



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

THEO DE CARVALHO BARBOSA

**PARÂMETROS DE FOTOGRAMETRIA TERRESTRE PARA A GERAÇÃO DE
NUVEM DE PONTOS EM MODELOS BIM**

Recife

2022

THEO DE CARVALHO BARBOSA

**PARÂMETROS DE FOTOGRAMETRIA TERRESTRE PARA A GERAÇÃO DE
NUVEM DE PONTOS EM MODELOS BIM**

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

Área de concentração: Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Jacks dos Anjos Garnés.

Coorientador: Profa. Dra. Simone Sayuri Sato.

Recife

2022

Catálogo na fonte:
Bibliotecária Sandra Maria Neri Santiago, CRB-4 / 1267

B238p Barbosa, Theo de Carvalho.
 Parâmetros de fotogrametria terrestre para a geração de nuvem de pontos em modelos BIM / Theo de Carvalho Barbosa. – 2022.
 161 f.: il., fig., quad., tab., abrev. e siglas.

 Orientador: Prof. Dr. Silvio Jacks dos Anjos Garnés.
 Coorientadora: Profa. Dra. Simone Sayuri Sato.
 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife, 2022.
 Inclui referências.

 1. Ciências geodésicas. 2. Fotogrametria terrestre. 3. Nuvem de pontos. 4. BIM. I. Garnés, Silvio Jacks dos Anjos (Orientador). II. Sato, Simone Sayuri (Coorientadora). III. Título.

UFPE

526.1 CDD (22. ed.)

BCTG/2023-146

THEO DE CARVALHO BARBOSA

**PARÂMETROS DE FOTOGRAMETRIA TERRESTRE PARA A GERAÇÃO DE
NUVEM DE PONTOS EM MODELOS BIM**

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

Aprovada em: 28/02/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Silvio Jacks dos Anjos Garnés (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Simone Sayuri Sato (Coorientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Daniel Carneiro da Silva (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Max Lira Veras Xavier de Andrade (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

À família, a base de tudo.

AGRADECIMENTOS

À Roberta, pelo apoio incondicional;

À Rodrigo, Renato e Helena, pelo motivo;

À Silvio e Simone, pela paciência.

RESUMO

Os levantamentos arquitetônicos de edificações, em especial de patrimônio, em sua grande maioria são realizados usando métodos que envolvem medições diretas com trenas, fitas ou eletrônicas, obedecendo alinhamentos físicos da própria construção ou montando uma grade de referência para se ter os detalhes construtivos que objetivam a representação não só da edificação, como também dos ornamentos, que refletem a cultura e o espírito de época em que foram concebidos. Esse método clássico depende não só de técnica, mas da habilidade artística de profissionais específicos para representá-los. Nesse estudo, é apresentado o uso da fotogrametria terrestre com câmaras de pequeno formato e tomadas de cenas com diferentes conjuntos de lentes, alterando distâncias e formas de processamento. O objetivo é testar e comparar os resultados obtidos do modelo tridimensional que servirão de base para a modelagem BIM. A edificação escolhida como objeto teste foi a Igreja Nossa Senhora da Piedade, situada no litoral de Pernambuco, no bairro de Piedade no município de Jaboatão dos Guararapes. O procedimento metodológico foi dividido em duas etapas, o primeiro foi realizado um processamento para a geração da nuvem de pontos e sua malha mesh, usando barras de escalas e dois tipos de lentes, foram gerados modelos tridimensionais e seus insumos e efetuadas avaliações da qualidade visual e uma análise comparativa usando como parâmetros: texturas e nível de detalhamento dos ornamentos arquitetônicos, com o objetivo de avaliar os processamentos, o consumo computacional, o tempo demandado e determinar os parâmetros utilizados para a otimizar os processamentos com uma qualidade necessária para arquitetura. Definido os parâmetros, na segunda etapa foi utilizado uma variedade maior de conjuntos ópticos, câmara e lente, para processar a ortoimagem da igreja e verificar os efeitos que essa variação causa no resultado. Os processamentos foram tomados com pontos de controle e com barras de escala. Ficaram evidenciadas que a variação causa distorção visual na representação, bem como diferentes acurácias posicionais e resoluções espaciais nas ortoimagens. Dentre os resultados, um celular, por exemplo, apresentou uma melhor performance do que a melhor câmara do teste, a Canon M50, quando equipada com a pior lente dos testes, a de 18mm.

Palavras-chave: fotogrametria terrestre; nuvem de pontos; BIM.

ABSTRACT

The architectural surveys of buildings, especially heritage, are mostly carried out using methods that involve direct measurements with measuring tapes, regular ones or electronics, obeying physical alignments of the construction itself or assembling a reference grid to have the constructive details that aim the representation not only of the building, but also of the ornaments, which reflect the culture and spirit of the time in which they were conceived. This classic method depends not only on technique, but on the artistic ability of specific professionals to represent them. In this study, the use of terrestrial photogrammetry with small format cameras and shots of scenes with different sets of lenses is presented, changing distances and forms of processing. The objective is to test and compare the results obtained from the three-dimensional model that will serve as a basis for BIM modeling. The building chosen as the test object was the Nossa Senhora da Piedade Church, located on the coast of Pernambuco, in the neighborhood of Piedade in the municipality of Jaboatão dos Guararapes. The methodological procedure was divided into two stages, the first was a processing to generate the point cloud and its mesh, using scale bars and two types of lenses, three-dimensional models and their inputs were generated and visual quality assessments were performed. and a comparative analysis using as parameters: textures and level of detail of the architectural ornaments, with the objective of evaluating the processing, the computational consumption, the time demanded and to determine the parameters used to optimize the processes with a necessary quality for architecture. Once the parameters were defined, in the second stage, a greater variety of optical sets, camera and lens, were used to process the orthoimage of the church and verify the effects that this variation causes on the result. Processes were taken with control points and with scale bars. It was evidenced that the variation causes visual distortion in the representation, as well as different positional accuracies and spatial resolutions in the orthoimages. Among the results, a cell phone, for example, performed better than the best camera in the test, the Canon M50, when equipped with the worst lens in the tests, the 18mm.

Keywords: terrestrial photogrammetry; point cloud; BIM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	(a) Desenho do molde (b) Molde para produção (c) Arco executado	23
Figura 2 -	O levantamento com contato executado em altura	24
Figura 3 -	Conceito ilustrado de representação arquitetônica.	29
Figura 4 -	Arquivos e desenho técnico do acervo da DPPC	30
Figura 5 -	Castelo Vincennes em Paris - levantamento	31
Figura 6 -	Levantamento da fachada das ruínas Casa da Torre	33
Figura 7 -	Representações arquitetônicas com dados obtidos por medições diretas e fotogrametria terrestre	34
Figura 8 -	Comparação de frontões por diferentes técnicas	35
Figura 9 -	Escaneamento da nuvem de pontos para modelagem no Revit	35
Figura 10 -	Elevação frontal em projeção ortogonal	36
Figura 11 -	Reconstrução em volumes geométricos primitivos	37
Figura 12 -	Elementos básicos da tomada de uma foto	38
Figura 13 -	Sobreposição longitudinal e transversal das fotos para visão estereoscópica	39
Figura 14 -	Formas distintas de captação de imagem	40
Figura 15 -	Fotos com DSLR e a sobreposição necessária	41
Figura 16 -	Sistema fotogramétrico	42
Figura 17 -	Representação da geometria epipolar entre um par de imagens	49
Figura 18 -	Sistema de coordenadas geodésicas	54
Figura 19 -	Sistema geodésico local	56
Figura 20 -	Uso da barra de escala ao lado de objetos culturais para reconstituição fotogramétrica	58
Figura 21 -	Da foto ao modelo, o processo de digitalização tridimensional de um objeto	59
Figura 22 -	Tipos de barras de escalas	60
Figura 23 -	Estadia e miras como “barra de escalas”	60
Figura 24 -	Base com pontos de controle para fotogrametria a curta distância	61

Figura 25 -	Tipos de alvos usado em aerofotogrametria	62
Figura 26 -	Alvos com fitas reflexivas e pontos naturais das edificações para servirem de pontos de controle	62
Figura 27 -	Sensor analógico, à esquerda e digital, à direita.	63
Quadro 1 -	Diferenças entre as DSLR e as Mirrorless	64
Figura 28 -	As diferenças internas entre as câmaras do tipo DSLR e Mirrorless	64
Figura 29 -	Esquema óptico que triangula o objeto, o ponto focal e o sensor.	65
Figura 30 -	Com o observador parado, o campo de visão de acordo com a distância focal	66
Figura 31 -	O campo de visão de cada lente conforme classificação.	66
Figura 32 -	Formas de distorção das lentes conforme distância focal	67
Figura 33 -	Efeito prático da distorção barril	67
Figura 34 -	Princípio do método clássico de interseção a vante	70
Figura 35 -	Princípio do método da irradiação	71
Figura 36 -	Princípio do método interseção a ré	71
Figura 37 -	Sequência de processamento do Metashape:	78
Quadro 2 -	Critérios de Níveis de Desenvolvimento pelo AIA	84
Figura 38 -	Representação dos LODs de uma mesma edificação	85
Figura 39 -	Entorno da Igreja de Nossa Senhora da Piedade	87
Figura 40 -	Entorno da Igreja de Nossa Senhora da Piedade	87
Figura 41 -	Entorno da Igreja	88
Figura 42 -	Comparação esquemática da distância focal de uma lente em um mesmo objeto	89
Quadro 3 -	Dados técnicos das câmaras disponíveis para realização da pesquisa	89
Quadro 4 -	Dados técnicos das lentes disponíveis para realização da pesquisa	90
Quadro 5 -	Nomenclatura dos testes padronizados	92
Figura 43 -	Técnica para tomada de fotografia de uma fachada	93
Figura 44 -	Posições das tomadas das fotos para a geração de um MDT	93
Figura 45 -	Técnica de tomada de fotos de um objeto isolado	94

Figura 46 -	Tomada de fotos de um objeto arquitetônico isolado	94
Figura 47 -	Formato de tomada de fotos representativo ao propósito da pesquisa	95
Figura 48 -	Modelo mesh texturizado com problemas e vazios em áreas de sombra	96
Figura 49 -	Pontos estimados para locação dos equipamentos e determinação dos pontos de controle	97
Figura 50 -	Pontos estimados para locação dos equipamentos e determinação dos pontos de controle	98
Figura 51 -	Pontos de controle de P1 até P27 na fachada da igreja	98
Figura 52 -	Análise de pontos de controle fotogramétricos	99
Figura 53 -	Inserção e análise do modelo com controle por barras de escala	100
Figura 54 -	Alinhamento das 137 fotos da lente de 55mm	103
Figura 55 -	Alinhamento com falhas, as fotos então em alturas incondizentes com a realidade	104
Figura 56 -	Pontos homólogos inseridos nas fotos para correção do alinhamento	105
Figura 57 -	Pontos homólogos inseridos nas fotos para correção do alinhamento	105
Figura 58 -	Modelo com 101 pontos homólogos inseridos nas 237 fotos, para correto alinhamento	106
Figura 59 -	Alinhamento corrigido com a inserção dos pontos homólogos	107
Quadro 6 -	Comparativo de técnicas automáticas e com pontos de auxílio no alinhamento.	107
Figura 60 -	Ensaio 250PU032 (a) Nuvem esparsa (0,17 mi) (b) Nuvem densa (433 mi)	108
Figura 61 -	Escalonamento da imagem para níveis de processamento distintos	109
Figura 62 -	(a) Exemplo de foto original (b) Seu mapa de profundidade também em Hig	110
Figura 63 -	Nuvem densa no cálculo do Metashape (a) Versão 1.5.2	110
Figura 64 -	Nuvem densa na versão 1.7.0	111

Figura 65 -	Modelo na versão 1.5.2 que não apresenta erros nas faces lisas	112
Figura 66 -	Melhor definição das bordas no modelo da versão 1.7, mas apresenta falhas e bolhas	112
Quadro 7 -	Consumo do sistema para os Depth maps	113
Quadro 8 -	Consumo do sistema e quantidade de pontos para o Dense Cloud	113
Figura 67 -	Nuvem de pontos colorida	114
Figura 68 -	Nuvem de pontos com nível de confiança	115
Figura 69 -	Filtro dos pontos com intervalo 0-3 do nível de confiança	116
Figura 70 -	Os pontos desejados com intervalo 3-255	116
Figura 71 -	Comparação dos níveis de confiança em lentes distintas	117
Figura 72 -	Esquema comparativo entre lentes de diferentes aberturas observando o mesmo objeto	118
Figura 73 -	Sobreposição dos modelos para comparação	118
Figura 74 -	A quantidade de pontos nos testes (55mm)	119
Figura 75 -	A quantidade de faces nos ensaios (55mm)	120
Figura 76 -	A quantidade de memória utilizada na criação da malha (55mm)	120
Figura 77 -	O tempo consumido para a criação do modelo texturizado ao final do processo (55mm)	120
Figura 78 -	A quantidade de pontos gerados nos ensaios (55mm)	121
Figura 79 -	A quantidade de memória utilizada na criação da malha (55mm)	122
Figura 80 -	O tempo consumido para processamento total dos testes	123
Figura 81 -	(a) A malha original (b) Otimizada para 10%	125
Figura 82 -	As imagens resultantes (a) Malha original (b) Malha otimizada	125
Figura 83 -	Exemplo de falhas pontuais na otimização da malh	126
Figura 84 -	(a) Mesh sem textura (b) Mesh texturizado	127
Figura 85 -	A textura do modelo inicial da lente 55mm	128
Figura 86 -	A texturização do modelo inicial 55mm, 2k a 32k	130
Figura 87 -	A texturização do modelo inicial 55mm, 2k a 32k	131
Figura 88 -	A texturização do modelo inicial 55mm, 2k a 32k	132

Figura 89 -	Os tempos de processamento por etapa nos testes	133
Figura 90 -	Comparativo das ortoimagens 55PH416, 55PU032, 250PH032 e 250PU332	134
Figura 91 -	Pináculos tortos nos testes 55PH416, 55PU032, 250PH032 e 250PU332	136
Figura 92 -	Falhas na ortoimagem do teste 250PU332	136
Figura 93 -	Falhas na ortoimagem do teste 250PU332	137
Figura 94 -	Falhas de projeção no teste 250PH032	138
Quadro 9 -	Combinação de câmaras e lentes para os testes	139
Figura 95 -	Fotos tomadas em campo da Igreja N. S. de Piedade	140
Figura 96 -	Os resultados dos processamentos câmara + lente e pontos de controle	141
Figura 97 -	Comparativo de sobreposição dos resultados obtidos.	144
Figura 98 -	Detalhes das ortoimagens com pontos de controle	145
Figura 99 -	Detalhes das ortoimagens com barras de escala	146
Figura 100 -	Detalhes das ortoimagens com pontos de controle	148
Figura 101 -	Comparativo de sobreposição dos resultados obtidos	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Resultados dos processamentos com pontos de controle	143
Tabela 2 -	Acurácia dos modelos com pontos de controle	147
Tabela 3 -	Acurácia dos modelos com barras de escala	147

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASA	American Standards Association
BIM	Building Information Modeling
CAD	Computer-aided design
CCD	Charged Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
DECART	Departamento de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura
DMA	Agência de Mapeamento de Defesa Americana
DPPC	Diretoria de Preservação do Patrimônio Cultural
DSLR	Digital Single Lens Reflex
GNSS	Global Navigation Satellite System
GSA	Serviço Geral Administração dos EUA
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPTU	Imposto Patrimonial e Territorial Urbano
ISO	International Organization for Standardization
LAGEO	Laboratório de Geodésia
LAMEPE	Laboratório de Metrologia e Posicionamento Espacial
LATOP	Laboratório de Topografia
LIDAR	Light Detection and Ranging
MDC	Modelo Digital de Construção
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelos Digitais de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
RTK	Real Time Kinematics
SfM	Structure From Motion
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SGL	Sistema Geodésico Local
SIFT	Scale Invariant Feature Transform
STL	Sistema Topográfico Local
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

UTM Sistema Universal Transversa de Mercator
VANT Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	JUSTIFICATIVA	21
1.2	OBJETIVOS	27
1.2.1	Objetivo geral	27
1.2.2	Objetivos específicos	28
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1	O DESENHO TÉCNICO ARQUITETÔNICO	29
2.2	A REPRESENTAÇÃO CONTA A HISTÓRIA DO MONUMENTO	30
2.3	O LEVANTAMENTO DE EDIFICAÇÕES	32
2.4	FOTOGRAMETRIA APLICADA AO MCD	35
2.5	CONCEITOS DA FOTOGRAMETRIA	38
2.5.1	Fotogrametria Terrestre ou de Curta Distância	39
2.5.2	Principais modelos matemáticos utilizados em fotogrametria	41
2.5.2.1	Equação da Colinearidade	41
2.5.2.2	Structure from Motion (SfM)	47
2.5.3	Referenciais geodésicos utilizados em fotogrametria	53
2.5.4	Tipos de pontos de controle e barras de escalas	57
2.5.5	Câmaras e lentes profissionais não fotogramétricas	62
2.5.6	Métodos para determinação de pontos de controle georreferenciados	67
2.5.6.1	Pontos de controle no terreno por GNSS	68
2.5.6.2	Pontos de controle na fachada por métodos clássicos	69
2.5.6.3	Equações de observações para os métodos clássicos	72
2.5.7	Ajustamento de observações com injunções de pontos de controle	72
2.5.8	Processamento de dados fotogramétricos	77
2.6	O PROCESSO BIM	80
2.6.1	As dimensões D do BIM	82
2.6.2	Os níveis de desenvolvimento	83
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	86
3.1	DEFINIÇÃO DA ÁREA E DO OBJETO DE ESTUDO	86

3.2	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	88
3.2.1	Softwares utilizados na pesquisa	91
3.3	PADRONIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO	91
3.3.1	Nomenclatura dos processamentos	91
3.3.2	Tomada de fotos da primeira etapa	92
3.4	PARÂMETROS COMPUTACIONAIS	96
3.5	LEVANTAMENTO DE PONTOS DE CONTROLE	97
3.6	DETERMINAÇÃO DAS BARRAS DE ESCALA NA EDIFICAÇÃO	99
3.7	TOMADAS DAS FOTOS COM VARIAÇÕES DE LENTES	100
3.8	PROCESSAMENTOS	101
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	102
4.1	O PROCESSAMENTO	102
4.1.1	A tomada de fotos	102
4.1.2	Alinhamento	103
4.1.3	Nuvem de pontos - Esparsa e densa	107
4.1.4	O nível de confiança	114
4.1.5	A malha <i>mesh</i>	123
4.1.6	A texturização do modelo	126
4.1.7	A ortorectificação do modelo	134
4.2	OS TESTES COM LENTES E CÂMARAS DISTINTAS	138
4.3	A ACURÁCIA DAS REPRESENTAÇÕES	146
5	CONCLUSÕES	151
	REFERÊNCIAS	153

1 INTRODUÇÃO

A boa comunicação é um dos fatores principais para o andamento de um trabalho coletivo, um objetivo comum. Esse paradigma é aplicado integralmente dentro do processo construtivo da arquitetura, desde o projeto até sua execução utilizando um repertório de técnicas verbais e não verbais que garantam que essa comunicação seja bem-sucedida, utilizando não só a linguagem falada, mas também a escrita e a do desenho arquitetônico como exemplos de comunicação no processo construtivo (MOREIRA, 2019).

No processo construtivo da arquitetura, desde a ideia da concepção até sua entrega, o principal método de comunicação entre os envolvidos é o desenho técnico. A partir dele, as ideias de uma obra, antes resguardadas apenas na mente do seu idealizador, conseguem se expandir entre todos os profissionais e sintonizá-los em um mesmo objetivo, (MONTENEGRO, 2007). O desenho visa concentrar todas as informações e as características de um empreendimento de forma visual. Dimensões, materiais, formas, cores, volumes e outros. Essas informações gráficas condensadas transpassam a barreira do tempo e permitem, por exemplo, que uma obra clássica possa ser entendida ou até replicada de posse dos desenhos existentes.

Em edificações já prontas, ou no jargão profissional, do ambiente construído, o desafio é parecido, porém, o desenho técnico passa a não ser apenas a representação de uma ideia, mas sim a representação de um objeto arquitetônico pronto: é necessário medir, analisar, interpretar, coletar dados, selecionar e atribuir cores, verificar o histórico, dimensões e patologias para, finalmente, concentrar em um documento técnico todas as informações ali existentes, sendo o desenho, a forma simplificada e abstrata que reúne todos esses elementos e passa a se comunicar graficamente e visualmente. Essa documentação visa manter a manutenção do patrimônio e a história viva.

Contudo, executar o levantamento do patrimônio histórico não é trivial. É comum o desaparecimento nas alvenarias e ausência de esquadro esperado (BRAGA, 2004) e conforme ensaios em Santos (2021). A técnica construtiva presente da pedra sobre pedra e a ausência de equipamentos de precisão como os atuais na época de sua execução, não garantem a verticalidade ou nível exato dos elementos.

O método convencional de medição em trena, consiste em medir linhas principais dos elementos marcantes, a partir de um ponto inicial e deve-se evitar mover a trena, para não se transplantar o possível erro, (SANTOS, 2021). Este é um método direto de medição (GROETELAARS, 2015) e que apresenta limitações quanto à acessibilidade ao objeto. Por exemplo, para representar detalhes complexos, é necessário a instalação de um andaime em frente à fachada, a fim de acessar os adornos a serem representados. Os métodos tradicionais de técnicas de medição direta são lentos, morosos e apresentam uma série de limitações evidentes (PIERACCINI et al, 2001). Em especial, para representar detalhes complicados do edifício que tradicionalmente são desenhados usando fotografias com base nas medições gerais tomadas, dessa forma, as medições não são muito corretas. Diferentemente dos métodos indiretos que apresentam soluções de medição e modelagem 3D como é o caso da fotogrametria, que possibilita medir objetos a partir de fotografias, sendo utilizada desde finais do século XIX, (ALBERTZ, 2001).

A fotogrametria de curta distância, como técnica para medir com precisão objetos a partir de fotografias capturadas com uma câmara a distâncias próximas, é a solução investigada neste estudo. As múltiplas imagens sobrepostas, tiradas de diferentes perspectivas, e quando realizadas as orientações das imagens reconstituídos o posicionamento das câmaras, permitem medir milhares de pontos usados para criar modelos tridimensionais do objeto fotografado. Os métodos fotogramétricos de curta distância têm sido aplicados com sucesso a projetos em arqueologia, arquitetura, engenharia automível e aeroespacial e reconstrução de acidentes (YAKAR et al. 2009), e obtenção dos parâmetros geométricos necessários na documentação da construção, (EL-DIN FAWZY, 2019).

A tendência segue com o uso da fotogrametria digital para a documentação do patrimônio arquitetônico, a exemplo, de nuvens de pontos oriundas da fotogrametria e do LiDAR, ou *laser scanner*. (SILVA, 2019). A fotogrametria digital é relacionada com o poder de processamento e têm avançado principalmente pela diminuição da litografia das CPUs¹. Isso influencia não só o processamento, com o aumento do poderio computacional, bem como, a qualidade e a resolução das câmaras digitais que também evoluem com seus processadores. Essa, não tão nova técnica, entra

¹ A lei de Moore, (MOORE, 1975), é uma observação feita pelo autor que previa que a potência dos processadores dobraria a cada dezoito meses para um mesmo custo, em razão da miniaturização dos componentes, a diminuição do calor gerado e, conseqüentemente, a quantidade de transistores acumulados por núcleo. Essa afirmação tem se provado condizente, não exata, até o ano do presente trabalho.

como um grande aliado para extração de modelos tridimensionais dos objetos alvos, conseqüentemente para a construção de nuvens de pontos com coordenadas X, Y, Z e, posteriormente para a vetorização manual, e finalmente, para o desenho técnico em posição nadir que melhor representa a fachada do objeto alvo.

A precisão dos pontos que compõem a nuvem de pontos, depende de uma combinação de vários fatores que serão abordados no estudo proposto. A potência computacional e o tempo destinado ao cálculo ajudam na melhoria da acurácia e da qualidade do resultado, bem como, em teoria, a quantidade e qualidade das fotos para processamento.

Contudo, para garantir os resultados confiáveis, todas as informações de procedimentos de tomadas de fotos e do processamento ainda estão pulverizadas em diversas bibliografias, e muitas das recomendações encontradas para as tomadas de fotos, apresentam parâmetros empíricos, quase sempre superestimados com exigências que demandam muito tempo de tomada de fotos e, conseqüentemente, no processamento computacional.

Em geral, as instruções para as tomadas de fotos em levantamentos fotogramétricos, como nos manuais de softwares fotogramétricos, se limitam a descrever procedimentos gerais para garantir uma qualidade mínima no processo das tomadas de fotos. Dentre as instruções: evitar imagens borradas, evitar lentes do tipo olho-de-peixe cuja distorção exija um esforço no cálculo e no processamento das imagens, utilizar a resolução máxima possível, adquirir o máximo de fotos possíveis da câmara e salvar com o tipo de arquivo não comprimível. Informações mais específicas como: ângulos para tomada das fotos, quantidade de fotos ótima ou mínima, configuração e especificações da lente ideal, sensibilidade ISO e valores de abertura e velocidade não são detalhadamente abordadas de forma parametrizada para garantir a qualidade, mesmo sendo uma variável importante para o processamento. Alsadik (2014) descreveu que para capturar imagens adequadas de um objeto para modelagem 3D não é uma tarefa fácil. Isso ocorre por vários motivos: cuidados com a sobreposição entre as imagens, o ângulo de visão da câmara, a distância do objeto e as localizações da câmara.

Todos os elementos variáveis para uma tomada de fotos otimizada, levaram a uma investigação e à testagem dos mesmos. Sendo, o objetivo principal deste estudo: a pesquisa e a definição de parâmetros da tomada de fotos que resultam em nuvem de pontos com maior precisão e acurácia, com aplicação direta para

dimensões arquitetônicas. Como resultados deste estudo, são apresentados os elementos e procedimentos metodológicos que levaram à extração de um melhor detalhamento do modelo tridimensional do objeto de estudo, conseguindo reproduzir modelos mais fiéis para análise arquitetônica.

Os testes com variações de diversos elementos significativos como, lentes, distâncias e formas de processamento para comparar os resultados do modelo tridimensional que servirão de base para aplicar ao modelo BIM. Já que permite a criação de modelos de edifícios virtuais, com fornecimento de imagens com detalhamentos geométricos, volumétricos e texturais.

1.1 JUSTIFICATIVA

Em muitas igrejas construídas no período colonial, assim como outros tipos de edificações daquele período, era comum que, com o passar do tempo, fossem verificados desaprumos nas alvenarias, por vezes acompanhados de fissuras, ou mesmo rachaduras. Em estudo amplo sobre o tema, Santos (1951) indica que tais patologias eram decorrentes de falhas na concepção, ou mesmo execução, das estruturas dos telhados, os quais causavam empuxos que desaprumavam as alvenarias para o exterior da edificação. Sobre a estrutura dos telhados, antigamente aquele elemento estrutural era muito simples e executado empiricamente, sem os necessários cálculos relativos às solicitações da cobertura. (CORONA e LEMOS, 2017).

Embora seja notória a riqueza de detalhes e de rigor compositivo na ornamentação interna e externa dessas igrejas, é preciso salientar que tais obras não eram resultado da criação de um único autor. Bazin (1983) elucida que, da concepção inicial à definição dos detalhes construtivos e ornamentais, a criação arquitetônica sofria diversas alterações, em escalas e naturezas distintas. As alvenarias ficavam a cargo dos pedreiros, enquanto os elementos decorativos em pedra eram concebidos e executados por cantéis. No interior, a ornamentação de madeira em relevo ficava sob a responsabilidade de mestres talhadores. Cada artífice dominava seu ofício, podendo ser coordenados por um arquiteto ou, segundo Bazin (1983), um mestre-de-risco. Conforme o autor, este termo era comumente empregado para se referir a qualquer pessoa que tivesse conhecimentos de arquitetura, adquiridos tanto pela prática como por vias acadêmicas. O termo risco,

segundo Bazin (1983), era utilizado para se referir ao desenho, ao projeto de uma edificação.

