003), MIKHAIL et al (2001) e WOLF (1983).

São diversos os métodos de solução da calibração de câmaras utilizados em diferentes programas comerciais e científicos para determinar os parâmetros de orientação interior e exterior envolvidos no levantamento. Para mais informações sobre o método que usa as Equações de Colinearidade com Parâmetros Adicionais recomenda-se GEMAEL (1994), ANDRADE (1988) e MIKHAIL (1976). Para o método de Transformação Linear Direta, para mais detalhes recomenda-se ABDEL-AZIZ e KARARA (1974). O método de fio de prumo pode ser consultado em PRESCOTT e MCLEAN (1997), TSAI (1989) e LENZ e TSAI (1988).

2.3.2.3. Densificação da nuvem de pontos

Definidos todos os parâmetros de orientação das imagens que compõem o bloco, o próximo passo é a reconstrução 3D do objeto, edificação ou local levantado através da densificação da nuvem de pontos. Os dados de saída normalmente são nuvens de pontos, com maior ou menor densidade, que servem para representar o objeto, formando um modelo ou maquete 3D. Informações de cores são incluídas na nuvem de pontos a partir das imagens, fazendo com que o modelo (as informações geradas) seja mais realista e de fácil interpretação.

Os algoritmos devem ser capazes de gerar uma nuvem de pontos altamente densa permitindo que objetos e superfícies possam ser definidos com qualidade. Técnicas conhecidas como *multi-image matching*, *semi-global*

matching, *patch-based* ou *optimal flow algorithms* são utilizadas nos mais diferentes programas comerciais ou programas abertos.

Para mais informações sobre tais técnicas de densificação da nuvem de pontos, indica-se a leitura de SEITZ et al. (2006), HIEP et al. (2009), ZHU et al. (2010), GEHRKE et al. (2010), HIRSCHMÜLLER (2008), FURUKAWA e PONCE (2010) e PIERROT-DESEILLIGNY e PAPARODITIS (2006).

2.3.2.4. Rede irregular triangular

Em 1958, os pesquisadores Miller e Laflamme, do Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), foram os primeiros a utilizar a expressão e o conceito de um Modelo Digital de Terreno (MDT) ao realizarem um projeto de estrada em meio digital (ACKERMANN, 1996).

Um MDT pode ser definido como um conjunto de pontos tridimensionais que representa uma superfície livre de qualquer objeto acima dela (vegetação, construções, etc.). Em levantamentos como tratados nessa tese, o modelo digital é gerado a partir das imagens aéreas e não podem ser considerados como MDT em sentido estrito, pois vegetação, construções e outros elementos visíveis nas imagens não representam a altitude do terreno, mas a dos objetos acima dela, em muitos pontos. Para esses casos emprega-se a expressão Modelo Digital de Superfície (MDS), ou seja, sua representação digital leva em conta todas as informações altimétricas dos objetos situados sobre o terreno.

Felgueiras e Câmara (2001) consideram a representação de uma superfície real no computador como sendo uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre. A criação de um modelo digital para a representação de uma superfície real no computador é indispensável. Tal modelo pode estar representado por equações analíticas ou uma rede (grade) de pontos, entre outras possíveis, de modo a transmitir ao usuário as características espaciais do terreno.

A apresentação dos modelos digitais de superfície mais utilizados é representada por uma malha triangular irregular (TIN) iniciais do termo inglês

triangular irregular network. Trata-se de uma malha irregular formada por pontos de interesse, incluindo máximos e mínimos locais, pontos de quebra, tais como rios, talwegues, cumeeiras, sistema viário, adaptando-se melhor às características irregulares da morfologia do terreno (IDOETA, 2017).

Em seu artigo, Ali e Mehrabian (2009), informam que existem diferentes maneiras de construir uma rede TIN para um número de n pontos, mas o método mais rigoroso e que apresenta melhores resultados é a triangulação de *Delaunay*. Felgueiras e Câmara (2001) destacam que o critério utilizado na triangulação de *Delaunay* é o de maximização dos ângulos mínimos de cada triângulo. Pode-se provar que dados um quadrilátero qualquer da triangulação de *Delaunay*, não existe uma troca de diagonais que melhore a configuração geométrica em termos de máximos ângulos mínimos.

Para exemplificar a reconstrução de geometrias através de redes irregulares triangulares a figura 27 mostra os triângulos formados sobre a nuvem de pontos e, dessa forma, gerando um objeto 3D.

Figura 27 – Representação de objetos tridimensionais através de rede irregular de triângulos (TIN), construída a partir de nuvem de pontos original. Edifício-Monumento do Museu do Ipiranga.

Com o poder computacional existente nos dias atuais, é possível gerar uma nuvem de pontos extremamente densa a partir das imagens (milhões de pontos). Para gerar um modelo TIN com alta qualidade existem vários métodos de implementação da triangulação de *Delaunay*. Para mais informações sugere-se a consulta em ALI e MEHRABIAN (2009), FELGUEIRAS e CÂMARA (2001), CHEW (1989), CINTRA (1985) e BAKER (1989).

2.4. INTEROPERABILIDADE

O *Online Dictionary for Library and Information Science* (ODLIS), define o termo interoperabilidade como a capacidade de um sistema de *hardware* ou de *software* de se comunicar e trabalhar efetivamente no intercâmbio de dados com outro sistema, geralmente de tipo diferente, projetado e produzido por um fornecedor diferente. Um conceito associado é o de padronização de formatos

Um formato típico de saída de uma campanha de levantamento LST é uma nuvem de pontos bruta que é armazenada em arquivos. Tais arquivos podem ser genéricos em formato ASCII, isto é, em TXT ou CSV e minimamente possuir uma lista de coordenadas XYZ tabuladas em colunas. Dados extras podem ser incluídos nessa tabulação para prover mais informações ao ponto levantado (Intensidade de retorno do sinal, cor, entre outros). Inúmeros formatos de arquivos foram desenvolvidos, alguns criptografados e desenvolvidos pelos próprios fabricantes dos equipamentos e outros para facilitar a integração (importação e exportação) entre os programas que utilizam esses dados (SAMBERG, 2007). A tabela 4 apresenta um resumo desses formatos.

Tabela 4 – Resumo de alguns formatos de dados LST.

Adaptado de Samberg, 2007

Formato dos arquivos		
Extensão	Formato	Empresa
.3DD	Binário	Riegl
.ASC	ASCII	Arquivo texto
.BIN	Binário	TerraScan
.DAT	ASCII	Arquivo texto
.IXF	Proprietário	Optech
.LAS	Binário	ASPRS LAS
.PTC	Binário	TerraScan
.PTS	ASCII	Leica Geosystems
.PTX	ASCII	Leica Geosystems
.RAW	ASCII	Dados brutos
.TS	Binário	TerraScan
.TXT	ASCII	Arquivo texto
.XML	DTM	Arquivo
.XYZ	ASCII	Arquivo texto
.ZFC	Binário	Zoller+Fröhlich
.ZFS	Binário	Zoller+Fröhlich
.RWP	Proprietário	Trimble
.FLS	Proprietário	Faro
.E57	Binário	ASTM

Obviamente que a existência de diferentes formatos não favorece a integração entre os diversos programas que podem ser utilizados na geração de produtos de engenharia. O desenvolvimento de arquivos padrão que possam ser importados ou exportados da maioria dos programas comerciais, sem perda de informação, é essencial para que esse processo funcione corretamente. Na prática, alguns formatos são utilizados nesse intercâmbio e suas características serão descritas nesse capítulo. Por exemplo:

- nuvem de pontos:
  - LAS, E57
- modelos 3D:
  - DXF, IFC, OBJ, STL.

O formato *Lidar Exchange Format* (LAS) foi desenvolvido pela Sociedade Americana para Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ASPRS - *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) com o objetivo de fazer a transferência de dados *LiDAR* (pré ou pós processados) entre os programas que utilizam e analisam esses dados. Os desenvolvedores de programas e equipamentos, provedores de serviços e usuários finais aceitaram o conceito

desenvolvido pela ASPRS como um padrão industrial. O uso desse formato traz algumas vantagens citadas por (SAMBERB, 2007):

- Permitem aumentar a velocidade de processamento dos dados *LiDAR*;
- Reduzem significativamente o espaço necessário para armazenar esse tipo de arquivo;
- Possibilitam o compartilhamento dos dados entre diferentes usuários através da internet, manipulando pequenos pedaços independentes.

Outro formato existente é o E57. Um grupo de voluntários trabalhou dentro do comitê ASTM E57 para desenvolver um formato de arquivo que fosse um padrão aberto para armazenar a nuvem de pontos de equipamentos LST, de 3D scanner de luz estruturadas, sistemas de visão computacional, e outros dispositivos que produzem dados de medições 3D. Além desses dados, o formato E57 pode armazenar imagens 2D associadas. Para mais informações sobre esse formato, consultar Huber (2011).

A modelagem dos dados produzidos em campo pode ser feita em diferentes programas existentes no mercado mundial, tudo depende do propósito desse produto e, por consequência, do programa que está sendo utilizado. Modelos 3D podem ser transferidos para diversos outros programas através de alguns formatos que são muito utilizados atualmente. O mais popular é o formato *Drawing Exchange Format* (DXF), desenvolvido pela *AutoDesk*. Como o próprio nome informa foi desenvolvido com o objetivo do intercambio de arquivos CAD entre os programas.

O formato OBJ, assim como o formato STL, são utilizados nos programas que gerenciam as impressoras 3D. O formato IFC além de trazer as informações geométricas do modelo 3D, contém informações importantes sobre o tipo do elemento modelado, ou seja, possui informações adicionais importantes para a elaboração de um *Building Information Modeling* (BIM).

Esses temas não serão detalhados na presente tese, pois objetivo deste tópico é de ser uma introdução ao tema. Estudos adicionais podem ser feitos até mesmo nos manuais dos programas mais utilizados, como exemplo: *AutoDesk Recap*, *Autodesk Revit* e *Realworks* (Trimble).

2.5. METODOLOGIA DE INTEGRAÇÃO DE DADOS

O presente item trata da questão da integração entre dados de levantamento através de LST e Drone.

O LST deve ser operado a partir locais em que não haja movimentação e, dessa forma, as estações de trabalho costumam ser posicionadas no solo, em região isenta de trepidação causada por exemplo, pela passagem de veículos pesados. Regiões altas, como por exemplo, cobertura de prédios, topo de esculturas, entre outros, só podem ser levantadas se houver a possibilidade de instalar o equipamento em locais em que a visada alcance tais regiões. A instalação de andaimes, plataformas e até mesmo o uso de guindastes são uma opção, mas pode elevar o custo de um projeto de maneira a inviabilizá-lo. Uma alternativa é utilizar os levantamentos aéreos para recobrir essas áreas de difícil acesso/alcance com o equipamento terrestre, por exemplo Drone/VANTs.

Em princípio, o LST possui precisão elevada e consegue levantar fachadas, mas não telhados e coberturas. Por sua vez, os drones conseguem levantar fachadas, telhados e coberturas, mas sua precisão é menor. A integração dos produtos passa pelo registro das nuvens de pontos tomadas em sistemas de coordenadas diferentes, sendo necessário promover a ligação entre eles, passando pela identificação de pontos e feições comuns.

É o que se detalha na sequência.

Como anteriormente informado, a nuvem de pontos é um dos produtos gerados por esses levantamentos. Tratam-se de pontos com coordenadas tridimensionais (e algumas vezes com informações complementares) de objetos e locais de interesse. A integração dos dados pode ser feita através de transformações de coordenadas utilizando os métodos dos mínimos quadrados (MMQ).

Com no mínimo 3 pontos em comum nas duas nuvens de pontos é possível fazer essa transformação ortogonal, onde três translações (ΔX , ΔY , ΔZ) e três rotações (ϖX , ϖY , ϖZ) são definidas para colocar as duas nuvens de pontos num sistema de coordenadas único. Essas equações foram detalhadas no item 2.3.1 da presente tese, equações (15), (16), (17), (18) e (19).

Na prática, em programas especializados, esse processo pode ser feito automaticamente através do reconhecimento de pontos homólogos pré-definidos

durante o levantamento de campo, por processos semiautomáticos ou até mesmo manuais. Como um dos objetivos dessa tese é fazer a integração da nuvem de pontos do LST e Drone, esses alvos pré-estabelecidos não existirão. No entanto, é interessante conhecer a maneira como o programa da RealWorks calcula, para entender melhor o processo. Além de que, em algum caso, possa ser interessante empregar de fato essa metodologia.

Para exemplificar, serão utilizadas apenas duas estações coletadas em campo. Cada uma delas possui um sistema de coordenada distinto onde, sua origem está no centro do equipamento e a orientação é baseada pelo eixo de rotação do equipamento. A figura 28, mostrada para esse exemplo, apresenta as duas nuvens de pontos antes do processo de registro e, dessa forma se vê a escultura principal do levantamento (Minerva) em dois locais.

Figura 28 – Duas nuvens de pontos antes do processo de registro. Cada cor apresenta uma estação levantada em campo.

O que se faz é escolher uma delas como referência e, através de uma transformação isogonal, referir todos os pontos ao sistema da primeira estação. As figuras 29 e 30 apresentam esse processo

Figura 29 – Identificação dos pontos homólogos par em duas estações para execução do registro das nuvens de pontos.

Deixando a nuvem de pontos da direita como referência (figura 29), escolhem-se três pontos em comum nas duas nuvens de pontos para fazer a transformação de coordenadas.

Com o processo finalizado, e validado através de um relatório e de uma análise visual, as duas nuvens de pontos passam a estar num sistema único de coordenadas, conforme apresentado na figura 30. Esse processo vai sendo repetido para todas as estações levantadas em campo. Obviamente que existem processos mais automatizados, mas que não serão descritos nessa tese.

Figura 30 – Registro finalizado e apresentação das nuvens de pontos num sistema único de coordenadas. Uma estação está representada em verde e outra em vermelho.

Relatórios desse processo vão sendo gerados a medida que o trabalho de registro avança e servem de base para averiguar a qualidade da junção de todas as nuvens de pontos do levantamento. Para o exemplo mostrado acima, o erro encontrado nesse processo foi inferior a 4 mm com uma sobreposição (mesma área recoberta nas duas nuvens de pontos) entre as duas nuvens de 76%, conforme mostrado na figura 31.

Figura 31 – Apresentação da qualidade do processo de registro para o exemplo.

2.6. CONTROLE DE QUALIDADE

Para mapas em meio digital, quatro parâmetros são tradicionalmente considerados no controle da qualidade de dados; são eles: Linhagem, Completude, Fidelidade Semântica e Consistência Lógica (LIMA, 2012 e BURITY et al, 1999).

Neste trabalho procura-se adaptar esses parâmetros para os dados gerados através dos levantamentos tratados aqui. Além disso, um novo parâmetro deve ser considerado, trata-se da Qualidade Métrica.

Dos cinco parâmetros citados acima, consideram-se que quatro podem ser utilizados no controle de qualidade em levantamentos LST e Drone: Linhagem, Completude, fidelidade semântica e Qualidade Métrica/posicional. Esses parâmetros de controle de qualidade serão aplicados aos dados coletados em campo (parte do controle do processo), sem prejuízo de que os produtos finais gerados possam ser analisados (controle do produto).

Na maioria dos casos, a análise é amostral e visual e um relatório de avaliação de cada parâmetro deverá detalhar os eventos envolvidos e testados, incluindo a data da avaliação.

2.6.1. Linhagem

Segundo Lima (2012), a Linhagem contém o detalhamento dos passos seguidos na criação dos dados, ou seja, tudo o que se refere à descrição do material de origem, métodos de derivação utilizados, transformações executadas e comentários.

No caso de uma nuvem de pontos oriundas de equipamentos LST ou de imagens aéreas, a Linhagem pode ser considerada um histórico do processo total, desde a coleta de dados em campo até a geração do produto final.

Esse parâmetro de controle de qualidade deve ser avaliado durante todo o processo e pode ser controlado através de normas e procedimentos de execução.

Algumas perguntas devem ser feitas já no planejamento do projeto, para verificar se o parâmetro Linhagem está sendo atendido ou não. Abaixo será apresentado um fluxograma desenvolvido para controlar o parâmetro Linhagem

e corrigir desvios que podem ocorrer no desenvolvimento de projetos dessa natureza.

A figura 32 sugere a utilização dessas tomadas de decisão para controlar todo o processo de levantamento de campo até a geração do produto final. Seguindo esse fluxograma, o profissional pode tomar decisões e prever problemas que podem surgir e inviabilizar o projeto.

De qualquer maneira, mais detalhes podem ser incorporados a essa proposta. Mostrando, por exemplo, quais modelos matemáticos, quais programas e quais os formatos de saída serão empregados no processamento. O nível de detalhamento pode ficar a critério do usuário, a partir dessa proposta básica. A implementação desse fluxograma pode ser feita para cada projeto, analisando cada detalhe necessário para suprir o parâmetro de controle de qualidade Linhagem.

Apenas analisar se o objetivo foi atingido com sucesso não é uma resposta definitiva para esse parâmetro, pois o mesmo resultado poderia ser atingido com custo menor ou em menor tempo. Por exemplo, a experiência da equipe envolvida tem bastante influência no resultado, pois, dependendo das decisões tomadas, o trabalho pode ser mais dispendioso, por ter sido refeito em parte ou no todo, e chegar a seu objetivo final com atrasos e fora do orçamento proposto.

Figura 32 – Fluxograma proposto para testar o parâmetro de qualidade Linhagem.

2.6.2. Completude

O conceito de Completude pode ser aplicado tanto às feições quanto aos atributos desta. Quando aplicado às feições, indica se todas as feições que devem ser representadas numa base cartográfica estão presentes ou não. Para os atributos, o nível de conhecimento sobre estes indica a Completude do mesmo. Os tipos de medidas utilizadas na definição de Completude podem ser: a porcentagem de feições em excesso ou falta com relação ao total da amostra, por exemplo, no comprimento ou na área de feições. O número (ou fração ou porcentagem) de erro pode corresponder a dados omissos ou em excesso. Deve-se incluir a data da avaliação, pois as feições mudam com o tempo (SANTOS et al., 2008).

Direcionando esses parâmetros para avaliar a qualidade dos levantamentos presentes nessa pesquisa, apresenta-se abaixo um fluxograma (Figura 33) que se propõe, com o objetivo de avaliar o parâmetro Completude.

Figura 33 – Fluxograma proposto para testar o parâmetro de qualidade de Completude.

2.6.3. Fidelidade Semântica

Descreve a diferença semântica entre objetos geográficos e a percepção da realidade. Está mais ligada à pertinência do significado do objeto geográfico que à apresentação geométrica (SANTOS et. al., 2008).

Tal definição pode ser aplicada à produção de bases cartográficas, onde uma análise dos objetos representados num mapa está de acordo com a percepção da realidade. Para os levantamentos que estão sendo detalhados nessa tese, essa análise está relacionada em identificar a diferença semântica entre o objeto levantado e o resultado obtido após a nuvem de pontos registrada (LST) ou processada (imagens aéreas). Ou seja, está relacionada à qualidade da imagem ou fotografia aérea (nos diversos produtos: ortomosaico, perspectivas, etc.) e à capacidade da nuvem de pontos (por sua densidade, cor, ausência de ruído, etc.) representar bem o objeto de forma adequada.

Pode-se analisar, por exemplo, se as cores atribuídas a um elemento (vegetação, construção, etc.) estão adequadas, se um certo elemento geométrico está bem representado nos dados processados, entre outros. No mínimo 3 análises devem ser realizadas: Padrões, texturas e rugosidades e semelhança física.

- a) padrões: Analisar visualmente se os padrões existentes nas nuvens de pontos estão corretos, exemplos:
  - i) analisar se as cores apresentadas na nuvem de pontos são as corretas;
  - ii) verificar se as formas foram preservadas;
  - iii) encontrar possíveis interferências que prejudicam a qualidade da nuvem de pontos;
- b) texturas e rugosidades: Utilizando programas que manipulam a nuvem de pontos, analisar se os objetos representados pela nuvem de pontos (no seu todo e em detalhe) apresentam semelhanças com os objetos reais;
- c) semelhança física: Verificar se a nuvem de pontos gerada realmente representa o objeto levantado.

O fluxograma (Figura 34) abaixo apresenta uma maneira de verificar se esse parâmetro de qualidade foi aprovado ou não.

Figura 34 – Fluxograma proposto para testar o parâmetro de qualidade de Fidelidade Semântica.

2.6.4. Consistência lógica

Santos et. al, 2008, define consistência lógica como sendo a informação sobre a manutenção de relações lógicas e topológicas consistentes. Tais testes incluem: Testes de valores válidos, testes gerais para dados gráficos e testes topológicos específicos.

Para a massa de dados provenientes de um levantamento LST ou a geração da nuvem de pontos através de imagens, esse teste não se aplica. Essa avaliação pode ser feita com os produtos gerados utilizando esses dados como base. Como as aplicações são as mais diversas, essa análise poderá ser mais detalhada em trabalhos futuros para cada tipo de aplicação.

2.6.5. Qualidade Métrica

Para um produto cartográfico convencional (cartas e mapas) a análise da qualidade posicional é realizada através do Padrão de Exatidão Cartográfica estabelecido pelo Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984.

Tal decreto estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Brasileira através de procedimentos e padrões a serem obedecidos na elaboração e apresentação de documentos cartográficos no Território Brasileiro, criando o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), e uma classificação das cartas em: Classe A, B e C.

Segundo Santos (2010), esse decreto estabelece em seu artigo 8º que "90% dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica estabelecido".

No entanto Dalmolin e Leal (2001), já destacavam que o PEC não apresenta diretrizes para avaliação de trabalhos hoje ofertados pela cartografia digital, visto que, no decreto de 1984, não estão contemplados procedimentos para avaliação da cartografia digital, mesmo porque, na data da sua publicação, poucas eram as experiências registradas nesta área.

Em 2011 foi divulgado a primeira edição do PEC para produtos cartográficos digitais (PEC-PCD) na ET-ADGV. Foi desenvolvido pelo Ministério

da defesa, Exército brasileiro e departamento de ciências e tecnologia e teve sua segunda edição publicada em 2016 (ET-CQDG).

Embora seja possível gerar produtos cartográficos a partir da nuvem de pontos (cartas topográficas e Ortofotos, por exemplo), os produtos finais que estão envolvidos nesta tese não podem ser considerados como produtos convencionais. Dessa maneira uma análise diferente deve ser realizada e será apresentada para tipo de aplicação desenvolvida nesse trabalho.

II. PARTE PRÁTICA

Para testar a metodologia para análise e controle de qualidade e integração dos dados gerados através das duas tecnologias, algumas regiões foram definidas como áreas de testes.

O primeiro teste foi realizado no Monumento Minerva, localizada próxima ao prédio da Engenharia Civil da Escola Politécnica. As ruínas do Engenho São Jorge dos Erasmos foi escolhida para o segundo teste. A terceira região escolhida foi o Edifício-Monumento do Museu do Ipiranga e o último campo de prova foi o prédio da Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

3. ESCULTURA PALAS ATENAS (ESCOLA POLITÉCNICA DA USP)

Localizada próxima ao prédio da Escola de Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, o Monumento/Escultura Palas Atenas foi criado pela cenógrafa e artista plástica Denise Milan para comemorar o centenário da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

A artista inspirou-se no símbolo da Poli, a deusa Minerva, para sua obra. A figura 35 retrata essa escultura. O jornal Estado de São Paulo número 35.981 noticiou: “A peça parece uma espécie de palco, com degraus de acesso e púlpito, encimado por uma forma recurva em aço; conta com alguns furos em sua estrutura, o que significam o capacete da Deusa”. Na realidade, observando in loco vê-se que foi desenhada em mármore a planta do Templo de Palas (equivalente à Minerva dos romanos) na cidade de Atenas, contendo o posicionamento das colunas e paredes, desenhado em preto sobre o mármore branco. Ao fundo há o altar do sacrifício. Em ferro, representou-se o perfil do capacete da deusa da sabedoria e da estratégia. Ou seja, é uma representação da planta do templo grego e da deusa associada à Escola Politécnica. Devido à falta de verba e manutenção, o capacete está muito enferrujado e diversas placas soltaram-se.

Figura 35 – Escultura Palas Atenas.