O mesmo autor ressalta que esta diversidade de profissionais incumbidos de tarefas distintas e, por vezes, simultâneas, em uma mesma obra, comumente ocasionava imperfeições, tanto estéticas como construtivas, como se vê nas escondidas dos espaços e em desaprumos decorrentes de imperfeições do reboco.

Contudo, havia casos em que tais imperfeições construtivas eram decorrentes de mão de obra não qualificada, que eram comuns no Brasil, principalmente durante o período colonial, como afirma Castro (2009). Para este autor, eram poucos os profissionais realmente habilidosos e capacitados, principalmente no que se refere à construção de alvenarias.

Escondidas e desaprumos são comumente presentes também em edificações de outros tipos e períodos, principalmente naquelas destinadas à moradia comum. Referindo-se às residências urbanas do Recife, por exemplo, Freyre (2006), comenta que eram construções espontâneas, construídas pelos próprios proprietários, conforme suas condições financeiras e eventuais habilidades construtivas adquiridas empiricamente.

A preservação do patrimônio edificado utiliza de uma combinação de materiais da época com tecnologias de levantamento arquitetônico e execução de forma mais contemporâneas, como o uso de fotografias e desenhos vetoriais para sua confecção. As construções brasileiras em sua colonização começaram no século XVI e, apenas a partir do século XX, o concreto foi aperfeiçoado e popularizado (KAEFER, 1998), resultando no trabalho misto, utilizando de técnicas modernas de detalhamento e clássicas para sua execução, com o uso de argamassa de cal e areia. No exemplo da Figura 1, cedidas pela Domo Arquitetura e Patrimônio, mostra a técnica da estucaria utilizada em um restauro na Avenida Rui Barbosa, 375, em Recife.

Figura 1 - (a) Desenho do molde (b) Molde para produção (c) Arco executado



Fonte: Cedidas por Domo Arquitetura e Patrimônio

No Brasil, o uso da “fotogrametria analógica” para levantamentos arquitetônicos começou a evoluir para mais precisão a partir da década de 1980 (FERREIRA, 1987), (MENDONÇA, 1989). Um ganho importante em precisão veio com a utilização de métodos topográficos na obtenção de pontos de controle (MEDINA et al., 1991) e a fotogrametria começa a baratear pela transição, entre a fotogrametria analógica com a estereorestituição e a fotogrametria analítica com monorestituição semiautomática (MITISHITA, 1997), (MEDINA; GARNÉS e MEDINA, 2000). Esses primeiros testes de viabilidade foram evidenciados e discutidos por Medina (2002).

Na era da fotogrametria analítica e digital, um dos limitantes do uso da fotogrametria terrestre quanto ao seu uso nos levantamentos arquitetônicos era a capacidade de processamento dos computadores, cuja dificuldade nas soluções dos ajustamentos para a realização das orientações das imagens (interior e exterior), muitas vezes inviabilizavam o uso do método. A manipulação de matrizes envolvidas na solução dos sistemas de equações do ajustamento quando realizado as medições fotogramétricas nas diversas imagens fotográficas era uma grande preocupação da época e foi foco de estudo pormenorizado, tanto na busca de minimização de erros como nos métodos de solução em si. Alguns trabalhos que destacam na linha do ajustamento das observações fotogramétricas, as buscas por métodos e soluções mais estáveis, dentre eles, citam-se, por exemplo: Lugnani (1975), Modro (1981), Dalmolin (1976), Garnés et al. (1997), Silva e Silva (2015).

Na pesquisa de Yakar et al. (2009), conclui-se que o método fotogramétrico é mais eficiente que os métodos convencionais de 100 a 130 vezes, 2 a 5 vezes graficamente, e também precisão de 10 vezes mais que os métodos tradicionais.

Todas as deformações nos objetos em investigação, podem não estar completamente representadas em projetos usando o método tradicional. Já no método fotogramétrico, é possível medir seções onde desejar e adquirir o modelo 3D dessas seções. Outra vantagem citada pelos autores, é a segurança da medição na impossibilidade de acessar o edifício devido a escoamentos, degradação, deformações e instabilidades. O risco vital é evitado, o método fotogramétrico é um método sem contato, conforme Figura 2

Figura 2 - O levantamento com contato executado em altura



Fonte: Yakar *et al.* (2009).

A técnica fotogramétrica, envolve a tomada de fotos, a determinação de pontos de controle e coordenadas. Se os pontos de controle forem medidos corretamente no campo, o levantamento de campo será feito apenas uma vez. Isso significa uma redução no trabalho de campo, economia de tempo e dinheiro. As informações e modelagem 3D são considerados dados importantes para arquitetos e para projetos de reconstrução e restauração de superfícies complexas.

Ao aprimorar as técnicas digitais, a fotogrametria digital tornou-se um método mais eficiente no campo da arquitetura. Atualmente, se utiliza e integra vários sensores e tecnologias (fotogrametria, varredura a laser, levantamento topográfico, etc.). Para explorar a potencialidade e vantagens intrínsecas de cada técnicas, (REMONDINO *et al.* 2013), cita alguns aspectos de análise, entre ele, derivar diferentes níveis geométricos de detalhe da cena sob investigação, em seguida, obter levantamentos de geometrias mais precisas e completas para modelagem, interpretação, representação e fatores de conservação digital. A modelagem 3D

baseada em integração de dados multi-escala e multi-sensores fornece melhores resultados 3D em termos de aparência e de detalhes geométricos.

Com o melhoramento da tecnologia computacional em termos de velocidade de processamentos e de algoritmos, o uso da fotogrametria associada com a topografia nos levantamentos de pontos de controle começou a viabilizar o uso das técnicas fotogramétricas terrestres para usuários que não possuíam uma infraestrutura computacional formada por workstation.

Outros fatores importantes e que limitavam o uso efetivo da fotogrametria arquitetural, alvos de pesquisas, foram a compreensão da acurácia posicional que dependem, por exemplo, da quantidade e distribuição de pontos de controle e a determinação dos parâmetros de calibração de câmaras. Primeiramente em câmaras métricas e posteriormente em câmaras não métricas e digitais do tipo CCD (Charged Coupled Device) e CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) image sensors) onde a posição do pixel é levada em conta em vez de ser medida no restituidor. Vários trabalhos nesse sentido foram elaborados, dentre eles, cita-se, por exemplo: Andrade (1977), Olivas (1980), Andrade e Olivas (1981), Galo (1993), Galo et al. (2008), entre outros. Entre os fatores que serão levados em consideração na pesquisa para análise da acurácia estão os parâmetros de calibração das câmaras a serem utilizadas.

Muito embora a tecnologia da fotogrametria terrestre estivesse avançando no Brasil na área das Ciências Geodésicas, pelos diversos elementos contextualizados anteriormente, não atraía à comunidade dos arquitetos e engenheiros civis que trabalhavam diretamente com as edificações, com os projetos arquitetônicos e com os trabalhos em sítios históricos e, ainda hoje, essa tecnologia é pouco conhecida no meio, porém com um imenso potencial de aplicação. Sabe-se da carência nas grades curriculares para abordagem desse tipo de tecnologia e com a profundidade que se deve ter, ficando a mercê de aplicação quase automatizada dos softwares dos dias atuais.

A diminuição dos custos dos softwares e alguns serviços de processamentos automáticos de fotogrametria, principalmente de fotos adquiridas pelos drones, sendo no meio técnico conhecido como aeronaves remotamente pilotadas, começaram a garantir trabalhos com qualidade relativa, carecendo, pois, de cuidados nos procedimentos fotogramétricos e uma análise mais detalhada para se chegar a uma acurácia absoluta. Nesse sentido chama-se a atenção para o

aprofundamento de conhecimentos dos levantamentos em sistemas topocêntricos, que no Brasil começaram na fotogrametria (LUGNANI, 1987), (ANDRADE, 1990), passando para aplicações também em topográfica por meio das normas da ABNT, a NBR 13133 (ABNT, 1994) e a NBR 14166 (ABNT, 1998), com associação a definição do Sistema Topográfico Local (GARNÉS, 1998), (GARNÉS et al., 2005), DAL'FORNO et al. (2010), até a popularização em georreferenciamento de imóveis rurais no conjunto de publicações que vieram com a 3ª Edição das normas do INCRA (INCRA, 2013). O Sistema Topográfico Local (STL) e o Sistema Geodésico Local (SGL), associados ao Sistema Geodésico Brasileiro (atual SIRGAS2000, época 2000,4), são os sistemas que serão usados na pesquisa.

O uso dos sistemas referenciais e o posicionamento de pontos de controle tridimensionais georreferenciados ao SGB na fotogrametria terrestre, os sítios históricos e as edificações, não só ficam representados em sua verdadeira grandeza e posição geográfica, como também cada detalhe construtivo pode ter uma visualização 3D em coordenadas absolutas. No mesmo sentido das nomenclaturas usadas para os levantamentos topográficos como o Modelo Digital de Terreno (MDT) ou o Modelo Digital de Elevação (MDE) que representam particularidades de Modelos Digitais de Superfície (MDS). Quando o foco é uma edificação, por analogia está sendo designado como Modelo Digital de Construção (MDC), trata-se de uma etapa prévia de um modelo BIM (Building Information Modeling), com as informações e separações parametrizadas dos objetos ali inseridos.

Mesmo nos dias de hoje, com os processadores computacionais velozes e programas especialistas nessa modalidade de fotogrametria, o tempo computacional é limitante na produção e análise dos dados fotogramétricos.

Uma temática investigada na elaboração de um modelo digital arquitetônico, é a obtenção da escala correta. A primeira hipótese é o uso de apenas uma determinada feição linear para uma medição precisa e acurada. Sendo a escala definida por meio da distância entre dois pontos conhecidos ou apenas da utilização da distância entre eles, sem necessariamente conhecer as coordenadas de seus pontos. Essa técnica denomina-se "*scale bar*", designação em inglês dada pelos softwares para o uso deste tipo de aferição de medida usando a feição linear.

Pode-se usar qualquer elemento físico com uma distância conhecida para a determinação da barra de escala, uma medição entre dois pontos ou, o mais comum, uma barra física com marcas. Para garantir a escala do modelo é

necessário apenas uma barra, para uma verificação da escala é utilizada duas barras, e três barras para garantir um controle estatístico de medidas, sendo recomendável o uso de quatro barras para a segurança contra incidentes ao fotografar, especialmente em externas que uma pode se deslocar por vento, chute ou deslocamento por algum elemento externo. (CHI, 2021).

Quanto mais medidas de feições lineares (*scale bar*) forem inseridas no momento do processamento para serem injuncionadas ao ajustamento do algoritmo usado pelo programa, mais confiabilidade se terá na escala do modelo. Muitas vezes é satisfatório analisar apenas esse tipo de informação.

Todavia, se pontos de controle forem inseridos, não só a escala é ajustada, mas também a posição do modelo em relação ao referencial adotado. Nesse sentido, pretendeu-se analisar a acurácia relativa e absoluta do MDC testando essas duas técnicas de injuncionar informações no ajustamento das fotos.

Na composição de um ortomosaico e do MDC, a quantidade de fotos, a distância das fotos, o espaço objeto, o tipo da lente, a iluminação, a quantidade de sombra, o tipo de sombreamento no momento da exposição, e todos esses fatores podem melhorar ou piorar a qualidade do produto final. Nesse sentido foram investigadas as influências desses elementos durante o desenvolvimento da pesquisa.

Para verificar a diferença em velocidade de processamento, na acurácia posicional e na qualidade dos resultados foi realizada a comparação de dois softwares conhecidos: o Agisoft Metashape e o Autodesk Recap Pro.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Testar elementos de aquisição de imagens, como tipo de lentes, tipo de controle posicional e posições de tomadas de fotos, sendo analisados as suas influências no processamento e no controle de qualidade do modelo tridimensional das representações arquitetônicas direcionadas à aplicação BIM.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar as variações dos resultados dos modelos com modificação dos tipos de lentes e câmaras. (DSLR / Mirrorless e celulares);
- b) Avaliar a performance computacional e o custo computacional quando variar as técnicas de tomada de fotos;
- c) Avaliar as acurácias dos métodos usando pontos de controle e barra de escala no processamento das imagens;
- d) Gerar e avaliar o comportamento e a qualidade de malhas 3D (mesh) para um modelo BIM compatível com as variações de profundidades dos elementos da fachada.

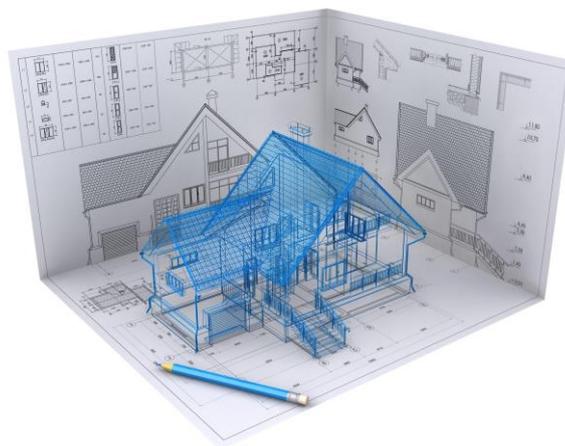
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A abordagem de revisão bibliográfica para essa pesquisa, inicia com a forma tradicional das técnicas de comunicação entre os profissionais para a análise da arquitetura e construção. Em seguida, contextualiza os elementos da Fotogrametria que possam garantir a qualidade mensurável de detalhes como: fissura, quebras, ondulações, saliências e demais detalhes das obras a saber.

2.1 O DESENHO TÉCNICO ARQUITETÔNICO

Segundo Pires (2015), na representação de objetos construídos, na concepção arquitetônica ou quaisquer modificações que sejam executadas nestes, a geometria descritiva e o desenho técnico são as ferramentas de primeira importância. A utilização desses instrumentos é bem variada, com destaque no registro histórico de sítios históricos e sua utilização no processo de aprovação de projetos ainda não edificadas. Para Tamashiro (2003), o desenho técnico é uma linguagem entre os envolvidos, projetistas e executores, que consiste num conjunto de desenhos bidimensionais representando um volume tridimensional. Esse conceito pode ser facilmente traduzido pela imagem conceitual, conforme exibido na Figura 3:

Figura 3 - Conceito ilustrado de representação arquitetônica.

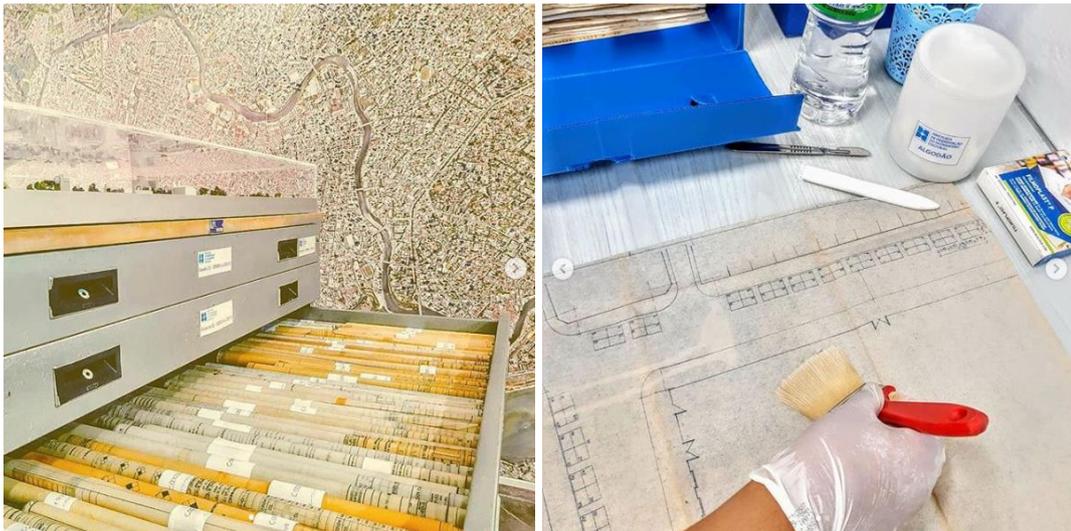


Fonte: Tretyakova (2019).

A forma de representar pelo desenho técnico arquitetônico é ainda a principal técnica utilizada pelas instituições de aprovação e controle, cita-se por exemplo no município de Recife, que para aprovar projetos a construir, se faz necessário anexar

o desenho nas regionais da Diretoria Executiva de Controle Urbano do Recife - DIRCON. Para projetos que envolvam o patrimônio histórico, a aprovação é feita pela Diretoria de Preservação do Patrimônio Cultural - DPPC, para projetos que envolvam risco e restauro estrutural e civil, o controle é na Coordenadoria de Defesa Civil do Recife - CODECIR, para projetos relacionados a taxas de Impostos Patrimonial e Territorial Urbano - IPTU, o controle é realizado pela Secretaria da Fazenda de Pernambuco - SEFAZ, dentre outros. São inúmeros órgãos que utilizam do desenho técnico para controle urbano e sua gestão. A Figura 4 representa os elementos do acervo da DPPC, sendo que na Figura 4(a) é mostrada a forma de armazenamento na mapoteca da DPPC e na Figura 4(b) o processo de conservação do acervo documental: Um desenho técnico.

Figura 4 - Arquivos e desenho técnico do acervo da DPPC



Fonte: Página pessoal do DPPC Recife

www.instagram.com/p/B6JT4WHnrca/?igshid=1dzbh7vd3dmg

(a) Arquivos da mapoteca

(b) Processo de conservação

2.2 A REPRESENTAÇÃO CONTA A HISTÓRIA DO MONUMENTO

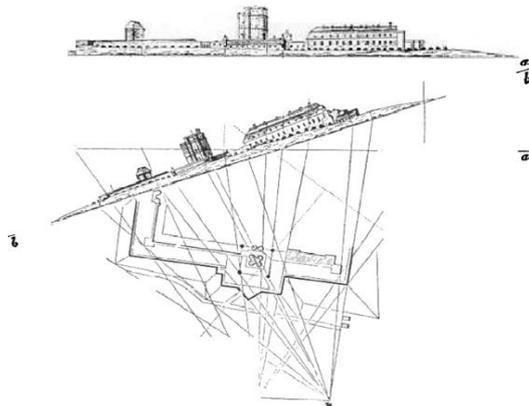
Nos séculos passados, a arquitetura só era pensada para as construções consideradas importantes dentro de uma sociedade: construções religiosas ou públicas de maior porte financeiro possuíam significado suficiente para se obter uma necessidade de se “fazer arquitetura”, pela própria importância dada na história clássica e na existência da segregação do patrimônio público, religioso e o seu entorno vernacular.

No Panorama da Arquitetura Ocidental, de 1943, começa o raciocínio que toda construção, toda manipulação pelo homem deve ser considerada e tratada como tal. Segundo Roth (2017), os elementos clássicos começam a aparecer em paradas de ônibus, abrigos para bicicletas e outros elementos considerados como “simples”.

Para fazer o planejamento em um ambiente rural ou urbano, é necessário conhecer suas características em diferentes níveis. Portanto, antes do processo de projeto arquitetônico ou do planejamento urbano, é preciso um olhar minucioso da estrutura da cidade atual e as características dos edifícios, principalmente em situações de cidades antigas ou áreas com edifícios singulares, locais onde é necessário equilibrar a tradição com a nova arquitetura. Nesse contexto, é fundamental ter uma documentação gráfica precisa e ferramentas para gerenciá-la, a fim de facilitar o processo de planejamento de uma nova paisagem em harmonia com o meio ambiente. Assim, desde as antigas civilizações os mapas e a representação do território estiveram presentes. (NÚÑEZ ANDRÉS e BUIILL POZUELE, 2009).

A invenção da fotografia é datada em 1826, mas não foi obra de um só autor, e sim um acúmulo de avanços técnicos. Em 1860 tem a realização de sua utilização histórica de Laussedat para levantamentos cartográficos e arquitetônicos (Figura 5). Uma das primeiras aplicações da imagem foram os catálogos de monumentos e seus arredores. Meydenbauer continua sendo o autor mais representativo deles. Graças a ele e ao seu trabalho, muitos monumentos puderam ser reconstruídos após as Guerras Mundiais. Atualmente, as tecnologias existentes possibilitam a obtenção de geometria e informações para catálogos proficientes. (NÚÑEZ ANDRÉS; BUIILL POZUELE, 2009).

Figura 5 - Castelo Vincennes em Paris, levantamento



Fonte: Laussedat (1899 *apud* BONNEVAL, 1972).

Segundo o mesmo autor, a aquisição de dados para representar qualquer elemento está em constante evolução à medida que incorpora novas ferramentas e necessidades. No texto a seguir, são citadas diferentes técnicas de levantamento e geração de informações para aplicação a modelagem 3D, com ênfase na fotogrametria.

2.3 O LEVANTAMENTO DE EDIFICAÇÕES

O levantamento ou medições realizadas de edificações foi por muito tempo, executado de forma quase artística, com a impossibilidade de verificação e com a ausência do registro da metodologia e do procedimento de tomada dos dados. Os primeiros desenhos de elementos significativos da arquitetura e da arqueologia foram esboços feitos à mão cuja intenção era mostrar a proporção entre as diferentes partes do objeto, às vezes usando ferramentas como fitas, grades, prumos, níveis e até perfilômetros para grandes escalas. Mais tarde, novas ferramentas, como clinômetros, mesas planas, bússolas e todos os tipos de estadiômetros e gôniômetros foram incorporados. Alguns exemplos podem ser encontrados em Arias et al. (2006) vantagens e desvantagens de diferentes métodos de levantamento de acordo com vários parâmetros de aplicabilidade. Em Groetelaars (2015), é reafirmado que as técnicas antigas para o cadastro do patrimônio utilizavam-se dessas mesmas ferramentas de levantamento. Os resultados das fachadas eram representados em escala e projeções ortogonais

Geralmente os desenhos são esboços, exceto os documentos métricos que são obtidos por levantamentos topográficos e fotogramétricos. (NÚÑEZ ANDRÉS e BUILL POZUELE, 2009).

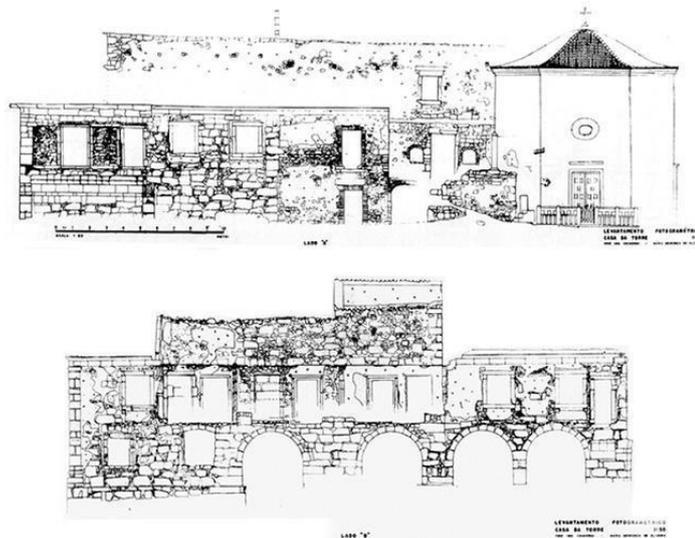
A grande dificuldade da representação nas técnicas de levantamento consiste na generalização dos detalhes, como as curvas e as imperfeições da técnica construtiva da época. Com foco principal na forma, os métodos de levantamento arquitetônico sempre se mostraram dependentes da capacidade artística do desenhista responsável. As linhas traçadas como uma malha, capturando a realidade de uma forma expandida para seus detalhes serem representados de forma artística.

Na prática, boas referências iniciais da malha e bom senso de proporção, conseguia-se manter um nível aceitável de representação do patrimônio construído.

Os detalhes, mesmo que com representações levemente deslocadas de sua posição correta, tinham êxito para a identificação do tipo da peça. Segundo Meg et al. (2005) essas técnicas não podem reproduzir o grau de detalhe e precisão exigidos pelos pesquisadores e conservadores atuais. De fato, eles são inerentemente subjetivos e limitantes, pois representam objetos 3D em suportes 2D (LERMA, 2010).

No levantamento 2D e manual, a precisão e acurácia são baixas, porém a fidelidade na interpretação arquitetônica é mantida cumprindo seu objetivo interpretativo do patrimônio. A Figura 6 apresenta um exemplo de um resultado do levantamento 2D de fachadas.

Figura 6 - Levantamento da fachada das ruínas Casa da Torre



Fonte: Oliveira (1979).

A partir da década de 1990, o uso das tecnologias aplicadas com o objetivo de obter dados de objetos construídos, se ampliaram e facilitaram a obtenção de medições diretas por meio de estações totais, GNSS, trenas eletrônicas, estações com varredura a laser. A fotogrametria terrestre, foi também potencializada com as câmaras digitais e a visão computacional incorporada aos softwares de processamento de imagens. A partir disso, sistemas totalmente automatizados vêm sendo desenvolvidos e explorados, permitindo medições fotogramétricas de alta precisão à curta distância, ampliando a diversidade de aplicações (JIANG, 2008).

O acoplamento das câmaras não métricas auxiliadas por aeronaves remotamente pilotadas também fizeram parte dessa ampliação metodológica de obtenção de objetos construídos. Dessa forma acabou por ser natural o surgimento

de comparativos dos levantamentos diretos e indiretos, outrora executados anteriormente, com os novos, baseados em processos digitais. Não só para a aplicação e aprendizado da nova prática, como também, a conferência do desenho antes registrado.

No exemplo, ilustrado na Figura 7, Oliveira (2019), compara o desenho existente no cadastro, efetuado por medição direta, com o resultado do desenho por fotogrametria terrestre. É possível perceber as distorções de desenho horizontais e verticais quando confrontados.

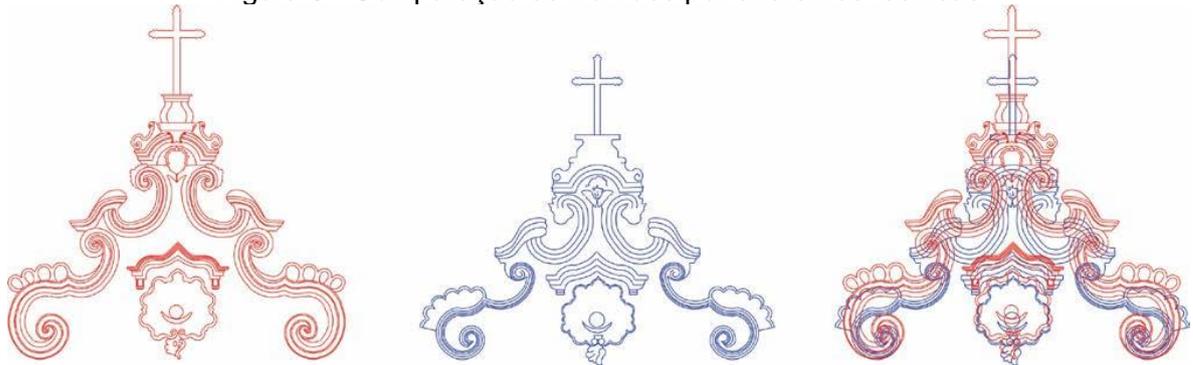
Figura 7 - Representações arquitetônicas com dados obtidos por medições diretas e fotogrametria terrestre



Fonte: (a) IPAC-BA (1999); (b) Tolentino; Groetelaars (2017); (c) Oliveira (2019)
 (6a) desenho realizado por medição direta; (6b) gerada através do software PhotoModeler;
 (6c) gerada através do software PhotoScan)

Não só a nível macro é possível perceber as discrepâncias. Os detalhes também possuem desajustes ao serem confrontados. Os frontões da igreja em questão, também possuem discrepâncias consideráveis, conforme Figura 8.