Fonte: (<http://www.denisemilanstudio.com/>)

3.1. Levantamento de campo

Dois levantamentos foram realizados. O primeiro foi executado no dia 02/06/16 utilizando o LST modelo Faro Focus 3D e um Drone modelo Phantom 4 do fabricante DJI. O segundo levantamento foi efetuado em 24/03/17 utilizando o mesmo Drone do primeiro levantamento e o LST da fabricante Trimble, modelo TX5.

Embora os equipamentos LST utilizados nesses levantamentos tenham sido diferentes, as informações fornecidas nos catálogos dos fabricantes mostram que os equipamentos possuem características idênticas. A figura 36 mostra parte dessas características retiradas dos catálogos dos fabricantes disponíveis em seus websites oficiais.

3.1.1. Primeira campanha de levantamento

3.1.1.1. Levantamento terrestre com equipamento FARO

Por ser uma estrutura simples e sem muita interferência, o levantamento da nuvem de pontos com LST foi realizado em menos de 2 horas de trabalho. Foram implantadas 6 estações de levantamento, circundando toda a escultura.

A figura 37 mostra uma vista em planta da escultura e a posição de cada estação em relação a escultura (bolhas transparentes). A relativa dificuldade desse caso é a existência de árvores e galhos, que invadem a área da escultura. Foi necessário afastar alguns galhos manualmente

Figura 37 – Nuvem de pontos, vista de cima com a posição de cada estação de levantamento.

Após o processo de registro (realizado no programa *Autodesk Recap*) obteve-se uma nuvem de pontos completa da escultura e seu entorno. Ao todo foram coletados 55.601.555 pontos. A figura 38 mostra a nuvem de pontos a partir de dois pontos de vista.

Figura 38 – Nuvem de pontos da escultura em uma vista perspectiva.

3.1.1.2. Levantamento aéreo (Drone)

O levantamento aéreo foi realizado com o equipamento modelo *Phantom* 4 do fabricante DJI. Apenas um voo foi realizado a uma altura de 40 metros do solo, sendo coletadas 25 imagens em 4 faixas. A sobreposição longitudinal foi de 80% enquanto que a transversal foi de 50%. O processamento foi realizado no programa *Pix4DMapper* e como resultado obteve-se a nuvem de pontos da escultura e de toda a região levantada. A figura 39 mostra como o recobrimento aéreo foi realizado.

Figura 39 – Esquema do levantamento, as pirâmides em verde mostram a posição das fotos tomadas (miniatura na base da pirâmide), com um ponto em verde na posição do centro perspectivo e sua projeção (em azul) no terreno.

3.1.1.3. Análise dos resultados e controle de qualidade

Além da Qualidade Métrica/posicional, dois parâmetros serão considerados na avaliação e análise dos resultados obtidos: Linhagem e Completude. Também será analisada a qualidade final da nuvem de pontos quando os dois produtos são integrados num único sistema.

3.1.1.3.1. Linhagem

O parâmetro Linhagem será analisado separadamente para cada levantamento realizado.

Para o levantamento com o LST, todo o processo foi realizado rapidamente, desde a coleta de campo até a geração do produto final e o mapeamento de todo o processo pôde ser executado e as tomadas de decisões puderam ser feitas com facilidade.

O produto foi gerado sem a necessidade de voltar a campo e todo o processo computacional foi realizado com sucesso, portanto pode-se dizer, que o quesito Linhagem foi muito bem controlado nesse levantamento. A figura 40 apresenta o fluxograma de trabalho para verificação desse parâmetro de qualidade.

Figura 40 – Análise do parâmetro de qualidade Linhagem do levantamento terrestre através do fluxograma proposto.

O levantamento realizado com o Drone não foi aprovado no parâmetro Linhagem. Todo o planejamento de campo foi realizado seguindo o fluxograma de trabalho, no entanto a nuvem de pontos gerada não apresentou os resultados esperados. A figura 41 apresenta o fluxograma de verificação para essa etapa do trabalho.

Figura 41 – Análise do parâmetro de qualidade Linhagem do levantamento aéreo através do fluxograma proposto.

Analisando a figura 41 percebe-se que todo o processo foi executado de maneira correta até a etapa de verificação dos resultados. Conforme já apresentado, os resultados conseguidos não foram satisfatórios e têm-se duas possibilidades para essa causa, ou o equipamento utilizado não é adequado para essa finalidade ou o voo realizado não estava adequado para um levantamento dessa natureza.

A falta de experiência com esse tipo de levantamento pode ter sido um ponto relevante para que esse parâmetro de qualidade não tenha sido aprovado nesse levantamento. Por isso, novos testes foram realizados nesse mesmo campo de provas e apresentados adiante.

3.1.1.3.2. Completude

Para a nuvem de pontos adquirida com o LST, analisando as imagens, vê-se que não há perda de informações consideráveis e as áreas de sombras são inexistentes após o processo de registro. As imagens mostradas na figura 42 apresentam algumas vistas que permitem a análise dos dados oriundos do LST.

Figura 42 - Vistas perspectivas da nuvem de pontos registrada e completa.

Nas imagens acima, é possível perceber que todo o objeto foi levantado e não há falta de informação na nuvem de pontos. Algumas árvores poderiam gerar interferências no momento da coleta, no entanto um bom planejamento para o trabalho de campo pôde minimizar ou eliminar esse problema.

Apenas a parte superior da escultura não possui informação (capacete da Minerva). Essa deficiência já era esperada e uma solução para problemas desse tipo é a instalação do equipamento em locais mais altos e assim possibilitar a coleta de informações nessas regiões. Para esse caso, em particular, ou o equipamento poderia ser instalado em cima do prédio ao lado da escultura ou sobre andaimes que poderiam ser instalados no local. Para estudar essa deficiência e a integração dos dados oriundos do LST com a nuvem de pontos a gerada a partir do levantamento aéreo, esse procedimento não foi adotado e essa região ficou sem pontos, como se pode ver na figura 43.

Figura 43 – Detalhe da parte superior da escultura, mostrando a inexistência de pontos nessa região.

No entanto, para esse caso, para a modelagem com o objetivo de produzir um modelo 3D para pacotes CAD/CAE, essa falta de informação não seria relevante, pois todas as faces da escultura foram levantadas e esses buracos poderiam ser preenchidos através da reconstrução de primitivas geométricas. Mas em outros casos essa informação será necessária e por isso mesmo será estudada a possibilidade de suprir essa lacuna com dados provenientes do levantamento com Drone. No caso concreto, por analogia e padrões identificáveis na escultura, a modelagem pode ser executada sem perda de informação.

A figura 44 retrata todo o processo de verificação de parâmetro de qualidade e mostra que todo o processo foi realizado com sucesso fazendo com que esse parâmetro seja aprovado.

Figura 44 – Análise do parâmetro de qualidade Completude do levantamento terrestre através do fluxograma proposto.

Por outro lado, analisando a nuvem de pontos gerada a partir do levantamento aéreo percebe-se que existem regiões em que não existe informação, ou seja, não foi possível gerar pontos através da correlação de imagens em certas regiões.

As figuras 45 e 46 mostram tais falhas encontradas através de uma análise visual.

Figura 45 – Vista aérea da nuvem de pontos gerada pelo levantamento aéreo. A seta indica a região onde não há informação.

Figura 46 – Vista lateral da nuvem de pontos gerada pelo levantamento aéreo. A seta indica a região onde não há informação.

Alguns fatores podem gerar essa condição:

- a) altura de voo inadequada para a aplicação;
- b) falta de sobreposição entre as imagens;

- c) baixa resolução radiométrica/geométrica das imagens;
- d) falta de informação das imagens (interferência de nuvem e árvores, por exemplo).

Nessa primeira análise, mostrada acima, verifica-se que a copa de uma árvore está sobre a base de mármore da escultura, impedindo o imageamento do local encoberto. Dessa forma, como não há informação na imagem, a correlação não pode ser feita e assim não há pontos no local. Lembrando-se que para gerar os pontos são necessárias pelo menos duas imagens de um mesmo local com perspectivas diferentes.

Gerando um recorte na nuvem de pontos, eliminando todos os pontos que não fazem parte da escultura (árvores e prédio), é possível verificar que a nuvem de pontos apresenta falhas e como consequência a escultura não pôde ser detalhada com exatidão. Percebe-se que a densidade de pontos é muito baixa nessa região. Tal fato pode ser verificado na figura 47.

Figura 47 – Vista lateral da nuvem de pontos gerada com Drone. A seta indica o local onde a densidade de pontos é baixa.

Alterando a perspectiva da vista, esse tipo de falha fica mais evidente. Na figura 48 é possível identificar melhor as regiões onde não há pontos gerados,

inclusive pela interferência gerada pela a árvore que existe no local: a nuvem de pontos é formada por pontos dessa vegetação.

Figura 48 – Nuvem de pontos gerada por correlação de imagens. As linhas em vermelho mostram as regiões de sombra / árvores.

Isso ocorre devido ao fato das imagens coletadas com o Drone serem paralelas ao plano do solo, o que causa baixo grau de correlação nesse objeto perpendicular ao solo.

O parâmetro Completude é totalmente dependente do parâmetro Linhagem, ou seja, havendo um procedimento de trabalho de campo bem definido considerando que os modelos matemáticos que serão empregados no processamento dos dados são os corretos, é possível eliminar as áreas de sombra, trazendo como produto final uma nuvem completa e sem falhas.

A figura 49 resume a análise desse parâmetro de qualidade para o levantamento aéreo.

Figura 49 – Análise do parâmetro de qualidade Completude do levantamento aéreo através do fluxograma proposto.

Analisando o fluxograma de referência e aplicando a esse caso, a qualidade desse parâmetro é facilmente rejeitada, pois percebe-se que o resultado conseguido não foi satisfatório para as necessidades do projeto.

Para o levantamento com LST, como o parâmetro Linhagem foi aprovado tem-se o parâmetro Completude classificado como de ótima qualidade, já para o levantamento aéreo, como houve uma falha no primeiro parâmetro de qualidade analisado, dificilmente o parâmetro Completude teria uma boa avaliação, como não teve de fato.

Definir o equipamento correto, metodologia de levantamento, modelos matemáticos empregados no processamento das imagens, pode ser fazer a diferença entre o sucesso e fracasso num levantamento dessa natureza. No caso, a existência de árvores ou outras obstruções pode invalidar o uso de drone, a menos que se encontre uma metodologia de voo mais adequada.

Importante salientar que mesmo o produto sendo validado quanto ao parâmetro Linhagem, não implica num resultado positivo para o parâmetro Completude.

Percebe-se que no caso do levantamento aéreo, a modelagem do terreno poderia ser realizada com sucesso, no entanto a modelagem da estrutura não seria possível.

3.1.1.3.3. Fidelidade Semântica

Analisando separadamente cada produto pode-se concluir que o resultado obtido com o levantamento LST apresenta um ótimo resultado no parâmetro de qualidade Fidelidade Semântica. A nuvem de pontos gerada possui as cores reais dos objetos levantados pois o equipamento utilizado possuía câmeras integradas. Essa característica não melhora a qualidade dos dados obtidos, mas auxilia na interpretação das informações.

A figura 50 mostra uma comparação entre imagens e a nuvem de pontos, mostrando que características inerentes ao local (cores e padrões geométricos) foram preservados.

Figura 50 – Comparação entre imagens tiradas no local (figuras da esquerda) e a nuvem de pontos em cores reais (figuras da direita).

A Figura 51 exemplifica o caso de não se ter as cores reais na nuvem de pontos. É possível interpretar a nuvem de pontos e compará-la com sua realidade constatando que mesmo assim toda a geometria e padrões estão preservados.

Figura 51 – Análise visual entre imagem tirada no local (figuras da esquerda) e a nuvem de pontos sem as cores reais (figuras da direita).

O fluxograma de verificação (figura 52) comprova a aprovação desse parâmetro.

Figura 52 – Análise do parâmetro de qualidade Fidelidade Semântica do levantamento terrestre através do fluxograma proposto.

Para os dados processados a partir das imagens aéreas, apesar de possuírem as cores reais dos objetos de estudo, as formas e as características dos objetos não foram preservadas. A figura 53 apresenta uma breve comparação do real com a nuvem de pontos e nelas é possível constatar que as características dos objetos não foram preservadas e dessa forma esse

parâmetro de qualidade não pode ser aprovado. O fluxograma de análise é mostrado na figura 54

Figura 53 – Comparação entre as imagens coletadas em campo (figuras da esquerda) com a nuvem de pontos resultante do processamento das imagens (figuras da direita).

Figura 54 – Análise do parâmetro de qualidade Fidelidade Semântica do levantamento aéreo através do fluxograma proposto.

3.1.1.3.4. Qualidade Métrica

As nuvens de pontos geradas pelos levantamentos apresentados acima foram referenciadas ao mesmo sistema de coordenadas, de acordo com a teoria do item 2.5, para que as feições geométricas pudessem ser comparadas e interpretadas por igual.

Utilizando o programa RealWorks da empresa Trimble, foram gerados cortes transversais nos eixos X, Y e Z, nas quatro nuvens de pontos, na mesma posição. Dessa maneira pode-se analisar a qualidade da nuvem de pontos quanto a sua posição e precisão métrica.

A figura 55 mostra em verde os perfis gerados diretamente sobre a nuvem de pontos coletada com o equipamento LST.

Figura 55 – Nuvem de pontos (LST) com os cortes gerados em verde.

Tais perfis foram traçados diretamente sobre a nuvem de pontos. A figura 56 mostra em ampliação os cortes gerados ao longo do eixo Y nos degraus da escultura.

Figura 56 – Nuvem de pontos (LST) com os perfis gerados nos degraus (em verde).

A figura 57 mostra todos os perfis gerados sobre a nuvem de pontos coletada com o LST nos três eixos (X, Y e Z).

Figura 57 – Nuvem de pontos (LST) sobreposta com os perfis gerados nos três eixos.

O mesmo procedimento para geração dos perfis foi feito com a nuvem de pontos geradas através das imagens (fotos) coletadas no levantamento aéreo (Drone) e processadas, com a formação de um modelo 3D, através da correlação de imagens. Os resultados serão apresentados a seguir.

Quatro locais foram escolhidos para prover dados para a primeira análise e cada distância medida foi nomeada para poder ser interpretada na tabela que foi montada. Medições diretamente no local, utilizando trena digital, foram realizadas para servir de referência. Para os dois primeiros cortes mostrados nas figuras 58 e 59, foram coletadas distâncias sobre esse corte de lado a lado da base da escultura.

Figura 58 – Local 1: Primeiro corte ou perfil ao longo do eixo Y (Distância: DY).

Figura 59 – Local 2: Primeiro corte ao longo do eixo X (Distância: DX).

A medidas realizadas sobre a estrutura regular (altar da deusa) foram denominadas de C1, C2 e C3. A localização das medidas está apresentada na figura 60.

Figura 60 – Local 3: Dimensões da estrutura regular localizada próxima a escultura (Distâncias: C1, C2 e C3).

A disposição de cada medida tirada e a nomenclatura utilizada está apresentada na figura 61.

Figura 61 – Esquema de medição e nomenclatura das medições realizadas no perfil extraído e mostrado na figura 60.

A figura 62 apresenta a região onde foram realizadas medições nos degraus da escultura, enquanto que a figura 63 mostra em detalhe a nomenclatura utilizada para posterior análise.

Figura 62 – Local 4: Degraus (Distâncias: D1 e D2).

Figura 63 – Detalhes e nomenclatura utilizada das medições realizadas no local 5.

A tabela 5 mostra o resultado obtido na comparação das observações realizadas sobre a nuvem de pontos oriunda do LST e do Drone e as medições coletadas *in loco*.

Tabela 5 – Erro absoluto e relativo entre as medições realizadas sobre as nuvens de pontos e as medições coletadas na escultura (trena digital).

Primeiro teste (FARO + TRENA POLI)							
Cota	Distâncias (mm)			Erro Absoluto (mm)		Erro Relativo (%)	
	A	B	C	B-A	C-A	B-A	C-A
	Trena	LST	Drone				
DY	5.794,00	5.794,71	5.719,53	0,71	-74,47	0,01%	1,29%
DX	12.942,00	12.939,56	12.865,82	-2,44	-76,18	0,02%	0,59%
C1	990	986,53	-	-3,47	-	0,35%	-
C2	620,00	615,51	-	-4,49	-	0,72%	-
C3	390,00	391,00	-	1,00	-	0,26%	-
D1	200,00	201,20	-	1,20	-	0,60%	-
D2	344,00	344,57	-	0,57	-	0,17%	-
Média				-0,99	-75,33	0,30%	0,94%
Desvio Padrão				2,40	1,21	0,28%	0,49%

Como observação preliminar deve-se dizer que, no levantamento com Drone, na maioria das regiões, por se tratar de elementos geométricos menores e mais detalhados, a nuvem de pontos geradas através do processamento de imagens produziu poucos pontos, deixando regiões sem nenhuma ou com pouca informação, não sendo possível a comparação dimensional.

Esse tipo de problema pode ter ocorrido em razão de uma falha no parâmetro Linhagem, ocasionando problemas no parâmetro Completude e por consequência não provendo informações para serem analisadas no parâmetro relacionado à Qualidade Métrica. Só foi possível medir as distâncias maiores (DX e DY).

Analisando a tabela 5 e considerando o valor medido *in loco* com trena como sendo o parâmetro de comparação, pode-se apontar o seguinte:

- analisando as duas distâncias obtidas sobre a nuvem de pontos do Drone, vê-se que as diferenças passaram de 76 mm;
- na comparação entre os valores de referência e o LST, a diferença máxima encontrada foi de 4,49 mm (C2) enquanto que a mínima foi de 0,57 mm (D2);
- considerando a nuvem de pontos gerada pelo levantamento aéreo, o erro relativo encontrado foi de 1,29% e 0,59% para as duas observações que foram realizadas (DY e DX)

- d) para os dados do LST, o menor erro relativo foi de 0,01% (DY) e o maior erro relativo encontrado foi de 0,72% (C2).
- e) o desvio padrão encontrado, considerando apenas as duas observações realizadas sobre os dados obtidos com o Drone, foi de 1,21 mm.
- f) o desvio padrão encontrado, considerando apenas as observações realizadas sobre os dados o LST, foi de 2,4 mm.
- g) o desvio padrão aplicado sobre os dados obtidos dos erros relativos foi de 0,28%

O desvio padrão das diferenças encontradas utilizando os dados obtidos pelo LST para toda essa amostra foi de 2,40 mm, o que está dentro do que é divulgado no catálogo do fabricante do equipamento. Sabe-se que os resultados apresentados pelo fabricante, são informados através de testes em laboratório controlados, mas nesse caso, foi conseguido nas condições de campo.

Utilizando as medições (DX, DY e D1) realizadas sobre a base da escultura e calculando o volume dessa base, uma análise complementar pode ser feita verificando as diferenças encontradas nesse cálculo nos diferentes métodos de levantamento. A tabela 6 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 6 – Volumes calculados a partir das medidas extraídas e apresentadas na tabela 5.

Volume (m3) Piso				
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Volume total (m3)
Faro	12939,560	5794,710	201,200	15,086
Manual	12942,000	5794,000	200,000	14,997

Comprando os dados apresentados acima é possível identificar que a diferença do volume encontrado entre as medições manuais e os dados LST são menores que 0,09 m³, ou seja 0,6% do volume total.

Como conclusão geral, confirma-se o esperado: a nuvem de pontos obtida através do processamento das imagens coletadas pelo Drone apresenta erros superiores (da ordem de 7 cm) quando comparados com o LST (4 mm, 17 vezes

menor) e assim, para levantamentos onde se necessita boa precisão (milimétrica) os dados obtidos com o LST atendem satisfatoriamente ao quesito geometria e o Drone não. Além disso, a nuvem gerada pelo processo com Drone apresentou muitas falhas e os detalhes não são facilmente identificáveis e por consequência não se consegue extrair informações precisas da nuvem de pontos

3.1.1.3.5. Integração

Conforme mostrado na figura 43, as partes superiores da escultura não foram levantadas com o LST pois toda a campanha de levantamento foi realizada no chão, impossibilitando que a escultura fosse levantada por completo.

Em regiões de difícil acesso para equipamentos LST pode se optar pela geração da nuvem de pontos através do processamento de imagens obtidas por Drone para uma complementação da informação. Para que isso ocorra de forma rápida e que não prejudique a qualidade final do levantamento, as duas nuvens de pontos devem estar no mesmo sistema de coordenadas e com a precisões compatíveis.

Para esse levantamento, não há a possibilidade de fazer essa integração, pois a nuvem de pontos obtida através das imagens aéreas ficou pobre, com pouca informação e com sua precisão degradada em relação a qualidade conseguida com o LST.

3.1.2. Segunda campanha de levantamento

3.1.2.1. Levantamento terrestre com equipamento Trimble

O levantamento utilizando o equipamento modelo TX5 da Trimble foi executado de maneira semelhante ao primeiro levantamento. Com a finalidade de gerar uma nuvem de pontos mais densa, foram realizadas 10 estações de levantamento ao redor da escultura conseguindo então, coletar 593.162.425 pontos contra 55.601.055 pontos do primeiro levantamento. A figura 64 mostra a disposição de todas as estações representadas por um triângulo.

Figura 64 – Levantamento realizado com equipamento TX5 da Trimble visto de cima e renderizada por elevação (coroplético por alturas).

Comparando ao levantamento anterior, percebe-se que foram feitas mais observações, inclusive uma no centro da escultura. No primeiro levantamento os dados foram coletados apenas ao redor da escultura. Todo o processo do registro das cenas foi realizado no programa *RealWorks*.

3.1.2.1. Levantamento aéreo (Drone)

Com os problemas no parâmetro Linhagem identificados no primeiro levantamento executado, optou-se por realizar um novo levantamento utilizando o mesmo equipamento, mas com métodos de coletas diferentes.

Enquanto que no primeiro levantamento as imagens foram coletadas verticalmente, em faixas de voo homogêneas, sobreposição entre as imagens e faixas constantes, altura de voo e posição da câmera fixa, no segundo levantamento foram realizados voos em diferentes alturas de voo, em algumas

com a câmera inclinada com a finalidade de coletar mais imagens da lateral da escultura.

O que se conseguiu, dessa vez, foi uma nuvem de pontos mais densa devido à grande quantidade de imagens coletadas, em diferentes condições. A figura 65 apresenta um esboço de como o levantamento foi realizado.

Figura 65 – Disposição esquemática da coleta de imagens aéreas.

Observando a figura 65 dá-se a impressão que as imagens foram coletadas de forma aleatória, o que de fato não ocorreu. Primeiro se executou um voo de forma padrão, ou seja, com faixas de voo lineares e paralelas, em seguida um segundo voo foi programado para ser executado de forma circular. Um terceiro e último levantamento foi realizando utilizando o controle manual, em que o operador determina a posição e a atitude da câmera no momento da tomada. Nesse último levantamento, as imagens foram tomadas lateralmente à escultura, com a câmera inclinada e altura de voo variável. Ao todo foram coletadas 383 imagens e todas foram utilizadas no processamento.

Como produto se obteve uma nuvem de pontos densa de todo o objeto de estudo, conforme se mostra na figura 66.

Figura 66 – Vistas perspectivas do resultado do processamento das imagens.

Comparando o primeiro levantamento com o segundo percebe-se a considerável melhora no resultado do processamento. A figura 67 apresenta uma vista perspectiva dos dois levantamentos. A figura da esquerda representa o processamento do primeiro levantamento enquanto a da direita mostra o resultado o segundo processamento.

Figura 67 – Comparação entre os resultados dos dois levantamentos.

3.1.2.1.1. Análise dos resultados e controle de qualidade

Para uma comparação consistente, os mesmos parâmetros foram utilizados para avaliar a segunda campanha de levantamento. Como na análise da primeira campanha de levantamento além da Qualidade Métrica, três parâmetros foram considerados na avaliação e análise dos resultados obtidos: Linhagem, Completude e Fidelidade Semântica. O processo de integração entre os dados também está apresentado, relatando as dificuldades e o resultados obtidos

3.1.2.1.2. Linhagem

Para o levantamento aéreo, com a experiência adquirida no primeiro levantamento, onde as imagens coletadas não foram suficientes para gerar uma nuvem de pontos densa e com informações de todo o local, nesse levantamento optou-se por ter uma maior redundância de observações, ou seja, o maior número possível de imagens de diferentes locais, alturas e orientações para que se tenha certeza que toda a escultura tivesse sido recoberta.