Figura 8 - Comparação de frontões por diferentes técnicas



Fonte: (a) e (c) Oliveira (2019); (b) IPAC-BA (1999)

(a) gerada através do software PhotoScan (em vermelho); (b) desenho realizado por medição direta (em azul); (c) sobreposição das vetorizações

2.4 FOTOGRAMETRIA APLICADA AO MCD

O uso de Laser Scanner no levantamento para aquisição de dados tridimensional, se destacou rapidamente pela combinação de fatores: a elevada quantidade de pontos que se mostra eficaz na representação e extração dos dados nas mínimas formas e atinge a precisão para um alto nível de detalhamento. Em LERMA, (2010), destaca como uma técnica que proporciona uma alta resolução das formas geométricas, conforme ilustra a Figura 9.

Figura 9 - Escaneamento da nuvem de pontos para modelagem no Revit



Fonte: Garagnani; Luciani; Mingucci (2012)

Tal técnica consiste na documentação digital de pontos que representam a edificação e sua representatividade em relação ao objeto depende de sua densidade. Essa representação é chamada de nuvem de pontos. Com a nuvem de

pontos é possível extrair uma série de dados. A mais utilizada é a elevação frontal em projeção ortogonal, em arquitetura denomina-se de fachada. E, de posse, é possível determinar dimensões, proporções e datas dos objetos estudados AMORIM (2010), Figura 10.

Figura 10 – Elevação frontal em projeção ortogonal



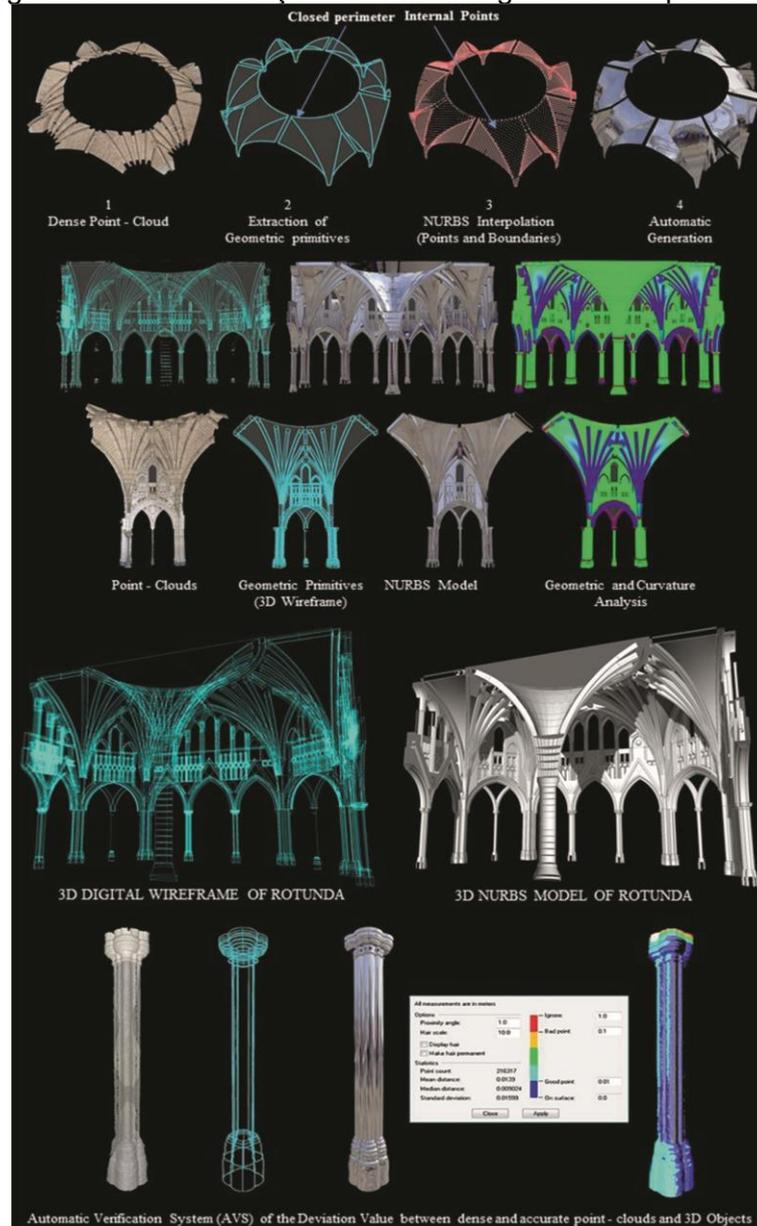
Fonte: Amorim (2010).

A representação externa de uma edificação é, classicamente, uma elevação frontal, com plano de representação paralelo à fachada. Essa representação gera um conjunto de desenhos bidimensionais que representam o todo. Com o avanço das tecnologias computacionais, pode-se modelar a edificação em três dimensões dentro de um computador e agregar mais informação nesse modelo para diversos fins. De compatibilização à análise estrutural. Essa construção faz parte do processo BIM - Building Information Modeling - ou Modelagem de Informação da Construção, e utiliza da interoperabilidade entre vários softwares. Utilizando tal processo é possível converter as informações do levantamento não só em uma elevação frontal, um desenho, mas uma extração de todo o modelo tridimensional carregado de informações como especificações, quantitativos, dimensões, materiais, datas, gestão, logística, dentre outros. Basicamente o processo consiste em uma interpretação das formas e a reconstrução em volumes geométricos primitivos, conforme Figura 11. Nela, é ilustrada a evolução de uma reconstrução tridimensional de modelos geométricos.

Huang (1998); Lerma et al (2010), descrevem a fotogrametria terrestre como sistemas relativamente baratos e altamente portáteis, e que podem ser facilmente calibradas para produzir resultados precisos antes da missão ou após o projeto por meio de auto calibração dos sensores no trabalho. Além do aspecto métrico

importante, as imagens mantêm todas as informações necessárias para obter modelos 3D totalmente texturizados. Por um lado, as câmaras podem ser manipuladas diretamente do solo para pesquisas terrestres; por outro, elas podem ser controladas com tecnologia sem fio em dispositivos aéreos como os veículos aéreos não tripulados (VANT) ou drones, pipas ou balões de controle remoto.

Figura 11 – Reconstrução em volumes geométricos primitivos.



Fonte: Banfi (2018)

2.5 CONCEITOS DA FOTOGRAMETRIA

A fotogrametria é uma ciência que envolve tecnologia para obter informações confiáveis a partir de registro, interpretação e medidas de imagens. (ANDRADE, 1998).

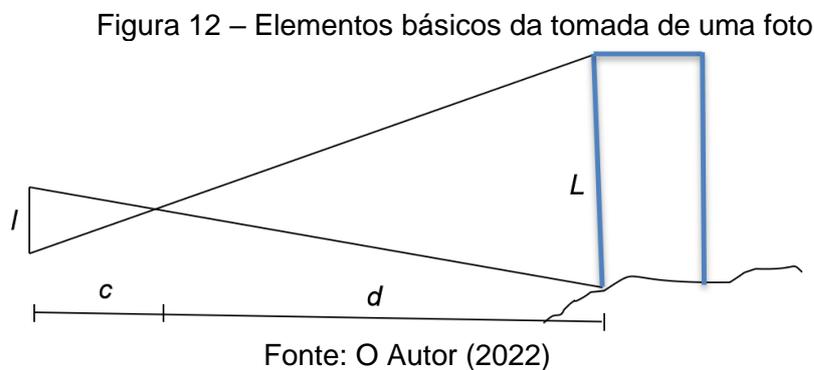
Os elementos básicos que envolvem a tomada de uma foto são a distância focal (c) da câmara utilizada, a distância (d) até o objeto a ser fotografado e a escala (E) que se pretende ter desse objeto da foto. A escala por sua vez é definida pela relação entre o objeto representado e o objeto físico real, Equação (01) (ESPARTEL, 1987):

$$E = \frac{l}{L} \quad (01)$$

Sendo:

l : o comprimento do objeto representado;

L : o comprimento do objeto físico.



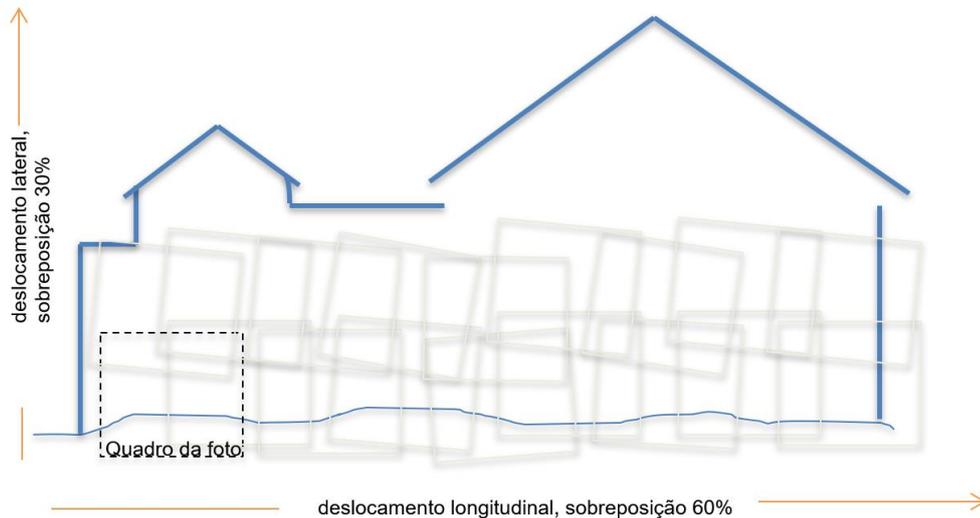
Usando a equação (02) e com o auxílio da Figura 12, tira-se por semelhança de triângulo a seguinte relação:

$$E = \frac{l}{L} = \frac{c}{d} \quad (02)$$

Para se ter a visão tridimensional de objetos, assim como o olho humano que enxerga o mesmo objeto a partir de dois pontos de vistas diferentes, deve-se obedecer ao mesmo princípio em fotogrametria. Assim, nas fotos devem ocorrer áreas de sobreposição, a sobreposição longitudinal no sentido que a câmara se move numa determinada faixa de imagens, e a sobreposição lateral, ortogonal a

anterior, e com um certo deslocamento da faixa de tomadas de fotos seguinte, conforme Figura 13.

Figura 13 – Sobreposição longitudinal e transversal das fotos para visão estereoscópica



Fonte: O Autor (2022)

Na fotogrametria, a visão estereoscópica é um dos pontos principais e é recomendada uma sobreposição entre uma imagem e outra de 60%. No entanto, há casos em que esta técnica é considerada insuficiente, como a de um objeto complexo, onde é necessário a tomada fotográfica de diversos ângulos e direções (GROETELAARS; AMORIM (2004)).

2.5.1 Fotogrametria Terrestre ou de Curta Distância

Chamando de B a distância deslocada entre a tomada de duas fotos, L o tamanho do quadro da foto no sentido longitudinal do objeto fotografado, então o deslocamento linear mantendo-se a escala da foto para que ocorra as sobreposições desejáveis, deve ser:

$$B_L = (1 - S_L/100) L, \quad (03)$$

sendo:

B_L : deslocamento longitudinal da tomada da foto;

S_L : percentual da sobreposição longitudinal (em geral 60% (AMORIM, 2004))

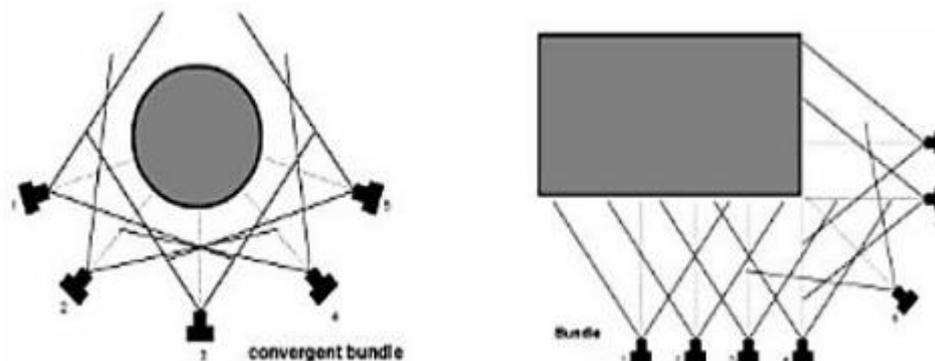
Se a foto for de formato retangular, a mesma analogia pode ser feita com o respectivo percentual e, com isso, o planejamento do número de fotos necessárias para o registro bem sucedido de um monumento.

As melhorias nas tecnologias de sensores, apoiadas por desenvolvimentos em algoritmos de processamento de imagem, renovaram o interesse no mapeamento 3D baseado em imagens. Nesse sentido, o uso do método de fotogrametria de curta distância para capturar informações 3D de imagens 2D como forma, posição e tamanho tem sido mencionada em várias aplicações, como a modelagem de fachadas, edifícios, monumentos, entre outros. (FRITSCH et al, 2013), (FRITSCH et al, 2015), (ALIDOOST e AREFI, 2015), (KARABÖRK et al., 2015), MONTERO et al., 2017).

Também se destacam os softwares dedicados à geração e manipulação de nuvem de pontos utilizando as imagens 2D para reconstruir monumentos históricos ou outros marcos, em (MONTERO et al., 2017), a metodologia combinada das técnicas fotogramétricas para mapear sítios históricos e a documentar as edificações individualmente pôde gerar uma base de dados documentada complexa, atualizada, visual e mensurável. Se constatou a viabilidade da metodologia para a gestão e controle permanentes do patrimônio edificado (FIRZAL, 2021).

Em particular, no processo de aquisição de imagem, a fotogrametria arquitetônica também pode combinar diferentes câmaras ou lentes, tomando pelo menos dois raios de ângulo de intersecção satisfatório das imagens, (FIRZAL, 2021) (Figura 14) com vários dispositivos, como as câmaras profissionais DSLR (Digital Single Lens Reflex) e o Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) (HOON, 2019).

Figura 14 - Formas distintas de captação de imagem



Fonte: Firzal (2021)

Outro parâmetro fundamental é a imagem distorção que é causada por: posição do operador na tomada das fotos, uso de lentes adequadas, quantidade de luz, o arranjo de dispositivo auxiliares, como o tripé, por exemplo (Figura 15). Portanto, na forma prática, o número de imagens capturadas é significativo não apenas para reduzir a distorção (KARRAS et al, 2001), mas também para contribuir gerando a densidade da nuvem de pontos (Sužiedelytė-Visockienė et al, 2019)

Figura 15 - Fotos com DSLR e a sobreposição necessária



Fonte: Firzal (2021)

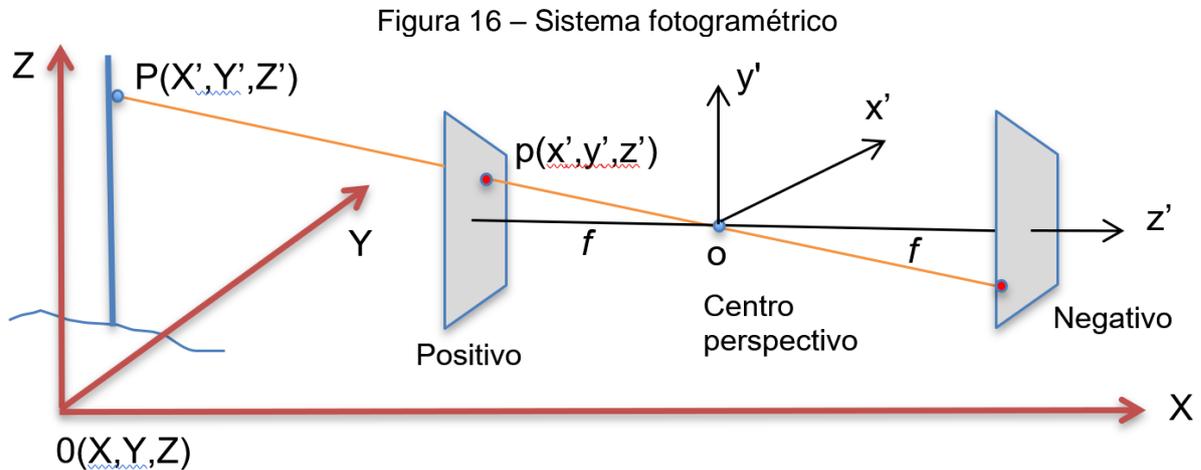
2.5.2 Principais modelos matemáticos utilizados em fotogrametria

A fotogrametria analítica, a partir do final do século passado, vem ganhando cada vez mais espaço nas aplicações por conta da evolução tecnológica. Tal evolução não cessou, com isso, a modelagem matemática e os algoritmos com estratégias de solução, acabam por ser os pontos fortes, implícitos na fotogrametria dos dias atuais.

2.5.2.1 Equação da Colinearidade

O principal modelo matemático envolvido na fotogrametria se dá pelo equacionamento que permite alinhar pontos do objeto físico, localizado no espaço-objeto, a pontos homólogos na imagem registrada (fotografia), localizado no espaço-imagem, condição de colinearidade entre os três pontos em referenciais distintos (espaço-imagem e espaço-objeto).

Assim, os feixes de luz que saem do espaço objeto se interceptam em um ponto (centro perspectivo) e atingem o espaço imagem (negativo ou base do sensor) onde são registrados.



Fonte: O Autor (2022)

Estabelecendo no centro perspectivo (o) da tomada da foto, a origem de um sistema cartesiano tridimensional (o, x', y', z'), com eixo x' positivo na direção do deslocamento da câmara, o eixo z' positivo para a direção do negativo e perpendicular ao mesmo e o eixo y' definido para formar um sistema dextrógiro (Figura 16). Então, representando no mesmo sistema o ponto $p(x', y', z')$ no positivo do espaço-imagem e o ponto $P(X', Y', Z')$ no espaço-objeto se pode estabelecer a relação matemática do caminho do feixe de luz que passa pelos três pontos por meio da equação da reta no espaço:

$$\frac{x'}{X'} = \frac{y'}{Y'} = \frac{z'}{Z'} \quad (04)$$

O sistema o, x', y', z' conforme definido é conhecido por sistema fotogramétrico. A distância (f) do negativo da câmara até o centro perspectivo (o) é a distância focal da câmara. O plano paralelo ao plano do negativo do lado oposto ao centro perspectivo é o plano positivo, cujo sentido das coordenadas (x' e y') coincide com o sentido das coordenadas X' e Y' no espaço objeto.

A transformação das coordenadas do ponto objeto $P(X', Y', Z')$ no sistema fotogramétrico, para um sistema local de coordenadas $0(X, Y, Z)$, por exemplo, o Sistema Geodésico Local (SGL), pode ser feito mediante transformação de corpo rígido, também conhecida por transformação ortogonal.

A transformação ortogonal tridimensional na forma matricial pode ser representada como:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{M}^T \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (05)$$

Sendo:

M: uma matriz ortogonal que representa o produto de outras três matrizes de rotação: no eixo x' de um ângulo ω , $\mathbf{R}_x(\omega)$, no eixo y' de um ângulo φ , $\mathbf{R}_y(\varphi)$, e no eixo z' de um ângulo κ , $\mathbf{R}_z(\kappa)$.

X_0, Y_0 e Z_0 : vetor com as coordenadas X_0, Y_0 e Z_0 representa o vetor de translação entre as origens dos dois sistemas, no caso, as coordenadas do centro perspectivo no sistema local.

T: o sobrescrito (T) está representando matriz transposta de **M**.

Se ao invés de usar um sistema local, optar-se por usar um sistema de projeção cartográfica, por exemplo, o UTM (Sistema Universal Transversa de Mercator), existe o problema de distorção devida à diferença da superfície de projeção com a superfície de referência e mais o fator de elevação do terreno. Nesse caso a escala dos sistemas não serão iguais e o adequado é que se use a transformação de similaridade, Equação (06), obtida quando se acrescenta um fator de escala (λ) na Equação (5).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{M}^T \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (06)$$

A transformação de similaridade inversa é obtida por:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{M} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (07)$$

Fazendo-se $\lambda=1$ tem-se a transformação ortogonal inversa.

Levando-se a equação (07) em (04), explicitando para x' e y' e considerando z' igual a distância focal negativa (-c), tem-se a equação projetiva da fotogrametria (ANDRADE, 1998), conhecida por equação da colinearidade (LUGNANI, 1987):

$$\left. \begin{aligned} x &= -c \frac{m_{11}(X-X_0)+m_{12}(Y-Y_0)+m_{13}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0)+m_{32}(Y-Y_0)+m_{33}(Z-Z_0)} + x_0 \\ y &= -c \frac{m_{21}(Y-X_0)+m_{22}(Y-Y_0)+m_{23}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0)+m_{32}(Y-Y_0)+m_{33}(Z-Z_0)} + y_0 \end{aligned} \right\} \quad (08)$$

sendo: $x=x'+x_0$ e $y=y'+y_0$ as coordenadas medidas na foto; e x_0 e y_0 valores que levam do ponto fiducial (pontos de referência da foto para determinar a projeção do centro perspectivo aparente) ao ponto principal (projeção do centro perspectivo de fato). Tais coordenadas são obtidas por meio da calibração da câmara.

Os elementos m_{ij} da equação da colinearidade para a transformação de corpo rígido, são (ANDRADE, 1998):

$$\left. \begin{aligned} m_{11} &= \cos \varphi \cos \kappa \\ m_{12} &= \cos \omega \operatorname{sen} \kappa + \operatorname{sen} \omega \operatorname{sen} \varphi \cos \kappa \\ m_{13} &= \operatorname{sen} \omega \operatorname{sen} \kappa - \cos \omega \operatorname{sen} \varphi \cos \kappa \\ m_{21} &= -\cos \varphi \operatorname{sen} \kappa \\ m_{22} &= \cos \omega \cos \kappa - \operatorname{sen} \omega \operatorname{sen} \varphi \operatorname{sen} \kappa \\ m_{23} &= \operatorname{sen} \omega \cos \kappa + \cos \omega \operatorname{sen} \varphi \operatorname{sen} \kappa \\ m_{31} &= \operatorname{sen} \varphi \\ m_{32} &= -\operatorname{sen} \omega \cos \varphi \\ m_{33} &= -\cos \omega \operatorname{sen} \varphi \end{aligned} \right\} \quad (09)$$

A equação da colinearidade envolvendo duas fotos e fazendo a correção ao pontos principal (x_0, y_0) de cada uma delas e acrescentando a distância focal da câmara, haveriam 6 (seis) incógnitas da orientação externa para cada uma delas, portanto um total de 12 incógnitas para o par estereoscópico.

$$\left. \begin{aligned} \text{Foto 1} &: X_{01}, Y_{01}, Z_{01}, \kappa_1, \varphi_1, \omega_1 \\ \text{Foto 2} &: X_{02}, Y_{02}, Z_{02}, \kappa_2, \varphi_2, \omega_2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Se forem fixados para a primeira foto os parâmetros $X_{01}, Y_{01}, Z_{01}, \kappa_1, \varphi_1, \omega_1$ e para a segunda foto o parâmetro X_{02} tem-se a conhecida orientação absoluta (sete parâmetros conhecidos). Os demais parâmetros $Y_{02}, Z_{02}, \kappa_2, \varphi_2, \omega_2$ corresponde a orientação relativa (cinco parâmetros). Esse procedimento de fixar parâmetros

iniciais é aplicado na ausência de pontos de controle suficientes para se ter a orientação externa.

Os parâmetros que compõem as equações anteriores são as coordenadas da imagem, as coordenadas do ponto principal, a distância principal (focal), os componentes da matriz de rotação, as coordenadas espaciais, as coordenadas do centro de projeção e as distorções, sendo as radiais simétricas e as descentradas, (KORTABERRIA, 2017).

Por conta de efeitos sistemáticos que podem ser corrigidos e/ou parametrizados, a equação de observação da colinearidade (08) pode ser reescrita como:

$$\left. \begin{aligned} x &= -c \frac{m_{11}(X-X_0)+m_{12}(Y-Y_0)+m_{13}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0)+m_{32}(Y-Y_0)+m_{33}(Z-Z_0)} + x_0 + \delta r_x + \delta d_x + \delta_x + \varepsilon_x \\ y &= -c \frac{m_{21}(X-X_0)+m_{22}(Y-Y_0)+m_{23}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0)+m_{32}(Y-Y_0)+m_{33}(Z-Z_0)} + y_0 + \delta r_y + \delta d_y + \delta_y + \varepsilon_y \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Sendo:

$\delta r_x, \delta r_y$: as componentes da distorção radial simétrica;

$\delta d_x, \delta d_y$: as componentes da distorção descentrada;

δ_x, δ_y : componentes de correção da não ortogonalidade dos eixos e da variação de escala;

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$ componentes do erro aleatório.

Os valores $\delta r_x, \delta d_x, \delta r_y, \delta d_y$ são obtidos pela calibração da câmara quando são determinados os coeficientes de calibração dados pelas equações (12) e (13) (ANDRADE, 1998), (LUGNANI, 1987).

A distorção radial simétrica pode ser encarada como sendo a parcela não desejável da refração sofrida por um raio de luz ao atravessar uma lente ou sistema de lentes (ANDRADE et al, 1981).

Para a distorção radial simétrica:

$$\left. \begin{aligned} \delta r_x &= x(k_0 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \\ \delta r_y &= y(k_0 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \\ r &= \sqrt{x^2 + y^2} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

A distorção descentrada responsável por deslocamentos na imagem é oriunda da impossibilidade do fabricante alinhar perfeitamente os eixos ópticos das lentes que compõem uma objetiva. Esta distorção é composta pelas distorções tangencial

e radial assimétrica, detalhes em (Andrade e Olivas, 1981). O modelo matemático utilizado para a correção desta distorção foi desenvolvido por Duane C. Brown em 1966.

Para a distorção descentrada:

$$\left. \begin{aligned} \delta d_x &= [p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2 x y](1 + p_3 r^2 + p_4 r^4) \\ \delta d_y &= [p_2(r^2 + 2y^2) + 2p_1 x y](1 + p_3 r^2 + p_4 r^4) \\ r &= \sqrt{x^2 + y^2} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Sendo:

δd_x : o efeito da distorção descentrada na componente x.

δd_y : o efeito da distorção descentrada na componente y.

p_1 e p_2 : os parâmetros da distorção descentrada.

Assumindo como referência o eixo x do sistema fotogramétrico, as correções do fator de escala e da não ortogonalidade dos eixos x e y, podem ser representadas por:

$$\left. \begin{aligned} \delta_x &= Ay \\ \delta_y &= By \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Para simplificar a notação os numeradores e denominador da equação (11) serão representados por:

$$N_1 = m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0) \quad (15)$$

$$N_2 = m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0) \quad (16)$$

$$D = m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0) \quad (17)$$

Considerando que o lado esquerdo da equação da colinearidade são observações (x e y) e que as coordenadas do lado direito (X,Y,Z) também sejam (pontos de controle com precisão associada), e estando associadas aos parâmetros, Moniwa (1977) apud Lugnani (1987) propõe o modelo implícito $F(x_a, L_a)$ para ser solucionado no ajustamento das fotos para se ter a auto calibração.

$$F_1\{[x - x_0 - x(k_0 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) - [p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2 x y] \\ (1 + p_3 r^2 + p_4 r^4) - Ay]D + c N_1\} = 0 \quad (18)$$

$$F_2\{[y - y_0 - y(k_0 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) - [p_2(r^2 + 2y^2) + 2p_1 x y] (1 + p_3r^2 + p_4r^4) - By]D + c N_2\} = 0 \quad (19)$$

2.5.2.2 Structure from Motion (SfM)

Na área da Visão Computacional foi observado que a percepção tridimensional de um objeto em movimento pode ser obtida sem a necessidade de que todas as feições de tal objeto sejam projetadas, isto é, a estrutura de um objeto pode ser percebida projetando-se ortogonalmente apenas alguns pontos pertencentes a tal. Um dos experimentos que demonstram este efeito é conhecido como *The two cylinders demonstration* (ULLMAN, 1979). Neste contexto, Ullman (1979) apresentou importantes contribuições nesta área, formalizando Teorema do Structure from Motion: dadas três cenas diferentes representando as projeções ortogonais de 4 pontos não coplanares que possuem uma rígida configuração, a estrutura e o movimento compatíveis com as três cenas são determinados de forma unívoca.

A evolução tecnológica impulsionou técnica SfM, o advento dos algoritmos de detecção e descrição de pontos de interesse em imagens digitais, a popularização e modernização dos sistemas computacionais, bem como o advento da Fotogrametria assistida por computador trouxeram novas abordagens. Algoritmos de detecção pontos de interesse, como o SIFT (LOWE, 2004) e suas variantes, bem como os algoritmos de combinação de pontos homólogos contribuíram fortemente para a automatização dos processos de reconstrução tridimensional, tornando o processo rápido e com mínima interferência do usuário.

A adoção da equação de colinearidade (vista no subitem 4.4.1.1. Equação (08) segundo (GRUEN; HUANG, 2013) ocasiona perda de desempenho computacional, enquanto a adoção do modelo que relaciona o espaço imagem e o espaço objeto de forma linear requer a adoção de uma maior quantidade de pontos de apoio e bem distribuídos no espaço, porém proporciona ganho de desempenho computacional.

O algoritmo SfM, compreende um conjunto de algoritmos oriundos de diferentes áreas do conhecimento, o que torna o SfM um conjunto de técnicas empregadas para obter como produto final a representação tridimensional de um objeto (AMORIM, 2020). O fluxo de trabalho para a reconstrução tridimensional SfM citado pela autora engloba as seguintes etapas:

- a) encontrar os pontos-chaves e estabelecer correspondência entre eles;
- b) eliminar falsas correspondências;
- c) determinar a orientação relativa do primeiro par e em seguida, para cada imagem subsequente: encontrar pontos homólogos entre a imagem e a anterior, estimar a matriz de projeção, atualizar a estrutura e inicializar novos pontos;
- d) aplicar o Bundle Adjustment;
- e) aplicar a transformação de similaridade.

A detecção de pontos-chave e determinação das correspondências é realizada geralmente pelo algoritmo SIFT (Scale Invariant Features Transform) que emprega quatro etapas: detecção em diferentes espaços-escala; localização de pontos-chave, determinação da orientação e descrição. Todos os algoritmos envolvidos são vistos em (AMORIM, 2020) e de forma simplificada, é representada pela equação (20):

$$\lambda x = K[R|T]X \quad (20)$$

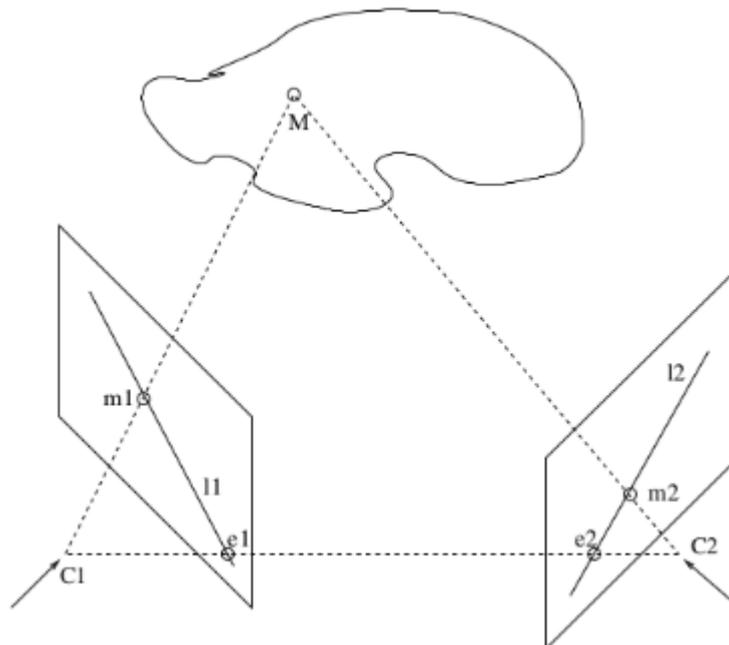
Onde, λ é um fator de escala, P é a matriz projetiva que coincide com a matriz de calibração, supondo que a distância focal seja igual a 1, K é a matriz que representa os parâmetros intrínsecos, ou parâmetros de orientação interior de uma câmara, R é a matriz de rotação e T o vetor de translação, bem como de suas coordenadas tridimensionais no espaço objeto X . A notação $[R|T]$ refere-se a uma matriz aumentada composta pela matriz de rotação e um vetor de translação. Estes, relacionam o sistema de coordenadas fotogramétricas com o sistema referencial tridimensional adotado. Isto seria equivalente a multiplicar a matriz projetiva P por uma matriz de transformação.

Após determinar os pontos de correspondências e eliminar as falsas correspondências, o próximo passo é a orientação relativa das imagens, que diferentemente da aplicação das equações de colinearidade ou ainda as equações de coplanaridade é realizado através de equações lineares utilizando modelos deduzidos da Geometria Epipolar utilizados na visão computacional (Moons et al, 2008) e (AMORIM, 2020), explicam que a determinação da Matriz Fundamental F é indispensável para a determinação de correspondências entre as imagens, uma vez

que limita a região de busca por pontos homólogos à linha epipolar. A Figura 17 mostra a representação da geometria epipolar entre um par de imagens, sendo:

- C1 e C2: A posição dos centros perspectivos da câmara no momento de cada tomada.
- O plano formado por C1-C2-M: É denominado plano epipolar, fundamental para definir a relação entre o espaço objeto e as imagens e, desta forma, realizar a determinação tridimensional de um ponto.
- m1 e m2: As projeções de um ponto M, no espaço objeto, em cada uma das imagens.
- e1 e e2: São os epípolos, sendo definidos como os pontos onde a linha da base do plano epipolar intercepta os planos das imagens. Todas as linhas epipolares em uma imagem se encontram no epípolo.
- As linhas e1-m1 e e2-m2: São denominadas linhas epipolares, definidas pela interseção do plano epipolar com as duas imagens.

Figura 17 - Representação da geometria epipolar entre um par de imagens



Fonte: Moons *et al.* (2008)

A matriz fundamental usando SfM, determina tanto a estrutura tridimensional quanto os parâmetros intrínsecos que podem ser desconhecidos. Dado um conjunto de pares de pontos (homólogos) entre duas imagens, a matriz fundamental é

determinada, pelos seguintes elementos: f um vetor que contém os elementos da matriz fundamental:

$$f = [F_{11} F_{12} F_{13} F_{21} F_{22} F_{23} F_{31} F_{32} F_{33}]^T \quad (21)$$

E sejam os pontos $m_1 = [x_1 y_1 1]^T$ e $m_2 = [x_2 y_2 1]^T$, Figura 17, o primeiro par de pontos homólogos de um conjunto contendo 8 pares. Desta forma, para cada par de correspondências, tem-se uma expressão que assume a seguinte equação:

$$[x_2 x_1 \quad x_2 y_1 \quad x_2 \quad y_2 x_1 \quad y_2 y_1 \quad y_2 \quad x_1 \quad y_1 \quad 1] f = 0 \quad (22)$$

Assim, para um conjunto de 8 pares, tem-se um sistema de equações lineares homogêneas com 8 equações e 9 incógnitas. O sistema de equações lineares para n pares de pontos homólogos é apresentado na Equação 22;

$$\begin{vmatrix} x_2 x_1 & x_2 y_1 & x_2 & y_2 x_1 & y_2 y_1 & y_2 & x_1 & y_1 & 1 \\ & & & \vdots & & & & & \\ x_{2n} x_{1n} & x_{2n} y_{1n} & x_{2n} & y_{2n} x_{1n} & y_{2n} y_{1n} & y_{2n} & x_{1n} & y_{1n} & 1 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} F_{11} \\ \vdots \\ F_{33} \end{vmatrix} = 0 \quad (23)$$

Este problema pode ser resolvido utilizando um procedimento denominado Decomposição em Valores Singulares, também conhecido como SVD (Singular Value Decomposition). O sistema de equações é escrito em forma matricial, então a Equação (22) é reescrita como:

$$Cf=0 \quad (24)$$

Sendo C uma abstração da matriz apresentada na Equação (22). Aplicando a SVD em C tem-se três matrizes USV^T e chega-se à solução, sendo U e V matrizes ortonormais, isto é, a multiplicação da sua transposta por ela mesma resulta em uma matriz identidade. A matriz S é a matriz dos valores singulares.

A decomposição SVD é de fundamental importância para a solução de sistemas de equações lineares. A decomposição SVD é de fundamental importância

para a solução de sistemas de equações lineares, onde a matriz A é representada por:

$$A = \sum \sigma_j u_j v_j^T \quad (25)$$

Sendo:

σ_j : são os valores singulares contidos na matriz S ;

u_j : são os elementos diagonais da matriz U ;

v_j^T : são os elementos diagonais da matriz V^T

A Equação (24) torna possível obter a melhor aproximação para a solução do sistema $Ax = b$. Desta forma, a decomposição SVD é largamente aplicada para a estimativa dos parâmetros envolvidos no problema do Structure from Motion e Método dos Mínimos Quadrados (MMQ).

Para a Inicialização dos Parâmetros intrínsecos e das Coordenadas Tridimensionais dos Pontos Homólogos, são primeiramente obtidos os primeiros valores para os parâmetros de orientação interior, bem como os valores para o conjunto de coordenadas 3D dos pontos homólogos no espaço objeto. Deve-se estabelecer valores iniciais para a matriz de projeção de cada uma das câmaras.

Tendo as matrizes projetivas para as duas câmaras inicializadas, torna-se possível empregar a interseção fotogramétrica no primeiro par, isto é, calcular as coordenadas 3D para os pares de pontos no primeiro par. A modelagem matemática desta etapa, está detalhada em (AMORIM, 2020).

Tendo a matriz projetiva da nova imagem deve-se atualizar a estrutura 3D adicionando as linhas das equações referentes aos pontos observados nas imagens anterior e atual. Este procedimento é repetido até que não haja mais imagens a serem adicionadas ao modelo.

A reconstrução tridimensional é um procedimento iterativo realizado entre pares de imagens (podem ser utilizadas outras abordagens, como um trio de imagens), desta forma, em cada etapa do procedimento erros sistemáticos são propagados e, portanto, devem ser minimizados (MOONS et al., 2008). Apesar dos algoritmos envolvidos no SfM serem desenvolvidos em pesquisas da Visão Computacional, o procedimento utilizado para ajuste global da estrutura 3D, bem

como otimização dos parâmetros de orientação da câmara é o Bundle Adjustment ou ajustamento de feixes, método bem conhecido da Fotogrametria.

Os autores continuam explicando que os pontos extraídos de forma automática nas imagens são considerados fixos, enquanto o conjunto de pontos 3D, os parâmetros de orientação interior e exterior devem ser otimizados de forma a minimizar o somatório dos erros. Este problema é solucionado por ajustamento por mínimos quadrados utilizando o método paramétrico (Gauss-Newton), no qual as observações são representadas como função dos parâmetros. O vetor das correções diferenciais é calculado e os parâmetros são modificados a cada iteração. O formulário do ajustamento é tratado de forma específica no item 4.4.6. Na etapa de processamento e uso do SfM, o vetor das correções diferenciais é calculado e os parâmetros são modificados a cada iteração.

$$\delta p = (A^T P A)^+ A^T P L \quad (26)$$

A Equação (25) mostra a solução para o cálculo do vetor de correção dos parâmetros, conforme mostrado por (GEMAEL et al., 2015), sendo δp o vetor das correções diferenciais, A a matriz jacobiana das derivadas parciais do modelo funcional em relação aos parâmetros, P é a matriz dos pesos e L é o vetor das diferenças entre valores calculados e observados. O vetor δp é calculado e seus valores são somados aos parâmetros até que um critério de parada seja atingido;

Para a estrutura tridimensional da cena é determinada segundo um sistema referencial projetivo. Para aplicações em Fotogrametria é essencial que a cena seja representada em um sistema cartesiano tridimensional ou em um sistema de projeção cartográfica que aproxima-se de um referencial cartesiano tridimensional. Desta forma, torna-se necessário o emprego de uma transformação geométrica para a determinação das coordenadas tridimensionais dos pontos no referencial apropriado para aplicações em engenharia e arquitetura. A Transformação de Similaridade, portanto, é a utilizada, sendo modelada segundo sete parâmetros: três parâmetros de rotação, três parâmetros de translação e um fator de escala, sendo:

$$X_{metrico} = \lambda * R * X_{proj} + T \quad (27)$$

Para a determinação destes parâmetros é necessário que pelo menos 3 pontos de apoio sejam conhecidos (dois pontos com X,Y e Z e um pelo menos com Z), sendo esta a condição mínima para a determinação. Sendo λ um fator de escala, R é uma matriz de rotação de dimensões 3x3, T é um vetor de translação, $X_{metrico}$ o vetor de coordenadas de um ponto de apoio e X_{proj} é o vetor de coordenadas de um ponto calculado via triangulação.

A solução é obtida por ajustamento por mínimos quadrados. O modelo funcional escreve as coordenadas dos pontos de apoio como observações em função dos parâmetros, logo tem-se:

$$X_{metrico} = f(\lambda, R, T) \quad (28)$$

Linearizando a função por expansão em séries de Taylor, desprezando os termos de ordem superior a 1, aplica-se o ajustamento pelo método paramétrico (Gauss-Newton), vistos em GARNÉS(2001) e GEMAEL et al., (2015), sendo a solução determinada iterativamente por:

$$\Delta P = (A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (29)$$

Em que ΔP é o vetor de correções diferenciais para cada um dos sete parâmetros. Tendo a solução para os parâmetros, aplica-se a transformação em todo o conjunto de pontos obtidos via triangulação, obtendo desta forma um novo conjunto de pontos representados em um referencial adequado.

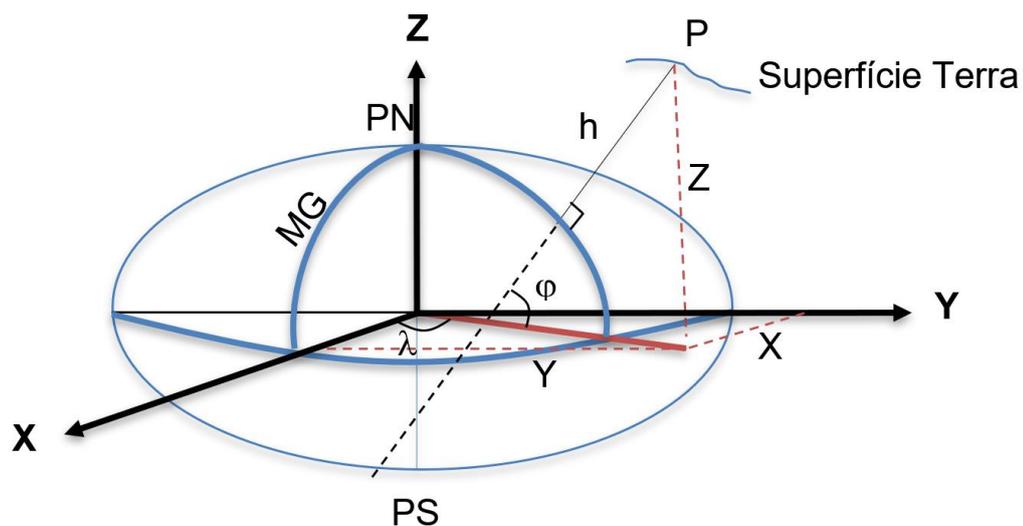
2.5.3 Referenciais geodésicos utilizados em fotogrametria

Quando se fala em pontos de controle para se ter o trabalho georreferenciado, alguns referenciais podem ser utilizados, destacam-se: o sistema de coordenadas natural da geodésia com a latitude, longitude e altitude, tendo os valores da latitude e longitude em graus decimais e da altitude em metros; os sistemas topocêntricos locais com o SGL (Sistema Geodésico Local) ou o STL (Sistema Topográfico Local); e finalmente os sistema de projeção cartográfica podendo ter como superfícies de projeção o plano o cone e o cilindro, e dentre estes o mais conhecido, o UTM (sistema de projeção Universal Transversa de Mercator).

As coordenadas geodésicas elipsoidais, segundo Gemael (1971) são definidas: Latitude geodésica (φ) – ângulo que a normal de um ponto forma com o plano do equador; Longitude geodésica (λ) – diedro formado pelo meridiano geodésico de Greenwich e o meridiano geodésico do ponto; Altitude geodésica (h) – distância contada desde o ponto até o elipsóide ao longo da normal.

Associado ao sistema de coordenadas elipsoidais usa-se um sistema de coordenadas cartesianas com origem no centro do elipsóide: orientação do eixo X para a interseção do meridiano de Greenwich com o plano do equador elipsoidal; eixo Z coincidindo com o eixo menor no elipsóide, orientado positivamente para o polo norte; eixo Y formando com os demais um sistema dextrógiro. A Figura 18 ilustra ambos os sistemas de coordenadas e as equações (19) e (20) apresentam as fórmulas de transformações entre elas.

Figura 18 – Sistemas de coordenadas geodésicas



Fonte: Gemael (1977)

Transformação de coordenadas geodésicas elipsoidais em cartesianas geocêntricas (IBGE, 1989):

$$\left. \begin{aligned} X &= (N + h)\cos\varphi\cos\lambda \\ Y &= (N + h)\cos\varphi\sin\lambda \\ Z &= [N(1 - e^2) + h]\sin\varphi \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

sendo:

$$e^2 = 2f - f^2 \quad (\text{primeira excentricidade ao quadrado})$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{(1 - e^2) \cdot \text{sen}^2 \varphi}} \quad (\text{raio de curvatura da seção primeiro vertical do ponto})$$

$$f = \frac{a - b}{a} \quad (\text{achatamento do elipsóide})$$

a, b, f : são o semieixo maior, o semieixo menor e o achatamento do elipsóide do sistema geodésico de referência, respectivamente.

O sistema geodésico brasileiro oficial, tornou-se o SIRGAS2000, época 2000,4 a partir de 25 de fevereiro de 2005, com os valores para o semieixo maior a= 6378137 m e para o achatamento f=1/298,257222101 (IBGE, 2005).

Transformação de coordenadas cartesianas geocêntricas em geodésicas elipsoidais (IBGE, 1989):

$$\begin{aligned} \varphi &= \arctan \left(\frac{Z + e^2 b \text{sen}^3 u}{\sqrt{X^2 + Y^2} - e^2 a \cos^3 u} \right) \\ \lambda &= \arctan \left(\frac{Y}{X} \right) \\ h &= \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos \varphi} - N \\ \text{sen } u &= \frac{\tan u}{\sqrt{1 + \tan^2 u}} ; \cos u = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 u}} ; \tan u = \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \frac{a}{b} \end{aligned} \quad (31)$$

Os sistemas topocêntricos que permitem o georreferenciamento de coordenadas locais (x,y,z), para coordenadas geodésicas elipsoidais (φ, λ, h), via cartesianas geocêntricas (X,Y,Z), pode ser obtido via uma transformação de corpo rígido no espaço por meio de uma matriz de rotação ($M=R_x.R_z$) e um vetor de translação (X_0), ou ainda por meio de transformação de base no espaço vetorial (GARNÉS, 1998).

O SGL (Sistema Geodésico Local), há muito utilizado pelos fotogrametristas fica definido segundo Lugnani (1987) (considerando o eixo x para o norte) ou concordando com Andrade (1981), Leick (1995), Andrade (1998) e Garnés (1998) com o eixo y para o norte da seguinte forma:

- **Origem 0(x,y)** : escolhida em algum ponto nas proximidades do trabalho (preferencialmente deveria ser no centro geométrico da área a ser levantada)
- **Eixo z**: coincide com a direção da normal geodésica;
- **Eixo y**: coincide com a direção do meridiano geodésico passante pelo ponto origem, sentido positivo para o norte;

pois a direção do eixo z passaria a ser oposto ao vetor da gravidade e o eixo y, coincide com o meridiano astronômico. Atualmente a NBR 13.133 (ABNT 2021) definiu a direção do eixo coincidindo com o meridiano geodésico da origem do sistema.

O sistema de projeção cartográfica mais conhecido no mundo é o UTM (Universal Transversa de Mercator), cuja definição pelo Agência de Mapeamento de Defesa Americana (DMA) é assim relatado (SOUZA e GARNÉS, 2012):

- a) $k_0 = 0,9996$: fator de escala no meridiano central;
- b) longitude origem no meridiano central;
- c) latitude origem o equador;
- d) unidade metro;
- e) falso norte: 0m para o hemisfério norte; 10.000.000 m para o hemisfério sul;
- f) falso leste: 500.000m no meridiano central;
- g) numeração dos fusos: iniciando com 1 entre os meridianos $180^\circ W$ e $174^\circ W$ e continuando para leste até o fuso 60 entre os meridianos $174^\circ E$ e $180^\circ E$;
- h) limites da latitude: $84^\circ N$ e $80^\circ S$;
- i) amplitude do fuso: 6° em longitude.

As fórmulas de transformação entre coordenadas geodésicas e UTM são encontradas com vastidão na literatura geodésica e cartográfica. Todavia pela praticidade e influência nas escolas brasileiras cita-se: Santos (1988) e Silveira (1990).

2.5.4 Tipos de pontos de controle e barras de escalas

No patrimônio cultural, que em vez de pontos de controle, conforme Cultural Heritage Imaging (2015), são utilizadas barras de escala calibradas “*scale bar*”. Para fotografar, colocam-se as barras de escala em torno, ou ao lado do objeto ou local, na tomada da série de imagens sobrepostas, a barra de escala, certamente irá ser medida em várias imagens permitindo obter informação suficiente para obtenção da escala do ortomosaico e da nuvem de pontos. Essa distância dada pela “barra de escala” entraria como injunção no ajustamento dos parâmetros da orientação exterior da câmara $X_o (X_0, Y_0, Z_0, \kappa, \phi, \omega)$, em relação a um sistema arbitrário (X, Y, Z) .

A utilização da barra é bem prática, e no levantamento é dispensável pontos de controle conhecidos, não é mandatório que a barra esteja perpendicular a uma outra barra e não é necessário que esteja perfeitamente paralela ao sensor. Esse artifício é muito utilizado em arqueologia, na captura de objetos pequenos. A Figura 20 ilustra a aplicação de barra de escalas para a reconstituição de um modelo 3D de escultura e pinturas.

Figura 20 - Uso da barra de escala ao lado de objetos culturais para reconstituição fotogramétrica



Fonte:

agisoft.com/pdf/tips_and_tricks/CHI_Calibrated_Scale_Bar_Placement_and_Processing.pdf

Para a aplicação, com iluminação controlada, o modelo gerado guarda os detalhes de sua forma, de nuvem de pontos a malha *mesh*, conforme Figura 21:

Figura 21 - Da foto ao modelo, o processo de digitalização tridimensional de um objeto



Fonte: <http://culturalheritageimaging.org/Technologies/Photogrammetry/>

Modelos de “barras de escala” são fornecidos pelos softwares para impressão, ou são vendidas por empresas. Todavia, poderiam ser fabricadas com material que possuam dois pontos identificáveis na imagem, rígido, com distância conhecida e que não dilate com o calor em trabalho de campo. A Figura 22 ilustra alguns tipos de “barras de escala”, fabricada em Alupanel, que consiste em uma impressão em alumínio com um núcleo de polietileno.

Figura 22 – Tipos de barras de escalas



Fonte:

agisoft.com/pdf/tips_and_tricks/CHI_Calibrated_Scale_Bar_Placement_and_Processing.pdf

Em topografia, para nivelamento geométrico ou levantamento taqueométrico, se empregam estadias de alumínio ou de madeira, popularmente conhecidas como miras falantes. Essas miras podem servir como *scale bar* nos levantamentos fotogramétricos quando essa técnica é aplicada. Geralmente são graduadas de centímetro em centímetro com estimativa de leitura ao milímetro (Figura 23(a)).

Figura 23 – Estadia e miras como “barra de escalas”



a) estadia de alumínio divisão centimétrica e 4m comprimento



b) mira horizontal de invar



c) mira de invar com código de barra

Fonte: Latop, Lamepe e Lageo do DECart/UFPE

Duas outras possibilidades de uso são as miras com liga de invar que garantem deformação mínima e alta acurácia em um determinado comprimento, por

exemplo, a mira horizontal de invar pertencente ao LAMEPE/DECART/UFPE possui dois metros de comprimento incerteza de 0,005mm garantida por certificado de calibração (BARBOSA et. al. ,2010), Figura 23b. A outra é uma mira de invar com escala de barra utilizada em nivelamento de altíssima precisão, garantindo erros de 0,3mm/km, usada, por exemplo, nos trabalhos de verificação de subsidência em Boa Viagem (LUNA et al., 2017), Figura 23(c).

O uso de uma trena de aço é também uma opção de “escala de barra” e essa metodologia foi empregada em Silva (1995) na determinação fotogramétrica do volume de um tanque cilíndrico, juntamente com pontos de apoio por interseção a vante definidas em Carneiro (1995).

Para algumas aplicações de fotogrametria a curta distância, pontos de controle podem ser gerados em papel milimetrado ou uma base com distâncias conhecidas e, no processamento, a insere-se as coordenadas do plano x,y desses pontos, arbitrando um dos pontos como início. A Figura 24 ilustra uma base de referência utilizada na fotogrametria de um fóssil.

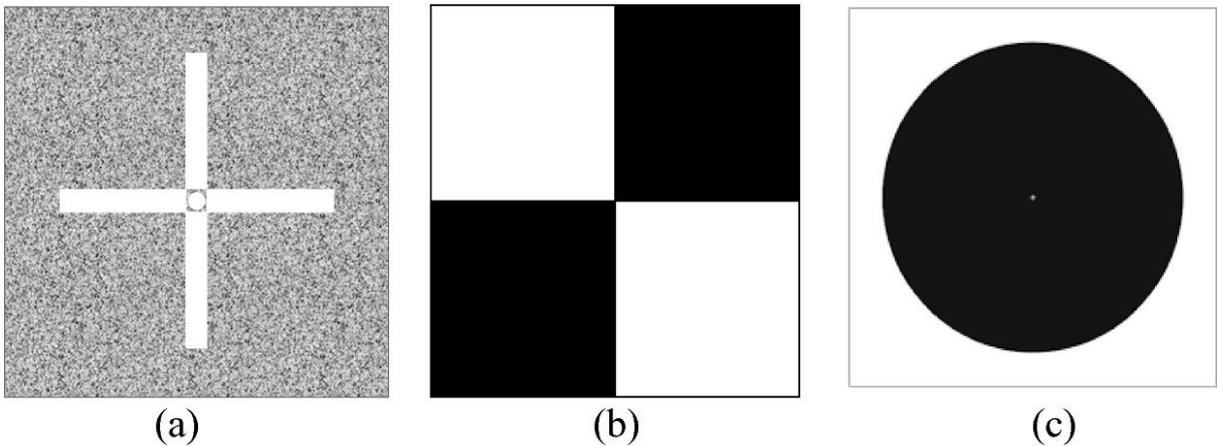
Figura 24 – Base com pontos de controle para fotogrametria a curta distância



Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=Uny9nTr22go>

Em aerofotogrametria os pontos de controle geralmente são pré-sinalizados e suas coordenadas determinadas antes da realização do voo. A visualização adequada dos pontos de controle na foto depende do tipo de alvo, da escala da foto bem como da altura do voo (JAIN, A.; MAHAJAN, M.; SARAF, R. 2019). Alguns modelos de alvos usados são ilustrados na Figura 25.