Observando o fluxograma de verificação do parâmetro de qualidade Linhagem, percebe-se que todas as etapas foram cumpridas e que todo o processo de trabalho foi seguido, inclusive utilizando como um fator decisivo a experiência adquirida em levantamentos anteriores. No primeiro levantamento, como explicado anteriormente, todas as etapas também foram realizadas, no entanto, a quantidade de imagens coletadas não foi suficiente para detalhar a escultura como necessário. Essa correção só foi possível quando foi inserida nesse contexto, a experiência da equipe envolvida no levantamento.

Para o levantamento terrestre (LST) todos os passos detalhados no fluxograma foram seguidos e o resultado do levantamento de campo satisfatório. O parâmetro de qualidade Linhagem foi aprovado para esse levantamento, o que é comprovado aplicando o que foi planejado e executados dos dois levantamentos. A figura 68 mostra essa avaliação.

Figura 68 – Avaliação do parâmetro de qualidade Linhagem dos dados terrestres (LST) e aéreos (Drone).

3.1.2.1.3. Completude

Para o levantamento terrestre, todas as etapas propostas no fluxograma de verificação desses parâmetros foram cumpridas, indicando que esse padrão de qualidade foi aprovado. Percebe-se que não há áreas de ocultas ou locais onde possíveis interferências prejudicassem a qualidade da nuvem de pontos. Todo o local de estudo (escultura) foi levantado e a nuvem de pontos resultante desse levantamento pode ser utilizada com segurança. A densidade da nuvem de pontos final é compatível com a necessidade. As figuras abaixo mostram como o resultado da coleta de campo.

Figura 69 – Vista de cima da nuvem de pontos (LST)

Figura 70 – Vistas perspectivas da nuvem de pontos (LST).

Figura 71 – Vista lateral da nuvem de pontos (LST)

Através das figuras 69, 70 e 71 é possível verificar que não há locais sem recobrimento da nuvem de pontos, ou seja, locais onde não existem dados prejudicando a qualidade do produto. Isso se dá também pelo fato dos parâmetros de qualidade Linhagem ter sido aprovado.

Em relação à nuvem de pontos geradas a partir das imagens aéreas, como a quantidade de imagens coletadas nesse segundo levantamento foi muito superior ao primeiro. Além disso, as imagens foram coletadas em diferentes alturas, posições e orientação, a nuvem de pontos gerada apresentou uma melhora considerável em relação a produzida no primeiro levantamento.

Percebe-se claramente que em locais onde, antes a nuvem de pontos era pobre e com poucos pontos, agora as informações são abundantes não deixando áreas vazias ou com pouca informação. As figuras 72 e 73 exemplificam os resultados obtidos nesse levantamento.

Figura 72 – Vista de cima da nuvem de pontos (Drone).

Figura 73 – Vistas perspectivas da nuvem de pontos (Drone).

Com a experiência adquirida no primeiro levantamento e por consequência pelo levantamento não ter sido aprovado nesse parâmetro de qualidade, nesse segundo levantamento optou-se por adquirir o maior número de imagens possíveis, em diferentes locais, alturas e direções para tentar produzir uma nuvem de pontos de qualidade.

O objetivo foi cumprido e ambas as nuvens de pontos (LST) e a partir das imagens aéreas) foram aprovadas no parâmetro Completude. O fluxograma aplicado a essa avaliação, para esses dados, é apresentado abaixo.

Figura 74 – Análise da Completude através do fluxograma proposto.

3.1.2.1.4. Fidelidade Semântica

Os dados resultantes do levantamento terrestre apresentam extrema semelhança quando comparado com os objetos reais que foram levantamentos. Isso só é possível devido a precisão nominal do equipamento e ao nível de detalhamento conseguido a densidade adequada da nuvem de pontos.

Através de uma análise visual é possível, sem a necessidade de conhecer o local do levantamento, reconhecer os padrões todos os objetos existentes nos dois levantamentos. Numa análise mais refinada é possível comparar a rugosidade de certos elementos, textura entre outros parâmetros que serão detalhados a seguir.

O equipamento utilizado no levantamento terrestre não possuía câmera fotográfica integrada, portando a nuvem de pontos não apresenta as cores reais dos objetos. No entanto apenas essa informação não indica se o parâmetro de qualidade foi reprovado ou não. As figuras 75, 76, 77 e 78 mostram alguns detalhes para verificação desse parâmetro de qualidade.

Figura 75 – Nuvem de pontos em tons de cinza do levantamento terrestre (LST).

Analisando a figura 75 percebe-se uma enorme quantidade de pessoas transitando no local no levantamento, no entanto nenhuma delas está no local objeto desse estudo e assim não interferindo no resultado do projeto. Apesar do natural movimento das pessoas, o contorno das mesmas está razoável, em função da rapidez da coleta dos dados.

A nuvem está apresentada em tons de cinza, numa primeira análise pode-se dizer a que falta de cores na nuvem de pontos pode interferir na interpretação das informações, no entanto outros tipos de visualização podem ser feitos nos programas que manipulam nuvem de pontos para facilitar a interpretação e análise dos dados. Simplesmente a falta das cores reais não indica se o parâmetro Fidelidade Semântica atendeu ou não aos requisitos. A figura 76 mostra a mesma nuvem sendo apresentado o nível de intensidade do retorno do sinal.

Figura 76 – Nuvem de pontos em tons de intensidade do levantamento terrestre (LST).

Numa análise superficial e visual é possível identificar todas as formas bem definidas. A base da escultura, o capacete da Minerva, os furos existentes, a folhagem das arvores ao redor da escultura (figuras 75 e 76), o prédio ao lado da escultura, entre outros exemplos. Num nível mais detalhado é possível ver que a nuvem de pontos gerada é fiel ao objeto real. A figura 77 exemplifica isso, mostrando os furos do capacete da Minerva, na nuvem de pontos e numa fotografia.

Figura 77 – Nuvem de pontos (LST) versus foto do local.

Analisando as paredes da escultura percebe-se que há uma unicidade da informação, ou seja, a parte plana é representada totalmente plana e uniforme na nuvem de pontos. A figura 78, vista em perfil dos pontos da superfície comprova esse detalhe.

Figura 78 – Análise do detalhamento da face lateral da escultura.

A região destaca na figura acima (esquerda) é mostrada em perfil na figura da direita. A face recortada é totalmente plana e sem ruídos, mostrando que a nuvem de pontos oriunda do levantamento terrestre, além da forma, preserva a textura dos elementos levantados.

Com base nas informações acima o esse parâmetro de qualidade foi aprovado para esse levantamento e o fluxograma de avaliação para o levantamento terrestre (LST) pode ser apresentado da seguinte maneira.

Figura 79 – Análise do parâmetro de qualidade Fidelidade Semântica do levantamento terrestre (LST).

Já para o levantamento aéreo é possível verificar que as cores foram preservadas assim como os padrões existentes, formas e detalhes. Aproximando um pouco mais de regiões em que a representação deveria ser plana possui pequenas irregularidades, fazendo com que a textura e rugosidade dos elementos analisados não sejam aprovados num processo de avaliação mais criterioso. Nas figuras 80 e 81 é possível ver que nem todos os detalhes estão visíveis nessa nuvem de pontos, por exemplo a furação no capacete da minerva.

Figura 80 – Nuvem de pontos gerada a partir do levantamento aéreo

Figura 81 – Nuvem de pontos (Drone) versus imagem do local

A face do capacete da minerva é totalmente plana e fazendo uma análise visual da nuvem de pontos percebe-se que o resultado do processamento aéreo produziu uma nuvem de pontos irregular e com baixa precisão nesse local. As figuras 82 e 83 mostram esses detalhes. É possível ver que uma região que

deveria ser plana não é representada dessa maneira na nuvem de pontos, a superfície resultante é irregular. A nuvem de pontos da figura da direita foi recortada (região indicada pelo polígono branco) e rotacionada para ser mostrada na figura da esquerda. O que deveria ser um plano bem definido e com espessura pequena, não é. Muitos ruídos existem nessa região.

Figura 82 – Nuvem de pontos (Drone) da face lateral do monumento.

Figura 83 – Nuvem de pontos (Drone) numa vista lateral, mostrando grandes ruídos na parede da escultura.

No entanto esse tipo de informação pode ser útil para inúmeros projetos e o parâmetro de qualidade Fidelidade Semântica não pode ser rejeitado por essa deficiência. Essa qualidade da nuvem de pontos já era esperada considerando o tipo de levantamento para gera-la. Padrões de aceitação podem ser criados a partir desse estudo, mostrando através de análise estatística quais são os valores adequados para diferentes aplicações e os níveis de aceitação. Abaixo o fluxograma desse tipo de validação aplicado a esse levantamento.

Figura 84 – Avaliação do parâmetro de qualidade Fidelidade Semântica dos dados gerados a partir das imagens aéreas (Drone).

3.1.2.1.5. Qualidade posicional e métrica

Para essa análise, a mesma metodologia de trabalho apresentada anteriormente foi empregada. Utilizando o programa *RealWorks* da Trimble, foram realizadas medições sobre ambas nuvens de pontos e o resultado foi analisado para verificar a Qualidade Métrica dos produtos. As medições foram realizadas nos mesmos locais já descritos e o resultado foi tabulado e apresentado na tabela 7.

Tabela 7 – Erro absoluto entre as medições realizadas sobre as nuvens de pontos e as medições coletadas na escultura (trena digital).

Segundo Teste (TRIMBLE + TRENA DIGITAL)							
Cota	Distâncias (mm)			Erro Absoluto (mm)		Erro Relativo (%)	
	A Trena	B LST	C Drone	B-A	C-A	B-A	C-A
DY	5.794,00	5.797,84	5.570,38	3,84	-223,62	0,07%	3,86%
DX	12.942,00	12.947,44	12.659,54	5,44	-282,46	0,04%	2,18%
C1	990,00	995,08	792,50	5,08	-197,50	0,51%	19,95%
C2	620,00	628,02	502,56	8,02	-117,44	1,29%	18,94%
C3	390,00	392,10	320,24	2,10	-69,76	0,54%	17,89%
D1	200,00	205,22	168,18	5,22	-31,82	2,61%	15,91%
D2	344,00	349,30	284,38	5,30	-59,62	1,54%	17,33%
	Média			5,00	-140,32	0,94%	13,72%
	Desvio Padrão			1,79	95,04	0,93%	7,43%

Considerando a experiência adquirida no primeiro levantamento, em que a nuvem de pontos gerada a partir das imagens aéreas ficou com poucos dados, impossibilitando uma análise mais criteriosa, nesse segundo, com uma quantidade de imagens superior, coletadas com diferentes alturas de voo e posição conseguiu-se gerar uma nuvem de pontos mais densa, possibilitando uma melhor análise dos resultados. Locais onde não foram possíveis retirar informações para uma análise técnica no primeiro levantamento agora puderam ser utilizados. Analisando a tabela 7 e considerando o valor medido *in loco* com trena como sendo o parâmetro de comparação, pode-se apontar o seguinte:

- analisando as duas distâncias conseguidas sobre a nuvem de pontos do Drone, vê-se que as diferenças passaram de 280 mm;
- na comparação entre os valores de referência e o LST, a diferença máxima encontrada foi de 8 mm (C2) enquanto que a mínima foi de 2,1 mm (C3);
- os maiores erros relativos considerando a nuvem de pontos gerada pelo levantamento aéreo foram encontradas para as menores distâncias medidas.
- para os dados do LST, o menor erro relativo foi de 0,04% (DX) e o maior erro relativo encontrado foi de 2,61% (D1).
- o desvio padrão encontrado, considerando apenas as observações realizadas sobre os dados obtidos com o Drone, foi de 95,16 mm.

- f) o desvio padrão encontrado, considerando apenas as observações realizadas sobre os dados o LST, foi de 1,79 mm. Na prática 2 mm.
- g) o desvio padrão encontrado sobre os dados obtidos pelo Drone quanto aos erros relativos foi de 7,97% enquanto que para os dados LST foi encontrado um erro relativo de 0,93%

Utilizando as medidas extraídas da base da escultura (DX, DY e D1), calculou-se o volume dessa base e o resultado é apresentado na tabela 8.

Tabela 8 – Volumes calculados a partir das medidas extraídas e apresentadas na tabela 7.

Volume (m3) Piso				
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Volume total (m3)
Trimble	12947,440	5797,840	205,220	15,405
Manual	12942,000	5794,000	200,000	14,997
Drone 2	12659,540	5570,380	168,180	11,860

Analisando os dados da tabela 8 pode-se dizer que:

- a) tem-se de 0,40 m³ entre o volume encontrado nas medições em campo e o volume obtido com as medições sobre a nuvem de pontos do LST;
- b) comparando o volume obtido a partir da nuvem de pontos geradas pelo levantamento aéreo, tem-se uma diferença de 3,54 m³;
- c) O erro relativo encontrado na nuvem de pontos do Drone foi de 29,90%, enquanto que o erro relativo encontrado na nuvem do LST foi de 2,65%.

3.1.2.1.6. Integração

Com os dois produtos (LST e Drone) aprovados nos parâmetros Completude, Linhagem e Fidelidade Semântica, é possível fazer a integração dos dados. Essa integração só é necessária em locais onde o levantamento

terrestre não coletou informações, pois como se mostrou, a nuvem de pontos gerada com o LST tem uma qualidade superior à da nuvem de pontos gerada através das imagens coletadas com Drone.

Integrando as duas nuvens de pontos no mesmo sistema de coordenadas, as informações são complementadas e o produto torna-se uma mescla de um levantamento terrestre obtido com o LST e um levantamento aéreo. Como a densidade e a precisão da nuvem de pontos de cada produto são diferentes, a qualidade do resultado é degradada.

Para minimizar esse processo de degradação o ideal é gerar pequenos recortes na nuvem de pontos geradas pelas imagens do Drone para complementar apenas os locais onde não foram coletados dados com o LST. Dessa maneira apenas nessas regiões a nuvem de pontos possui uma precisão inferior à do restante do levantamento. Caso, por alguma razão, se opte por unir todos os dados gerados com as imagens, por essa ter uma precisão inferior, todo o levantamento terá seu resultado degradado.

Visivelmente percebe-se que a qualidade nessa região ficou degradada, e a nuvem de pontos nesse local deve ser trabalhada com cautela. Tal cautela é necessária dependendo da finalidade do projeto. Projetos em que se necessite de uma precisão milimétrica podem ser prejudicados, já que a nuvem de pontos gerada pelas imagens não possui essa precisão, e a figura 85 mostra essa diferença, inclusive em termos de densidade de pontos.

Figura 85 – Nuvem de pontos oriunda do LST versus nuvem de pontos oriunda do levantamento aéreo (Drone).

A figura da esquerda mostra a nuvem de pontos (vermelho) coletada com o LST e a da direita através do levantamento aéreo (cinza). Alguns detalhes são visíveis na nuvem de pontos em vermelho e não visíveis na nuvem de pontos em cinza (furação do capacete da Minerva). Fazendo a fusão das duas nuvens é possível ver que esses detalhes foram suprimidos e a definição da estrutura feita com a nuvem de pontos se perdeu com a junção entre elas. A figura 86 mostra o resultado dessa integração.

A análise dessas regiões, segundo os princípios apresentados neste capítulo, permite quantificar a precisão métrica/posicional.

Figura 86 – Nuvem de pontos integrada, no mesmo sistema de coordenadas, distinguindo-se a origem dos pontos segundo a cor. Notar como os pontos cinzas (imagens) tiram a definição da escultura.

Resumindo, uma maneira para minimizar esse problema é utilizar apenas a nuvem de pontos geradas do levantamento aéreo da região em que o levantamento terrestre não coletou informações, dessa maneira a qualidade é degradada apenas em determinadas regiões conhecidas.

Para esse caso prático de levantamento, apenas a região superior da escultura não pôde ser levantada com o LST, portanto a integração foi realizada apenas nesse local e os resultados são apresentados abaixo. Os dados da parte de cima do capacete foram utilizados na integração dos dados, minimizando dessa forma a região afetada por uma fonte de dados de menor qualidade e precisão.

Figura 87 – Integração das nuvens na parte superior do monumento.

A figura 87 mostra o resultado dessa integração, onde não existiam dados (imagem da esquerda) agora possui (imagem da direita). Essa integração será mais detalhada no próximo item, em que o volume de dados é maior e a região que será integrada consiste numa área maior.

4. RUÍNAS ENGENHO SÃO JORGE DOS ERASMOS (MONUMENTO NACIONAL)

Foram realizados três levantamentos no Engenho São Jorge dos Erasmos:

1. levantamento topográfico e geodésico;
2. levantamento com LST;
3. levantamento fotogramétrico através de Drone.

O primeiro levantamento foi realizado para definir e materializar um sistema de coordenadas. Foram utilizados equipamentos GNSS e Estações Totais. O levantamento da nuvem de pontos foi realizado em um dia de campo e utilizou-se um LST modelo Focus 3D do fabricante FARO, disponibilizado gentilmente pelo Centro Interdisciplinar de Tecnologias Interativas (CITI) da Universidade de São Paulo (USP). O Levantamento aéreo também foi realizado num único dia e utilizou-se um Drone Modelo Phantom 3 da fabricante DJI.

4.1. Breve histórico

O ponto de partida para indústria açucareira no Brasil pode ser datada da expedição de Martim Afonso de Souza ao Brasil e a criação da vila de São Vicente em 1532.

Martim Afonso, mais tarde donatário da Capitania de São Vicente, foi responsável pelo lançamento das bases da ocupação da região, criando uma infraestrutura que permitiu a fixação dos portugueses no território.

Ele introduziu o cultivo da cana de açúcar na capitania, através da construção de engenhos. Dentre as unidades produtoras de açúcar, destaca-se o primeiro, conhecido como Engenho do Governador, posteriormente “*dos Erasmos*”, quando adquirido pela família *Schetz* de Antuérpia.

O Engenho funcionou até o século XVIII. Ao longo desse período, produziu cana para exportação, além de rapadura e aguardente para consumo interno no século XVIII. Sofreu ataque de índios e piratas e chegou a ser incendiado. Comportava unidades administrativas e residenciais, inclusive dependências de escravos (senzalas). Compunha de uma casa muito grande

com seis cômodos, uma senzala com uma ferraria provida de baluartes e ainda duas casas cobertas de telhas, muito boas e fortes.

Em 1943, os terrenos com as ruínas foram adquiridos por Otávio Ribeiro de Araújo, que loteou a propriedade e doou o Engenho São Jorge dos Erasmos à Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da USP, no ano de 1958. Nesse mesmo ano, Luís Saia, chefe do 4º Distrito da Diretoria do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, órgão federal, relatou ao presidente da Comissão Especial do Engenho São Jorge dos Erasmos que realizou prospecção e definiu o partido arquitetônico como de “modelo açoriano, tipo real e movido à água”.

É importante salientar que o engenho é o único exemplar que restou em território nacional, como testemunho dos tempos primordiais em que a indústria açucareira era o produto essencial nos negócios e na economia da colônia.

O Monumento Nacional Ruínas Engenho São Jorge dos Erasmos, é um órgão da Pró-Reitoria de Cultura e Extensão Universitária da Universidade de São Paulo, situado na divisa entre os municípios de Santos e São Vicente, no estado de São Paulo. É a mais antiga evidência física preservada da colonização portuguesa em território brasileiro e sua data de construção remonta a 1534. Desde 2004, desenvolve programas educacionais que buscam viabilizar o conhecimento a partir da interdisciplinaridade, em vista do contexto histórico, geográfico, arqueológico, arquitetônico, social e ambiental em que as Ruínas estão inseridas.

Para mais informações, pode-se visitar o site <http://www.engenho.prceu.usp.br/>, onde é possível conhecer mais todas as características históricas do sítio arqueológico.

4.2. Levantamento Geodésico e Topográfico

Para estabelecer um sistema de coordenadas, dois pontos intervisíveis foram levantados com equipamento GNSS. Tais pontos foram denominados *Hora* e *Luci*.

O Ponto Hora foi rastreado por um período de 1h56min com a antena numa altura vertical de 1,080 m e está localizado fora dos limites do Engenho. O ponto denominado Luci foi rastreado durante 2h33min com sua antena a uma

altura de 1,023m e foi materializado em cima do prédio administrativo do Engenho. A figura 88 mostra a localização aproximada dos pontos levantamentos e em azul a área do Engenho.

Figura 88 – Localização aproximada dos pontos levantamentos com equipamentos GNSS e limites do Engenho.

Os dois pontos foram rastreados utilizando o equipamento TOPCON LEGACY 20hz. Sua precisão horizontal é de 3mm + 1ppm para L1+L2; e 5mm + 1.5ppm for L1+L2 na componente vertical. O processamento dos dados foi realizado utilizando como ponto de controle a estação pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) denominada POLI. Esta estação geodésica está localizada ao lado do Prédio da AEP (Associação dos Engenheiros Politécnicos) e do Prédio Administrativo da Escola Politécnica da USP, denominado "Governador Mário Covas". Av. Prof. Almeida Prado, Travessa 2, Cidade Universitária - São Paulo - SP.

O programa escolhido para realizar o processamento foi o *GNSS Solutions*, versão 3.71. Os resultados foram apresentados em coordenadas UTM fuso 23S, SIRGAS 2000. Utilizando esses dois pontos definidos através de rastreio GNSS, criou-se um sistema topográfico local, em que a origem do sistema definido-materializado foi o ponto *Luci*. A tabela 9 mostra as

coordenadas obtidas nessa fase do levantamento, no sistema UTM-Fuso23/Sirgas2000.

Tabela 9 – Coordenadas UTM dos pontos rastreados.

Pontos Registrados - UTM			
Nome	Componentes		Erro 68,7% (1 sigma)
<i>Hora</i>	Este	361.101,238	0,004
	Norte	7.351.013,167	0,005
	Altura Geométrica	-2,283	0,009
<i>Luci</i>	Este	361.275,261	0,004
	Norte	7350.920,651	0,005
	Altura Geométrica	4,753	0,009

Vale lembrar que a altura geométrica (no caso negativa) não é a altura sobre o nível médio dos mares; para chegar a essa outra seria preciso somar a ondulação geoidal, N. Uma maneira prática de encontrar a ondulação geoidal dessa região é utilizar o programa MAPGEO2015 do IBGE e assim transformando essas alturas em altitudes ortométricas

A coordenadas obtidas no sistema topográfico criado está reportado na tabela 10.

Tabela 10 – Coordenadas topográficas dos pontos rastreados.

Pontos Registrados - Topográfico		
Nome	Componentes	
<i>Hora</i>	X	149.826,851
	Y	250.094,208
<i>Luci</i>	X	150.000,000
	Y	250.000,000

De posse dessas coordenadas iniciou-se o levantamento topográfico para determinação das coordenadas dos marcos implantados no Engenho. Ao todo foram estabelecidos 8 marcos de concreto com chapa metálica de identificação.

Todo o trabalho foi pautado pela NBR 13.133/1994 que define os procedimentos para levantamentos topográficos e nas especificações, recomendações e normas gerais para levantamentos geodésicos (Resolução PR

nº 5 -31/03/1993), definidas pelo IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

4.3. Levantamento da Nuvem de Pontos

Tendo a base topográfica implantada, o levantamento da nuvem de pontos pode ser realizado. O equipamento utilizado, como adiantado, foi o modelo FARO Focus 3D. Esse equipamento coleta informação no máximo a 130 metros com uma precisão de +/- 2mm, segundo seu fabricante, numa taxa máxima de coleta de 976.000 pontos por segundo.

O levantamento foi realizado em 7 horas de trabalho com 25 estações. Cada estação foi posicionada no local e através de uma varredura de 360° foram feitas as observações. A figura 89 mostra a disposição geral das estações de levantamento. Ao longo do levantamento, alvos esféricos foram sendo posicionados em locais estratégicos para dar suporte ao processo de registro, ou seja, colocar todas as estações do levantamento num sistema único de coordenadas.

Figura 89 – Localização aproximada das estações de levantamentos LST

Os pontos em amarelo na figura 89, mostram as estações feitas dentro da área coberta, enquanto que os pontos vermelhos na área externa. Alguns alvos planos foram instalados durante o levantamento e escaneados com alta

precisão. As coordenadas desses alvos foram determinadas utilizando a base topográfica implantada previamente através do método de levantamento topográfico denominado interseção a ré, ou estação livre.

Com a área toda levantada, o passo seguinte foi a transferência dos dados brutos para uma estação de trabalho com os programas específicos instalados.

O programa utilizado para o registro da nuvem foi o *Autodesk Recap pro*. Ao final do processo, toda a nuvem de pontos estava referenciada a um sistema de coordenadas único.

As figuras 90, 91 e 92 mostram algumas vistas perspectivas retiradas do produto final obtido.

Figura 90 – Vista geral das ruínas do engenho

Figura 91 – Nuvem de pontos das paredes do entorno das ruínas do engenho, junto à antiga capela e sacristia.

Figura 92 – Nuvem de pontos da região preservada do engenho, casa da moenda.

4.4. Levantamento aéreo (Drone)

Para o recobrimento aéreo utilizou-se o Drone modelo *Phantom 3* da DJI. Esse equipamento é propulsionado através de quatro rotores e possui uma câmera integrada com resolução 4k, além de um sistema inercial integrado.

Tendo em conta a experiência obtida no voo realizado para levantar a escultura Minerva, detalhado no item anterior, optou-se por realizar não apenas o voo convencional, ou seja, coletando imagens verticais, mas outros dois. Ou seja, um voo de maneira tradicional (foto vertical) e dois com a câmera inclinada em relação à vertical (45°). Desse modo, não haveria áreas de ocultas ou pelo menos seriam minimizadas.

O primeiro voo foi realizado de maneira tradicional, ou seja, as imagens foram coletadas ortogonalmente ao terreno. Todo o Engenho foi levantando em 10 faixas de voo numa altura de aproximadamente 25 m, coletando um total de 110 imagens com uma sobreposição longitudinal de 70% e lateral de 30%. A Figura 93 apresenta como o primeiro voo foi realizado.

Figura 93 – Esquema do primeiro levantamento aéreo, indicando-se o centro perspectivos com pequenas bolas azuis e verdes a respectiva pirâmide fotográfica.

O segundo e terceiro recobrimento foram realizados sobre a área de interesse com trajetória formando um círculo. O Drone sobrevoou o local na primeira faixa de voo com a altura mínima, fazendo um recobrimento circular com a câmera posicionada de forma inclinada de 45° com relação à vertical. A segunda faixa de voo foi realizada da mesma forma, mas com uma altura de voo um pouco maior e um raio de círculo menor. Esse procedimento foi sendo realizado até que, na altura máxima de voo, o Drone coletasse apenas uma foto ortogonalmente, abrangendo todo o Engenho. O planejamento do voo não foi realizado por programas ou aplicativos para *tablets* ou *smartphones* existentes no mercado, mas por um programa controlador de voo desenvolvido pela equipe de pesquisadores do CITI.

As figuras 94 e 95 mostram a projeção dos dois voos realizados de forma circular sobre o Engenho.

Figura 94 – Vista aérea do engenho com as faixas de voo projetadas, materializadas pelos centros das fotografias, representados por bolas vermelhas.

Figura 95 – Vista perspectiva do Esquema dos dois levantamentos circulares realizados.

Cada voo circular coletou 181 imagens. Pode-se destacar pelo menos duas características importantes nesse tipo de recobrimento. A primeira é que se obtém uma sobreposição lateral entre as imagens que é praticamente 100%. O segundo ponto importante é a coleta de dados em pontos que não poderiam ser visualizados num recobrimento ortogonal.

A figura 96 mostra um exemplo de um par de imagens do voo ortogonal.

Figura 96 – Par de imagens verticais do primeiro levantamento aéreo.

No voo convencional só é possível detalhar o telhado. Percebe-se que as colunas não são visíveis nessas imagens, portando essa região do Engenho não seria levantada. A figura 97 exemplifica como isso é corrigido através das imagens coletadas nos voos circulares e com a câmera inclinada.

Figura 97 – Exemplo de imagens inclinadas coletadas no segundo e terceiro levantamento aéreo.

Nesse par de imagens, as colunas, paredes e outros detalhes são visíveis e a correlação de imagens poderá ser aplicada e as informações extraídas. Nesse projeto, foram coletadas 472 imagens, sendo 110 no voo ortogonal e 181 em cada voo semicircular. Para o processamento, todas as imagens foram utilizadas processadas pelo programa *Pix4DMapper*.

Para ter mais dados para análise e estudo nesta pesquisa, foram realizados três processamentos. No primeiro, todas as imagens foram processadas conjuntamente, no segundo foram utilizadas apenas as imagens dos voos circulares e por último apenas as imagens do voo tradicional.

4.5. Análise dos resultados e controle de qualidade

Quatro parâmetros foram analisados: a Qualidade Métrica, Linhagem, Completude, Fidelidade Semântica e pôr fim a integração dos dados. A análise da Qualidade Métrica será realizada e discutida a seguir por cada produto gerado, ou seja, uma análise para a nuvem de pontos gerada pelo levantamento terrestre e outra para a nuvem de pontos gerada a partir do levantamento aéreo. As demais análises de qualidades serão apresentadas nos tópicos abaixo.

4.5.1. Linhagem

Para analisar o parâmetro Linhagem, deve-se seguir o procedimento de campo executado para identificar falhas que poderiam prejudicar a qualidade dos dados neste aspecto. De fato, a Linhagem pode ser totalmente mapeada durante o planejamento de campo; se alguma dificuldade não prevista ocorrer, medidas devem ser tomadas para que o levantamento de campo seja bem-sucedido e produza dados de boa qualidade para atender o objetivo. Um procedimento de campo bem executado, com equipamentos adequados e equipe experiente, dificilmente trará resultados deficientes.

Para o levantamento terrestre não houve nenhuma dificuldade além do que previsto e coberto pelos procedimentos de campo. Toda região de estudo foi levantada corretamente, os dados processados e com os resultados satisfatórios. O mesmo ocorreu com o levantamento aéreo. Todos os voos foram realizados com sucesso, sem imprevistos e com qualidade.

Um pequeno problema ocorreu durante um dos voos circulares. No pouso do Drone, o equipamento bateu numa pedra e acabou tombando, uma das hélices ficou danificada. Como o planejamento do trabalho previa isso, existiam peças de reposição e o trabalho pôde seguir sem nenhum problema.

O fluxograma apresentado na figura 98 mostra que o parâmetro de qualidade Linhagem foi aprovado para os dois levantamentos.

Figura 98 – Fluxograma de análise do parâmetro de qualidade Linhagem (Drone e LST).

4.5.2. Completude

Para analisar esse parâmetro de qualidade é necessária uma análise visual: navegar na nuvem de pontos, utilizando programas específicos procurando identificar se existem locais que deveriam ter sido levantados e não foram, prejudicando, dessa maneira, a qualidade do produto gerado.

Para o levantamento terrestre, geralmente, locais de difícil acesso ou interferências físicas podem causar regiões de oclusões, ou seja, locais onde não existem dados coletados. Se esses locais fazem parte do que devia ser levantado existe uma falha no parâmetro Completude. A correção só pode ser feita com uma nova ida a campo para coletar dados complementares e conseguir completar toda a região alvo do levantamento.

Para o levantamento aéreo, uma falha do planejamento de voo pode deixar áreas de fora do levantamento, também fazendo com que o resultado não seja completo. Condições climáticas, como grande quantidade de nuvens, não afetam esse tipo de levantamento, pois os voos são realizados relativamente baixos (até 120 metros de altura). Apenas chuva e neblina podem atrapalhar e prejudicar o resultado do processamento.

Analisando as nuvens de pontos pôde-se concluir que não há regiões ocultas e todo o local foi levantado corretamente. A figura 99 mostra vistas gerais da nuvem de pontos coletadas com o LST enquanto que na figura 100 aparece o resultado do processamento das imagens aéreas mostrando que a superabundância de dados fez com que não houvesse regiões de sombra.

Figura 99 – Vistas perspectivas da nuvem de pontos resultantes do levantamento terrestre.

O levantamento terrestre não coletou pontos sobre o telhado das ruínas do engenho, coisa que já era esperada e será objeto de estudo no processo de análise da integração de dados.

Figura 100 – Vistas perspectivas da nuvem de pontos resultantes do levantamento aéreo.

É possível verificar que não existem pontos dentro da área coberta da ruína. Esse fato já era esperado pois a partir do levantamento aéreo não é possível coletar imagens do local, no entanto, isso não afeta a qualidade do produto pois tal fato já era esperado.

Ambos levantamentos foram aprovados nesse parâmetro de qualidade e o fluxograma apresentado na figura 101 relata isso de forma gráfica.

Figura 101 – Fluxograma de análise do parâmetro de qualidade Completude (Drone e LST).

4.5.3. Fidelidade Semântica

Comprando os produtos gerados com o local levantado, algumas avaliações podem ser feitas e um parecer técnico pode ser dado quando ao parâmetro Fidelidade Semântica.

Diferentemente do primeiro teste realizado (Escultura Palas Atenas), o engenho é uma região predominantemente composto de ruínas de construções antigas. Os padrões geométricos não são tão claros como no primeiro teste e por consequência, o nível de detalhamento do produto não precisa ser alto, pois não se espera definir uma geometria rigorosa através de uma modelagem de dados.

Uma análise visual (em algumas regiões com mais detalhes que outras) é necessária para fazer essa avaliação da qualidade. Compara-se nessa etapa, se os elementos reais possuem as mesmas características dos objetos representados nas nuvens de pontos. As duas nuvens de pontos aparecem com as cores reais do local, essa característica da nuvem (realismo) ajuda nessa avaliação já que a interpretação fica mais fácil e auxilia no reconhecimento das características do local.

As figuras 102, 103, 104, 105 e 106 comparam fotos tiradas no local com a nuvem de pontos gerada com o LST. Percebe-se que as características físicas do local, ou seja, padrões de cores foram preservados. Características intrínsecas ao local, rugosidades dos elementos, entre outros fatores foram preservadas na nuvem de pontos. Para os dados aéreos, as figuras 107 e 108 fazem a mesma comparação e tem-se os mesmos resultados na análise visual.

Figura 102 – Foto (esquerda) e nuvem de pontos LST (direita) da área coberta do Engenho.

Figura 103 – Foto (esquerda) e nuvem de pontos LST (direita) da área coberta do Engenho.

Figura 104 – Foto (esquerda) e nuvem de pontos LST (direita) de um dos muros das ruínas do Engenho.

Figura 105 – Foto (esquerda) e nuvem de pontos LST (direita) de um dos muros das ruínas do Engenho.

Figura 106 – Foto (esquerda) e nuvem de pontos LST (direita) do local onde eram guardados os armamentos do Engenho.

As imagens da direita nas figuras acima são das nuvens de pontos, portando o fundo de cada imagem é criado pelo programa de visualização da mesma. A cor real é inserida na nuvem de pontos através de imagens coletadas pelo próprio equipamento durante o levantamento e sobrepostas à nuvem de pontos. Dessa forma, pode ocorrer uma leve diferença nessa sobreposição e algumas bordas existentes no local não serem coloridas corretamente e apresentarem pequenas regiões em branco.

Na figura 106 percebe-se uma área circular, junto ao canto mais à direita, sem informação nenhuma coletada. Isso ocorre pelo fato de o equipamento ter sido posicionado nesse local e, dessa forma, não ter coletado pontos abaixo dele próprio. Uma opção para contornar essa situação seria, ou deixar o equipamento

o mais próximo do chão possível (não utilizando o tripé), fazer o escaneamento de outro ponto e se necessário inclinando o equipamento o suficiente para conseguir coletar informações dessa região. Pela tecnologia, sempre vai ficar uma região de sombra embaixo de cada estação de coleta, mas que será levantada de outra estação.

Figura 107 – Foto (esquerda) e nuvem de pontos Drone (direita) da área coberta do Engenho.

Figura 108 – Foto (esquerda) e nuvem de pontos Drone (direita).

Nas figuras 107 e 108 (imagens da esquerda) percebe-se claramente que há uma menor definição da resolução da nuvem de pontos quando comparado com a nuvem de pontos do LST (da figura 102 a 106). Obviamente são produtos

diferentes que não podem ser comparados entre si, mas sim preparados para serem utilizados em conjunto. A nuvem de pontos gerada a partir do levantamento aéreo conseguiu reproduzir de maneira fidedigna o local levantando não deixando pontos sem informação e dessa maneira sendo aprovado no parâmetro de qualidade Fidelidade Semântica. O fluxograma apresentado na figura 109 mostra a análise realizada em forma gráfica.

Figura 109 – Fluxograma de análise do parâmetro de qualidade Fidelidade Semântica (Drone e LST).

4.5.1. Qualidade Métrica

A análise será realizada comparando as medidas retiradas das nuvens de pontos geradas através das imagens aéreas e LST com as medições realizadas em campo (estação total), consideradas como padrão. As dimensões escolhidas estão indicadas na figura 110. As distâncias denominadas d1, d2, d3 e d4 foram medidas na horizontal e as distâncias d5, d6 e d7 foram feitas na vertical. A d8 refere-se a área plana do telhado.

Figura 110 – Locais escolhidos para análise da Qualidade Métrica.

As distâncias d5, d6 e d7 não foram medidas sobre as nuvens de pontos do Drone por não haver, nesses locais, pontos suficientes para definir com precisão essas distâncias. A medida (d8a) está muito diferente da medição realizada sobre a nuvem de pontos do LST (244 mm) e comparando com as demais diferenças encontradas entre o LST e as medições *in loco* constata-se que se trata de um erro grosseiro cometido na medição em campo e, portanto, não podem fazer parte dessa análise. A tabela 11 mostra o resultado dessas medições assim como as diferenças encontradas (absolutas e relativas).

Tabela 11 – Distâncias encontradas sobre as nuvens de pontos, erros absolutos e relativos.

Cota	Distâncias (mm)					Erro Absoluto (mm)				Erro Relativo (%)			
	A	B	C	D	E								
	LST	Drone completo	Drone Circular	Drone Ortogonal	Estação Total	A-E	B-E	C-E	D-E	A-E	B-E	C-E	D-E
d1	43934	44970	44658	43910	43924	10	1046	734	-14	0,02%	2,38%	1,67%	0,03%
d2	16984	17474	17128	16977	16993	-9	481	135	-16	0,05%	2,83%	0,79%	0,09%
d3a	7340	7734	7661	7368	7346	-6	388	315	22	0,08%	5,28%	4,29%	0,30%
d3b	3107	3173	3137	3082	3100	7	73	37	-18	0,23%	2,35%	1,19%	0,58%
d3c	6549	6541	6509	6650	6533	16	8	-24	117	0,24%	0,12%	0,37%	1,79%
d4	5928	6001	5963	5947	5925	3	76	38	22	0,05%	1,28%	0,64%	0,37%
d5	3330	-	-	-	3327	3	-	-	-	0,09%	-	-	-
d6	6089	-	-	-	6089	0	-	-	-	0,00%	-	-	-
d7	4540	-	-	-	4539	1	-	-	-	0,02%	-	-	-
d8a	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
d8b	14180	14437	14333	14035	13936	244	501	397	99	1,75%	3,60%	2,85%	0,71%
d8c	19945	21064	20910	19972	19950	-5	1114	960	22	0,03%	5,58%	4,81%	0,11%
d8d	14172	14583	14311	14184	14180	-8	403	131	4	0,06%	2,84%	0,92%	0,03%
Média						0,50	483,44	334,67	20,11	0,08%	2,94%	2,01%	0,39%
Desvio Padrão						7,76	413,49	364,17	41,92	0,08%	1,75%	1,70%	0,56%

Analizando a tabela 11 nota-se que as maiores diferenças encontradas estão nas observações realizadas sobre a nuvem de pontos do drone completa, seguida pela nuvem geradas pelas imagens oblíquas e por último as geradas pelo voo ortogonal. A maior diferença foi encontrada na medida d1 (diferença superior a 1,0 m) sendo para o mesmo local, quando comparado com o voo ortogonal, se tem 14 mm.

A média das diferenças do processamento completo é de 483,44 mm, com desvio padrão de 413,49 mm. Para o processamento das imagens oblíquas chegou-se numa média de 334,67 mm e desvio padrão aproximado de 364,17 mm, enquanto que para o voo ortogonal a média ficou abaixo de 21 mm com desvio padrão de 41,92 mm.

Considerando uma sobreposição entre os pares fotogramétricos de quase 100% para o voo circular esperava-se melhores resultados na nuvem de pontos resultante, no entanto, apesar de mais completo esse levantamento se mostrou menos preciso.

O resultado se mostrou pior quando todas as imagens foram processadas juntas. Apenas para as imagens ortogonais o desvio padrão encontrado sobre as medições foi aproximadamente 4 cm, para as imagens oblíquas 37 cm e com a junção de todas as imagens o desvio padrão aumentou para 42 cm.

Analizando as medições realizadas sobre a nuvem de pontos do LST têm-se uma média do erro absoluto de 0,5 mm com desvio padrão abaixo de 8 mm. O melhor resultado obtido com o Drone foi de 42 mm (voo ortogonal) de desvio padrão, ou seja, 6 vezes pior.

Destaca-se a dificuldade de medição sobre as nuvens de pontos (qualquer uma delas) nos locais exatos levantados em campo, pois trata-se de uma região sem padrões geométricos simples como em construções e edificações atuais regulares.

Causa uma certa dúvida quando se observa apenas para as nuvens de pontos do Drone. Por exemplo, para o local d1, no processamento completo encontrou-se uma diferença superior a 1,0 m, enquanto que para a nuvem de pontos do processamento das imagens ortogonais apenas 14 mm. Inúmeras verificações foram feitas sobre as medições sobre as nuvens de pontos tentando identificar se algum erro grosseiro teria ocorrido, no entanto constatou-se que as

medições foram feitas corretamente. Com isso outras observações foram realizadas sobre as nuvens de pontos para tentar identificar a procedência desses erros.

Mediu-se a distância entre o ponto de origem utilizado no processo de registro até pontos apresentados nos detalhes A, B e C. Para essa análise apenas se considerou as observações realizadas sobre as nuvens de pontos. O resultado é ilustrado na figura 111.

Figura 111 – Medições a partir do ponto de origem do processo de registro e detalhes.

Os resultados encontrados estão resumidos nas tabelas 12, 13 e 14.

Tabela 12 – Distâncias medidas sobre as nuvens de pontos a partir de um ponto de origem.

DETALHE	LST	DISTÂNCIAS (mm)		
		Drone (completo)	Drone (Circular)	Drone (ortogonal)
A	51380	52670	52097	51287
B	60006	61504	60817	59917
C	65507	67170	66442	65426

Tabela 13 – Erros absoluto encontrados quando se compara as mesmas distâncias nas nuvens de pontos.

DIFERENÇAS (mm)			
DETALHE	LST - Drone (completo)	LST - Drone (Circular)	LS3D - Drone (ortogonal)
A	-1290	-717	93
B	-1498	-811	89
C	-1663	-935	81
Média	-1484	-821	88
Desvio Padrão	187	109	6

Tabela 14 – Erros relativos encontrados quando se compara as mesmas distâncias nas nuvens de pontos.

ERRO RELATIVO (%)			
DETALHE	LST - Drone (completo)	LST - Drone (Circular)	LS3D - Drone (ortogonal)
A	2,51%	1,40%	0,18%
B	2,50%	1,35%	0,15%
C	2,54%	1,43%	0,12%
Média	2,52%	1,39%	0,15%
Desvio Padrão	0,02%	0,04%	0,03%

Percebe-se que quanto maior a distância ao ponto de origem maior é a diferença absoluta e também o erro relativo.

Conclui-se que visualmente as três nuvens apresentam boa qualidade, no entanto quando uma análise mais criteriosa é realizada vê-se que as precisões são diferentes e as do Drone podem deixar a desejar.

Embora pareça que mais imagens, de pontos de vistas e alturas diferentes possam melhorar o resultado da nuvem de pontos gerada, percebe-se que não. Todas as nuvens de pontos foram aprovadas nos parâmetros Linhagem, Completude e Fidelidade Semântica, mas o parâmetro Qualidade Métrica não. Analisando as informações acima apresentadas, vê-se que a nuvem de pontos gerada a partir das imagens verticais foi a única aprovada, para um critério que exija alguns milímetros como erro máximo. As demais apresentaram erros maiores que 1 metro (em alguns casos), o que leva à rejeição de seu uso em projetos de Engenharia. Essas diferenças serão apresentadas e analisadas no item a seguir (Integração).

4.5.1. Integração

Há uma região no conjunto levantada que foi recoberta parcialmente pelo levantamento terrestre e parcialmente pelo levantamento aéreo, ou seja, a construção que servia de casa de moagem, ao fundo em grande parte levantada com o LST, ficando apenas de fora dessa nuvem de pontos o telhado, que por sua vez foi levantado e detalhado pela nuvem de pontos processada através das imagens aéreas.

A nuvem de pontos gerada a partir do voo ortogonal teve parâmetros de qualidade que apresentam precisão relativamente boa (ver tabela 11) e que podem ser utilizadas no processo de integração. Tendo o produto oriundo do levantamento terrestre uma precisão maior, esse será utilizado como a base e referência para a integração. Tomando essa nuvem de pontos como referência geométrica, a nuvem de pontos do levantamento aéreo será transformada para o mesmo sistema de coordenadas através de uma transformação ortogonal ou de corpo rígido (3 parâmetros de rotação e 3 de translação).

O resultado obtido, como se mostra a seguir, foi satisfatório numa análise visual e o processo de integração pode ser validado. As nuvens de pontos não tiveram distorções e locais onde não haviam pontos coletados com o LST puderam ser preenchidos com a nuvem de pontos sem que houvesse grande perda de qualidade.

As figuras 112 e 113 apresentam o resultado dessa integração. Em ciano está a nuvem de pontos do LST (referência) e em vermelho a complementação feita com a nuvem de pontos gerada pelo processamento das imagens.

A figura 113 mostra em detalhes a região da moenda. Nessa figura vê-se que as regiões mais altas do telhado possuem uma mistura entre as duas nuvens de pontos enquanto que nas regiões mais baixas se destaca apenas a nuvem de pontos do Drone. Isso ocorre pelo ângulo de inclinação do telhado e assim possibilitando a coleta de pontos pelo LST dos pontos mais altos do telhado através do levantamento terrestre.

Figura 112 – Integração entre as nuvens de pontos terrestre e aérea.

Figura 113 – Integração entre as nuvens de pontos terrestre e aérea. Em detalhe a região da moeda do Engenho.

As outras duas nuvens de pontos (voos circulares) processadas pelas imagens aéreas não foram aprovadas no parâmetro de Qualidade Métrica, dessa

forma o processo de integração não pode ser feito. No entanto, esse processo será realizado nessa pesquisa para mostrar graficamente que a integração não pode ser feita se a Qualidade Métrica não for aprovada

Como o processo de registro através de uma transformação ortogonal não produz bons resultados (devido as diferenças métricas apresentadas no item anterior), optou-se por realizar o registro da seguinte forma: tomou-se a nuvem de pontos do LST como referência, e todas as outras foram transformadas para o mesmo sistema de coordenadas utilizando um ponto de origem (o mesmo utilizado para medir as distancias no item anterior). Próximo a região do ponto de origem é difícil encontrar diferenças e incompatibilidade entre as nuvens de pontos que serão integradas (a figura 114 mostra o ponto de origem utilizado). Constatou-se que quanto mais longe do ponto de origem maiores são as diferenças.

Figura 114 – Ponto de origem do processo de registro entre as nuvens de pontos.

A figura 115 mostra a nuvem de pontos do LST (ciano) e nuvem de pontos do levantamento aéreo (vermelho). Como o ponto de referência situa-se atrás da construção, percebe-se que nessa região os dados estão registrados com pequenos erros e toda a nuvem de pontos do Drone está posicionada em relação a nuvem de referência (LST).

Figura 115 – Região próxima ao ponto de origem do registro entre as nuvens de pontos.

No entanto, afastando-se desse ponto, na direção maior das construções do engenho, percebe-se claramente que há um afastamento entre as duas nuvens de pontos. A figura 116 mostra uma visão macro da região e aponta os detalhes que ampliados na figura 117.

Figura 116 – Visão geral do processo de integração e indicação dos detalhes a serem analisados.

Isolando as nuvens de pontos dos detalhes pode se ver claramente uma diferença na posição, pelas massas de pontos ciano e vermelha na figura 117. Pode-se pensar que o registro da nuvem de pontos não foi realizado com sucesso pois existe um fator de escala na nuvem de pontos processada com o voo circular.

Figura 117 – Detalhes A, B e C mostrando as diferenças entre as nuvens de pontos no processo de integração.