Figura 25 – Tipos de alvos usado em aerofotogrametria

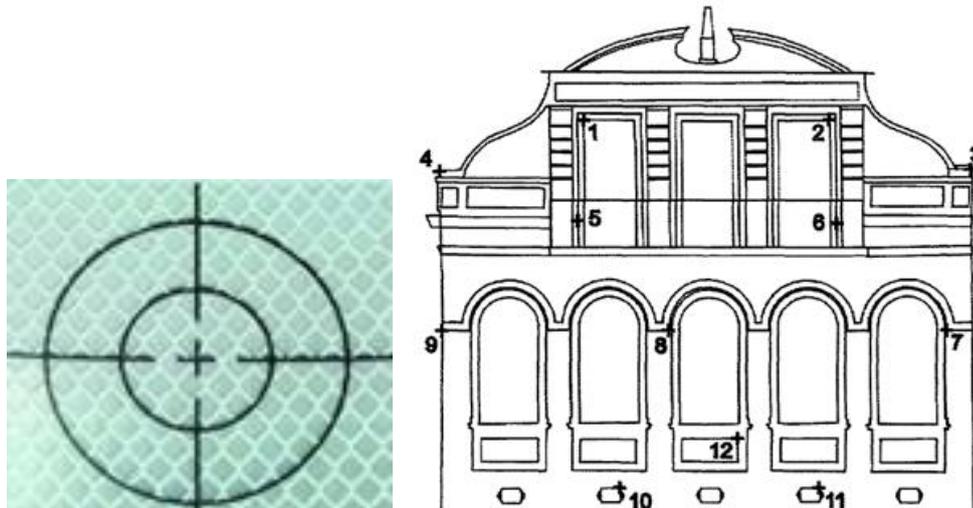


Fonte: Jain; Mahajan; SaraF (2019)

Em topografia, nos levantamentos arquitetônicos os alvos em geral são com fitas reflexivas ou pontos naturais na própria edificação, (MEDINA, 2002). A Figura 26(a) ilustra um modelo de alvo com fita reflexiva para estação total comercializado por empresas de topografia. A Figura 26(b) ilustra como podem ser escolhidos pontos naturais na própria edificação.

Figura 26 - Alvos com fitas reflexivas e pontos naturais das edificações para servirem de pontos de controle

(a) - Alvo com fita reflexiva para uso com estação total (b) - Alvo em pontos naturais



Fonte: Medina (2002)

2.5.5 Câmaras e lentes profissionais não fotogramétricas

As câmaras não métricas podem ser analógicas e digitais (Figura 25). Os parâmetros velocidade, abertura e ISO, análogo ao antigo ASA, nunca mudaram,

são a base para o controle da câmara e, mesmo com o tempo de evolução, a base matemática desses parâmetros continua a mesma. O que mudou foi a qualidade e tecnologia das lentes e sensores. O filme fotográfico, na câmara analógica, foi trocado pelo sensor digital. Ambos são protegidos por barreiras físicas que acionam num tempo pré-determinado e capturam a luz durante a exposição.

Na década de noventa, as câmaras digitais surgiram e variantes à opção analógica chegaram ao mercado. Todavia, os modelos foram sendo substituídos rapidamente, a primeira geração, que utilizava disquete ficaram obsoletas, as compactas, ou *point-and-shoot*, foram substituídas pelos celulares, pelo processo de miniaturização do sensor. Por outro lado, as câmaras profissionais, DSLR (Digital Single-Lens Reflex), pela diminuição do custo, antes restritas ao público profissional, foram ganhando adeptos de amadores entusiastas.

Figura 27 - Sensor analógico, à esquerda e digital, à direita.



Fonte:<http://câmaraneon.com/tenha-em-mente/diferenca-entre-câmaras-analogica-digital-o-que-e/>

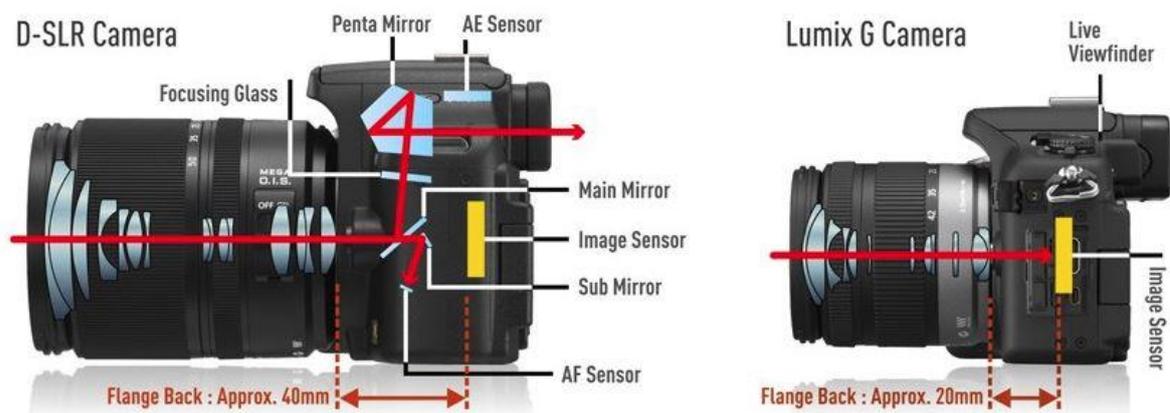
Há poucos anos uma nova categoria denominada *Mirrorless* começou a disputar espaço com as DSLR e vêm ganhando adeptos em maior quantidade. Por utilizar o mesmo sensor, não há diferença em termos de qualidade de imagem e serão tratadas nos experimentos como uma categoria única. As diferenças são técnicas, como o nome sugere, *mirrorless* (sem espelho), tem seu funcionamento interno, custo e dimensões distintas. Conforme quadro 1 e Figura 28.

Quadro 1 - Diferenças entre as DSLR e as Mirrorless

	DSLR	MIRRORLESS
Espelho	Possui espelho para rebatimento da imagem pro visor.	Não possui espelho, a imagem é projetada diretamente no sensor
Visor	Óptico. Mesmo com a câmara desligada é possível ver a imagem	LCD. Tela interna que projeta a imagem captada pelo sensor. Só funciona ligada.
Dimensões	São grandes, robustas e pesadas	60% do peso e dimensão de uma DSLR equivalente. São também robustas por utilizarem os mesmos materiais de fabricação.
Custo	100%	70% de uma DSLR equivalente. Por não ter o espelho pentamirror e o mecanismo de exposição, se torna mais barata para produzir
Encaixe	Proprietária, de acordo com a marca. Para as canon, atualmente se utiliza o tipo EF-S	Possui um encaixe menor, do tipo EF-M. e sua gama de lentes. Com um adaptador, possui acesso à toda a linha EF-S.

Fonte: O Autor (2022)

Figura 28 - As diferenças internas entre as câmaras do tipo DSLR e Mirrorless



Fonte: <https://www.onlinecâmaraed.com/mirrorless-câmaras/>

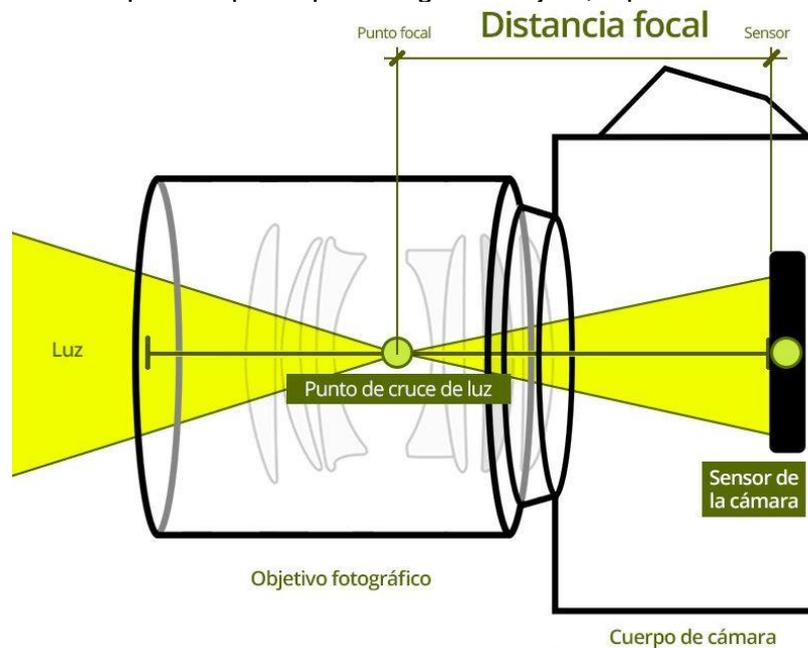
As câmaras profissionais, DSLR, possuem inúmeras vantagens sobre as compactas de lente fixa e de pequeno sensor, destaca-se:

- Sensor de maior tamanho e, conseqüentemente, qualidade de imagem;
- Maior taxa de pixels por imagem;

- Menor nível de ruído em imagens noturnas com alto ISO;
- Possibilidade de troca de lentes para diferentes cenários;
- Corpo mais resistente, aguenta intempéries;
- Controles manuais e rápido ajuste em campo.

As lentes intercambiáveis das DSLR agregam muita versatilidade ao equipamento, com elas, é possível obter vários tipos de distância focal que abrangem cenários com desafios distintos. A Figura 29, esquematiza a distância focal, onde se localiza o sensor da câmara e a objetiva com a distância focal regulável.

Figura 29 - Esquema óptico que triangula o objeto, o ponto focal e o sensor.



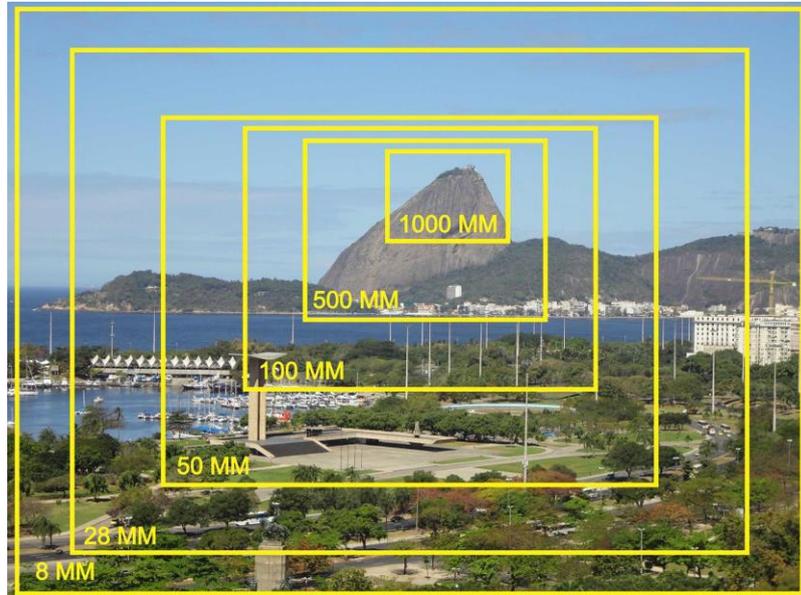
Fonte: <https://www.linofotografia.com/single-post/nomenclaturalentebasiconikon>

Lentes com distâncias focais baixas, de até 8mm, chamadas de olho-de-peixe e as grandes angulares, com distância focal até 20mm, têm como característica principal a possibilidade de captura de muita área com pouco afastamento do objeto, Figura 30.

As câmaras grandes angulares são adequadas para capturar grandes grupos de pessoas e ambientes no interior das edificações. Para tal, existe o custo da distorção barril, onde a imagem sofre aberração e, conseqüentemente, a perda de informação e proporção nas bordas das imagens conforme ilustra a Figura 30(c).

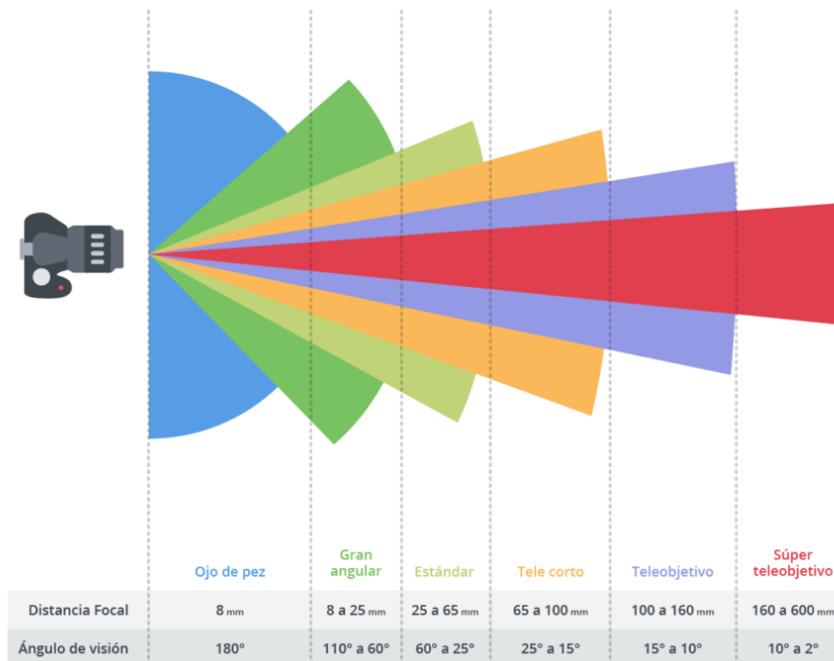
As lentes teleobjetivas, por sua vez, funcionam exatamente de forma oposta. Possuem baixa distorção, algumas do tipo almofada, Figura 32(b), e conseguem chegar até o detalhe do objeto com média distância, Figura 31.

Figura 30- Com o observador parado, o campo de visão de acordo com a distância focal



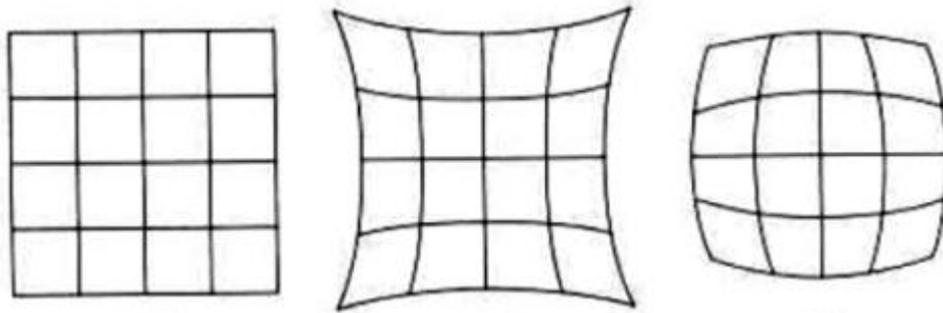
Fonte: <https://fotografiadicas.com.br/lentes-na-fotografia/>

Figura 31 - O campo de visão de cada lente conforme classificação.



Fonte: <https://www.blogdelfotografo.com/glosario-terminos-fotograficos/>

Figura 32 - Formas de distorção das lentes conforme distância focal



Fonte: <https://focusfoto.com.br/objetivas-tipos-de-distorcao/>
 a) Sem distorção b) Tipo Almofada c) Tipo barril

Essas distorções são visualmente percebidas em fotografias de arquitetura que a vertical das edificações é apresentada com as distorções citadas, causando o efeito normalmente indesejado. Na Figura 33(a), corrigida, permanece praticamente inexistente, na Figura 30b, a foto original com a distorção característica:

Figura 33 - Efeito prático da distorção barril



Fonte: http://www.camaraversuscamara.com.br/dic/dist_opt.htm
 a) Distorção corrigida b) Foto original com distorção barril

2.5.6 Métodos para determinação de pontos de controle georreferenciados

Para a orientação das câmaras e fotos quando estas não dispõem do posicionamento GNSS (Global Navigation Satellite System) associado a um sistema inercial de atitude (orientação da câmara no espaço), deve-se fazer a determinação dessa orientação usando pontos de controle. E mesmo que esses sistemas estejam presentes no instrumental da câmara, os mesmos devem ser refinados durante o ajustamento das fotos, para que se garanta a acurácia dos resultados.

As edificações, por terem uma estrutura na vertical, praticamente impossibilita a coleta de pontos de controle nas paredes usando o posicionamento por satélite. Nesse caso, deve-se utilizar os métodos tradicionais da topografia como poligonação, triangulação, trilateração e triangulateração. Todavia os métodos tradicionais da topografia para o georreferenciamento devem partir de pontos com coordenadas conhecidas amarradas ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) vigente à época do levantamento. Esse transporte de coordenadas muitas vezes é custoso por conta da infraestrutura geodésica existente, que pode estar a dezenas ou centenas de quilômetros de distância.

Para contornar o transporte de coordenadas por métodos clássicos, o mais viável seria a determinação de pontos de controle no terreno por GNSS nas proximidades da edificação que se pretende fotografar. Desta forma, os pontos de controle (no terreno e nas fachadas) georreferenciados seriam determinados por um processo misto entre o posicionamento por satélite e o posicionamento clássico.

2.5.6.1 Pontos de controle no terreno por GNSS

A sigla GNSS desde 1991 foi designada para englobar todos os sistemas de posicionamento por satélite, incluindo o americano (GPS), o russo (GLONASS), o chinês (COMPASS), o Europeu (GALILEO) e assim os demais que vierem a surgir na mesma modalidade (SEEBER, 2003).

O princípio do posicionamento por satélite é medir a distância do receptor ao satélite em um determinado instante, e para esse instante, conhecendo-se a posição do satélite, determina-se a posição do receptor. Isso pode ser feito usando duas opções: uma usando o sinal do código, fornecendo assim as chamadas pseudodistâncias; e outra, usando a fase da onda portadora, fornecendo assim distâncias mais precisas, porém com o inconveniente da ambiguidade a ser solucionada.

Para o georreferenciamento adequado dos monumentos arquitetônicos pelos métodos atuais, espera-se que tais pontos no terreno não tenham erros maiores que 1cm, ABNT NBR 13133 (2021) pois a propagação da incerteza de tais pontos, nos pontos da fachada poderiam prejudicar a precisão do processamento fotogramétrico.

Baseando-se em experiências brasileiras que se iniciaram com o sistema americano de posicionamento por satélite, exemplo, em Tierra Creolho (1993) com

métodos estático, pseudo cinemático e cinemático e partir daí, uma infinidade de trabalhos que relatam as precisões dos métodos GNSS, incluindo trabalhos no campus da Universidade Federal de Pernambuco (SILVA, 2012), nas ruas da cidade do Recife (SOUZA *et al.*, 2014) em áreas de risco com RTK NTRIP (BURITY, 2016), são recomendados para acurácia citada anteriormente o posicionamento relativo estático e o posicionamento relativo estático rápido.

Se no entanto, as coordenadas de apenas um ponto GNSS for usada para o georreferenciamento e as coordenadas de um outro ponto for usado para definir o azimute (orientação do levantamento topográfico) do alinhamento para os métodos tradicionais, então mais outros métodos de posicionamento por satélite poderiam atender (espera-se erros inferiores a 3 centímetros se bem elaborados): o PPP - Posicionamento por Ponto Preciso (IBGE, 2021 Manual PPP) e os RTK (*Real Time Kinematics*) na modalidade em par de receptores ou em rede de receptores (Krueger *et al.* 2021 artigo RBC).

Se o ponto do terreno para início dos trabalhos topográficos for definido pela interseção a ré (método clássico), então poderiam ser admitidos os pontos de controle de vante pelos quatro métodos de posicionamento por satélites citados anteriormente.

Em relação a descrição desses métodos descritos, além das referências citadas neste tópico, mais três referências clássicas são recomendadas: Hofmann-Wellenhof *et al.* (1994), Seeber(2003) e Monico (2008).

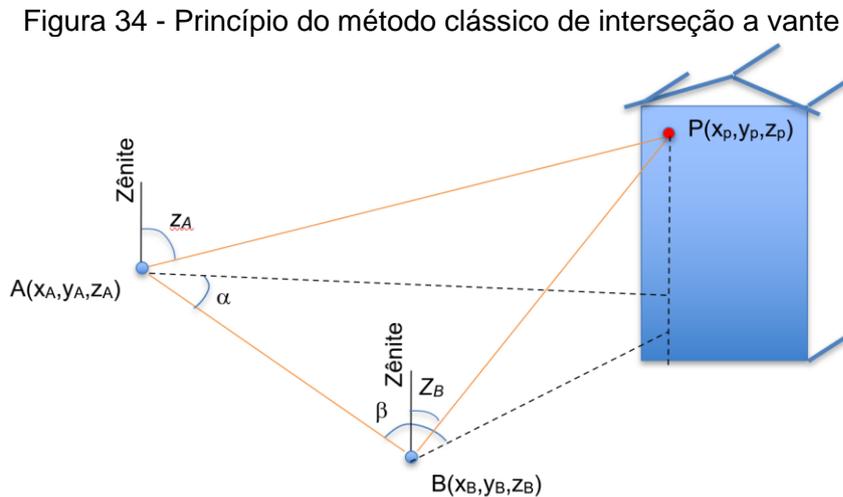
2.5.6.2 Pontos de controle na fachada por métodos clássicos

Para a determinação de pontos de controle em fachadas (pontos objetos) o método mais recomendado é a interseção à vante. Esse método, por exemplo, foi usado em: Medina *et al.* (1991), Carneiro (1993), Medida *et al.*(2000), Silva *et al.*, (2016), Nascimento *et al.*(2016), entre outros.

Um segundo método que poderia ser usado com “segurança” seria o da irradiação simples usando alvos com fita reflexiva, ou mesmo, com menos segurança, obtendo-se as distâncias pela reflexão no próprio objeto, com estações totais que possuem essa possibilidade.

O método da “interseção a vante” pressuponha conhecidas coordenadas tridimensionais de dois ou mais pontos de controle de terreno, por exemplo, pontos

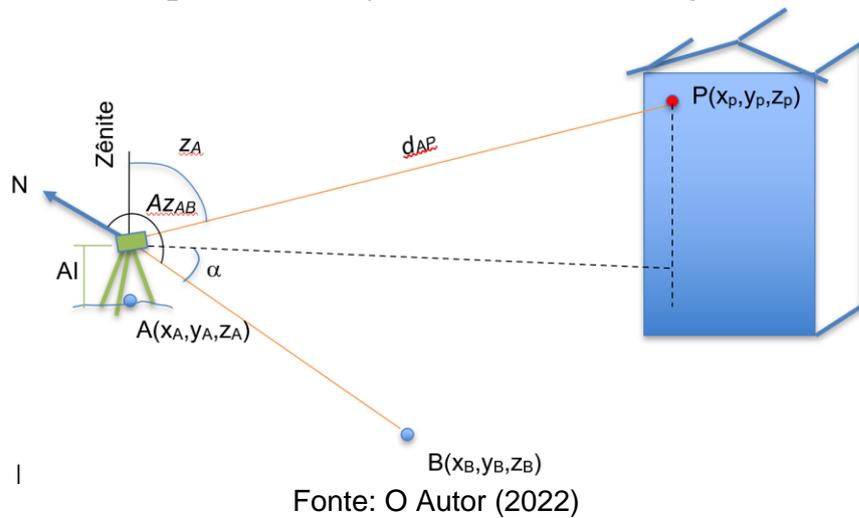
A e ponto B ilustrados na Figura 34. A partir deles, medindo-se os ângulos horizontais (α e β) e verticais (Z_A e Z_B) determina-se as coordenadas tridimensionais do ponto P desejado.



A solução clássica desse método é resolver as coordenadas horizontais (x_p, y_p) de P e depois com a solução do nivelamento trigonométrico resolver a coordenada vertical (z_p). Por topografia tal solução é encontrada em Espartel (1987).

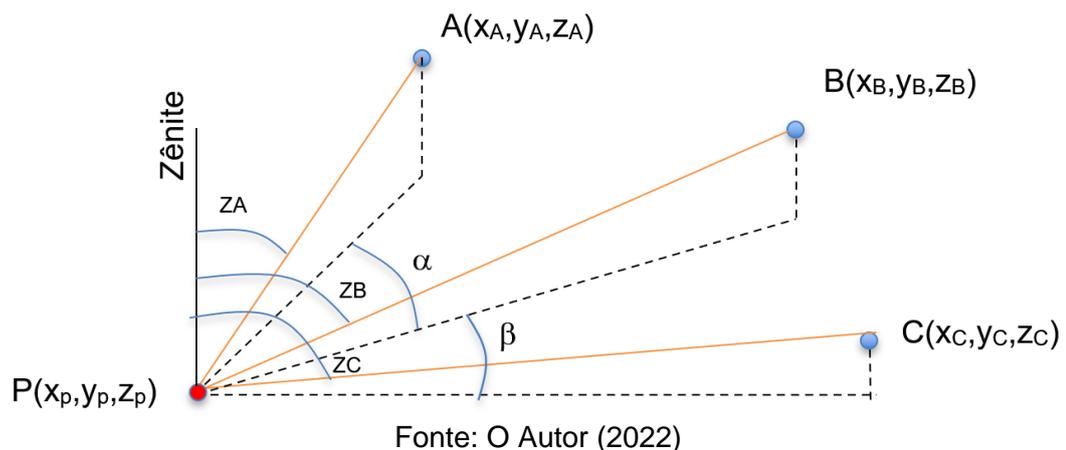
No método da “irradiação” é necessário o conhecimento das coordenadas da estação onde foi calado o equipamento, no caso deveria ser uma estação total com opção de ler distância em alvo reflexivo ou com a opção de ler a distância sem necessidade de prisma ou alvo reflexivo. O conhecimento do azimute da visada a ré, associado a leitura do ângulo horizontal, ângulo zenital e mais a altura do instrumento instalado, permite obter as coordenadas tridimensionais do ponto P, Figura 35.

Figura 35 - Princípio do método da irradiação



No método da “interseção da ré”, algumas vezes os pontos A e B conforme mostrados pelos métodos da interseção a vante ou da irradiação, não são possíveis ou não são viáveis de serem determinados via tecnologia GNSS, todavia se a partir da estação A, forem visíveis dois ou mais pontos de controle de terreno que foram anteriormente implantados é possível se ter a determinação de tal ponto. Nesse caso, com observações de ângulos e/ou distâncias a partir dessa estação desconhecida pode-se determinar suas coordenadas. Esse método é conhecido por interseção a ré, sendo ilustrado na Figura 36.

Figura 36 - Princípio do método intersecção a ré



Quando envolve três pontos conhecidos apenas no plano e dois ângulos são lidos a partir do ponto incógnito, essa configuração é conhecida por problema de Pothénot (ESPARTEL, 1987).

2.5.6.3 Equações de observações para os métodos clássicos

Independente de qual seja o método adotado, qualquer um deles poderia ser solucionado usando o princípio do “método dos mínimos quadrados - MMQ”, desde que se tenha observações e geometria o suficiente para solução. Esse tipo de solução é utilizado no módulo ajustamento de rede geodésica do software AstGeoTop (GARNÉS, 2022) e que será utilizado na metodologia deste trabalho.

O software utiliza-se de observações de distâncias inclinadas, de ângulos horizontais e de ângulos zenitais para observações geodésicas de longas distâncias, porém para distâncias curtas como é o caso da aplicação em fotogrametria terrestre, as equações de observação para cada um desses elementos teriam resultados equivalentes as equações (24), (25) e (26), respectivamente.

As equações de observação da distância inclinada com estação em i e ponto de visada em j pode ser representada por:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (34)$$

As equações de observação de ângulos com estação em i , ponto de ré em j e ponto de vante em k pode ser representada por:

$$a_{ijk} = \arctg\left(\frac{x_j - x_i}{y_j - y_i}\right) - \arctg\left(\frac{x_k - x_i}{y_k - y_i}\right) \quad (35)$$

As equações de observação de ângulos zenitais com estação em i e ponto visado em j pode ser representada por:

$$z_{ij} = \arctg\left(\frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{z_j - z_i}\right) \quad (36)$$

A solução para obter as coordenadas do ponto P(x,y,z) usando as equações de observações apresentadas anteriormente, se enquadra no item “**modelo paramétrico**” da seção a seguir.

2.5.7 Ajustamento de observações com injunções de pontos de controle

Dois métodos de ajustamento podem ser aplicados neste trabalho, um que se utiliza do modelo implícito, $F(L, x) = 0$, aplicado às equações de observações (17) e

(18) e outro que se utiliza o modelo explícito, $L_a = F(x_a)$, aplicado às equações (21) a (30).

Baseado na notação matricial o MMQ foi introduzido por Uotila (1967) e sintetizado nos trabalhos de Gemael (1994).