Como esperado, através dessa análise visual é possível avaliar se a integração entre os dados pode ser feita ou não, mesmo sem quantificá-la. Grandes diferenças foram encontradas e a nuvem de pontos gerada no processamento de todas as imagens foi reprovada final para o processo de integração. Se a integração for realizada toda a nuvem de pontos terá sua qualidade degradada, definindo mal a posição dos elementos das edificações.

O mesmo aconteceu com a nuvem de pontos geradas a partir das imagens oblíquas. O resultado gráfico, apresentado na figura 118, mostra que a integração não foi satisfatória.

Figura 118 – Diferenças encontradas no processo de registro entre a nuvem de pontos do LST e a nuvem de pontos geradas a partir das imagens oblíquas coletadas. Vista transversal.

4.5.2. Conclusões e levantamento alternativo

Analisando as informações acima é possível dizer que a análise métrica e posicional e o parâmetro Linhagem são os mais importantes para o processo de integração. Se o parâmetro Linhagem não for aprovado, dificilmente os dados resultados do processamento serão bem classificados nos demais parâmetros.

A Completude é o objetivo desse processo de integração, ou seja, locais que não há informações devem ser preenchidos com um outro levantamento.

O parâmetro de Qualidade Métrica, se não aprovado, impede que o registro entre as duas nuvens seja feito, e mesmo sendo executado, a nuvem de pontos resultante poderá apresentar grandes distorções e, dessa forma, compromete a nuvem de pontos que possui uma boa qualidade. No caso concreto a integração foi possível apenas para o voo ortogonal.

Devido as diferenças e a não aprovação da nuvem de pontos resultante das imagens coletadas pelo voo circular, surgiu a dúvida de que a baixa qualidade poderia ser por algum fator específico ou aleatório nesse dia, e resolveu-se fazer um novo levantamento aéreo circular, dessa vez utilizando programas comerciais (Pix4D Capture) e com planos de voos semelhantes. Três voos foram realizados de maneira tradicional variando a altura de voo (40m, 80m e 120m) e três voos foram executados com o plano de voo circular e com as mesmas alturas de voos dos voos executados de maneira tradicional. Ao todo foram coletadas 231 imagens, sendo 87 imagens dos voos circulares e 144 dos voos tradicionais.

Com o resultado do processamento executado de maneira idêntica ao primeiro levantamento, as nuvens de pontos geradas puderam ser analisadas quanto sua qualidade e utilizando os parâmetros de qualidade propostos nessa tese. No entanto, dada a deficiência nesse item, apenas a análise métrica foi realizada e os resultados são apresentados a seguir.

A análise foi realizada sobre três nuvens de pontos; uma resultante do processamento das imagens dos voos circulares, outra com os resultados obtidos a partir das imagens dos voos ortogonais e por último sobre a nuvens de pontos obtida com o processamento de todas as imagens.

Realizando as mesmas medições realizadas acima, os resultados obtidos são apresentados na tabela 15.

Tabela 15 – Distâncias encontradas sobre as nuvens de pontos, erros absolutos e relativos.

Cota	Distâncias (mm)					Erro Absoluto (mm)				Erro Relativo (%)			
	A	B	C	D	E								
	LST	Drone completo	Drone Oblíquo	Drone Ortogonal	Estação Total	A-E	B-E	C-E	D-E	A-E	B-E	C-E	D-E
d1	43934	43643	43925	43477	43924	10	-281	1	-447	0,02%	0,64%	0,00%	1,02%
d2	16984	16774	16925	16648	16993	-9	-219	-68	-345	0,05%	1,29%	0,40%	2,03%
d3a	7340	7256	7331	7082	7346	-6	-90	-15	-264	0,08%	1,23%	0,20%	3,59%
d3b	3107	3125	3060	3026	3100	7	25	-40	-74	0,23%	0,81%	1,29%	2,39%
d3c	6549	6547	6393	6330	6533	16	14	-140	-203	0,24%	0,21%	2,14%	3,11%
d4	5928	5949	5952	5858	5925	3	24	27	-67	0,05%	0,41%	0,46%	1,13%
d5	3330	-	-	-	3327	3	-	-	-	0,09%	-	-	-
d6	6089	-	-	-	6089	0	-	-	-	0,00%	-	-	-
d7	4540	-	-	-	4539	1	-	-	-	0,02%	-	-	-
d8a	20029	20153	20360	20296	20035	-6	118	325	261	0,03%	0,59%	1,62%	1,30%
d8b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
d8c	19945	20316	20004	20315	19950	-5	366	54	365	0,03%	1,83%	0,27%	1,83%
d8d	14172	14110	14067	14292	14180	-8	-70	-113	112	0,06%	0,49%	0,80%	0,79%
Média						0,50	-12,56	3,44	-73,56	0,08%	0,83%	0,80%	1,91%
Desvio Padrão						7,76	189,66	136,01	274,98	0,08%	0,52%	0,73%	0,97%

Houve sensíveis melhoras: enquanto tinha-se 413 mm de desvio padrão para as medições realizadas na nuvem de pontos do processamento completo, com o segundo levantamento chegou-se no valor de 189 mm. Para o levantamento circular, o desvio padrão que era de 364 mm, obteve-se 136 mm. Para o levantamento ortogonal os resultados do segundo levantamento pioraram de 41 mm para 274 mm de desvio padrão das medições realizadas. Em todo caso, parece-nos que essa melhora, nos casos em que ocorreu, não é significativa.

Mesmo realizando voos em diferentes datas, com diferentes programas de captura os resultados conseguidos com os levantamentos aéreos não apresentam homogeneidade. No primeiro levantamento, os piores resultados conseguidos foram quando as imagens foram obtidas em voos circulares; já no segundo isso foi ao contrário. Ou seja, não se pode generalizar dizendo que o voo circular é melhor ou pior que o ortogonal e que uma análise prévia precisa ser feita. Esta pode concentrar-se na região em que a integração vai ser feita (cobertura de edificações).

Essa variação na qualidade dos resultados mostra que é sempre necessário fazer um controle de qualidade das nuvens de pontos, principalmente das obtidas com imagens aéreas. Os resultados podem variar e, mesmo que uma análise visual indique que o produto gerado é de boa qualidade, os parâmetros de qualidade propostos devem ser avaliados para garantir que se possa utilizar o modelo 3D para sua finalidade, respeitando sempre a precisão alcançada.

Os próximos experimentos ajudarão a complementar as análises e conclusões.

5. MUSEU PAULISTA (MUSEU DO IPIRANGA)

Segundo seu site oficial (<http://www.mp.usp.br>), o edifício histórico localizado no Parque da Independência, conhecido pelo nome de Museu do Ipiranga, tem como nome oficial Museu Paulista da Universidade de São Paulo. Foi inaugurado em 7 de setembro de 1895 como museu de História Natural e marco representativo da Independência, da História do Brasil e Paulista. Seu primeiro núcleo de acervo foi a coleção do Coronel Joaquim Sertório, que era um museu particular em São Paulo.

No primeiro Centenário da Independência, 1922, foi reforçado o caráter histórico da instituição. Formaram-se novos acervos, com destaque para a História de São Paulo. Realizou-se a decoração interna do edifício, com pinturas e esculturas apresentando a História do Brasil no Saguão, Escadaria e Salão Nobre. Foi instalado o Museu Republicano “Convenção de Itu”, extensão do Museu Paulista no interior do Estado.

Ao longo do tempo, houve uma série de transferências de acervos para diferentes instituições. A última delas foi em 1989, para o Museu de Arqueologia e Etnologia da USP. A partir daí o Museu Paulista vem ampliando substancialmente seus acervos referentes ao período de 1850 a 1950 em São Paulo.

Atualmente, o possui um acervo de mais de 125.000 unidades, entre itens, entre objetos, iconografia e documentação textual, do século 17 até meados do século 20, que é significativo para a compreensão da sociedade brasileira, especialmente no que se refere à história paulista e conta com uma equipe especializada de curadoria. Atualmente (2019) conta com recursos para sua restauração, modernização e ampliação de seus espaços físicos.

A figura 119 apresenta algumas fotografias de fins do século XIX e começos do XX que estão disponíveis em seu site oficial

Figura 119 – Fotografias antigas do museu paulista

Fonte: <http://www.mp.usp.br>

A previsão é que o museu seja reaberto em 2022, ano do bicentenário da Independência do Brasil. Por conta dessa reforma, alguns levantamentos foram executados sendo um deles o levantamento de uma nuvem de pontos com a finalidade de prover informações para um estudo da estrutura do prédio. Esse levantamento será utilizado para a presente pesquisa e será complementado com um levantamento aéreo por Drone. As análises dos produtos obtidos serão descritas nos tópicos a seguir.

5.1. Levantamento terrestre

A necessidade de informações precisas para o desenvolvimento do projeto de restauração do prédio fez com que fosse contratada uma empresa especializada em levantamentos de nuvem de pontos a partir de LST. O objetivo era entregar uma nuvem de pontos de todo o prédio (área externa e interna) densa e com precisão compatível com as necessidades.

A empresa Metro Cúbico Engenharia foi contratada para esse levantamento e com um equipamento da fabricante FARO, semelhante aos

equipamentos utilizados nos levantamentos da Minerva e Engenho dos Erasmos, levantou 695 cenas. Como já existia uma nuvem de pontos coletada com equipamento adequado e com aparente boa qualidade, decidiu-se utilizar essa base de informação nessa tese e não realizar um novo levantamento. Das 695 cenas levantadas, para essa pesquisa, apenas as estações levantadas na área externa foram avaliadas (138 no total).

As figuras abaixo mostram a nuvem de pontos do prédio.

Figura 120 – Vista perspectiva da nuvem de pontos do museu. A esquerda mostra a nuvem de pontos em cor real e a da direita a intensidade em tons de cinza.

Figura 121 – Vista perspectiva da nuvem de pontos do museu em cor real.

5.2. Levantamento aéreo (Drone)

Foram executados 4 voos com o equipamento DJI Phantom 4, sendo que dois deles foram circulares, com a câmera posicionada a 45° em relação ao plano do solo, e dois de maneira tradicional. Ao todo foram coletadas 403 imagens e 5 processamentos distintos foram realizados, conforme apontado a seguir:

- a) imagens do voo circular a 40 metros de altura;
- b) imagens do voo circular a 60 metros de altura;
- c) todas as imagens dos voos circulares;
- d) imagens dos voos verticais;
- e) todas as imagens.

Essa diferença no processamento foi realizada tendo em vista os resultados obtidos no Engenho dos Erasmos e tem o objetivo de verificar se os resultados obtidos com o processamento de imagens oblíquas interferem no resultado final.

Visualmente, os produtos gerados parecem ter uma ótima qualidade; no entanto, uma análise mais criteriosa deve ser feita e todos os parâmetros de qualidade propostas nessa tese foram verificados. As figuras 122, 123 e 124 mostram o resultado obtido desses processamentos.

Figura 122 – Nuvem de pontos da região frontal do museu.

Figura 123 – Modelo 3D gerado pela triangulação da nuvem de pontos do museu.

Figura 124 – Detalhes da triangulação gerada para a produção do modelo 3D do museu.

A figura 122 mostra uma vista perspectiva da nuvem de pontos obtida do processamento das imagens aéreas. O modelo 3D é apresentado na figura 123, onde, através da triangulação de *Delaunay* é possível fazer a reconstrução

geométrica de todo o prédio. A figura 124 apresenta a fachada principal e a representação dos triângulos de *Delaunay* gerados.

5.3. Análise dos resultados e controle de qualidade

5.3.1. Linhagem

Como detalhado nos itens anteriores, essa análise é importante para identificar falhas no processo do trabalho de campo que possam causar problemas na geração do produto final.

Os voos realizados seguiram todo o planejamento executado, coletando todas as informações necessárias e possibilitando que se tenha o melhor resultado no processamento possível. A experiência adquirida nos levantamentos anteriores ajudou muito nesse processo, que deve ser cuidadoso, pois durante o planejamento, algo esquecido ou não levando em consideração pode acarretar problemas no trabalho de campo e por consequência no processamento dos dados.

Para o levantamento LST, como o trabalho de campo foi executado por uma empresa (Metro Cúbico Engenharia), a que não se teve acesso, esse parâmetro não pode ser verificado; situação que pode repetir-se para quem trabalha área. No entanto, se inconsistências forem encontradas na análise dos demais parâmetros, é possível deduzir se há falhas no parâmetro Linhagem.

O fluxograma apresentado na figura 125 é considerado para essa análise. Com base nesse fluxograma, o parâmetro Linhagem está aprovado para o levantamento aéreo, sendo que para o LST, a análise dos demais parâmetros confirmarão se a Linhagem pode ser realmente considerada aprovada.

Figura 125 – Fluxograma de análise do parâmetro de qualidade Linhagem para o levantamento aéreo.

5.3.1. Completude

Navegando diretamente sobre a nuvem de pontos obtida do levantamento terrestre (LST) é possível verificar que até locais de difícil acesso (cobertura, por exemplo) foram levantados. Em alguns casos, interferências físicas podem fazer com que ocorram regiões de oclusões na nuvem de pontos e, para evitar esse problema novas estações de levantamento devem ser ocupadas para completar toda a região que está sendo levantada.

As figuras abaixo mostram que não há regiões ocultas, falha na nuvem de pontos ou regiões com baixa densidade de pontos, e assim o parâmetro Completude pode ser considerado aprovado para o levantamento terrestre.

Figura 126 – Nuvem de pontos do LST da região superior do museu.

Figura 127 – Nuvem de pontos do telhado do museu, com detalhe da passarela.

Figura 128 – Nuvem de pontos da entrada principal do museu

Figura 129 – Nuvem de pontos da região aposta a entrada principal do museu, em tons de cinza.

Teoricamente, no levantamento aéreo, as condições climáticas (chuva e neblina) podem prejudicar ou interromper o levantamento. Um planejamento de voo mal executado pode trazer consequências sérias na nuvem de pontos gerada. Ao contrário do levantamento terrestre, onde as regiões de sombras podem ser minimizadas durante o levantamento, dificilmente é possível verificar, durante a operação, se o levantamento aéreo recobriu toda a área. Drones, geralmente, são pequenos e facilmente se perde o contato visual durante o voo e, dessa maneira não é possível identificar se o equipamento está coletando todas as informações previstas, mesmo que as imagens, em tamanho pequeno para inspeção, possam ser visualizadas em um celular ou tablet em tempo real. Um conhecimento prévio do local e um bom planejamento de voo (até mesmo alto grau de redundância de imagens) faz com que se minimize esse problema e que o levantamento executado consiga coletar todas as informações necessárias.

Como dito, com as imagens coletadas, cinco processamentos foram executados e o parâmetro Completude deve ser analisado por meio de uma navegação na nuvem de pontos, e através de uma análise visual, que pode identificar se há regiões de sombras que prejudiquem o resultado do levantamento aéreo.

a) imagens do voo circular a 40 metros de altura:

A análise visual da nuvem de pontos resultante do processamento de 167 imagens foi realizada e notou-se que uma das faces do museu (lateral apontando para oeste) não foi levantada completamente e por consequência a nuvem de pontos gerada não representa o museu por completo. Dessa forma esse processamento não pode ser aprovado nesse parâmetro de qualidade, ainda que parte de seus dados possam ser aproveitados. As figuras abaixo mostram o resultado da análise.

Figura 130 – Vista frontal da nuvem de pontos das imagens do voo circular a 40 metros de altura.

Figura 131 – Vista traseira da nuvem de pontos das imagens do voo circular a 40 metros de altura.

Figura 132 – Vistas laterais da nuvem de pontos das imagens do voo circular a 40 metros de altura.

Verificando a figura 132 é possível identificar claramente que uma das faces do museu não foi detalhada na nuvem de pontos. Essa é face oeste, orientação que se deduz sabendo que a face principal tem orientação norte. Essa omissão ou incompletude pode ter ocorrido pelo fato do planejamento do voo não ter sido executado de corretamente. Tal problema deveria ter sido verificado na análise do parâmetro Linhagem, e esse parâmetro de qualidade reprovado, no entanto esse problema não foi visualizado, acarretando problemas no produto gerado. O fluxograma de análise é apresentado na figura 133.

Figura 133 – Fluxograma de análise do parâmetro de qualidade Completude da nuvem de pontos geradas a partir das imagens aéreas do voo a 40 metros.

b) imagens do voo circular a 60 metros de altura:

As figuras abaixo mostram a nuvem de pontos das quatro faces principais do museu. Ao contrário do voo feito a 40 metros de altura, o resultado foi aprovado nesse parâmetro de qualidade pois, a nuvem de pontos, examinada ao detalhe, está completa.

Figura 134 – Vistas frontal, traseira e laterais da nuvem de pontos das imagens do voo circular a 60 metros de altura.

Nesse processamento foi possível representar toda a face oeste na nuvem de pontos, diferente do primeiro voo. O fluxograma de análise desse parâmetro é apresentado na figura 135

Figura 135 – Fluxograma de análise do parâmetro de qualidade Completude da nuvem de pontos geradas a partir das imagens aéreas do voo a 60 metros.

c) todas as imagens dos voos circulares

Utilizando todas as imagens dos dois voos analisados nos itens a) e b) um novo processamento foi realizado e uma nuvem de pontos gerada. Através de uma análise visual é possível identificar que as falhas encontradas na nuvem de pontos do caso a), como esperado, foi complementada pelos dados do caso b), ao integrar os dados dos dois levantamentos num único conjunto. Não houve divergência maior nos dados de um e de outro. Assim, o parâmetro Completude pode ser considerado aprovado, para a somatória dos dois levantamentos. As figuras abaixo mostram as 4 faces do museu para essa nova situação.

Figura 136 – Vistas frontal, traseira e laterais da nuvem de pontos das imagens dos voos circulares

Na prática, depois do exame da nuvem do caso a) seria necessário levantar apenas as imagens da região em que a nuvem de pontos ficou deficitária (no voo circular a 40 metros) e reprocessar esses dados. Isso é indicado no fluxograma de análise desse voo. Mas, na prática, isso obrigaria a examinar (em escritório) o levantamento e depois voltar a campo. Como o tempo de um

levantamento é pequeno (alguns minutos), tona-se mais prático aproveitar a ida a campo para fazer diversos levantamentos e não ter que retornar.

Para esse processamento com todas imagens, é possível ver que não há regiões de sombra e que toda a geometria do museu foi reconstruída através do processamento das imagens. O fluxograma apresentado na figura 137 mostra o processo de análise desse parâmetro de qualidade.

Figura 137 – Fluxograma de análise do parâmetro de qualidade Completude da nuvem de pontos geradas a partir de todas as imagens dos voos circulares.

d) imagens dos voos verticais;

O processamento das imagens verticais produziu uma nuvem de pontos com inúmeras falhas e com baixa resolução. Esse resultado de baixa qualidade está relacionado com a baixa correlação entre os pares fotogramétricos e a baixa sobreposição entre os mesmos. O voo foi realizado a 40 metros e a sobreposição de 80% foi calculada com base no plano do solo. Essa sobreposição não se manteve no topo do prédio e assim não foi possível gerar uma nuvem de pontos com qualidade.

Observadndo a figura 138, é possível verificar (visualmente) que houve aproximadamente os 80% de sobreposição quando o plano do solo é considerado. A área delimitada pelos polígonos azul e vermelho deveria ser a área de sobreposição, no entanto essa relação apenas se mantém no plano do solo (polígono azul). Já na região do prédio do museu (polígono vermelho) não há sobreposição suficiente entre as imagens, portanto, impossível de realizar os processos necessários para produzir a nuvem de pontos.

Figura 138 – Indicação da sobreposição longitudinal entre as imagens consecutivas coletadas por Drone.

Mais uma vez esse erro poderia ter sido verificado no parâmetro Linhagem, mediante um planejamento de voo mais eficiente considerando a altura do prédio para o cálculo da sobreposição entre as imagens, mas não foi, o produto ficou prejudicado. Como se disse, o controle de qualidade dos demais parâmetros e levar à não aprovação do produto gerado. Em outros termos, não basta o produto ter sido aprovado em um item; é preciso ser aprovado em todos.

A figura 139 mostra as más condições da nuvem de pontos processadas a partir das imagens verticais.

Figura 139 – Nuvem de pontos resultante do processamento das imagens coletadas pelo voo tradicional.

Facilmente identifica-se que a nuvem de pontos gerada não representa com fidelidade a região levantada e dessa forma esse parâmetro de qualidade não é aprovado e o fluxograma da figura 140 apresenta essa análise.

Figura 140 – Fluxograma de análise do parâmetro de qualidade Completude da nuvem de pontos geradas a partir das imagens aéreas ortogonais.

e) todas as imagens.

Utilizando todas as imagens (no total de 403) uma nuvem de pontos foi produzida e as falhas encontradas nas nuvens dos itens anteriores foram corrigidas, ou seja, a superabundância de imagens fez com que o processamento fosse realizado com sucesso e a nuvem de pontos gerada apresentasse uma boa qualidade, dessa maneira, sendo aprovado esse parâmetro de qualidade (Completeness). A figura 141 exemplifica essa análise visual.

Figura 141 – Nuvem de pontos resultante do processamento de todas as imagens coletadas da região da entrada principal do museu

O mesmo fluxograma de análise feito para o voo circular a 60 metros (figura 135) pode ser considerado para a análise da nuvem de pontos obtida com o processamento de todas as imagens. Esse tipo de verificação não se faz necessário, pois como se utilizou todas as imagens de um voo já aprovado nesse parâmetro de qualidade, inserindo mais imagens no processamento apenas irá densificar a nuvem de pontos e dessa forma o produto já poderia ser considerado aprovado.

Dependendo do tipo de necessidade, por exemplo, um projeto de Engenharia, certas regiões necessitam apresentar uma nuvem de pontos com mais detalhes. Para esse levantamento, analisando em detalhe os mesmos locais levantados por LST, nota-se que, por exemplo, na região da entrada principal do museu, existem muitas falhas e nem todos os locais estão representados pelo modelo 3D. Os resultados são semelhantes, nesse aspecto, para os três voos analisados (circular a 60 metros, todas as imagens dos voos

circulares e todas as imagens levantadas). As figuras 142, 143 e 144 mostram com mais detalhes algumas regiões do museu

Figura 142 – Nuvem de pontos em detalhes da fachada do museu, mostrando a densidade resultante do processamento das imagens.

Figura 143 – Vista perspectiva de uma das fachadas do museu.

Figura 144 – Baixa densidade da nuvem de pontos na região da parte superior do museu.

Considerando o nível de detalhe na análise de projeto de Engenharia, essas nuvens de pontos não atenderiam os requisitos, e estariam reprovadas nesse parâmetro de qualidade para essa finalidade. Ou seja, a aprovação ou não, pode depender do tipo de aplicação e detalhe que se deseja.

Assim, para complementar a pesquisa, um novo levantamento foi realizado apenas com imagens da fachada da entrada principal do museu. Região que se mostrou das mais deficientes nesse aspecto. As imagens adicionais foram levantadas com o mesmo equipamento (Drone modelo *Phantom 4 advanced*) e um processamento independente foi realizado (Figura 145). A nuvem de pontos resultante desse processamento foi incorporada à nuvem de pontos gerada com o processamento de todas as imagens através do processo já apresentado e um exemplo do resultado é apresentado na figura 146.

Figura 145 – Resultado obtido pelo processamento das imagens coletadas da fachada da entrada principal do museu.

a) antes da integração

b) depois da integração

Figura 146 – Comparação da mesma região antes e depois da integração da nuvem de pontos do novo processamento.

Analisando as duas nuvens de pontos, percebe-se que o primeiro processamento gerou uma nuvem de pontos com baixa densidade e que. Isso ocorrer pela a distância em que as imagens foram coletadas. Quanto mais próximo do objeto as imagens foram coletadas maior é a resolução e densidade de pontos gerados no processamento. O processamento das imagens coletadas da fachada mostra essa característica, já que as imagens foram tiradas bem

próximas a ela (aproximadamente 5 metros), a nuvem de pontos gerada não possui regiões que não foram representadas nesse processamento.

Esse levantamento não foi executado em todo o prédio, mas só para essa região de amostra. Isso mostra que os resultados podem ser melhorados fazendo voos complementares.

Como outro exemplo pode-se citar a nuvem de pontos obtida com voos circulares a 40 m de altura. Uma das laterais (fachada oeste) não foi recoberta com as imagens e assim a nuvem de pontos ficou deficitária nessa região. Com um voo auxiliar seria possível coletar imagens apenas nessa região e reprocessar todas as imagens ou apenas processar as novas imagens coletadas e fazer o registro com dados de voo deficiente. O fluxograma da figura 147 detalha a análise desse parâmetro de qualidade até sua aprovação.

Figura 147 – Fluxograma de análise do parâmetro de qualidade Completude, mostrando a necessidade de voltar a campo para complementar os dados previamente levantados.

Seguindo o fluxograma, desde a geração da nuvem de pontos pelo fluxo azul, num determinado ponto nota-se que o produto possui falhas e não existem dados complementares para suprir essa necessidade. Nesse caso, é necessário voltar a campo, coletar novas imagens e gerar uma nova nuvem de pontos.

Considerando o caso da fachada do museu, com a complementação executada, a nuvem de pontos poderia ser aprovada nesse parâmetro de qualidade (completude). Esse procedimento poderia ser executado para todas as regiões do museu com as falhas identificadas. Resta fazer um estudo de produtividade e, como se apontou, pode-se de imediato fazer várias coletas no mesmo dia, situação que poderia evitar uma volta ao campo.

Para as demais análises, apenas três nuvens de pontos serão analisadas: voo circular a 60 metros de altura, voo circular completo e o processamento resultante de todas as imagens. As demais serão descartadas por não terem sido aprovadas nesse parâmetro de qualidade.

5.3.2. Fidelidade Semântica

Comparando os produtos gerados com imagens do local é possível identificar facilmente que as características semânticas foram preservadas. As características físicas, cores e formas estão de acordo com o real e isto pode ser comprovado pelas as imagens abaixo.

Figura 148 – Comparação da imagem coletada em campo (esquerda) com a nuvem de pontos em cor real (direita).

A figura 148 mostram a entrada principal do museu, sendo que a imagem da esquerda é uma fotografia tirada no local e a imagem da direita é a nuvem de pontos em cor real do LST. Algumas regiões (geralmente de bordas) apresentam pequenos ruídos (em branco) que podem surgir no processo de aplicação de cores das nuvens de pontos.

Como as cores são aplicadas à nuvem de pontos através de imagens coletadas pelo equipamento em campo, as cores nessas regiões podem não ser

aplicadas corretamente e, dessa forma, faz com que a nuvem de pontos fique com essa coloração. Alterando a visualização que mostra a intensidade do retorno do sinal é possível verificar as mesmas características vistas na nuvem de pontos em cor real, sendo que alguns detalhes ficam mais realçado. A cor real dos objetos pode ajudar na identificação, mas se essa informação não estiver disponível, outras formas de visualização da nuvem de pontos podem ser utilizadas e, em algumas situações, tornam o elemento mais nítido e com os detalhes mais realçados. Ruídos, como apresentados na figura 148 que está em cor real não aparecem nesse tipo visualização. Um exemplo é o da figura 149.

Figura 149 – Nuvem de pontos renderizada por intensidade do retorno do sinal

Nesse tipo de visualização, as cores apresentadas estão contidas na nuvem de pontos coletadas em campo. Como não há pós processamento para se obter esse tipo de renderização, o dado bruto coletado em campo é apresentado, minimizando ou até mesmo eliminando ruídos.

Outras regiões do museu são apresentadas nas figuras abaixo, mostrando que todas as características dessas regiões foram preservadas e fazendo com que o parâmetro Fidelidade Semântica seja aprovado para o levantamento terrestre.

Figura 150 – Comparação da imagem coletada em campo (esquerda) com a nuvem de pontos em cor real (direita).

Figura 151 – Comparação da imagem coletada em campo (esquerda) com a nuvem de pontos em cor real (direita).

Pequenas alterações nas cores podem ser visualizadas, mas sem maiores consequências. Tratam-se de regiões de borda e vegetação (em sua grande maioria). Fazendo a análise utilizando outro tipo de visualização/renderização, esses tipos de ruídos não seriam visíveis.

Para o levantamento aéreo a mesma análise é feita: imagens do local são analisadas e comparadas com as nuvens de pontos do processamento das imagens aéreas. Considerando apenas os levantamentos aprovados no parâmetro de qualidade *Completeness*, constata-se que todos os resultados obtidos são aprovados nesse parâmetro (*Fidelidade Semântica*).

Percebe-se que numa visão geral, toda a região foi levantada corretamente e as cores e a geometria foram preservadas. As figuras 152 e 153 mostram o resultado. Já o fluxograma da figura 154 relata o processo de análise desse parâmetro. A mesma análise foi feita para as três nuvens de pontos aprovadas até essa etapa e os resultados foram semelhantes e as nuvens de pontos foram aprovadas nesse parâmetro de qualidade.

Figura 152 – Visão geral do resultado do levantamento aéreo

Figura 153 – Visão geral do resultado do levantamento aéreo

Figura 154 – Fluxograma de análise do parâmetro de qualidade Fidelidade Semântica para os dois levantamentos (terrestre e aéreo).

5.3.3. Qualidade Métrica

Antes do processo de integração, o último parâmetro deve ser analisado para cada uma das nuvens de pontos aprovadas para depois realizar o processo de integração. Ou seja, deve-se garantir que as nuvens de pontos possuem precisão e qualidade semelhante para não integrar dados ruins com outros bons.

A densidade não precisa ser a mesma, mas deve-se evitar mesclar produtos com precisões dispares, para não degradar a qualidade. Unir mais nuvens significa, em princípio, melhorar a Completude.

Assim, para avaliar a qualidade métrica, foi feito um experimento: Utilizando uma estação total, algumas distâncias foram medidas sobre a fachada do prédio. Ao todo 14 elementos do edifício, bem definidos, foram escolhidos para realizar medições de padrão ou de comparação para avaliar as nuvens de pontos obtidas pelo levantamento terrestre e aéreo. As figuras 155, 156, 157, 158 e 159 apresentam esses elementos.

Figura 155 – Regiões escolhidas para comparação entre as medições realizadas em campo com Estação Total e as realizadas sobre as nuvens de pontos (parte superior da entrada principal do museu).

Figura 156 – Regiões escolhidas para comparação entre as medições realizadas em campo com Estação Total e as realizadas sobre as nuvens de pontos (parte inferior esquerda da entrada principal do museu).

Figura 157 – Regiões escolhidas para comparação entre as medições realizadas em campo com Estação Total e as realizadas sobre as nuvens de pontos (parte inferior direta da entrada principal do museu).

Figura 158 – Regiões escolhidas para comparação entre as medições realizadas em campo com Estação Total e as realizadas sobre as nuvens de pontos (parte superior e lateral da entrada principal do museu).

Figura 159 – Regiões escolhidas para comparação entre as medições realizadas em campo com Estação Total e as realizadas sobre as nuvens de pontos (lateral direita da entrada fachada principal do museu).

Considerando apenas as medidas realizadas sobre as três nuvens de pontos que foram aprovadas nos parâmetros de qualidade anteriores (voo circular a 60 metros de altura, voo circular completo e com todas as imagens) e os valores conseguidos no levantamento com estação total, foi montada a tabela a 16 que efetua a comparação.

Tabela 16 – Distâncias encontradas sobre as nuvens de pontos, erros absolutos e relativos.

	Distâncias (mm)					Erro Absoluto (mm)				Erro Relativo (%)			
	A	B	C	D	E	B-A	C-A	D-A	E-A	B-A	C-A	D-A	E-A
Cota	Estação total	LST	DRONE COMPLETO	DRONE CIRCULAR 60m	CIRC COMPLETO								
d1	24046	24031	23979	24051	23970	-15	-67	5	-76	0,06%	0,28%	0,02%	0,32%
d2	2143	2152	2123	2122	2152	9	-20	-21	9	0,42%	0,93%	0,98%	0,42%
d3	2137	2146	2085	2089	2069	9	-52	-48	-68	0,42%	2,43%	2,25%	3,18%
d4	1086	1079	991	-	1035	-7	-95	-	-51	0,64%	8,75%	-	4,70%
d5	1056	1061	1102	-	999	5	46	-	-57	0,47%	4,36%	-	5,40%
d6	2846	2838	2867	-	-	-8	21	-	-	0,28%	0,74%	-	-
d7	3159	3169	3250	3187	3134	10	91	28	-25	0,32%	2,88%	0,89%	0,79%
d8	15317	15309	15341	15219	15216	-8	24	-98	-101	0,05%	0,16%	0,64%	0,66%
d9	8273	8267	8281	8230	8207	-6	8	-43	-66	0,07%	0,10%	0,52%	0,80%
d10	1014	1007	1038	1049	1032	-7	24	35	18	0,69%	2,37%	3,45%	1,78%
d11	1009	1010	1004	964	988	1	-5	-45	-21	0,10%	0,50%	4,46%	2,08%
d12	16779	16775	16791	16738	16781	-4	12	-41	2	0,02%	0,07%	0,24%	0,01%
d13	4134	4119	4085	4129	4104	-15	-49	-5	-30	0,36%	1,19%	0,12%	0,73%
d14	8432	8430	8363	8354	8360	-2	-69	-78	-72	0,02%	0,82%	0,93%	0,85%
Média						-2,71	-9,36	-28,27	-41,38	0,28%	1,83%	1,32%	1,67%
Desvio Padrão						8,40	51,72	41,54	36,63	0,23%	2,36%	1,45%	1,73%

Considerando as medidas coletadas com a estação total como sendo o a referência, com precisão de ordem superior, e comparando com as medições realizadas sobre as diferentes nuvens de pontos pode-se tirar algumas conclusões:

- a) a média, que representa tendência, ficou em torno de 3mm no LST (melhor caso) e mesmo no pior (circular completo), com cerca de 4 cm, não é comprometedora para muitas aplicações.
- b) a precisão, medida pelo desvio-padrão, ocorre com as observações feitas sobre nuvem de pontos do LST (8,4 mm), conforme esperado em função dos diversos testes anteriores feitos nesta pesquisa. Os demais situaram-se na casa dos 4 ou 5 cm, sendo o drone completo (52 mm), o pior deles, apontando para que a integração de todos piora ligeiramente a precisão.
- c) o maior erro absoluto encontrado (101 mm) foi na cota d8 sobre a medição na nuvem de pontos das imagens coletadas dos voos circulares;
- d) o menor erro absoluto está na cota d11 (1 mm) obtidos na comparação entre a nuvem de pontos do LST e a medição feita com a estação total;
- e) o maior erro relativo foi encontrado na análise da cota d4 da nuvem de pontos geradas a partir de todas as imagens (8,75%) enquanto que o menor erro relativo (0,01%) está na comparação entre a nuvem de pontos de todas as imagens circulares com a medida feita em campo com a estação total na cota d12. O erro relativo não é um parâmetro que requer certa cautela, pois tende a tornar-se menor com distâncias maiores, pela natureza das tecnologias.

As cotas d4, d5 e d6 não foram medidas na nuvem de pontos geradas a partir do voo circular a 60 m pois a densidade nessa região não permitiu identificar corretamente os objetos extremos do elemento. Quando foram inseridas as imagens dos demais voos circulares essa região ficou mais bem definida e foi possível realizar a medição das cotas d4 e d5, ficamos apenas a

cota d6 ainda sem definição. Quando todas as imagens foram utilizadas no processamento a cota d6 pode ser medida sobre a nuvem de pontos.

Os resultados obtidos mostram que quanto maior o número de imagens utilizadas no processamento e de diferentes pontos de visada, os resultados podem ser melhorados consideravelmente quanto à Completude dos dados e Fidelidade Semântica, mas não necessariamente melhoram a Qualidade Métrica, como se apontou, à vista dos dados da tabela 16. O pior desvio padrão encontrado foi sobre a nuvem de pontos gerada utilizando todas as imagens.

É necessário considerar ainda a dificuldade de ser realizar medições sobre as nuvens de pontos originadas de imagens, pois as bordas não ficam muito bem definidas como na nuvem de pontos do LST e, dessa forma, há uma degradação nos resultados das observações. Como essa característica é marcante nas nuvens de pontos geradas a partir de imagens, o resultado obtido nessa análise deve ser considerado para a definição da precisão alcançada dos produtos gerados, que para esse levantamento ficou entre 36,63 mm a 51,72 mm.

5.3.4. Integração

O processo de integração de dados LST é necessário quando não se consegue fazer o levantamento a partir de um único ponto de vista. E cresce em dificuldade quando o objeto (edifício, ruínas, etc.) possuem reentrâncias (como é típico do capital das colunas, palmetas e outros apliques) ou quando há dificuldades ou restrições no acesso a certas regiões, por exemplo telhados e coberturas até mesmo obstruções físicas no local do levantamento. Quando isso ocorre uma alternativa de complementação dos dados é a utilização da nuvem de pontos gerada pelo processamento das imagens aéreas coletadas por drone que em tese poderia chegar mais perto e ter acesso remoto através da visão superior.

Para o levantamento do museu, essa integração aparentemente não é necessária pois, a nuvem de pontos do LST está completa (inclusive a cobertura do prédio). A equipe de campo acessou o telhado e as torres do museu e fez o levantamento de regiões de difícil acesso e, dessa forma, levantando informações que geralmente não seriam realizadas (dependendo do objetivo do

levantamento). Mesmo o levantamento de campo tendo sido executado dessa maneira, pequenas regiões no telhado e as torres não foram detalhadas e, dessa forma, a nuvem de pontos do drone pode auxiliar na complementação dos dados.

As figuras 160 e 161 mostram essas regiões. Representadas em verde está a nuvem de pontos do LST e em laranja a nuvem de pontos geradas a partir das imagens. O processo de integração é realizado de acordo com o apresentado no item 2.3.1 e 2.5 dessa tese.

Figura 160 – Integração entre as nuvens de pontos da região de uma das torres. Imagem da esquerda antes da integração (nuvem de pontos do LST) e da direita integrada com a nuvem de pontos do Drone.

Figura 161 – Integração entre as nuvens de pontos da região entre as duas torres. Imagem da esquerda antes da integração (nuvem de pontos do LST) e da direita integrada com a nuvem de pontos do Drone.

Fazendo um corte no local indicado na figura 162 (cruzando a passarela entre as duas torres) e mostrando as nuvens de pontos sobrepostas e independentes é possível afirmar que a nuvem de pontos gerada a partir do processamento das imagens degrada o resultado obtido pela nuvem de pontos do LST e faz com que ocorra perda de precisão da nuvem de pontos integrada. Ou seja, a precisão nessa região fica condicionada pela menor precisão do drone. Situação que se admite em função da melhoria indispensável do conteúdo (integridade, completude).

Figura 162 – Indicação do local do corte gerado sobre a nuvem de pontos

Figura 163 – Vista em corte (indicado na figura 162) e resultado para os diferentes produtos analisados.

A figura 163 mostra na parte superior o corte feito sobre a nuvem de pontos do LST, na parte do meio da figura o mesmo corte na nuvem de pontos do Drone e por último os dois cortes sobrepostos. A nuvem de pontos do LST possui uma definição superior das estruturas modeladas, ou seja, representa

com maior precisão e definição (como comprovado no item de avaliação da Qualidade Métrica) as estruturas levantadas em campo. Fazendo uma inspeção da região da passarela da cobertura do museu é possível comprovar isso visualmente. A figura 164 apresenta essa região.

Figura 164 – Detalhe do corte realizado sobre as nuvens de pontos com sobreposição dos dois produtos (LSD3 em verde e Drone em laranja).

Enquanto se tem um corte bem definido na passarela na nuvem de pontos em verde (LST), não se consegue uma boa definição da estrutura com a nuvem de pontos através das imagens pro drone (alaranjado).

Separando as nuvens de pontos da região do piso da passarela e usando as ferramentas do programa *RealWorks da Trimble* para modelar um plano a partir desses pontos é possível quantificar a precisão dessa modelagem e comprovar a diferença de qualidade das nuvens de pontos.

A figura 165 mostra a esquerda (em verde) a nuvem de pontos do LST do piso da passarela isolada e a direita (laranja) a nuvem de pontos do Drone da mesma região.

Figura 165 – Nuvem de pontos isoladas da região da passarela (LST em verde e Drone em laranja).

Utilizando a ferramenta de modelagem de primitivas do programa, seleciona-se a nuvem de pontos e escolhe-se a primitiva que essa região representa (nesse caso escolheu-se um plano, mas o mesmo procedimento pode ser feito com caixas, cilindros, esferas entre outros), adequando-se à realidade do elemento. O programa ajusta a nuvem de pontos e cria o plano que melhor se adapta à nuvem de pontos selecionada. Todo o processo é ajustado utilizando o método dos mínimos quadrados. A figura 166 apresenta a interface básica de modelagem à esquerda (mantendo os pontos), e à direita a primitiva modelada.

Figura 166 – Interface básica do programa de modelagem e reconhecimento de primitivas a partir da nuvem de pontos.

Como resultado, são apresentados o sólido criado e o desvio padrão resultantes desse processamento. Para o plano gerado com a nuvem de pontos do LST obteve-se um desvio padrão de 9,36 mm utilizando 526.447 pontos enquanto que para a nuvem de pontos das imagens aéreas o desvio padrão dessa modelagem foi de 27,22 mm com aproximadamente 3.000 pontos. Ou seja, aproximadamente 3 vezes pior. Além disso, como a nuvem de pontos do levantamento aéreo é mais espessa nessa região, isso fez com que um deslocamento ocorresse na geração do plano médio, e dessa forma modelando um plano distante da posição correta (tendência, medida pela média). Esses valores são apresentados na figura 167.

Cloud		Cloud	
Color of Cloud	RGB(50,255,0)	Color of Cloud	RGB(255,76,0)
Standard Deviation	9.36 mm	Standard Deviation	27.22 mm
N° Points	526.447	N° Points	3.066

Figura 167 – Resultado estatístico do processo de reconhecimento de primitivas a partir da nuvem de pontos (LST em verde e Drone em laranja).

A figura 168 mostra esses planos modelados com a referência da nuvem de pontos do LST. Há uma diferença de aproximadamente 27 mm entre os dois planos gerados. O plano modelado em verde é o gerado a partir da nuvem de pontos do LST e o plano em alaranjado é o modelado a partir da nuvem gerada pelo processamento das imagens.

Figura 168 – Planos modelados e sobre as nuvens de pontos e visualizados conjuntamente.

Pequenas regiões foram utilizadas para essa análise mas extrapolando o resultados para o museu todo, se a nuvem de pontos do levantamento aéreo fosse integrada por completo à nuvem de pontos do LST a precisão da nuvem de pontos integrada seria degradada em todas as regiões, ou seja, a precisão milimétrica encontrada na levantamento LST não poderia ser mais considerada para esse caso e sim a centimétrica encontrada na nuvem de pontos geradas a partir das imagens aéreas. Assim, na prática recomenda-se que só se faça a integração naquelas regiões em que há lacuna de dados por parte do LST.

6. EDIFÍCIO PAULA SOUZA (PRÉDIO DA ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA USP)

A Cidade Universitária, na capital paulista, ocupa aproximadamente 10 km² sendo que as instalações atuais da Escola Politécnica representam cerca de 7% da área total da USP, e é constituída por nove edificações com uma área construída total de mais que 140.000 m², que inclui salas de aulas, bibliotecas, laboratórios acadêmicos e de pesquisa, além de setores administrativos. São 15 departamentos de ensino e pesquisa, que mantêm convênios acadêmicos internacionais com diferentes países, além de convênios e contratos com o setor produtivo. Oferece 17 cursos regulares de graduação, que atende mais de 5 mil estudantes. Seus mais que 30 cursos de mestrado e doutorado contam com cerca de 5 mil alunos, além de atividades de educação continuada, com centenas de cursos que promovem reciclagem para egressos, qualificando anualmente quase 8 mil profissionais para o mercado de trabalho. Mais informações sobre a Escola Politécnica da USP podem ser encontradas no site <https://www.poli.usp.br>

O prédio da Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo está localizado na Av. Prof. Almeida Prado, 83 na cidade universitária e foi escolhido como campo de provas de teste para a presente pesquisa pela facilidade de acesso e por possuir boas características geométricas para análise dos parâmetros de qualidade aqui propostos. A construção possui aproximadamente 15.000 m² com uma fachada com elementos regulares que serão utilizados para a análise dimensional e com sua cobertura irregular que será utilizada para a verificação da qualidade na integração dos dados, fazendo-se o levantamento dessa cobertura com drone. Figura 169 mostra a localização e dimensão do prédio em questão.

Figura 169 – Edifício Paula Souza (Prédio da Engenharia Civil).

Fonte: <https://earth.google.com>

6.1.1. Levantamento terrestre

O levantamento terrestre foi executado com equipamento da Trimble modelo TX5 e foram instaladas 49 estações, sendo que 14 delas foram executadas na parte interna do edifício, primeiro pavimento. Toda a nuvem de pontos foi registrada no programa *RealWorks* da *Trimble* e algumas figuras que apresentam o resultado obtido são mostradas abaixo.

Figura 170 – Entrada principal do prédio da engenharia civil.

Figura 171 – Vista externa do refeitório.

Figura 172 – Corredor interno do prédio.

O equipamento utilizado não possui câmera fotográfica integrada e dessa forma a nuvem de pontos gerada não possui as cores reais do local. Essa característica não prejudica o processo de análise de qualidade. A cor real é útil na interpretação das informações levantadas, mas não melhora a qualidade geométrica da nuvem de pontos.

6.1.1. Levantamento aéreo

Para complementar esse levantamento, o autor da presente pesquisa, como nos demais casos, executou diferentes voos sobre o prédio da Engenharia Civil com a finalidade de gerar uma nuvem de pontos precisa e completa. Três voos foram realizados de maneira tradicional com alta sobreposição longitudinal (80%) e lateral (60%) com alturas de 50, 80 e 120 metros. Foram executados outros dois voos circulares com 50 e 80 metros de altura e por último um voo realizado manualmente para a coleta das imagens de uma das fachadas do prédio. Ao todo foram coletadas 395 imagens.

O processamento das imagens foi executado individualmente para cada voo. Ao final foi feito um processamento utilizando todas as imagens coletadas. As figuras abaixo mostram graficamente alguns dados desses voos.

Figura 173 – Resultado prévio do processamento das imagens aéreas. Voo circular.

Figura 174 – Resultado prévio do processamento das imagens aéreas. Voo tradicional.

Figura 175 – Resultado prévio do processamento de todas as imagens coletadas.

Figura 176 – Resultado prévio do processamento das imagens coletadas na fachada do prédio.

Cada ponto vermelho nas figuras da esquerda mostram o local das tomadas das imagens aéreas em vista ortogonal enquanto que as figuras da direita mostram a disposição das imagens em perspectiva e parte do resultado do processamento.

6.2. Análise dos resultados e controle de qualidade

6.2.1. Linhagem

A experiência adquirida nos levantamentos anteriores ajudou para que erros cometidos anteriormente não se repetissem. Dessa forma, os levantamentos realizados nesse local foram executados corretamente, ou seja, um bom planejamento de campo foi realizado, equipamentos adequados e técnicas de campos foram aplicadas com sucesso e permitiram concluir que o parâmetro Linhagem foi aprovado tanto para o levantamento aéreo quanto para o levantamento terrestre.

Os produtos conseguidos com os levantamentos aparentam ter boa qualidade (isso só poderá ser conclusivo após a análise de todos os parâmetros) e, portanto, o fluxograma apresentado na figura 177 pode ser utilizado para analisar todo o processo de verificação desse parâmetro de qualidade (Linhagem) para os dados obtidos com o levantamento aéreo e terrestre.

Figura 177 – Fluxograma de análise do parâmetro de qualidade Linhagem para os levantamentos terrestre e aéreo.

6.2.2. Completude

A Completude foi analisada para cada levantamento executado e exemplificado através de imagens retiradas das nuvens de pontos conseguidas. Para o levantamento aéreo, como foram realizados vários voos diferentes, essa análise visual será feita para cada levantamento. Quanto ao levantamento terrestre, apenas um produto foi gerado e, sendo assim, uma análise será apresentada e levando em consideração apenas a parte externa do edifício.

Os voos tradicionais executados a 50, 80 e 120 metros de altura possuem basicamente as mesmas características e resultados. Regiões onde já se esperava a não criação da nuvem de pontos (fachada do prédio) ocorreram nos três voos e através dessa análise visual não foi possível diferenciar os três produtos, quanto à qualidade da nuvem de pontos, de forma geral. As figuras abaixo mostram em mais detalhes que não existem diferenças visuais entre as três nuvens de pontos resultantes.