Modelo implícito $F(L_a, x_a) = 0$ - Ajustamento combinado com injunções

Nesse modelo pressupõe-se que observações ajustadas contidas no vetor L_a estão interconectadas por uma função F com parâmetros ajustados contidos no vetor x_a e, que dessa conexão, se produz um vetor nulo 0 . Além disso, associado às observações pressupõe-se um modelo estocástico em que exista uma matriz definida positiva de pesos (P) definida por (GEMAEL, 1994):

$$P = \sigma_0^2 \Sigma_{Lb}^{-1} \quad (37)$$

sendo:

σ_0^2 a variância de referência;

Σ_{Lb} a matriz variância-covariâncias (MVC) do vetor de observações.

A linearização da função $F(L_a, x_a)$, por exemplo, em série de Taylor, usando valores aproximado para x_a , isto é, x_0 , e valores observados para L_a , isto é, L_b , e ainda considerando V , um vetor de resíduos (interpreta-se como correção às observações), se tem o seguinte sistema de equações lineares (GEMAEL, 1994):

$$Bv + Ax + W = 0 \quad (38)$$

sendo:

B: uma matriz de derivadas parciais em relação às observações;

A: uma matriz de derivadas parciais em relação aos parâmetros;

W: avaliação da função F correspondente ao erro de fechamento da função.

$X = X_a - X_0$: vetor de correções aos parâmetros aproximados.

Nas aplicações deste método nas equações (17) e (18), por exemplo, o vetor dos parâmetros aproximados x_0 deverá conter valores aproximados para 19 parâmetros, conforme Equação (24).

$$\mathbf{X}_o (x_0, y_0, c, X_0, Y_0, Z_0, \dots, k_0, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, p_3, p_4, A, B). \quad (39)$$

Como cada ponto fotogramétrico $p(x,y)$ produz duas equações que compõem a colinearidade dos feixes de luz, então para se ter uma solução única, seriam necessários no mínimo 10 pontos de controle. Para soluções com menos pontos de controle os parâmetros menos significativos poderiam ser negligenciados, por exemplo, p_3 e p_4 da distorção descentrada, conforme Lugnani (1987) ou serem diminuídos se uma prévia calibração da câmara já tiver sido feita.

Quando da utilização de barra de escala, as distâncias são conhecidas entre dois pontos, e dessa forma, uma equação de distância pode ser utilizada no ajustamento conjunto. Representando o conjunto de possíveis novas observações (com um peso elevado tais distâncias seriam injunções no ajustamento) que poderiam ser utilizadas no ajustamento, estas representadas por:

$$F_2(L_{2a}, X_a) = 0 \quad (40)$$

Sendo: L_{2a} o vetor contendo as equações de distâncias precisas.

Essas distâncias juntamente com sua MVC e com a MVC das coordenadas dos pontos a ela associada, forneceriam uma nova matriz de pesos P_2 .

Com esse modelo a solução por mínimos quadrados resulta (LEICK, 1995):

a) Modelo linearizado para ambas equações de observações podendo ser às segundas equações de injunções:

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_1 \mathbf{V}_1 + \mathbf{A}_1 \mathbf{X} + \mathbf{W}_1 &= \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_2 \mathbf{V}_2 + \mathbf{A}_2 \mathbf{X} + \mathbf{W}_2 &= \mathbf{0} \\ \mathbf{P} &= \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (41)$$

b) Elementos das equações normais

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_1 &= \mathbf{B}_1 \mathbf{P}_1^{-1} \mathbf{B}_1^T & \mathbf{M}_2 &= \mathbf{B}_2 \mathbf{P}_2^{-1} \mathbf{B}_2^T \\ \mathbf{N}_1 &= \mathbf{A}_1^T \mathbf{M}_1^{-1} \mathbf{A}_1 & \mathbf{N}_2 &= \mathbf{A}_2^T \mathbf{M}_2^{-1} \mathbf{A}_2 \\ \mathbf{U}_1 &= \mathbf{A}_1^T \mathbf{M}_1^{-1} \mathbf{W}_1 & \mathbf{U}_2 &= \mathbf{A}_2^T \mathbf{M}_2^{-1} \mathbf{W}_2 \end{aligned} \quad (42)$$

c) Parâmetros estimados

$$\begin{aligned}
\hat{\mathbf{X}} &= \mathbf{X}^* + \Delta\mathbf{X} \\
\mathbf{X}^* &= -\mathbf{N}_1^{-1}\mathbf{U}_1 \\
\mathbf{T} &= (\mathbf{M}_2 + \mathbf{A}_2\mathbf{N}_1^{-1}\mathbf{A}_2^T)^{-1} \\
\Delta\mathbf{X} &= -\mathbf{N}_1^{-1}\mathbf{A}_2^T\mathbf{T}(\mathbf{A}_2\mathbf{X}^* + \mathbf{W}_2)
\end{aligned} \tag{43}$$

d) MVC dos parâmetros ajustados

$$\begin{aligned}
\Sigma_X &= \Sigma_X^* + \Delta\Sigma_X \\
\Sigma_X^* &= \hat{\sigma}_0^2 \mathbf{N}_1^{-1} \\
\Delta\Sigma_X &= -\hat{\sigma}_0^2 \mathbf{N}_1^{-1}\mathbf{A}_2^T\mathbf{T}\mathbf{A}_2\mathbf{N}_1^{-1}
\end{aligned} \tag{44}$$

e) Quadrática de mínimos quadrados

$$\begin{aligned}
\mathbf{V}^T\mathbf{P}\mathbf{V} &= \mathbf{V}^T\mathbf{P}\mathbf{V}^* + \Delta\mathbf{V}^T\mathbf{P}\mathbf{V} \\
\mathbf{V}^T\mathbf{P}\mathbf{V}^* &= -\mathbf{U}_1^T\mathbf{N}_1^{-1}\mathbf{U}_1 + \mathbf{W}_1^T\mathbf{M}_1^{-1}\mathbf{W}_1 \\
\Delta\mathbf{V}^T\mathbf{P}\mathbf{V} &= (\mathbf{A}_2\mathbf{X}^* + \mathbf{W}_2)^T\mathbf{T}(\mathbf{A}_2\mathbf{X}^* + \mathbf{W}_2)
\end{aligned} \tag{45}$$

f) variância de referência

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\mathbf{V}^T\mathbf{P}\mathbf{V}}{r_1+r_2-u} \tag{46}$$

Sendo:

- r1: número de equações de condição do primeiro bloco para equação da colinearidade
- r2: número de equações de inunções de distância para o segundo bloco;
- u: número de parâmetros a estimar no ajustamento.

Modelo explícito $L_a = F(\mathbf{x}_a)$ - Ajustamento paramétrico com inunções

O modelo paramétrico no contexto deste trabalho, seria mais aplicado no ajustamento de redes geodésicas e topográficas na obtenção das coordenadas ajustadas dos pontos de controle. Desta forma, o modelo de ajustamento utilizando inunções para que fique mais genérico é assim apresentado:

Encontrar os parâmetros que minimizam a forma quadrática $\mathbf{V}^T\mathbf{P}\mathbf{V}$ do modelo explícito $L_a = F(\mathbf{x}_a)$ sujeito às inunções $\mathbf{G}(\mathbf{x}_a)=0$.

Ambas funções F e G podem ser linearizadas por Taylor e usando a notação Lb para o vetor das observações; V para o vetor das correções ou resíduos e X0 para o vetor dos parâmetros aproximados, tem-se:

$$\begin{aligned} V_1 &= A_1 X + L_1 \\ A_2 X + L_2 &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (47)$$

sendo:

$X = x_a - x_0$: vetor de correções aos parâmetros aproximados;

$L_1 = F(x_0) - L_b$: vetor com as diferenças das equações de observações menos o vetor de observações;

A_1 : matriz das derivadas parciais das equações de observações em relação aos parâmetros;

A_2 : matriz das derivadas parciais das equações de injunções em relação aos parâmetros;

$L_2 = G(x_0) - L_{inj}$: vetor com as diferenças das equações de observações menos o vetor de injunções;

Isso posto, então:

$$\begin{aligned} & \textit{minimizar} \quad V_1^T P V_1 \\ & \textit{sujeito a} : A_2 X + L_2 = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (48)$$

tem solução de mínimos quadrados dado por (LEICK, 1995):

a) Elementos das equações normais

$$\begin{aligned} N_1 &= A_1^T P_1 A_1 \\ U_1 &= A_1^T P_1 L_1 \end{aligned} \quad (49)$$

b) Parâmetros estimados

$$\begin{aligned} N_1 &= A_1^T P_1 A_1 \\ U_1 &= A_1^T P_1 L_1 \end{aligned} \quad (50)$$

c) MVC dos parâmetros ajustados

$$\begin{aligned} \Sigma_X &= \Sigma_X^* + \Delta \Sigma_X \\ \Sigma_X^* &= \hat{\sigma}_0^2 N_1^{-1} \\ \Delta \Sigma_X &= -\hat{\sigma}_0^2 N_1^{-1} A_2^T T A_2 N_1^{-1} \end{aligned} \quad (51)$$

d) Quadrática de mínimos quadrados

$$\begin{aligned}
V^T P V &= V^T P V^* + \Delta V^T P V \\
V^T P V^* &= -U_1^T N_1^{-1} U_1 + L_1^T P_1^{-1} L_1 \\
\Delta V^T P V &= (A_2 X^* + L_2)^T T (A_2 X^* + L_2)
\end{aligned}
\tag{52}$$

e) variância de referência

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{n_1 + n_2 - u}
\tag{53}$$

Sendo:

n_1 : número de equações de observações;

n_2 : número de equações de injunções;

u : número de parâmetros do ajustamento.

2.5.8 Processamento de dados fotogramétricos

No processamento de fotos, a fotogrametria analítica entrou em cena no final da década de 90, buscando a realizar processamento de fotos de câmaras não métricas, introdução de pontos de controle, injunções de distâncias, ter capacidade de armazenamento, velocidade de processamento e ainda uma interface fácil e intuitiva com o usuário.

A fotogrametria de estrutura de movimento (SfM) criou oportunidades em muitas aplicações, entre elas, a modelagem de objetos, geração de superfície 3D e geração de nuvem de pontos que revolucionou a documentação 3D de locais de patrimônio cultural e edifícios (BAKIRMAN, 2020). Utilizando a combinação da tecnologia SfM com a fotogrametria terrestre existente.

Dentre os softwares que buscam atender essa demanda, foi escolhido o Agisoft Metashape para o cálculo das nuvens de pontos e modelo mesh resultados do trabalho, foi escolhido por sua qualidade e popularidade reconhecida no meio. Alguns detalhes são esclarecidos a seguir:

a) Agisoft Metashape

Antes chamado de Photoscan, foi rebatizado de Metashape. É um software de fotogrametria muito difundido, ele possui uma interface intuitiva e trabalha com dados controlados e não-controlados.

O software possui a capacidade de criar uma nuvem de pontos 3D e modelos digitais de superfície MDS a partir de pares estereoscópicos.

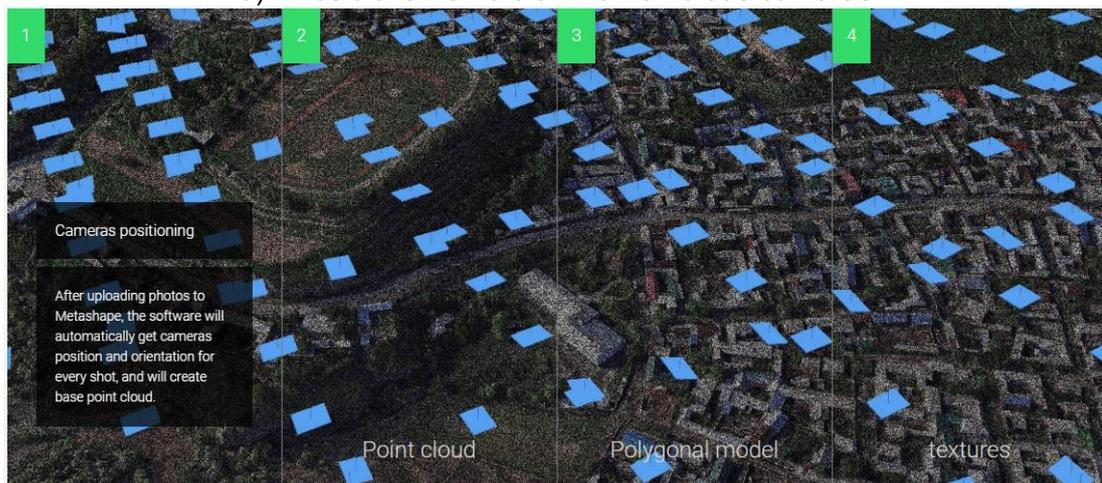
Permite a autocalibração e trabalha com lentes esféricas, cilíndricas e suporta várias projeções de câmaras.

Os resultados e características dos processamentos são:

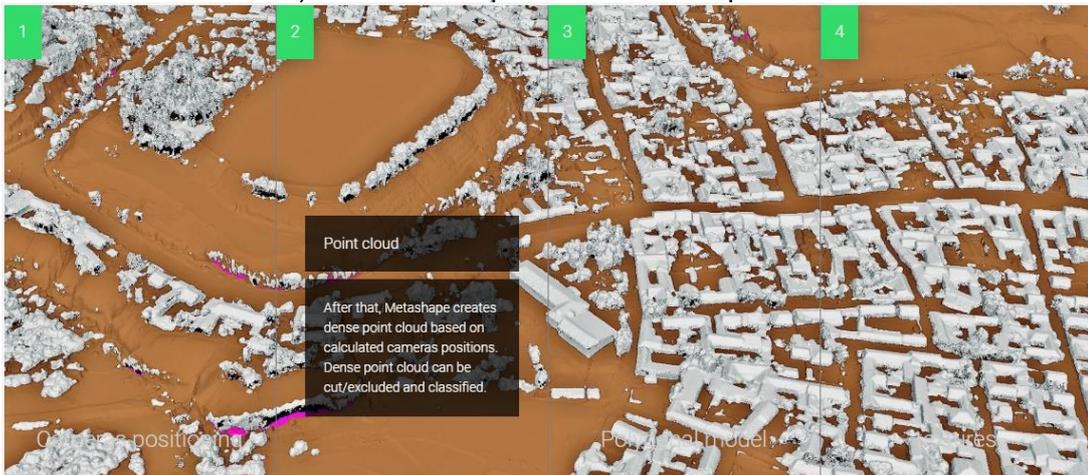
- a) MDE: Modelo digital de elevação. (Exporta DSM / DTM);
- b) Ortomosaicos;
- c) Medições de distâncias, áreas e volumes;
- d) Processamento de imagens multiespectral;
- e) Exporta malha *mesh* em formato de modelo 3D;
- f) Exporta modelo 4D com dados temporais de várias câmaras;
- g) Costura de panorama 360;
- h) Processamento em rede com vários computadores.

Uma sequência simplificada do processamento e geração consiste no alinhamento das câmaras em um determinado espaço, processamentos dos pontos tridimensionais, criação de um modelo e sua texturização, conforme Figura 37.

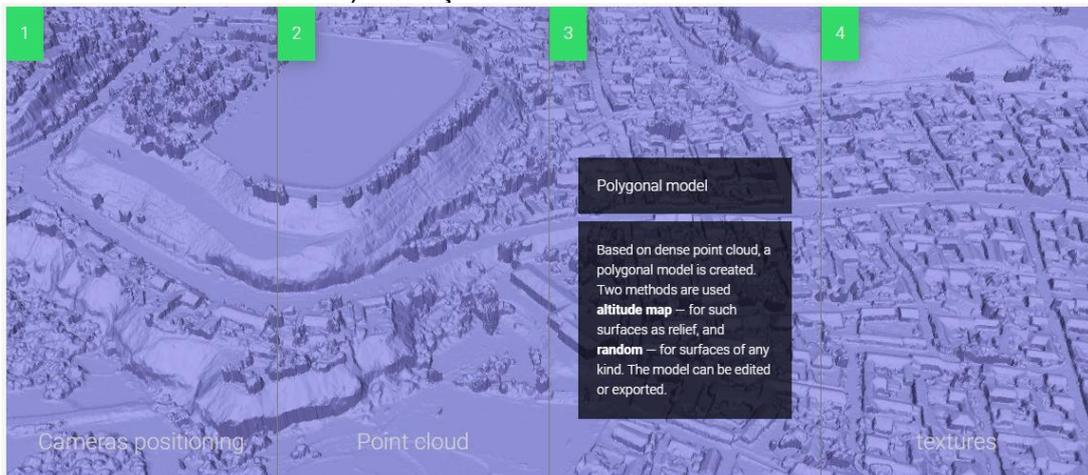
Figura 37 - Sequência de processamento do Metashape:
a) - Posicionamento e alinhamento das câmaras



b) - Transformação em nuvem de pontos



c) - Criação de uma malha mesh



d) - Modelo com a textura



Fonte: https://www.geoscan.aero/en/software/agisoft/metashape_pro

2.6 O PROCESSO BIM

O BIM (Building Information Modeling), ou Modelagem da Informação da Construção, é definido por Eastman et al. (2011) in Guerretta et al (2017) como processo colaborativo integrado, em formato digital, entre diversos agentes para acesso às informações físicas e funcionais de uma construção, durante todo seu ciclo de vida.

É um processo amplo com várias possibilidades, que, resumidamente, consiste na construção digital de uma edificação, em forma de modelo tridimensional que inclui informação de suas peças e processos construtivos. É possível fazer a gestão de sua construção, gestão da manutenção, custos, fabricantes, dimensões, compatibilização e até a sua desmontagem, dentre outros. BIM é um processo de gestão da informação construtiva, que utiliza softwares multidisciplinares que se inter operacionalizam, extraindo informações, quantificando e identificando incompatibilidades entre as temáticas envolvidas. Com o BIM, um modelo virtual preciso de um edifício é construído digitalmente (GUERRETTA et al, 2017). O BIM abrange o projeto e manufatura de edificações.

O processo BIM é ligado à evolução tecnológica pela demanda de sua potência computacional. As modelagens podem atingir graus de detalhamento altos, dependendo da demanda do projeto, e ainda exigem hardware de ponta nem sempre acessíveis pelos escritórios de projeto. Atualmente, os computadores domésticos suportam projetos modelados tridimensionalmente caso haja uma simplificação do modelo. Caso seja demandado um modelo extremamente detalhado, uma análise da potência computacional se faz necessária para maiores projetos e maiores níveis de detalhes, denominado LOD (*Level of Development*). Impensável há dez ou quinze anos, apesar dos primeiros softwares BIM serem da década de noventa. E, justamente pela evolução, que a disseminação do processo se tornou viável.

Não é a primeira vez que uma mudança de processo profunda acontece nos escritórios de projeto por causa da tecnologia digital. O impacto do processo de mudança de CAD para BIM que acontece atualmente se assemelha à transformação do desenho à mão para o computador na década de oitenta, que repercutiu no mercado da construção. Os programas de CAD, Computer Aided Design, ou Desenho Assistido por Computador substituíram as pranchetas e o papel vegetal por

desktops e plotters. Assim como nos dias atuais, os escritórios sofrem um processo de adaptação à nova realidade. (FREITAS, 2020)

Atualmente é inviável pensar em um escritório que os desenhos sejam executados à mão, salvo os anteprojetos que utilizam a expressão manual apenas como forma de apresentação e esboço das ideias iniciais. Essas mudanças sofreram e sofrem resistência pelos usuários, à época com o CAD e atualmente com o BIM.

Apesar de resistências semelhantes, são motivos distintos. Na mudança para o CAD, novos conceitos abstratos foram apresentados para os projetistas como: *Layers*, penas representadas por cores, escala variável na impressão, *paper space*, *model space*, dentre outras. Mas a principal mudança para o desenhista seria a informática, incomum à época e sendo apresentada para seus novos usuários que teriam que aprender uma ferramenta de CAD sem ter habilidade com informática ou o sistema operacional da época, o DOS.

A mudança de ferramenta de desenho não alterou o processo. A planta baixa, tal qual era feita à mão, era então executada no computador. Após a definição da planta, os cortes e fachadas, e assim sucessivamente. O processo foi transplantado de ferramenta, saindo do desenho à mão para a inserção do computador no processo. Com a mudança do CAD para BIM, a ferramenta agora se mantém: “o computador”, os usuários já o utilizam, possuem habilidades de informática e não é mais novidade, mas nessa nova migração, novas habilidades de softwares e processos de gestão precisam ser estudadas e estabelecidas. Todo o processo é modificado, cíclico e colaborativo. A gestão das informações agora necessita de uma hierarquia e controle de como são coordenadas entre projetistas interdisciplinares. (ARAÚJO e CUNHA, 2015).

Simplificando o processo: a nível 3D, deve-se modelar o projeto, inserir informações necessárias em cada peça, inserir custos, planejamento e o software irá extrair as plantas e quantitativos “automaticamente”. Ou seja, o desenho é resultado de uma modelagem e não sua causa. Desta forma, quaisquer alterações no modelo, todos os desenhos são alterados em conjunto. O software que melhor representa esse processo é o Autodesk Revit. O próprio nome é uma abreviação de Revise Instantly, ou, revise instantaneamente, em português, segundo entrevista com David Conant, um dos primeiros programadores do software.

As vantagens desse processo são percebidas no planejamento e na própria obra, se preciso for a modelagem. Como as disciplinas são todas visualizadas em conjunto, como um raio-X, é possível identificar os problemas de projeto e incompatibilidades antes da sua execução. São inúmeras disciplinas modeladas, como exemplo, em uma obra simples: arquitetura, estrutura, elétrica, hidráulica, combate a incêndio, sistema de câmara interno, iluminação, paisagismo, revestimentos, alvenaria, granitaria, marcenaria, gesso, pinturas, rede e internet, impermeabilização, dentre outros. Essas disciplinas devem ser vistas por todos os envolvidos e coordenadas de forma eficiente.

2.6.1 As dimensões D do BIM

O modelo BIM pode atingir vários níveis de dimensões. A literatura não é totalmente unânime em relação às classificações, e está sempre em mutação. Originalmente do 3D até o 7D, segundo (CHAREF et al., 2018) e a recente discussão sobre o 8D (CHAREF, 2022). Atualmente existem seis dimensões de BIM:

- A dimensão 3D: Visualização - O nível começa com a modelagem apenas focada na modelagem em função da forma. Suas dimensões são respeitadas e tem como objetivo apenas a extração das plantas, imagens e representações tridimensionais do objeto proposto.
- A dimensão 4D: Planejamento - Consiste em determinar quando cada peça será instalada em uma obra. A variável tempo e prazo, e suas sub-variáveis são inseridas nas peças como informação dentro de um modelo. Isso possibilita que se tenha o controle e o planejamento dentro de uma. Como exemplo, controlar a execução de uma estrutura antes de uma alvenaria, por exemplo.
- A dimensão 5D: Custo - Com os valores dos produtos e serviços inseridos como informação nas peças, é possível ter uma estimativa do custo total da obra.
- A dimensão 6D: Operação e energia - Controla os recursos e gestão da obra, dos sistemas de elevadores à ar-condicionado, é possível ter o controle e análise energética para fazer mudanças e controlar os equipamentos visando a melhor eficiência.

- A dimensão 7D: Sustentabilidade - Focado na operação, gestão, controle e manutenção das instalações durante todas as etapas do projeto. É possível extrair informações que otimizam a gestão de ativos relevantes como: Status do componente, manutenção, especificações, manuais de operação, datas de garantia).
- A dimensão 8D: Segurança - Tecnologia que possibilita prever os riscos relativos à segurança nos processos de construção e operacional da obra.

Neste trabalho, com foco em precisão e fotogrametria, o foco será a modelagem tridimensional, 3D.

2.6.2 Os níveis de desenvolvimento

Ao modelar uma edificação ou um componente da edificação, algumas informações e geometria mais detalhadas são desnecessárias em um projeto, contudo, de acordo com o tamanho do projeto e, algumas simplificações são feitas quase como exigência técnica para viabilização, de tal forma que os computadores atuais suportem tal demanda e atendam a necessidade para qual aquele modelo é construído.

Não que tal simplificação vá degradar a qualidade do projeto, o objetivo é a informação e sua gestão, mas dependendo da demanda, determinadas modelagens menores possam ficar de fora. Como exemplo, os parafusos de uma luminária, as maçanetas de uma porta ou a armadura de uma peça estrutural poderiam constar como informação e não necessariamente como geometria.

Esses níveis de desenvolvimento, ou LOD, Level of development, são definidos entre as empresas executoras no começo da modelagem e definirá o nível e prazo de acordo com a exigência. Existem cinco níveis básicos de LOD: 100, 200, 300, 400 e 500. (AIA, 2012). O LOD 350 não é listado originalmente, é adicionado posteriormente no *Associated Guide and Instructions*, sendo os níveis definidos entre LOD100, até LOD500. Essa padronização ainda não é precisa e está em constante discussão. A Figura 38 representa e o quadro 2 da AIA que padroniza esses níveis:

Quadro 2 - Critérios de Níveis de Desenvolvimento pelo AIA

ESPECIFICAÇÃO LOD	DEFINIÇÃO
100	O Elemento do Modelo pode ser representado graficamente com um símbolo ou outra representação genérica, mas não deve satisfazer os requisitos do LOD 200. Informações relacionadas ao Elemento do Modelo (ex. custo por metro quadrado, capacidade de BTU de ar condicionado, etc.) podem ser derivadas de outro elemento do Modelo.
200	O Elemento do Modelo é representado graficamente como um sistema genérico, como um objeto ou uma montagem, com quantidades, tamanhos, formas, localização e orientação aproximadas. Informações não gráficas também podem ser inseridas ao Elemento do Modelo.
300	O Elemento do Modelo é representado graficamente como um sistema específico, objeto ou montagem com quantidade, tamanho, forma, localização e orientação. Informações não gráficas também podem ser inseridas ao Elemento do Modelo.
350	O Elemento do Modelo é representado graficamente como um sistema específico, objeto ou montagem com quantidade, tamanho, forma, localização, orientação e com interface a outras disciplinas de projeto. Informações não gráficas também podem ser inseridas ao Elemento do Modelo.
400	O Elemento do Modelo é representado graficamente como um sistema específico, objeto ou montagem no que diz respeito a quantidade, tamanho, forma, localização e orientação com detalhamento, fabricação, montagem e informações de instalação. Informações não gráficas também podem ser inseridas ao Elemento do Modelo.
500	O Elemento do modelo é a representação de uma verificação em campo no que diz respeito a tamanho, forma, localização, quantidade e orientação. Informações não gráficas também podem ser inseridas ao Elemento do Modelo.

Fonte: AIA (2015).