Figura 178 – Vista perspectiva e de detalhe da cobertura do prédio representada pela nuvem de pontos do processamento do voo realizado a 50m de altura.

Figura 179 – Vista perspectiva e de detalhe da cobertura do prédio representada pela nuvem de pontos do processamento do voo realizado a 80m de altura.

Figura 180 – Vista perspectiva e de detalhe da cobertura do prédio representada pela nuvem de pontos do processamento do voo realizado a 120m de altura.

Comparando as figuras 178, 179 e 180 é possível ver que, para os três voos as regiões que ficaram sem nuvens de pontos são as mesmas: detalhes e reentrâncias do telhado e a fachada do prédio. Isso já era esperado para esse levantamento e, portanto, não pode ser considerada uma falha no parâmetro de Completude.

Se verificado (figuras da esquerda) em detalhe algumas regiões do telhado, nos diferentes voos, é possível identificar diferentes resoluções nos objetos. Sobre o telhado, existem regiões com vidros curvos e, nesses pontos, percebe-se uma leve diminuição na definição desses objetos proporcionalmente à altura de voo. A medida que se aumenta a altura de voo, menos detalhes podem ser definidos na nuvem de pontos. Comparando a figura (imagens da esquerda) 178 com as figuras 179 e 180 percebe-se que a definição nessas regiões vai se deteriorando. Esse tipo de análise não será executado nesta tese e poderá ser tratada em trabalhos futuros. No entanto, como se viu nos casos do Museu Paulista, voar mais alto pode ser importante para conseguir correlacionar as imagens, principalmente em regiões com arborização.

Nos voos circulares foram obtidos resultados semelhantes. A diferença de altura de voo não gerou produtos diferentes na avaliação do parâmetro Completude. As nuvens de pontos produzidas possuem características semelhantes e as mesmas regiões onde já era esperado a falta de informação (fachadas do prédio) se confirmaram, verificando se essa ausência. As figuras 181, 182 e 183 mostram o resultado do processamento das imagens coletadas nos voos circulares a 50m, 80m e com todas as imagens. As nuvens de pontos

possuem pouca variação e as mesmas regiões sem nuvem de pontos aparecem nos três processamentos.

Figura 181 – Vista geral do processamento do voo circular a 50 metros de altura.

Figura 182 – Vista geral do processamento do voo circular a 80 metros de altura.

Figura 183 – Vista geral do processamento de todas as imagens coletadas.

Como já informado anteriormente, e com a experiência adquirida nos levantamentos anteriores, tais regiões sem nuvem de pontos já eram esperadas para esses levantamentos. Para corrigir essa deficiência, voos manuais foram executados e imagens foram coletadas em partes das fachadas do prédio. A nuvem de pontos foi processada e integrada ao modelo existente e assim completando as regiões que antes estavam deficitárias.

As figuras 184 e 185 mostram a disposição das tomadas das imagens e o resultado do processamento realizado.

Figura 184 – Disposição da tomada das imagens para o levantamento da fachada do prédio.

Figura 185 – Nuvem de pontos resultante do processamento das imagens coletadas da fachada do prédio.

Esse procedimento, experimental, foi executado em duas regiões do prédio com a finalidade de mostrar a possibilidade de levantar todo o prédio dessa maneira. O resultado pode ser visto das figuras 186 e 187. Essas regiões serão utilizadas para a análise da Qualidade Métrica.

Figura 186 – Indicação dos locais onde foram realizados os voos manuais.

Fonte: Adaptada de <https://earth.google.com>

Integrando a nuvem de pontos da fachada à nuvem de pontos geral do prédio se tem a Completude esperada. A figura 187 apresenta o antes (a) e o depois (b) da integração dessa região levantada manualmente, mostrando visualmente a melhoria.

Figura 187 – Integração entre nuvens de pontos para se obter a completude esperada.

Para o LST, considerando apenas o levantamento executado na região externo do prédio na análise de Completude pode se concluir que o resultado foi positivo. Teoricamente, as árvores existentes no local podem prejudicar o

levantamento caso o planejamento dos locais de instalação do equipamento não seja bem executado. Analisando toda a nuvem de pontos gerada constatou-se que isso não ocorreu pois não foram encontradas áreas de sombra que prejudicassem o objetivo desse levantamento. Algumas figuras são mostradas abaixo para exemplificar.

Figura 188 – Vista geral da nuvem de pontos (LST) uma das fachadas do prédio.

Figura 189 – Vista em detalhe da nuvem de pontos (LST) uma das fachadas do prédio.

Considerando o que foi apresentado acima, todos os levantamentos foram aprovados no controle de qualidade do parâmetro Completude. As necessidades foram supridas, ou por um levantamento completar ou por uma superabundância de dados. A nuvem de pontos do levantamento terrestre poderia ser reprovada nesse parâmetro de qualidade caso não se atentasse a grande quantidade de interferências físicas presentes e possíveis (árvores em sua grande maioria).

No levantamento aéreo as árvores existentes interferem no resultado final, mas tendo em vista que o objetivo principal do uso do drone foi de prover dados onde o levantamento terrestre não conseguiu capturar, esse fato não pode reprovar esse parâmetro de qualidade (observado por exemplo nas laterais do prédio mal definidas), pois toda a cobertura do prédio foi levantada e poderá ser utilizada na integração dos dados, caso sejam aprovadas nos demais parâmetros de qualidade (Fidelidade Semântica e Qualidade Métrica).

O fluxograma de análise é apresentado abaixo e é válido tanto para as nuvens de pontos geradas das imagens aéreas quanto para o levantamento terrestre e, dessa forma, todos os levantamentos tiveram seus resultados aprovados nesse parâmetro de qualidade.

Figura 190 – Fluxograma de análise do parâmetro Completude para os dois produtos gerados (nuvem de pontos LST e Drone).

6.2.3. Fidelidade Semântica

Seguindo o processo padrão de análise de qualidade e tendo as nuvens de pontos aprovadas nos parâmetros de qualidade anteriores, a próxima análise foi realizada para identificar se os produtos gerados estão fiéis à realidade encontrada em campo. Tal verificação é realizada através de uma análise visual nos produtos gerados para identificar se a realidade do local levantado foi corretamente representada pelas nuvens de pontos geradas.

As figuras apresentadas nos itens anteriores podem ser consideradas como elemento para a na classificação desse parâmetro de qualidade (ver figuras 178, 179, 180, 186, 187 e 188). Através dessas figuras é possível ver que, se em alguns casos, a nuvem não tem as cores reais (LST) a qualidade geométrica foi garantida pelo contraste entre os elementos escaneados (concreto e janelas, por exemplo) e pela preservação das formas em todas as nuvens de pontos levantadas.

Com essa análise visual e a montagem do fluxograma de análise apresentado na figura 191, é possível considerar todas as nuvens de pontos como aprovadas nesse parâmetro de qualidade.

Figura 191 – Fluxograma de análise do parâmetro Fidelidade Semântica para os dois produtos gerados (nuvem de pontos LST e Drone).

Analizando o fluxograma acima nota-se que um detalhe importante, que a cor da nuvem de pontos, não interfere na qualidade dos produtos (para esse caso).

6.2.4. Qualidade Métrica

A análise da Qualidade Métrica será apresentada de maneira semelhante os levantamentos anteriores. Medições foram realizadas em campo com uma estação total e comparadas com medidas realizadas sobre as nuvens de pontos. Como o prédio levantado possui uma grande extensão, escolheram-se duas regiões amostrais para realizar essas medições e validar esse processo de análise. As regiões levantadas com estação total foram a entrada principal do prédio e outra região da fachada onde se tem uma boa qualidade das nuvens de pontos e pouca interferência de árvores. São as mesmas apresentadas nas figuras 186, provenientes de voos manuais para adensar a nuvem de pontos dessas regiões. As figuras 192 e 193 apresentam os locais medidos.

Figura 192 – Local das medições realizadas na fachada do prédio (Região A apresentada na figura 186).

Figura 193 – Local das medições realizadas na entrada principal do prédio (Região B apresentada na figura 186).

O resultado das medições e a comparação entre elas está apresentado na tabela 17.

Tabela 17 – Distâncias encontradas sobre as nuvens de pontos, erros absolutos e relativos.

Cota	Distâncias (mm)			Erro Absoluto (mm)		Erro Relativo (%)	
	A	B	C				
	LST	Drone	Estação Total	A-C	B-C	A-C	B-C
D1	14777	14719	14779	-2	-60	0,01%	0,41%
D2	14760	14715	14754	6	-39	0,04%	0,26%
D3	8381	8383	8392	-11	-9	0,13%	0,11%
D4	8398	8389	8396	2	-7	0,02%	0,08%
D5	3043	3169	3045	-2	124	0,07%	4,07%
D6	1445	1582	1445	0	137	0,00%	9,48%
D7	1529	1643	1529	0	114	0,00%	7,46%
D8	7269	7888	7268	1	620	0,01%	8,53%
Média				-0,75	110,00	0,04%	3,80%
Desvio Padrão				4,86	220,39	0,04%	4,13%

Como esperado, os melhores resultados foram obtidos nas medições feitas sobre a nuvem de pontos do LST. A maior diferença encontrada foi de 11 mm sobre a cota D3, que também apresentou o maior erro relativo (0,13%). O desvio padrão das diferenças entre as medições em campo com estação total e o LST foi menor que 5 mm, ou seja, abaixo do informado pelo catálogo do fabricante.

Os resultados da nuvem de pontos do Drone, principalmente junto à entrada principal (D5 a D8) do prédio apresentaram os piores resultados. Erros absolutos de até 620 mm foram, com desvio padrão de 200 mm para essa comparação de distâncias. O maior erro relativo foi encontrado sobre a cota D6, que se aproximou de 9,5%.

Considerando apenas as medições realizadas na nuvem de pontos do Drone na região da entrada principal (D1 a D4), o maior erro absoluto encontrado foi de 60 mm e o desvio padrão dessa amostra passa a ser de aproximadamente 25 mm.

Analisando essas duas regiões e comparando as nuvens de pontos do LST e do Drone, as diferenças são claras e visualmente é possível ver que os modelos 3D são diferentes na região da entrada principal. Esse local possui muitas árvores e interferências físicas e podem ter prejudicado o processamento das imagens para a geração da nuvem de pontos. Por outro lado, na outra região utilizada nessa comparação, as nuvens de pontos estão com boas sobreposições geométrica, ao contrário do que ocorre na entrada principal do prédio. Essas diferenças são mostradas nas figuras 194, 195 e 196 para a região B e 197, 198 e 199 para a região A que foi apresentada na figura 186.

Figura 194 – Nuvens de pontos do Drone na entrada principal do prédio (Região B apresentada na figura 186).

Figura 195 – Nuvens de pontos do LST na entrada principal do prédio (Região B apresentada na figura 186).

Figura 196 – Sobreposição entre as nuvens de pontos na entrada principal do prédio. Em vermelho a nuvem de pontos do LST e em amarelo a nuvem de pontos do Drone (Região B apresentada na figura 186).

Analisando a figura 196 vê-se que há uma distorção na nuvem de pontos gerada pelo processamento das imagens aéreas. Não há uma coincidência geométrica entre as nuvens de pontos, o que é explicado pelo resultado da análise das medições realizadas nesse local (medidas D5, D6, D7 e D8). Nota-se também que a marquise representada em amarelo está completamente fora da posição da nuvem representada em vermelho (LST).

A nuvem de pontos do Drone na região da entrada principal não pode ser integrada à nuvem de pontos do LST, pois, mesmo com a menor densidade, é possível verificar claramente que existem grandes erros que não permitem que essa integração seja executada.

Figura 197 – Nuvens de pontos do Drone na Região A apresentada na figura 186.

Figura 198 – Nuvens de pontos do LST Região A apresentada na figura 186.

Figura 199 – Sobreposição entre as nuvens de pontos na fachada do prédio. Em vermelho a nuvem de pontos do LST e em amarelo a nuvem de pontos do Drone.

Na figura 199 as duas nuvens de pontos não apresentam as mesmas discrepâncias entre as feições apresentadas na figura 196. Pode-se ver que os pontos em vermelhos (LST) estão geometricamente coincidentes com os pontos em amarelo (Drone) sendo diferenciados apenas pela densidade de cada levantamento e a precisão de cada um.

Apesar de ter sido utilizada uma pequena região para essa análise, pode-se considerar que todas as nuvens de pontos foram aprovadas nesse parâmetro de qualidade, com exceção da nuvem de pontos do Drone da região da entrada principal (Região A). O procedimento ideal para essa análise, por se tratar de um grande edifício, seria realizar mais medições em outras regiões do prédio para garantir uma maior representatividade dos resultados, diminuindo a possibilidade de existirem distorções ou erros em pontos específicos.

6.2.5. Integração

O produto mais preciso, conforme demonstrado no item de análise da Qualidade Métrica é o da nuvem de pontos do LST. Muitos produtos foram gerados a partir das imagens aéreas considerando os diferentes voos executados e, para esse processo de integração, serão utilizadas a nuvem de pontos do LST (como fiducial) e a nuvem de pontos gerada a partir de todas as imagens.

Como em todos os outros casos, no levantamento terrestre há uma deficiência na nuvem de pontos na cobertura do prédio enquanto que na nuvem de pontos do levantamento aéreo, as fachadas do prédio são deficitárias. Como ficou claro em casos anteriores, fazer a junção de produtos diferentes pode fazer com que o produto melhor seja degradado, portanto, para minimizar esse característica o ideal é que apenas as regiões onde não exista nuvem de pontos num determinado levantamento seja preenchida com outro e, dessa forma, fazendo com que apenas a região que foi integrada à nuvem de pontos original (e mais precisa) esteja com uma precisão mais baixa. Conforme já mencionado, apenas a cobertura do prédio será integrada ao levantamento terrestre.

Tal operação é realizada aplicando uma transformação de corpo rígido à nuvem de pontos, fazendo com que os dois produtos fiquem no mesmo sistema de coordenadas. O processo de integração foi detalhado no desenvolvimento da teoria e essa metodologia foi empregada em todos os processamentos realizados da presente pesquisa. As figuras 200 e 201 mostram o produto dessa integração.

Figura 200 – Nuvem de pontos do levantamento terrestre (LST) apenas.

A figura 201 mostra a nuvem de pontos (vista geral) realizada com ao LST. É possível ver que há muitas lacunas na cobertura do prédio. O levantamento foi todo executado a partir do solo e em nenhum momento foram utilizados andaimes, visadas a partir de caixas d'água ou acesso ao telhado do prédio.

Figura 201 – Nuvem de pontos do levantamento aéreo (Drone) apenas.

A figura 201 mostra a nuvem de pontos resultante do processamento das imagens do drone e percebe-se que as fachadas do prédio estão incompletas.

Realizando o processo de registro utilizando pontos homólogos identificáveis nas duas nuvens de pontos, faz-se com que a nuvem de pontos do levantamento aéreo fique no mesmo sistema de coordenadas da nuvem de pontos de referência (geralmente deve ser a nuvem de pontos de maior precisão, nesse caso, a do LST). A figura 202 mostra as duas nuvens integradas num mesmo sistema de cores (tons de cinza) e a figura 203 apresenta, em amarelo, a nuvem de pontos de referência (LST) e em vermelho a nuvem de pontos transformada (levantamento aéreo), técnica que permite avaliar melhor a integração.

Figura 202 – Nuvem de pontos integrada em tons de cinza.

Figura 203 – Nuvem de pontos integrada. Em vermelho está representada a nuvem de pontos do levantamento aéreo e em amarelo a nuvem de pontos do levantamento terrestre.

Como mencionado, se considerarmos o produto final como apresentado acima, toda a região em que existe nuvem de pontos do LST (em amarelo) e, por consequência com maior precisão, foi sobreposta com alguma nuvem de pontos do levantamento aéreo (vermelho). Em resumo, os pontos vermelhos, embora menos precisos, completam a nuvem amarela, havendo locais em que o vermelho predomina fortemente. Isso também ocorre na fachada e em algumas árvores. Deve-se então, considerar essa integração apenas para o telhado (nesse caso) e excluir as demais regiões, deixando o máximo possível das informações sejam preenchidas pelo levantamento mais preciso (LST). Poderia ser admitida uma exceção em locais das fachadas com poucos pontos amarelos, coisa que não aconteceu. Visualmente, no entanto, há locais na fachada em que os pontos vermelhos escondem os amarelos, como no módulo próximo à caixa d'água na região da direita da foto. Mas, examinando a imagem amarela, constata-se que ela não é deficitária,

Os programas que trabalham com dados dessa natureza possuem ferramentas de corte e edição das nuvens de pontos e, sendo assim, é possível excluir da nuvem de pontos do Drone as regiões que já foram recobertas com a nuvem de pontos do LST.

Na figura 204, na parte superior, à imagem da esquerda, em amarelo, mostra a nuvem de pontos do LST, na imagem da direita apenas o telhado da nuvem do Drone, em vermelho, ambas recortadas previamente para deixar só o que interessa. Na parte de baixo da figura tem-se as duas nuvens integradas, apenas com as partes necessárias para dar a Completude ao todo.

Figura 204 – Nuvem de pontos integrada em diferentes pontos de vista e separadas por tipo de nuvem de pontos.

A figura 205 apresenta outra região do prédio da Engenharia Civil e na mesma posição (apresentado na figura 206), mas com um sistema de cores diferentes (tons de cinza). É possível identificar o monumento utilizado para o primeiro teste dessa tese (Minerva).

Figura 205 – Nuvem de pontos integrada na região próxima ao restaurante, com diferenciação de cores.

Figura 206 – Nuvem de pontos integrada na região próxima ao restaurante em tons de cinza.

Numa análise visual não se vê diferenças entre as nuvens de pontos, mas a análise da precisão geométrica mostra que os dois produtos não têm a mesma precisão. A informação de precisão deve constar dos metadados do produto final, estando disponível para os usuários e informando também as diferentes precisões por região do edifício.

7. ANÁLISE FINAL, CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

7.1. Análise final

Para facilitar as conclusões é interessante realizar uma análise comparada dos diversos levantamentos realizados na parte prática.

Na sequência, também com auxílio de tabelas-resumo são mostrados, e a seguir analisados, os resultados obtidos na análise da Qualidade Métrica, apenas dos dados que foram aprovados em todos os parâmetros de qualidade. Ou seja, foram descartados os levantamentos não aprovados em algum quesito: no caso do levantamento da escultura de Palas Atenas (nos quatro quesitos), no Engenho dos Erasmos (quesito qualidade métrica) e no Museu do Ipiranga (reprovado em três quesitos).

No capítulo 3 está detalhada a primeira prática realizada (escultura Palas Atenas), na qual foram necessários dois levantamentos aéreos e dois levantamentos terrestres para conseguir obter bons resultados. A falta de experiência pode ter sido um dos fatores dos resultados deficientes do primeiro voo: apesar de ter sido executado de acordo com as práticas correntes, o processamento das imagens não produziu bons resultados e através da análise dos parâmetros de qualidade identificou-se que a falha nos parâmetros Linhagem (identificada pela baixa densidade de pontos em algumas regiões) foi o que prejudicou o produto. Foi feito um segundo levantamento aéreo, que possibilitou a geração de uma nuvem de pontos densa o suficiente para ser utilizada na análise dimensional, que é a última antes da integração. Os dados estão resumidos na Tabela 18.

Tabela 18 – Resumo dos resultados obtidos no segundo levantamento da escultura Palas Atenas.

Segundo Teste (TRIMBLE + TRENA DIGITAL)							
Cota	Distâncias (mm)			Erro Absoluto (mm)		Erro Relativo (%)	
	A	B	C	B-A	C-A	B-A	C-A
	Trena	LS3D	Drone				
	Média			5,00	-140,32	0,94%	13,72%
	Desvio Padrão			1,79	95,04	0,93%	7,43%

No capítulo 4, os voos circulares realizados sobre o Engenho dos Erasmos foram reprovados no parâmetro de qualidade métrica para a nuvem de pontos dos dados aéreo e por consequência esses dados não foram utilizados na integração. A experiência adquirida no primeiro levantamento foi essencial para a rejeição imediata desses primeiros levantamentos e um novo foi executado com sucesso. A Tabela 19 resume todos os resultados e depois se fará uma análise comparativa entre as diferentes opções de levantamento com drone (B, C e D), mas já se adianta que os voos circulares e também o levantamento completo que o inclui, forneceram os piores resultados.

Tabela 19 – Resumo dos resultados do levantamento executado no Engenho São Jorge dos Erasmos.

Engenho dos Erasmos													
Cota	Distâncias (mm)					Erro Absoluto (mm)				Erro Relativo (%)			
	A	B	C	D	E								
	LS3D	Drone completo	Drone Oblíquo	Drone Ortogonal	Estação Total	A-E	B-E	C-E	D-E	A-E	B-E	C-E	D-E
					Média	0,50	483,44	334,67	20,11	0,08%	2,94%	2,01%	0,39%
					Desvio Padrão	7,76	413,49	364,17	41,92	0,08%	1,75%	1,70%	0,56%

No capítulo 5, referente ao levantamento do Museu do Ipiranga, descreve-se o experimento, em que foram testadas diferentes alturas de voos (40m e 60m) e diferentes disposições da orientação (angulação) da câmera do Drone. Conclui-se que, contrariamente ao que se imagina com frequência, voos mais baixos não produzem melhores resultados geométricos, apenas geram uma nuvem de pontos mais densas e detalhadas. Novamente falhas no parâmetro de qualidade Linhagem permitiram identificar os levantamentos piores e ficar com o que produziu melhores resultados. A tabela 20 resume os resultados.

Tabela 20 – Resumo dos resultados do levantamento executado no Museu do Ipiranga.

Museu do Ipiranga													
Cota	Distâncias (mm)					Erro Absoluto (mm)				Erro Relativo (%)			
	A	B	C	D	E	B-A	C-A	D-A	E-A	B-A	C-A	D-A	E-A
	Estação total	LS3D	DRONE COMPLETO	DRONE CIRCULAR 60m	CIRC COMPLETO								
					Média	-2,71	-9,36	-28,27	-41,38	0,28%	1,83%	1,32%	1,67%
					Desvio Padrão	8,40	51,72	41,54	36,63	0,23%	2,36%	1,45%	1,73%

No capítulo 6, descreve-se o resultado do levantamento do prédio da Engenharia Civil da Escola Politécnica da USP. A tabela 21 resume os resultados.

Tabela 21 – Resumo dos resultados do levantamento executado no prédio da Engenharia Civil da Escola Politécnica da USP.

Prédio Engenharia Civil							
Cota	Distâncias (mm)			Erro Absoluto (mm)		Erro Relativo (%)	
	A	B	C	A-C	B-C	A-C	B-C
	LS3D	Drone	Estação Total				
			Média	-0,75	110,00	0,04%	3,80%
			Desvio Padrão	4,86	220,39	0,04%	4,13%

Em função da existência de muitas árvores, a fachada do prédio não pôde ser bem representada na nuvem de pontos e prejudicou os resultados. Retirando esses dados da análise estatística, obtém-se novos resultados, mostrados na tabela 22.

Tabela 22 – Resumo dos resultados obtidos no levantamento executado no prédio da Engenharia Civil da Escola Politécnica da USP, desconsiderando as medições sobre a fachada da entrada principal do prédio.

Cota	Distâncias (mm)			Erro Absoluto (mm)		Erro Relativo (%)	
	A	B	C	A-C	B-C	A-C	B-C
	LS3D	Drone	Estação Total				
D1	14777	14719	14779	-2	-60	0,01%	0,41%
D2	14760	14715	14754	6	-39	0,04%	0,26%
D3	8381	8383	8392	-11	-9	0,13%	0,11%
D4	8398	8389	8396	2	-7	0,02%	0,08%
			Média	-1,25	-28,75	0,05%	0,22%
			Desvio Padrão	7,27	25,46	0,05%	0,15%

Nota-se que houve uma melhoria, que será analisada logo mais. Mas em todo caso, esse produto mais preciso perde em completude ou integridade e a fachada principal deveria ser levantada por outro método.

A partir desses dados montou-se uma tabela 23, comparativa de todos os resultados, para as conclusões. Na primeira coluna se faz uma referência a tabela de onde os dados foram retirados. Os campos destacados em verde são os resultados do LST, em amarelo os resultados mais precisos obtidos com Drone. Em azul a proporção entre os dois (dividindo o resultado obtido com o Drone pelo LST).

Tabela 23 – Resumo de todos os resultados obtidos dos levantamentos aéreos e comparação com os dados obtidos com o LST.