Figura 38 - Representação dos LODs de uma mesma edificação



Fonte: <https://engenhariadigital.com/lod-level-of-development-para-projetos-bim/>

Quanto ao erro máximo admissível, de acordo com o guia BIM para imagens 3D, que é publicado pelo Serviço Geral Administração (GSA) dos EUA, a faixa de erro deve ser de no máximo 51 mm para projetos de edifícios de áreas urbanas e um máximo de 13 mm para projetos arquitetônicos. Caso contrário, a precisão prática não pode ser mantida. (KIM, et al. 2020).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

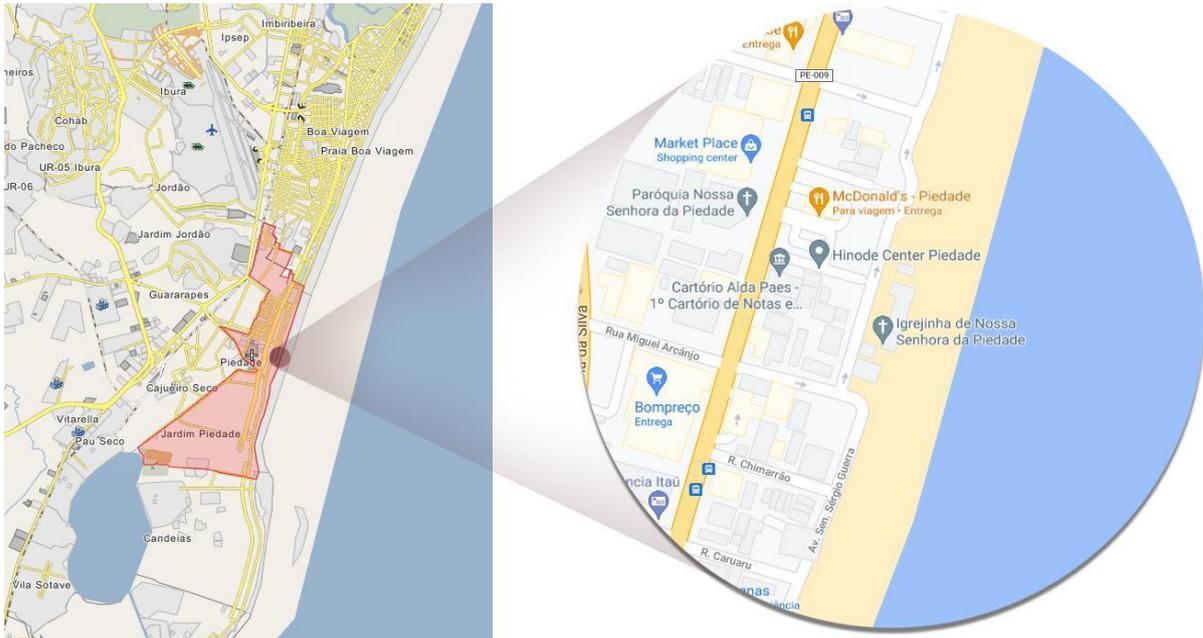
Em busca de verificar o comportamento da acurácia posicional de levantamentos de edificações arquitetônicas usando a fotogrametria com câmaras profissionais não métricas, foram testadas diferentes câmaras e diferentes objetivas com variação da distância focal. A otimização do tempo computacional de processamento foi um dos fatores estudados. Foram definidos os procedimentos metodológicos com as seguintes etapas:

- a) Definição da área e do objeto de estudo;
- b) Definição de materiais e equipamentos;
- c) Testagem e definição dos parâmetros de processamento;
- d) Tomada de fotos da primeira etapa;
- e) Determinação dos parâmetros computacionais;
- f) Determinação de pontos de controle na edificação;
- g) Determinação das *barras de escala* na edificação;
- h) Tomadas das fotos com variações de lentes;
- i) Processamentos dos modelos com pontos de controle;
- j) Processamentos dos modelos com *barras de escala*;
- k) Processamentos das acurácias;
- l) Apresentação dos resultados com análise e discussão;
- m) Considerações finais e conclusões.

3.1 DEFINIÇÃO DA ÁREA E DO OBJETO DE ESTUDO

Para a realização dos experimentos propostos foi escolhido como objeto de estudo a Igreja de Nossa Senhora da Piedade, localizada na Av. Beira Mar, na praia de Piedade, em Jaboatão dos Guararapes, conforme Figuras 39 e 40.

Figura 39 - Entorno da Igreja de Nossa Senhora da Piedade:



Fonte: Adaptado de Wikimapia e Google Maps

Figura 40 - Entorno da Igreja de Nossa Senhora da Piedade:



Fonte: Google Street View

A igreja de Nossa Senhora da Piedade é localizada à beira mar de Piedade, município pertencente ao grande Recife, foi construída em pedra e possui estilo maneirista. Não se sabe ao certo a data de fundação, mas a lápide do seu fundador é datada em 1683. (Prefeitura Municipal de Jaboatão dos Guararapes, 2021).

A seleção da igreja para o estudo foi escolhida por portar características necessárias para o processamento: fachada de dimensões medianas em relação às outras igrejas de Pernambuco, otimizando o trabalho de tomada das imagens; adornos cujos detalhes representam um objeto de análise interessante sem a necessidade de um maior processamento para uma maior fachada; localização em área aberta, acessível para a tomada das fotos. No entorno, além da praia a leste,

há uma praça aberta na frente e a oeste o acesso pela Avenida Senador Sérgio Guerra. Acesso reto e perpendicular à face da fachada, conforme Figura 41. Esses atributos possibilitaram a utilização de lentes de maior foco que requerem maior distância do objeto para executar os testes e estudos comparativos propostos.

Figura 41 - Entorno da Igreja



Fonte: Adaptado do Google Earth

Apesar da edificação escolhida ser enquadrada em uma subcategoria do BIM, chamada de HBIM (Heritage BIM), o objeto fora escolhido apenas pelo seu nível de complexidade dos detalhes, de difícil levantamento manual, não limitando assim a pesquisa para o patrimônio histórico.

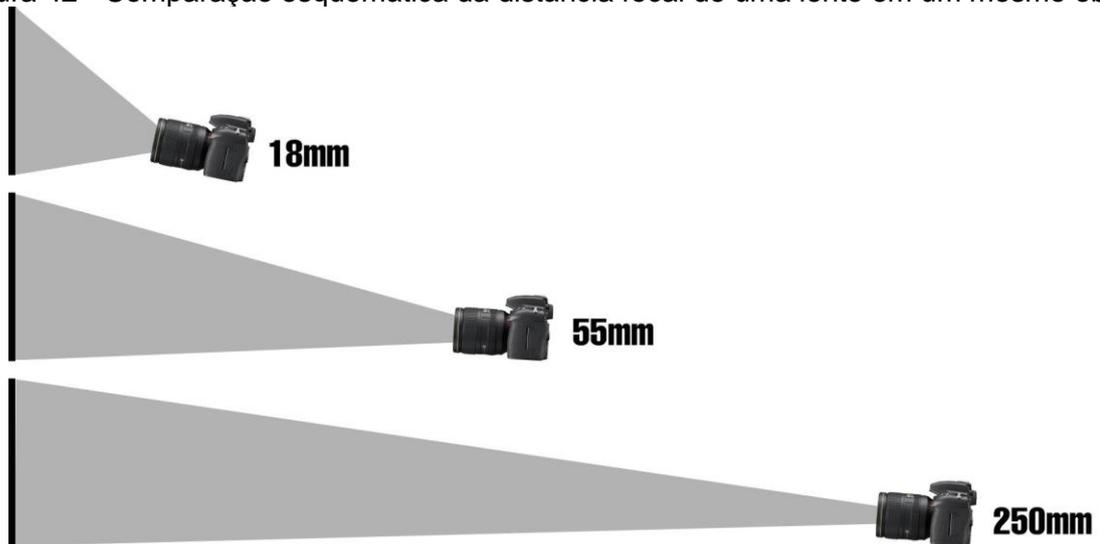
3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

A escolha das lentes para realizar os testes da pesquisa foi orientada pelos seguintes parâmetros: apresentar maior variação de distância focal entre elas, a fim de detectar alterações nos resultados quando utilizados lentes bem amplas; recomendadas para tomadas de fotos em locais com pouca distância para a fachada e lentes fechadas, do tipo zoom; possibilitar a captação de detalhes no topo da edificação com maior resolução espacial.

Pela topografia plana da área de estudo e área aberta na frente da fachada, é possível a aquisição de imagens em diferentes distâncias e diferentes lentes. A

imagem da Figura 42, ilustra um exemplo da variação de tomada de fotos em campo utilizando a troca de lentes e de câmaras, conforme quadros 3 e 4, são apresentados as especificações técnicas das câmaras e das lentes utilizadas na pesquisa

Figura 42 - Comparação esquemática da distância focal de uma lente em um mesmo objeto



Fonte: O Autor (2022)

Quadro 3 - Dados técnicos das câmaras disponíveis para realização da pesquisa

FOTO	FABRICANTE	MODELO	TIPO	ANO DE LANÇAMENTO	DIMENSÕES DA IMAGEM
	Canon	M50	MIRRORLESS	2018	6000 x 4000 (24MPx)
	Nikon	COOLPIX P520	COMPACTA ZOOM	2013	4896 x 3672 (18MPx)
	SAMSUNG	NOTE 10 PLUS	CELULAR	2019	4032 x 3024 (12Mpx)
	Apple	iPHONE 7	CELULAR	2016	4032 x 3024 (12Mpx)

FONTE: Sites dos fabricantes

Quadro 4 - Dados técnicos das lentes disponíveis para realização da pesquisa

FABRICANTE	CÓD DE REFERÊNCIA	CLASSIFICAÇÃO	DISTÂNCIA FOCAL TOMADA	35mm EQUIVALENTE
	EF-S 10-18mm F/4.5-5.6 IS STM	Angular	18mm	27mm
	EF-M 15-45mm f/3.5-6.3 IS STM	Normal	45mm	72mm
	EF-S 55-250mm f/4-5.6 IS STM	Telefoto	55mm	88mm
	EF-S 55-250mm f/4-5.6 IS STM	Telefoto	250mm	400mm
	4.3-180mm f/3-5.9	-	12mm	70mm
	6mm f/2.1	Normal	6mm	52mm
	4mm f/1.8	Angular	4mm	28mm

FONTE: Site dos fabricantes

Para a fixação e elevação das câmaras foi utilizado um tripé, monopé modelo QZSD-999h,

Para os estudos do comportamento da acurácia do levantamento serão necessários mais pontos de controle na fachada da Igreja usando equipamentos topográficos disponíveis nos laboratórios do DECART/UFPE.

- Estação Total Topcon GPT 3200N e Estação Total Norte
- Precisão angular: 5". Precisão linear: com prisma $\pm (5\text{mm}+5\text{ppm})$;
- 04 Tripés de alumínio; (2)
- 02 Prismas Refletores;
- 01 Trena de fibra de vidro (precisão de 1mm);
- 02 Adaptadores base-prisma;
- 02 adaptadores bastão-prisma;
- Cones de sinalização;
- Receptores GNSS Hiper V
- Paquímetro

3.2.1 Softwares utilizados na pesquisa

- Microsoft Office Excel 2013;
- Software Matlab R2014a - licença gratuita de 30 dias.
- Software AutoCAD 2014 - versão estudantil
- Software ASTGEOTOP. Versão 2022 - Licença do orientador da pesquisa.
- Agisoft Metashape - licença teste

3.3 PADRONIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSAMENTO

Para criar uma sequência sistematizada para a pesquisa, na primeira etapa foram realizados testes de processamento de imagens. Neles, foram utilizados conjuntos de fotos de duas lentes distintas, a de 55mm e a de 250mm e variando apenas os parâmetros computacionais. Essas lentes foram escolhidas por serem mais fechadas, considerando que se obtenha os insumos almejados: modelo tridimensional facetado, conhecido como *malha mesh* e sua respectiva ortoimagem, com melhor resolução espacial quando comparadas com a outros conjuntos de lentes a serem realizados os demais testes.

3.3.1 Nomenclatura dos processamentos

De forma a balizar a nomenclatura, um código foi criado para organizar o resultado de acordo com os parâmetros de cada teste. A sequência dos testes é apresentada em 5.4 e os resultados com a discussão no tópico 6.

Esse código é composto de até oito caracteres alfanuméricos que seguem o proposto no quadro 5:

Quadro 5 - Nomenclatura dos testes padronizados

CÓDIGOS - NOMENCLATURA DOS TESTES	
Lente:	
Lente 55mm	55
Lente 250mm	250
Alinhamento	
Automático	A
Com pontos homólogos de auxílio	P
Nuvem de pontos densa (qualidade do cálculo)	
Ultra-high (Ultra alto)	U
High (Alto)	H
Nível de confiança mínima da nuvem	
0, 1, 2, 3, 4, 5	0, 1, 2, 3, 4, 5
Textura do modelo mesh	
2k, 4k, 8k, 16k, 32k	2, 4, 8, 16, 32

Fonte: O Autor (2022)

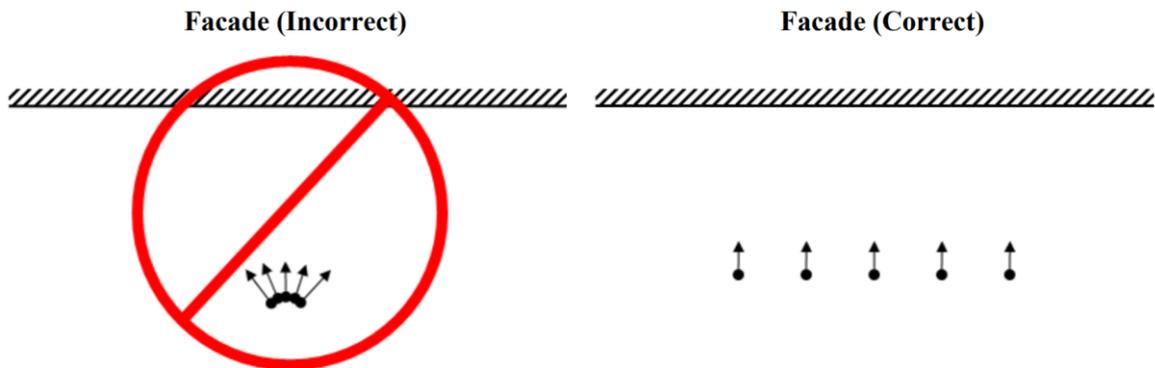
Um teste cujo código seja 55PU032 se refere a um ensaio com a lente de 55mm, feito com pontos homólogos, em qualidade ultra-high, com malha mesh sendo calculada com pontos de confiança mínima de zero e uma texturização 32k.

3.3.2 Tomada de fotos da primeira etapa

Na tomada das fotos da Igreja, ou de qualquer edificação que tenha a altura acima da escala humana, um primeiro desafio é a captação das imagens condicionadas a geração de modelos tridimensionais. Pelas recomendações do manual do Metashape 1.7 que apresenta dois métodos para fotografar um objeto: o primeiro, para as fachadas, a tomada das fotos é realizada na perpendicular do plano que será representado, essa técnica consiste em se obter sobreposição entre as fotos, paralelismo nas normais dos planos, e visa a extração de elevações em

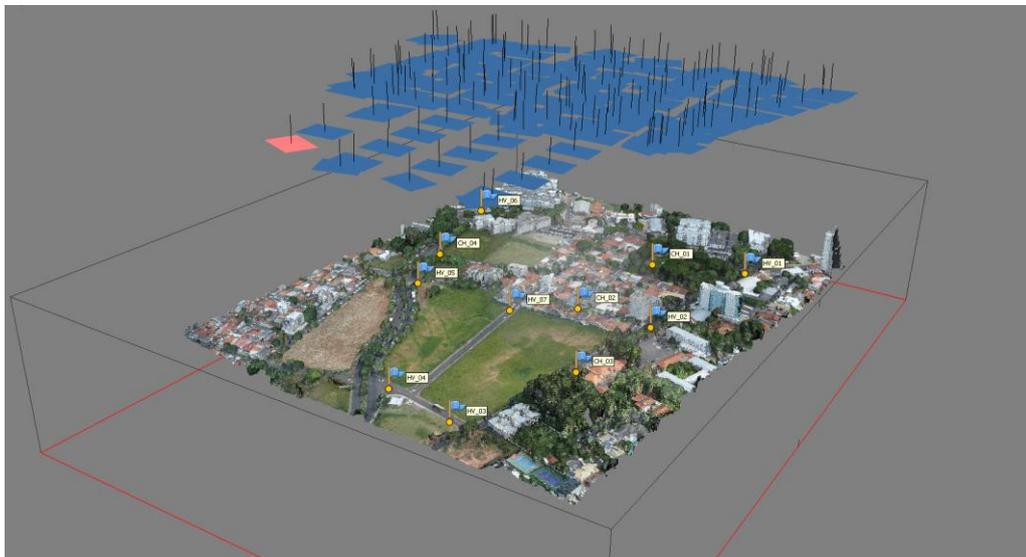
planos, seja fachadas ou terrenos, técnica bastante utilizada por drones para a tomada de planos terrestres, Figura 43. Um outro exemplo, para uma tomada de fotos aéreas utilizando drones, é análogo ao apresentado para fachadas, e pode ser visto na Figura 44.

Figura 43 - Técnica para tomada de fotografia de uma fachada



Fonte: Manual do Metashape 1.7

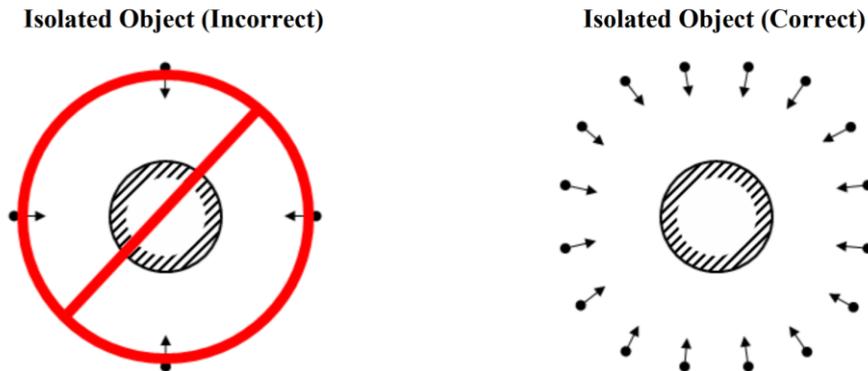
Figura 44 - Posições das tomadas das fotos para a geração de um MDT



Fonte: <https://blog.droneng.com.br/como-importar-dados-de-entrada-no-agisoft/>

O segundo método também visto em (ARIAS, 2006) é muito utilizado por escultores, arqueólogos, antropólogos e demais profissionais cuja necessidade de representação de um objeto em todas as suas dimensões. Essa técnica consiste em um giro 360° em todo o objeto com mais de uma camada de altura, conforme Figura 45.

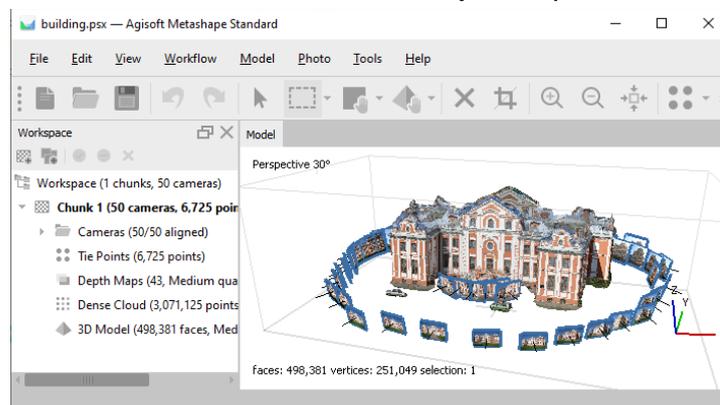
Figura 45 - Técnica de tomada de fotos de um objeto isolado



Fonte: Manual do Metashape 1.7

Alguns exemplos da utilização dessa técnica são encontrados em (ARIAS, 2006), principalmente de objetos pequenos, até a dimensão humana, facilitando o seu giro e tomada em várias camadas de alturas. Mas é possível encontrar exemplos aplicados em edificações, em objetos cujas dimensões são bem maiores. Conforme Figura 46.

Figura 46 - Tomada de fotos de um objeto arquitetônico isolado



Fonte:

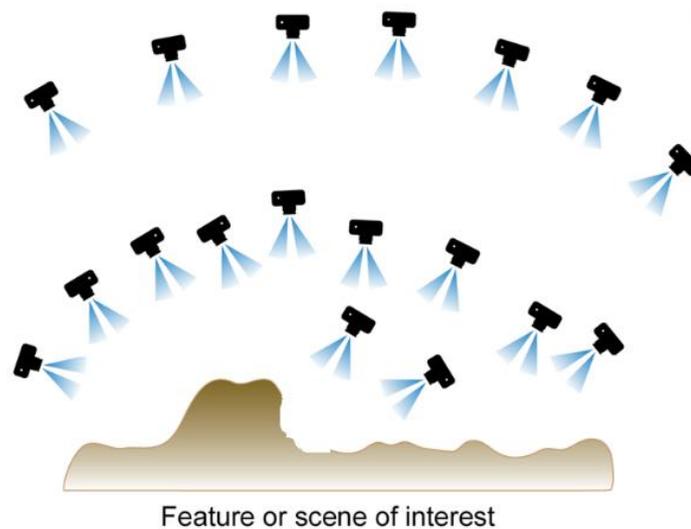
<https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000157701-manual-chunk-alignment-standard-edition->

Avaliando as duas formas de tomadas de fotos, Infelizmente, para arquitetura, os dois apresentam aparentes limitações quanto a perda de detalhes, especialmente no primeiro método com tomada de fotos nadirais a fachada.

A solução encontrada é um meio termo combinando as duas técnicas: tomada das imagens de vários ângulos e, em cada posição dessas, as fotos são adquiridas de partes da fachada com sobreposição de mais de 60%. Segundo (MICHELETTI et

al., 2019), para garantir uma cobertura de fotos adequada adota-se como princípio básico que cada ponto exposto deve aparecer em pelo menos três imagens adquiridas de locais espacialmente distintos. A Figura 47, apresenta um exemplo de aquisição de imagens. A estrutura da fotogrametria de movimento requer várias fotografias com grande sobreposição coletadas de diferentes posições e direções.

Figura 47 - Formato de tomada de fotos representativo ao propósito da pesquisa



Fonte: Micheletti *et al.* (2019)

Assim, presume-se que serão resolvidas as sombras, dentro do possível da fotogrametria terrestre e mantendo a resolução necessária para os detalhes. A falta de paralaxe poderá provir de algum problema, que será analisada conforme o andamento dos testes.

A Figura 48, apresenta um exemplo de problemas de texturização causados por áreas de sombra no processamento. Isso ocorre em locais que não estejam no plano de representação e não foram capturados por todos os ângulos disponíveis.

Figura 48 - Modelo *mesh* texturizado com problemas e vazios em áreas de sombra



Fonte: O Autor (2022)

Com este estudo de possibilidade da tomada das fotos, uma das dificuldades passa a ser a resolução da imagem. Nos dias atuais, a maioria das câmeras digitais profissionais possuem 24 a 32 Mpx, e, em casos específicos, chegam a 150 Mpx. Neste caso, uma única foto que englobe toda a edificação, com a resolução padrão, pode não ser suficiente para atender os requisitos de detalhamento necessários para a correta representação do patrimônio histórico, pelo resultado de seu cálculo de pixels por metro na representação da fachada.

3.4 PARÂMETROS COMPUTACIONAIS

Para o cálculo do modelo e ortoimagem, existe uma sequência básica hierárquica para obtenção dos resultados objetivados nesta pesquisa. Nessa linha existem ramificações que geram outros insumos e produtos nos softwares de fotogrametria.

Essa sequência de etapas é interdependente, ou seja, a etapa seguinte depende da conclusão da anterior.

- a) tomada das fotos
- b) alinhamento dessas fotos no espaço tridimensional
- c) criação de uma nuvem esparsa
- d) cálculo da nuvem densa
- e) cálculo da malha mesh
- f) cálculo da textura
- g) extração da ortoimagem

A descrição detalhada de cada subtópico dessas etapas está apresentada no item 6.

3.5 LEVANTAMENTO DE PONTOS DE CONTROLE

Nesta etapa da pesquisa, primeiramente, foram planejadas as posições das bases operantes para execução do levantamento dos pontos de controle.

O levantamento dos pontos foi realizado com estação total Topcon GPT 3200N utilizando o método de interseção a vante, originados dois pontos próximos à fachada, E1 e E2, formando um triângulo equilátero para a instalação da estação total. Para a ajustamento posicional dos pontos e georreferenciamento, e avaliação da acurácia dos pontos foram ainda levantados dois pontos com GNSS L1/L2 Hiper V, denominados E3 e E4, conforme Figura 49 e 50:

Figura 49 - Pontos estimados para locação dos equipamentos e determinação dos pontos de controle



Fonte: O Autor (2022)

Figura 50 - Pontos estimados para locação dos equipamentos e determinação dos pontos de controle



Fonte: O Autor (2022)

Foram coletados dois tipos de pontos na fachada: pontos pré-sinalizados, que foram inseridos na fachada e, pontos naturais, marcas existentes em locais de difícil acesso. Na Figura 51, apresenta a distribuição dos pontos de controle, de P1 até P27.

Figura 51 - Pontos de controle de P1 até P27 na fachada da igreja:

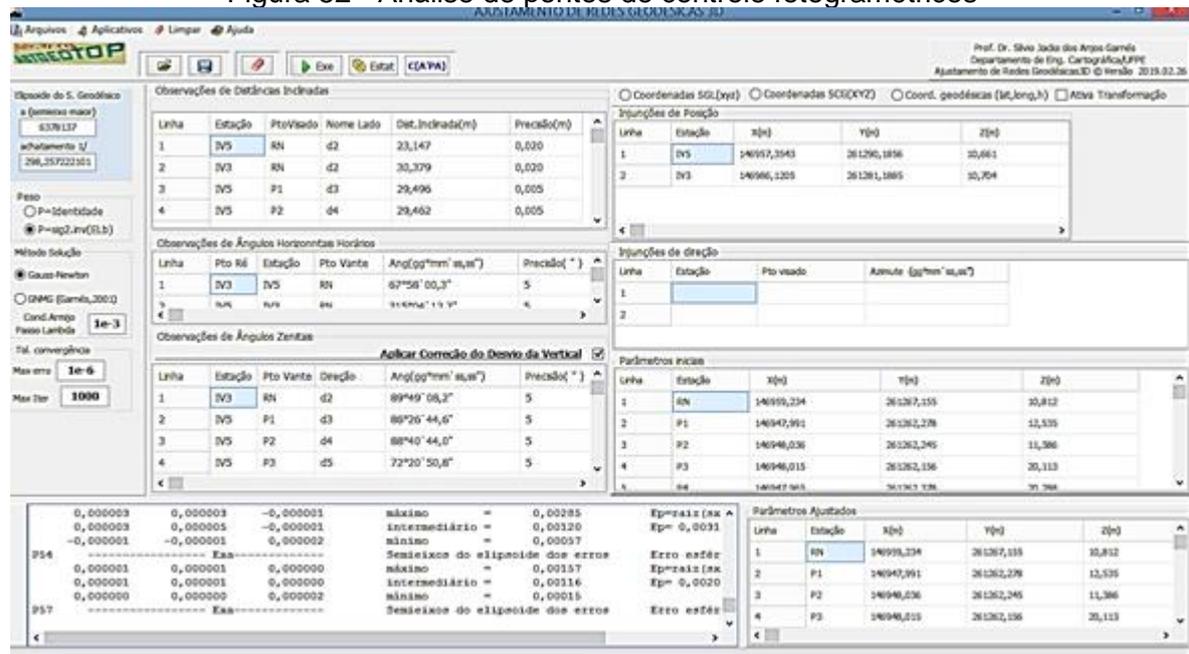


Fonte: O Autor (2022)

As coordenadas dos pontos de controle foram calculadas, ajustadas e a qualidade posicional 3D do conjunto delas foram avaliadas. Todo o processamento dos pontos foi executado no software ASTGEOTOP, versão 2022.14.07, o ajustamento da rede de pontos foi realizado usando a função de ajustamento de rede geodésica 3D. A Figura 52, apresenta uma visão geral da tela capturada com os resultados do ajustamento realizado.

O uso do módulo de ajustamento de rede disponível no software permitiu o ajuste e a análise estatística que possibilita verificar anormalidades das observações pelo teste de qui-quadrado, bem como, o mal condicionamento usando vários indicadores, apresentando os semi-eixos da elipse dos erros e o erro esférico do posicionamento. O ajustamento pode ser realizado pelo método de Gauss-Newton ou pelo método global, proposto por Garnés (2001). Para a pesquisa foi utilizado o método global.