Tabela	Levantamento	Precisão (mm)				Proporção drone/LST (mm)	
		LST (μ)	LST (σ)	Drone (μ)	Drone (σ)	(μ)	(σ)
19	Palas Atenas - LST	5,00	1,79				
	Palas Atenas - Drone			140,30	95,00	28,06	53,07
20	Erasmus - LST	0,50	7,76				
	Erasmus - Drone (Imagens ortogonais a 25m)			20,11	41,92	40,22	5,40
	Erasmus - Drone (imagens do voo circular)			334,67	364,17	669,34	46,93
	Erasmus - Drone completo (todas as imagens - Ortogonal + Circular)			483,44	413,49	966,88	53,28
21	Museu do Ipiranga - LST	-2,71	8,40				
	Museu do Ipiranga - Drone (imagens do voo circular a 60 m)			-28,27	41,64	10,43	4,96
	Museu do Ipiranga - Drone (Todas as imagens dos voos circulares)			-41,38	36,63	15,27	4,36
	Museu do Ipiranga - Drone completo (imagens do voo circular e ortogonal)			-9,36	51,72	3,45	6,16
22	Prédio da Engenharia Civil - LST	-0,75	4,86				
	Prédio da Engenharia Civil - Drone (Fachada)			110,00	220,39	-146,67	45,35
23	Prédio da Engenharia Civil - LST	-1,25	7,27				
	Prédio da Engenharia Civil - Drone (Fachada)			-28,75	25,46	23,00	3,50

As bases de comparação foram os levantamentos feitos com Estação Total ou Trena. Por esses números, principalmente a proporção das últimas colunas, reforça-se que o levantamento com LST foi sempre melhor/mais preciso que o feito com Drone para o mesmo objeto/levantamento. Na prática pode-se então usar o LST como padrão (se houver garantias de qualidade e relatórios de calibração do equipamento), dispensado o controle através da estação total. Isso pode ser uma boa solução, pois na hipótese de integração, poupa um levantamento extra de controle.

Nessa tabela, foi calculada a proporção para a média, que indica o valor do erro sistemático, e para o desvio-padrão, que é um indicativo da precisão.

Para a média, no levantamento da escultura Palas Atenas, a proporção é de 28 vezes melhor. No Engenho aproximadamente 40 vezes, no Museu 15 vezes e no prédio da Engenharia Civil 23 vezes. Ou seja, de 15 a 40 vezes.

Para o desvio-padrão, a proporção, na sequência e aproximadamente é: 53,1; 5,5; 4,4 e 3,5 vezes. Ou seja, excluído o levantamento da Palas Atenas, de 3,5 a 5,5 mais preciso. Ou seja, o LST é robustamente melhor que o Drone e pode ser usado como base geométrica precisa para a integração dos dados de Drone.

Esses dados permitem também fazer comparações relativas nos casos do Engenho dos Erasmos e do Museu.

No Engenho dos Erasmos, o levantamento aéreo ortogonal foi 16,6 vezes melhor no quesito média do que o levantamento oblíquo circular (dividir a 669,34 por 40,22) e 8,7 vezes mais preciso quanto ao desvio padrão (46,93/5,4). O resultado do processamento Drone completo, contaminado pela pior qualidade dos dados circulares, ficou pior do que este. A conclusão, neste caso, é que o voo ortogonal apresentou resultados muito melhores do que o circular. No entanto, nos outros casos o processamento das imagens dos voos circulares apresentou melhores resultados. Acredita-se que pode ter ocorrido algum problema não detectado com esses voos circulares (talvez algum problema com o programa de controle de voo desenvolvido pela equipe do CITI, a ser pesquisado). Como visto no processamento das imagens dos voos circulares sobre o Museu do Ipiranga, o voo circular a 60 m de altura foi aprovado e com bons resultados quanto à sua precisão.

A nuvem de pontos resultante do processamento de todas as imagens coletadas do Museu do Ipiranga se mostrou menos tendencioso que os demais casos. Já o circular completo foi ligeiramente mais preciso que o circular (4,36 contra 4,96m). O levantamento completo com drone mostrou-se pior que os outros dois isoladamente, mas a tendência foi menor (melhor) que os dois casos. Foi nesse experimento que se verificou que baixas alturas (experimentos rejeitados), com mais imagens, densificam a nuvem de pontos e mostram mais detalhes, mas não aumentam a qualidade posicional, em função de não se obter correlação ou até fazer falsas correlações, principalmente em função da existência de árvores. Voos mais altos incluem edificações das redondezas, permitindo obter pontos bem definidos para montar a correlação de imagens.

Esse resultado leva à questão da tendência e que esta é bastante dependente de um ajustamento e modelo matemático e trabalhos futuros poderiam aprofundar nesse assunto.

7.2. Conclusões

Os experimentos realizados para o presente trabalho mostraram que, dentro dos parâmetros técnicos e condições de contorno da presente tese, o uso do Drone é, de fato, uma ferramenta eficaz quanto ao aspecto de representação

da realidade, isto é, na produção de material com qualidade visual: fotos aéreas, mosaico ortoretificado, maquete eletrônica 3D e filme com sobrevoo dessa maquete. No entanto, pode deixar a desejar no aspecto dimensional, principalmente para algumas aplicações mais exigentes, como costumam ser algumas de engenharia, e comparativamente com tecnologias clássicas: aerofotogrametria e o LST. Também se mostra adequado para pequenas áreas e, notadamente, para edifícios e assemelhados, como foram os casos estudados, em função do foco da pesquisa. Isso tudo dentro dos limites mostrados no item anterior.

Por sua vez, o LST, já em outros trabalhos e confirmado neste, mostrou-se uma tecnologia competitiva quando comparado com a topografia convencional, atendendo aos requisitos de representação e precisão dimensional.

Em função disso, a presente pesquisa trabalhou com a integração de produtos tomando-se as devidas precauções. Como apresentado, nuvens de pontos de diferentes fontes possuem características distintas e devem ser utilizadas com prudência, conhecendo as limitações de cada produto, principalmente a menor precisão do Drone, quando utilizado em sua metodologia básica, sem apoio de campo ou GPS diferencial.

A possibilidade de integração das tecnologias consistiu pois no objetivo geral de presente pesquisa e, através de casos reais, mostrou sua viabilidade e suas limitações. Para isso foi necessário analisar a qualidade de cada produto gerado validando as metodologias propostas (objetivos específicos) e, caso o resultado dessa análise seja positivo, promover a integração dos dados.

Para isso, metodologicamente, foram estabelecidos procedimentos para analisar os processos e garantir a melhor qualidade possível. Assim, foram propostos a aplicação de quatro parâmetros de qualidade (resumidos em fluxogramas) a serem analisados para que o processo de integração seja bem-sucedida: Linhagem; Completude; Fidelidade Semântica e Qualidade Métrica. A ordem dessa análise deve ser seguida, pois como visto, uma análise é dependente da anterior. Por exemplo, caso a análise da Fidelidade Semântica não seja aprovada para um determinado levantamento, a falha pode ter ocorrido em processo anterior. No levantamento do Museu do Ipiranga, por exemplo, um

dos voos foi realizado numa altura incompatível e não possibilitando a sobreposição entre as imagens (falha no parâmetro Linhagem) e por consequência, os produtos resultantes do processamento não puderam ser validados nos demais parâmetros de qualidade subsequentes.

Outra conclusão é que, visualmente, os produtos apresentam resultados que podem confundir o usuário, principalmente quando tais levantamentos possuem a característica das cores reais dos objetos. Como se viu no teste realizado no Engenho dos Erasmos, o primeiro produto gerado por Drone aparentava ter uma boa qualidade. Os parâmetros de qualidade Linhagem, Completude e Fidelidade Semântica foram aprovados e só se percebeu que o produto estava reprovado no controle de qualidade métrica. Sem esse tipo de análise, esse produto poderia ter sido utilizado em projetos de engenharia, com consequências imprevisíveis.

Como proposta genérica de metodologia, sugere-se:

- a) em função da presença de árvores ou vegetação, prever voos mais altos para obter sempre boa correlação entre as imagens (identificação de ponto homólogos bem definidos como cantos em edificações);
- b) utilizar o LST para obter distâncias que sirvam de parâmetros para avaliação dos processamentos das imagens aéreas;
- c) realizar tanto o voo ortogonal quanto o circular, e processar cada um separadamente e avaliar a qualidade pelos processos acima descritos, incluindo os diversos controles de qualidade (fluxogramas do presente trabalho). Com os produtos aprovados, realizar também o processamento integrado das imagens.

Com o estabelecimento dessas metodologias foram atingidos os objetivos específicos.

7.3. Trabalhos futuros

Também se pode pensar em futuras pesquisas, sugeridas pelos resultados do presente trabalho:

- a) Quando se trabalha com nuvens de pontos de diferentes fontes de dados, os programas especializados devem possibilitar um processo de registro que permita a aplicação de fatores de escala às nuvens de pontos com menores precisões, através da aplicação da transformação afim nesse processo. Até o presente momento os programas não permitem fazer isso. Com essa possibilidade, e tendo a nuvem de referência uma qualidade superior, possibilita-se que nuvens de pontos deficitárias (como no caso do primeiro levantamento do Engenho dos Erasmos) sejam corrigidas sem a necessidade voltar a campo para um novo levantamento. Estudos relacionados a esse tema devem ser mais explorados, dando continuidade à presente pesquisa.
- b) No presente estudo, alguns tipos de equipamentos foram utilizados. Para os levantamentos terrestres foram empregados os equipamentos da Trimble e Faro e para os levantamentos aéreos os Drones da fabricante DJI, modelos Phantom 3 e 4. No processamento de imagens utilizou-se o programa Pix4D *mapper* e para o tratamento das nuvens de pontos terrestre os programas Autodesk Recap pro e Trimble RealWorks. Estudos complementares semelhantes ao realizados podem ser feitos utilizando outros equipamentos e programas, para verificar se isso afeta os resultados.
- c) A metodologia aplicada na análise da qualidade dos dados nessa tese foi realizada através de processos manuais e visuais de verificação. O uso de técnicas de computacionais pode auxiliar nesse processo de controle de qualidade. Técnicas conhecidas pelo termo inglês *Machine Learning*, *Deep Learning* e inteligência artificial podem ser empregadas em estudos futuros e, dessa forma, automatizar os processos de avaliação da qualidade dos produtos e atuando no processo de integração dos dados. Com essas técnicas, visualiza-se a possibilidade de integração automática de dados apenas em locais onde sejam realmente possíveis e necessárias (onde não há nuvens de pontos no produto mais preciso, correção automática de nuvens de pontos com menores precisões através de transformações

matemáticas (transformação afim) e a produção de relatórios de qualidade automáticos.

- d) Outro estudo pode versar sobre a utilização das nuvens de pontos na modelagem de dados e reconstrução de sólidos para projetos de Engenharia. Nos estudos realizados sobre as nuvens de pontos do Museu do Ipiranga, um pequeno teste foi realizado sobre a modelagem de uma plataforma e constatou-se que mesmo estando as nuvens de pontos num mesmo sistema de coordenadas, devido a suas características de qualidade, a modelagem desses dados pode não ser adequada a determinados objetivos. A precisão da definição de um sólido a partir da nuvem de pontos do LST ficou 3 vezes superior à da modelagem da mesma região utilizando a nuvem de pontos do processamento das imagens (Drone). Enquanto se obteve 9 mm de desvio padrão na modelagem de um plano sobre a nuvem de pontos do LST, com a nuvem das imagens aéreas, o desvio padrão encontrado foi de 27 mm (apresentado no item 5.3.3, figura 167)
- e) Nesta tese, apenas foram analisadas as nuvens de pontos resultantes do processamento de imagens aéreas, no entanto outros produtos são gerados a partir desse processamento: Ortoimagens e modelos digitais de terreno (MDT). Os Programas oferecem a opção de gerar o MDT e, tal solução deve ser testada e analisada, constatando se os algoritmos são capazes de eliminar as construções, vegetações entre outros, para apresentar apenas a nuvem de pontos sobre o terreno. É necessário também avaliar a qualidade desses dados.

Pode-se dizer que, realizando o controle de qualidade para identificar possíveis problemas nos resultados de integração e conhecendo as limitações de cada produto, como constatado, os produtos integrados podem auxiliar nos projetos de Engenharia. Adicionalmente, produtos visuais podem ser gerados utilizando as nuvens de pontos integradas, gerando produtos de realidade aumentada ou virtual. Esses produtos podem ser visualizados através de ferramentas e programas específicos e podem ser tanto dinâmicos (quando há a interação humana na navegação dentro das maquetes 3D) ou estáticas

(quando são produzidos vídeos com trajetórias definidas para serem reproduzidas em locais definidos. Internet, por exemplo.).

Concluindo, as duas tecnologias podem ser utilizadas em conjunto sempre que necessário. O LST apresenta bons resultados quanto ao produto gerado. No entanto, os equipamentos são caros (centenas de milhares de reais) e pelo seu tamanho, podem dificultar ou inviabilizar seu uso em determinados locais (coberturas, por exemplo). Essas características podem inviabilizar seu uso em alguns projetos. O Drone, por sua vez, é um equipamento relativamente barato (dezena de milhares de reais) e de fácil uso. É operado remotamente e pode coletar dados de locais de difícil acesso. Nesses experimentos, o produto possui precisão em torno de 5 a 10 vezes piores que a do LST. Conhecendo a limitação de cada uma e fazendo o controle de qualidade conforme proposto, é possível produzir produtos de qualidade para uso em diversas áreas da Engenharia.

Vale advertir o usuário que só foram exploradas as potencialidades básicas dos dados do drone e que, a presente pesquisa não analisou a melhoria da precisão quando se utilizam pontos de apoio de campo e o GPS diferencial. Isso já seria objeto de outras pesquisas, com metodologia semelhante à proposta neste trabalho, já existindo bibliografia e experimentos a respeito, que não foram objeto da presente tese.

REFERÊNCIAS¹

ABDEL-AZIZ, Y. I., and KARARA, H. M. **Photogrammetric potential of non-metric cameras**. No. 36. University of Illinois at Urbana - Champaign, Civil Eng. Studies, Photogrammetry Series, 1974.

ADNAN, A., DARWIN, N., ARIFF, M., MAJID, Z., IDRIS, K. **Integration between unmanned aerial vehicle and terrestrial laser scanner in producing 3d model**. Isprs - international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, (2019).

AICARDI, I., DABOVE, P., LINGUA, A., PIRAS, M. **Integration between TLS and UAV photogrammetry techniques for forestry applications**. iForest - Biogeosciences and Forestry (2016).

ACKERMANN, Friedrich. **Techniques and strategies for DEM generation. Digital photogrammetry: an addendum to the Manual of Photogrammetry**. Edited by C. Greve. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Md, p. 135-141, 1996.

ALI, Tarig; MEHRABIAN, Ali. **A novel computational paradigm for creating a Triangular Irregular Network (TIN) from LiDAR data**. Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications, v. 71, n. 12, p. e624-e629, 2009.

ANDRADE, J. B de. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, v. 258, 1998.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. SBEE, Curitiba. (2ª Edição, ISBN 85-86180-29-9), 2003.

AUSTIN, Reg. **Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment**. John Wiley & Sons, 2011.

---

¹ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 6023).

BAKER, Timothy J. **Automatic mesh generation for complex three-dimensional regions using a constrained Delaunay triangulation**. Engineering with Computers, v. 5, n. 3-4, p. 161-175, 1989.

BARBOSA, Julierme Z.; CONSALTER, Rangel; PAULETTI, Volnei e MOTTA, Antonio C. V. **Uso de imagens digitais obtidas com câmeras para analisar plantas**. Rev. de Ciências Agrárias, Lisboa , v. 39, n. 1, p. 15-24, mar. 2016.

BRADSKI, Gary; KAEHLER, Adrian. Learning OpenCV: **Computer vision with the OpenCV library**. " O'Reilly Media, Inc.", 2008.

BRITO, Jorge Nunes; COELHO, Luiz;. **Fotogrametria digital**. P. 270. EdUERJ, 2007.

BRUM, D., SILVA, R., SOARES, G., ROOS, R. **Análise da Integração da Nuvem de Pontos Obtidas com Laser Scanner Terrestre, Reconstrução 3D a partir de Fotos e VANT: Estudo de caso em área de construção do Campus da Unisinos**. ANAIS DO simpósio brasileiro de sensoriamento remoto. Anais eletrônicos. Campinas (2017)

CHEW, L. Paul. **Constrained delaunay triangulations**. Algorithmica, v. 4, n. 1-4, p. 97-108, 1989.

CINTRA, Jorge Pimentel. **Contribuições ao estudo de representação de superfícies com o auxílio do computador**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 1984.

CINTRA, Jorge Pimentel; GONÇALES, Rodrigo. **Topografia de túneis com laser scanner terrestre: estudo de caso**. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 23, n. 1, p. 115-133, 2017.

COSTA, Moisés Ferreira; SILVA, Antonio Simões. **Determinação de coordenadas planas: uma metodologia de cálculos pelo processo de ressecção linear**. Setor de Engenharia de Agrimensura, 1995.

DALMOLIN, Quintino; LEAL, Evilázio da Mota. **Análise da qualidade posicional em bases cartográficas geradas em CAD**. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 7, n. 1, 2001.

ECK, Christoph. **Navigation algorithms with applications to unmanned helicopters**. 2001. Tese de Doutorado. ETH Zurich, 2001.

EISENBEISS, Henri. **A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition**. International Archives of Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 36, n. 5/W1, p. 1-7, 2004.

FELGUEIRAS, Carlos Alberto; CÂMARA, Gilberto. **Modelagem numérica de terreno. Análise Espacial de Dados Geográficos**. Disponível em:< <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/index.html>>. Acesso em, v. 8, 2001.

FURUKAWA, Yasutaka; PONCE, Jean. **Accurate, dense, and robust multiview stereopsis**. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, v. 32, n. 8, p. 1362-1376, 2010.

GEHRKE, S., MORIN, K., DOWNEY, M., BOEHRER, N., & FUCHS, T. Semi-global matching: **An alternative to LIDAR for DSM generation**. Proceedings of the 2010 Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I. 2010.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações**. Editora da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1994.

GONÇALES, Rodrigo. **Dispositivo de varredura laser 3D terrestre e suas aplicações na engenharia, com ênfase em túneis**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, 2007.

GROETELAARS, Natalie Johanna; DE AMORIM, Arivaldo Leão. **Tecnologia 3D Laser Scanning: características, processos e ferramentas para manipulação de nuvens de pontos**. In: Anais do 15th Iberoamerican Congress of Digital Graphics. Santa fé, Argentina. P. 490-494, 2011.

GROVES, Paul D. **Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems**. Artech house, p. 7-10, 2013.

HIEP, V. H., KERIVEN, R., LABATUT, P., & PONS, J. P. **Towards high-resolution large-scale multi-view stereo**. Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. CVPR 2009. IEEE Conference. p. 1430-1437, 2009.

HUBER, Daniel. **The ASTM E57 file format for 3D imaging data exchange. In: Three-Dimensional Imaging, Interaction, and Measurement**. International Society for Optics and Photonics. p. 78640A, 2011.

IDOETA, Ivan Valeije. **Metodologia de elaboração automatizada de modelo digital de elevação e ortofoto em média e pequena escala**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2007.

KAŠPAR, M., POSPÍŠIL, J., ŠTRONER, M., KŘEMEN, T., & TEJKAL, M. **Laser Scanning in Civil Engineering and Land Surveying**. Editorship Vega spolso Hradec Králové, 2004.

LENZ, Reimar K.; TSAI, Roger Y. **Techniques for calibration of the scale factor and image center for high accuracy 3d machine vision metrology**. In IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 10, p. 713–720, 1988.

LI, Zhilin; ZHU, Christopher; GOLD, Chris. **Digital terrain modeling: principles and methodology**. CRC press, 2004.

LIM, M., PETLEY, D. N., ROSSER, N. J., ALLISON, R. J., LONG, A. J. **Combined digital photogrammetry and time-of-flight laser scanning for monitoring cliff evolution**. The Photogrammetric Record, v. 20, n. 110, p. 109-129, 2005.

LIMA, Erly Caldas de. **O levantamento pioneiro da SARA Brasil: histórico, tecnologia empregada e avaliação dos produtos**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

LUGNANI, J. B. **Introdução à fototriangulação**. UFPR - Univ. Federal do Paraná, Curitiba, 1987.

MIKHAIL, E. M. **Observations and least squares**. University Press of America Inc., New York, 1976.

MIKHAIL, E. M., BETHEL, J., and McGLONE, J. C. **Introduction to Modern Photogrammetry**. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001.

MILANO, Danilo de; HONORATO, Luciano Barrozo. **Visão computacional**. Universidade Estadual de Campinas-(Unicamp), Faculdade de Tecnologia, 2010.

MONICO, João Francisco Galera. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. Editora UNESP, 2007.

NEX, Francesco; REMONDINO, Fabio. **UAV for 3D mapping applications: a review**. Applied geomatics, v. 6, n. 1, p. 1-15, 2014.

PIERROT-DESEILLIGNY, Marc; PAPARODITIS, Nicolas. **A multiresolution and optimization-based image matching approach: An application to**

surface reconstruction from SPOT5-HRS stereo imagery. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 36, n. 1/W41, 2006.

PITERI, Marco Antônio; RODRIGUES, José Carlos. **Fundamentos de visão computacional.** Presidente Prudente: FCT/UNESP-PP, 2011.

PRESCOTT, B., and McLEAN, G. I. **Line base correction of radial lens distortion.** Graphical Models and Image Processing 59, 1, 39–47. 1997.

RICKER, Mark D. **Pixels, bits, and GUIs: The fundamentals of digital imagery and their application by plant pathologists.** Plant disease, v. 88, n. 3, p. 228-241, 2004.

SAMBERG, Andre. **An implementation of the ASPRS LAS standard.** ISPRS Workshop on Laser Scanning and SilvLaser. p. 363-372, 2007

SANTOS, Daniel Rodrigues: **Fotogrametria II.** Departamento de Geomática UFPR. 2013.

SANTOS, Suzana Daniela Rochal; HUINCA, Suelen Cristina Movio; MELO, Lineardo Ferreira de Sampaio; SILVA, Marly Terezinha Quadri Simões; DELAZARI, Luciene Stamato. **Considerações sobre a utilização do PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) nos dias atuais.** III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação Recife, 2010.

SANTOS, Adriana Goulart; SEGANTINE, Paulo César Lima; DA SILVA, Irineu. **Controle de qualidade de mapas digitais urbanos para uso em sistemas de informações geográficas.** Minerva, v. 5, n. 2, p. 169-176, 2008.

SCHULZ, Thorsten. **Calibration of a terrestrial laser scanner for engineering geodesy.** Tese de Doutorado. Technical University of Berlin, 2007.

SOUSA, Henrique Lima de. **Visão computacional na Fotogrametria: uma avaliação sobre os modernos recursos que podem ser utilizados na otimização do processamento de imagens obtidas em VANT**. IV Simpósio Brasileiro de Geomática – SBG2017. II Jornadas Lusófonas - Ciências e Tecnologias de Informação Geográfica - CTIG2017, 2017

TOMMASELLI, Antonio Maria Garcia. **Um estudo sobre as técnicas de varredura a laser e Fotogrametria para levantamentos 3D a curta distância**. GEODÉSIA Online-Revista da Comissão Brasileira de Geodésia, v. 4, p. 1415-1111, 2003.

TSAI, Roger Y. **An efficient and accurate camera calibration technique for 3d machine vision**. In IEEE Computer Vision and Pattern Recognition Conference, pp. 364–374. 1989

WOLF, Paul R. **Elements of Photogrammetry**. Tokio: McGraw-Hill, 1974.

WOLF, Paul. R. **Elements of Photogrammetry with Air Photo Interpretation and Remote Sensing**. McGraw-Hill Book Co, Singapore, 1983.

WOLF, Paul R.; DEWITT, Bon A. **Elements of photogrammetry: with applications in GIS**. New York: McGraw-Hill, 2000.

WUTKE, Juliana Dias. **Métodos para avaliação de um sistema laser scanner terrestre**. 2006. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná.

ZHU, Q., ZHANG, Y., WU, B., & ZHANG, Y. **Multiple close-range image matching based on a self-adaptive triangle constraint**. The Photogrammetric Record, v. 25, n. 132, p. 437-453, 2010.