Figura 52 - Análise de pontos de controle fotogramétricos



Fonte: AstGeoTop (2022)

3.6 DETERMINAÇÃO DAS BARRAS DE ESCALA NA EDIFICAÇÃO

Quando não se possui as coordenadas dos pontos, é possível a reconstrução desse modelo dentro do Metashape com a inserção de barras de escala. Ao se inserir a distância entre dois pontos, mesmo sem conhecer suas coordenadas, é

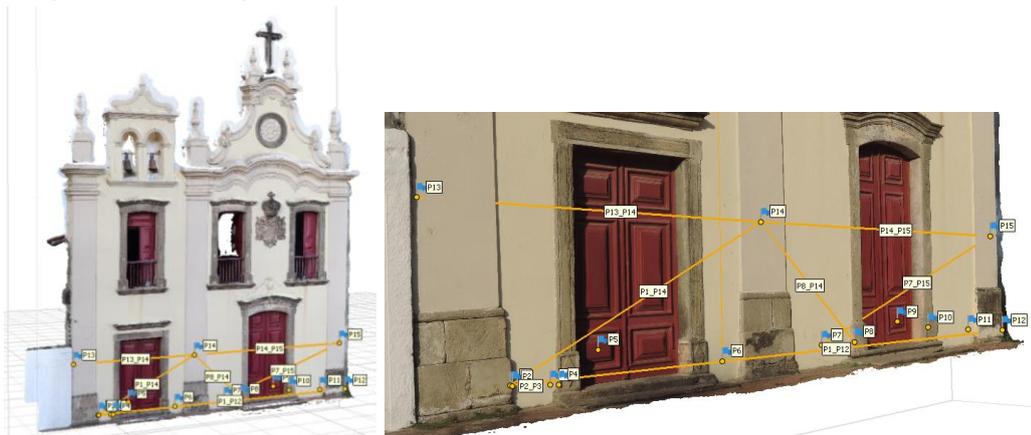
base suficiente para a reconstrução do modelo. Com uma, é possível reconstruir, mas foram tomadas sete *barras de escala* na edificação a fim de se obter segurança estatística.

Ao se capturar as distâncias dos pontos da fachada, foi reproduzido um dos problemas práticos de acesso às partes mais elevadas das edificações, no caso foi usada a limitação na altura humana, na prática, em torno de 2m. Essa possível limitação faz com as medidas estejam concentradas no primeiro andar da edificação.

Com esse controle apenas no primeiro nível da edificação é simulado um cenário ruim, forçando os erros nos pontos mais altos da igreja ficarem evidenciados, a fim de comparação das acurácias.

Foi criada uma malha com distâncias conhecidas entre pontos em todos os testes de variações de lente, conforme Figura 53:

Figura 53 - Inserção e análise do modelo com controle por barras de escala



Fonte: O Autor (2022)

3.7 TOMADAS DAS FOTOS COM VARIAÇÕES DE LENTES

Nessa etapa foram tomadas as fotos com todos os conjuntos ópticos seguindo os conceitos propostos 5.3.1 para aplicação nos processamentos. Cada conjunto demandou testes com pontos de controle e barras de escala

Nessa etapa é necessário tomar alguns cuidados práticos para garantir uma imagem possível de ser calculada nos softwares:

- fotografar a fachada de forma rápida, garantindo que entre o começo e o final do teste não se tenha uma variação de sol grande e, conseqüentemente, a sombra na edificação
- Em cada posição de foto, garantir um recobrimento
- Capturar toda a fachada e parte de sua lateral em cada posição
- Configurar para modo manual, escolhendo uma velocidade compatível com a velocidade de tomada, evitando possíveis desfoques por movimento
- Usar o menor ISO possível
- Usar a abertura (f-stop) em um valor tal que não se capture imagens com desfoque por DOF (Depth-of-field)

3.8 PROCESSAMENTOS

Nessa etapa, de posse das fotos da fachada de sete conjuntos distintos, foram processados em quatro grupos:

- Modelos com o uso dos pontos de controle;
- Modelos com o uso das barras de escala;
- Acurácia posicional dos modelos com pontos de controle;
- Acurácia posicional dos modelos com barras de escala.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O texto a seguir abordará o desenvolvimento e o comparativo dos resultados obtidos pelo processamento das imagens tomadas.

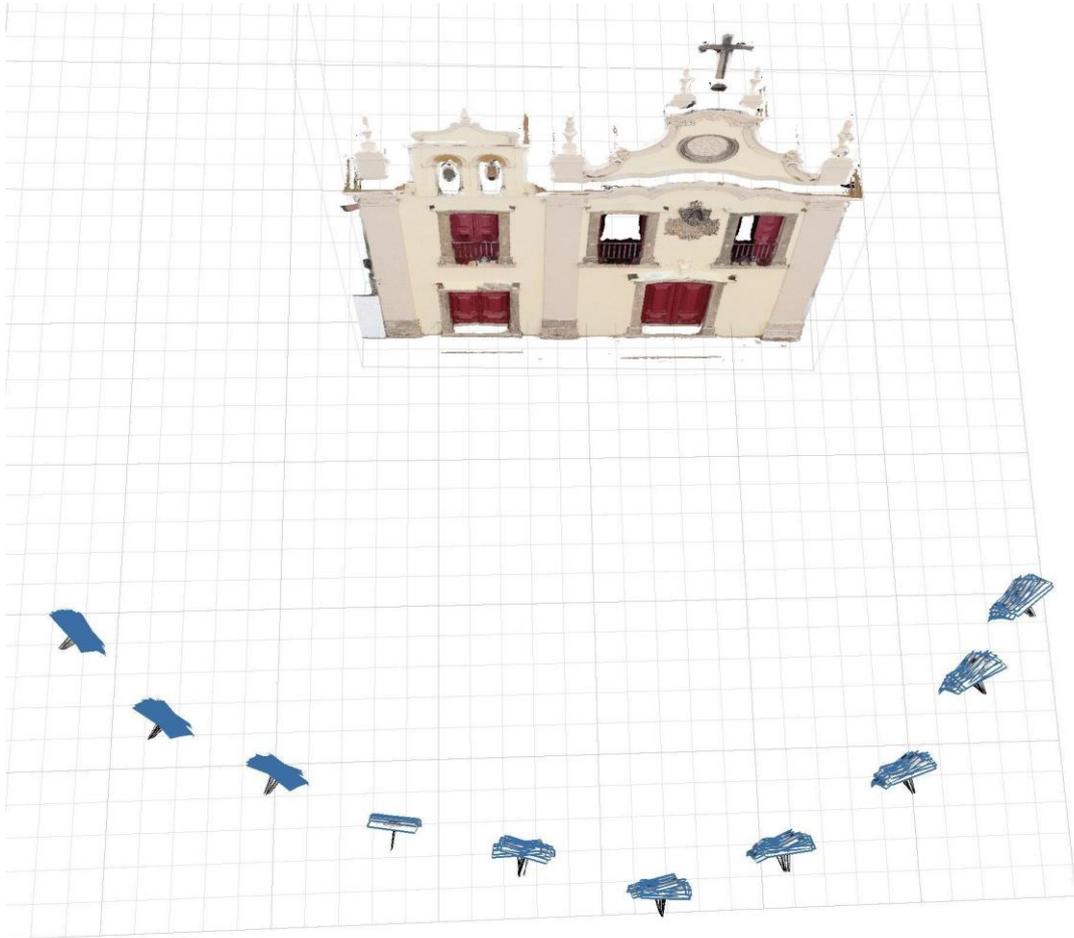
4.1 O PROCESSAMENTO

Com o mesmo conjunto de fotos, para uma mesma lente, testou-se condições distintas, possibilitando assim a análise das diferenças de tempo de cada processamento, a qualidade dos detalhes atingida com alteração de parâmetros de processamento, a memória e o tempo consumida em cada processamento, resultados de texturização, falhas e outros aspectos observados nos resultados, nessa primeira etapa, ainda visuais. O objetivo nessa primeira etapa dos resultados foi o de definir quais os parâmetros no processamento serão utilizados nos testes da segunda etapa, com pontos de controle e barras de escala, bem como determinar a acurácia de todos os testes nos dois grupos de métodos de controle.

4.1.1 A tomada de fotos

Quando combinados as duas técnicas mencionadas no subitem 5.3.1, conforme a Figura 54, obteve-se resultados isentos de buracos nas reentrâncias do modelo. O formato de tomadas de fotos côncavo, tendo as posições das fotos da fachada para a lente de 55mm, ficou isento de falhas e proporcionou a cobertura total da fachada em todas as suas faces internas. As imagens foram obtidas em posições distintas, com ângulos mínimos e máximos para a fachada, visando atingir 180°, olhando em planta, e criando pequenas distâncias entre os pontos observados. Em cada ponto, uma sequência de imagens é tomada de tal forma que haja a cobertura de toda a fachada. Para a lente de 55mm foram tomadas 137 fotos.

Figura 54 - Alinhamento das 137 fotos da lente de 55mm:



Fonte: O Autor (2022)

4.1.2 Alinhamento

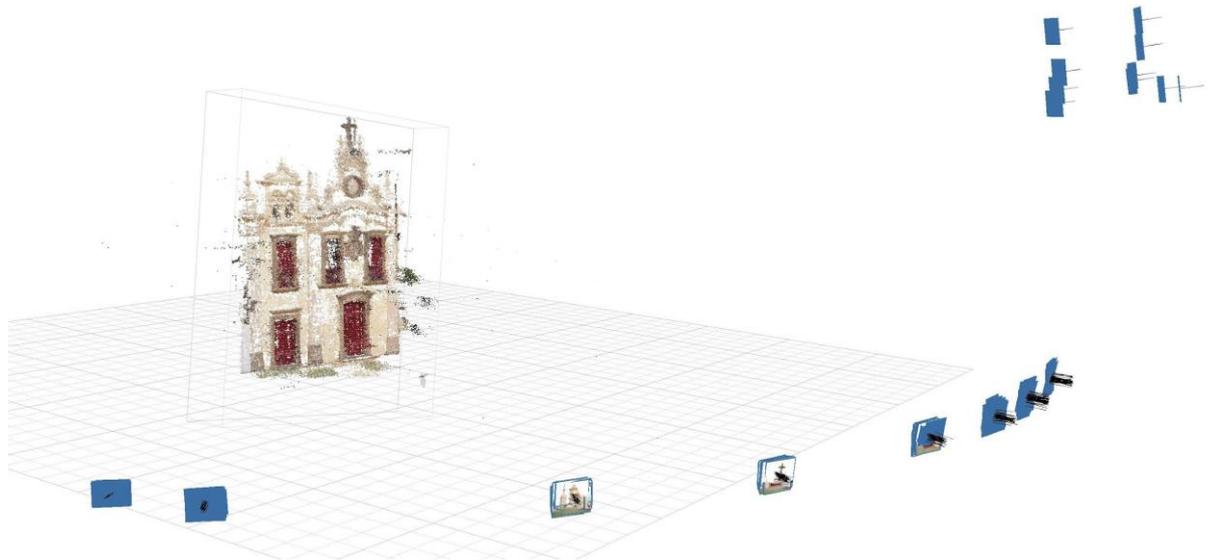
O entendimento da posição espacial de cada foto é dado por uma análise de pontos que sejam iguais em fotos distintas, auxiliadas pela posição espacial registrada no momento da foto, por GPS. São chamados de pontos de equivalência (*tie points*). No caso de câmaras DSLR, não é comum o equipamento possuir GPS integrado para se obter o registro da coordenada em seu EXIF, diferente do caso de drones que possuem esse recurso integrado para sua navegação. Para determinar a posição relativa, o processo consiste na comparação entre fotos e a busca de áreas semelhantes. Esse alinhamento automático normalmente funciona de forma precisa, mas, quando estamos trabalhando com arquitetura existe um fator a considerar.

É muito comum, em arquitetura, existir vários elementos repetidos, como janelas, adornos ou aberturas que seguem uma lógica e são repetidos com espaços definidos. É chamado de ritmo arquitetônico e é muito característico na arquitetura

clássica. Ao processar as fotos, não é incomum encontrar erros de alinhamento, gerando erros também na interpretação do modelo. É preciso cuidado para verificar se o alinhamento automático está sendo executado corretamente comparando a posição das fotos com a posição que foram tomadas no local.

Na Figura 55, um erro de alinhamento automático nas fotos da lente de 250mm, com posições aéreas que não condizem com a fotogrametria terrestre aplicada. Nesse caso há um erro de alinhamento com 7.684px.

Figura 55 - Alinhamento com falhas, as fotos então em alturas incondizentes com a realidade



Fonte: O Autor (2022)

Existem formas de ajustar isso. A primeira seria tentar realinhar apenas as fotos errôneas. Em caso de insucesso, é necessário acrescentar pontos nessas imagens, e em seus pares, que forcem seu alinhamento para a sua posição correta. Esses pontos tem como objetivo apenas o alinhamento, sem informações de coordenadas ou distâncias conhecidas. Aqui, o chamaremos de pontos homólogos. Podem ser marcas, adesivos inseridos na fachada bem como pontos naturais contidos na edificação. Muito útil para quando não se tem acesso ao interior da edificação pelas condições ou altura.

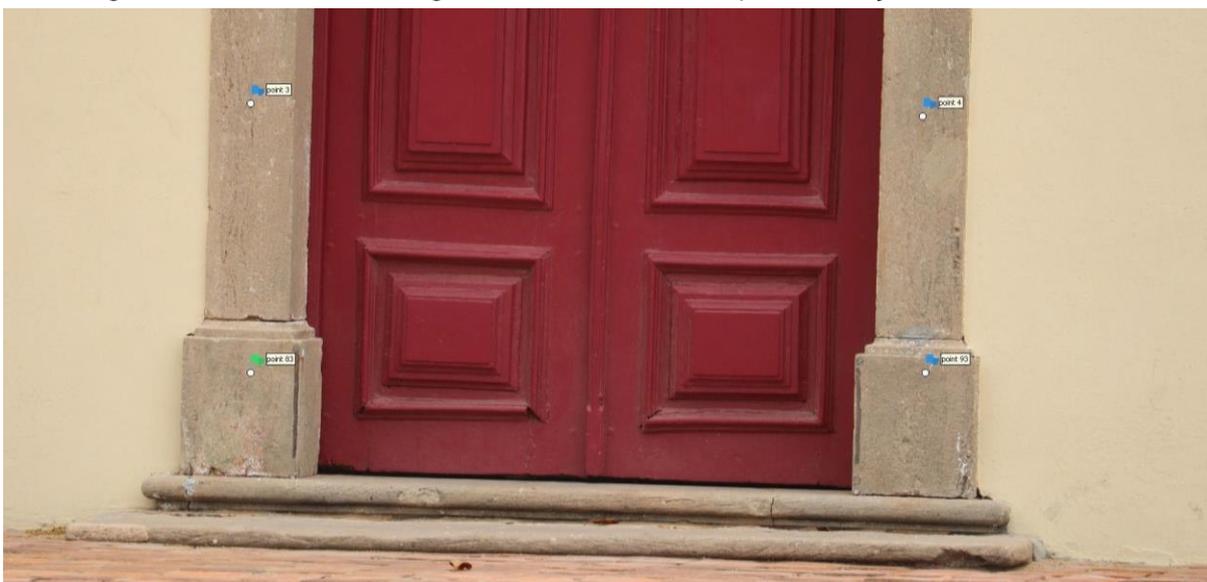
Um exemplo de pontos homólogos em imagens distintas pode ser conferido nas Figuras 56 e 57

Figura 56 - Pontos homólogos inseridos nas fotos para correção do alinhamento.



Fonte: O Autor (2022)

Figura 57 - Pontos homólogos inseridos nas fotos para correção do alinhamento.



Fonte: O Autor (2022)

Para o modelo da lente de 55mm, foram necessários 57 pontos homólogos para alinhar as 137 fotos. Para o caso do modelo de lente 250mm, foram necessários 101 pontos homólogos para alinhar corretamente todas as 237 fotos. O resultado, além do correto alinhamento, foi a redução do erro máximo para 2.768px, conforme Figura 58.

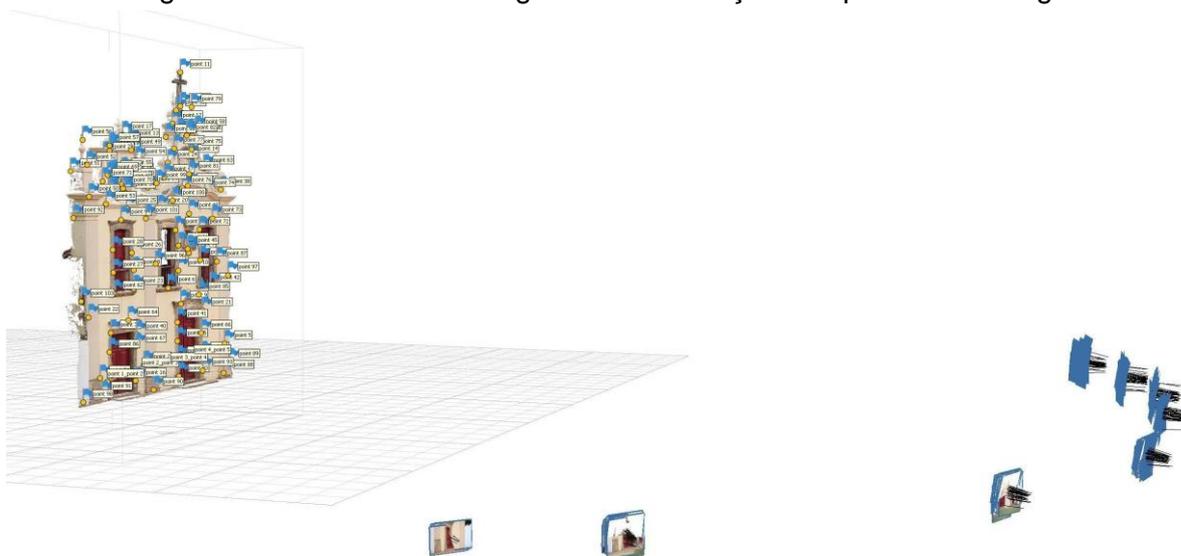
Figura 58 - Modelo com 101 pontos homólogos inseridos nas 237 fotos, para correto alinhamento.



Fonte: O Autor (2022)

Com os pontos inseridos, a correção do alinhamento acontece e é possível continuar a execução da malha de pontos, modelo com malha triangular mesh e texturização. Conforme Figura 59:

Figura 59 - Alinhamento corrigido com a inserção dos pontos homólogos.



Fonte: O Autor (2022)

Uma comparação de resultados do alinhamento executado de forma assistida e outra automática é apresentada no quadro 6:

Quadro 6 -Comparativo de técnicas automáticas e com pontos de auxílio no alinhamento.

CÓD	LENTE	PONTOS DE ALINHAMENTO	ERRO MÁXIMO (PIXELS)
250AU032	250mm	Automático	7.684
250PH032	250mm	Homólogos	2.768
55AU032	55mm	Automático	1.159
55PH032	55mm	Homólogos	1.258

Fonte: O Autor (2022)

4.1.3 Nuvem de pontos - Esparsa e densa

Durante o processamento do modelo duas nuvens distintas são criadas em etapas distintas. A nuvem esparsa (*sparse cloud*) e a nuvem densa (*dense cloud*) e suas derivadas, como a nuvem de confiança e a nuvem da MVC (matriz de variância-covariância). A nuvem esparsa é bem difusa, com poucos pontos que não contemplam os detalhes arquitetônicos. Tem como objetivo ser leve e é produzida

automaticamente pelo processo do alinhamento, é gerada pelos pontos de equivalência (*tie points*). É gerada de forma rápida, se consegue visualizar o modelo e fazer ajustes de rotação e posição, em caso de não se ter pontos de controle georreferenciados.

A nuvem densa é o conjunto de pontos que melhor retrata o modelo, suas formas, detalhes e cores. É contabilizada em milhões de pontos, requer um computador com uma potência razoável para manipular e, a partir dessa nuvem, pode-se enviar para outro software, ou outros processos, como gerar um modelo triangular mesh, texturizar, gerar MDE, MDT, dentre outros produtos.

Um dos testes, 250PU032, apresentou uma nuvem esparsa com 0,17 milhões de pontos contra 433 milhões na nuvem densa. A diferença entre as duas pode ser vista na Figura 60.

Figura 60 - Ensaio 250PU032 (a) Nuvem esparsa (0,17 mi) (b) Nuvem densa (433 mi)



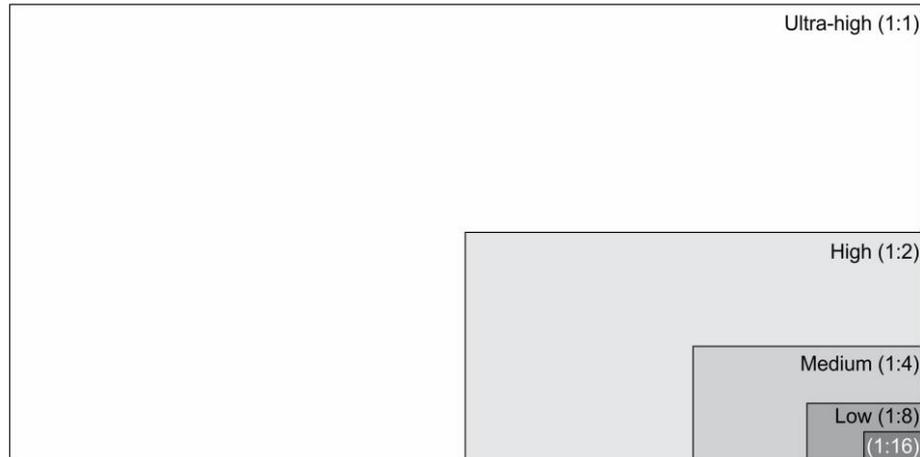
Fonte: O Autor (2022)

A nuvem de pontos gerada pelas fotos, possuem graus distintos de profundidade (depth maps) que é definido pelo usuário, sendo eles: lowest, low, medium, high e ultra-high. Em tradução direta: baixíssimo, baixo, médio, alto e ultra alto. A diferença no processamento, está na resolução da imagem, o ultra-high trabalha com a imagem total, 1:1, a high executa um escalonamento dessa imagem em 1:2, trabalhando com $\frac{1}{4}$ dos pixels, e assim sucessivamente até o lowest. É de

se esperar que o ultra trará qualidade melhor que todos, mas com um custo computacional considerável.

Para visualizar o escalonamento da imagem, é apresentado o esquema conforme Figura 61.

Figura 61 - Escalonamento da imagem para níveis de processamento distintos



Fonte: Adaptado de: <https://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=11007.0>

Uma das discussões levantadas neste tópico é sobre o custo computacional e de espaço de armazenamento para os processamentos. É comum, por limitações de tempo, máquina disponível ou até necessidade, usar o processamento em nível *medium* ou até descer para *low*. Raros são os casos que o *high* ou o *ultra-high* são necessários. Se já se tem o conhecimento que vai reescalonar a imagem para processar, porquê consumir espaço e tempo tomando fotos em sua máxima resolução? Não é uma pergunta a ser respondida no presente trabalho, mas uma reflexão para os processos de tomada de fotos para reconstrução.

Para a produção da nuvem, é necessária a criação dos mapas de profundidade de cada imagem, que acompanham o nível hierárquico da nuvem. Se a nuvem é criada no *high*, os mapas de profundidade obrigatoriamente serão *high*. Um subprocesso embutido no cálculo que demanda bastante tempo e memória para a sua criação. Um exemplo de um mapa de profundidade pode ser conferido na Figura 62:

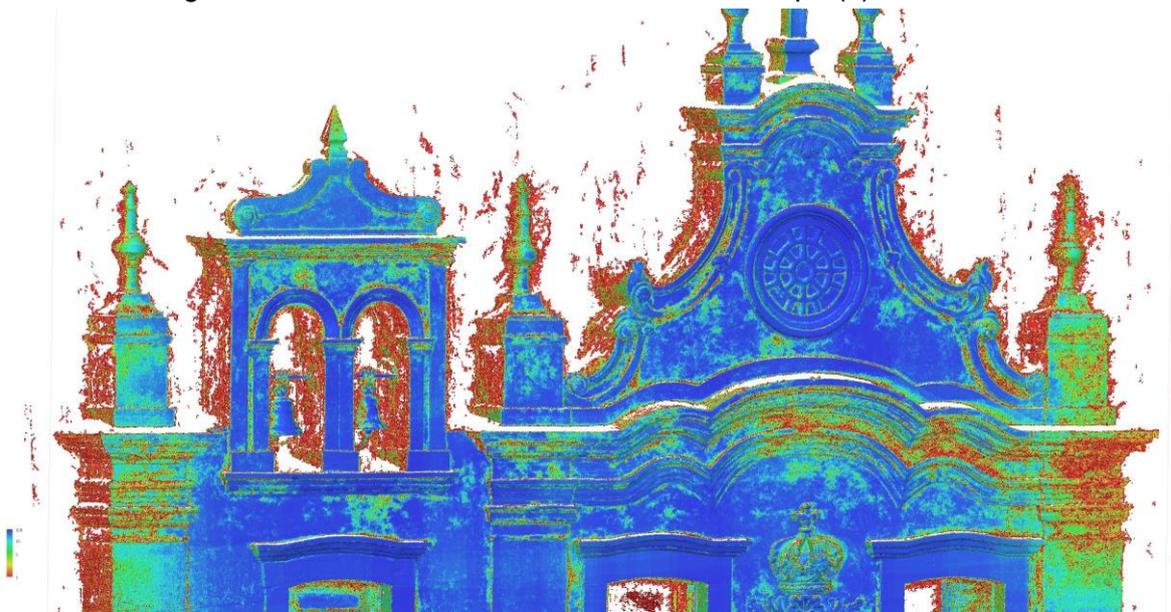
Figuras 62 - (a) Exemplo de foto original (b) Seu mapa de profundidade também em High



Fonte: O Autor (2022)

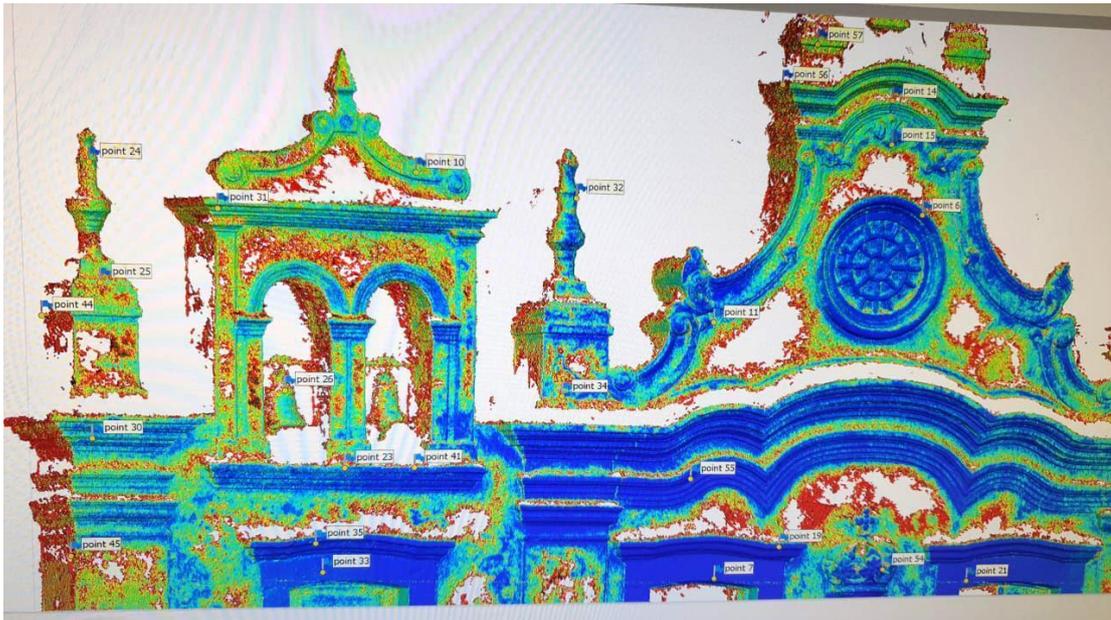
A criação da nuvem densa é diferente de acordo com o software. Até no mesmo há variação no resultado de acordo com sua versão. As versões mais novas do Metashape conseguem chegar em um nível de detalhe mais alto em menos tempo. Contudo, algumas falhas no modelo foram observadas com esse novo processo, especialmente em áreas lisas, com pouca ou nenhuma variação de cor. Infelizmente, áreas de pintura lisa com pouco contraste são bem comuns em arquitetura. As diferenças nos resultados das nuvens densas, de cálculos iguais mas com versões de softwares diferentes são apresentadas nas Figura 63 e 64:

Figura 63 - Nuvem densa no cálculo do Metashape (a) Versão 1.5.2



Fonte: O Autor (2022)

Figura 64 - Nuvem densa na versão 1.7.0

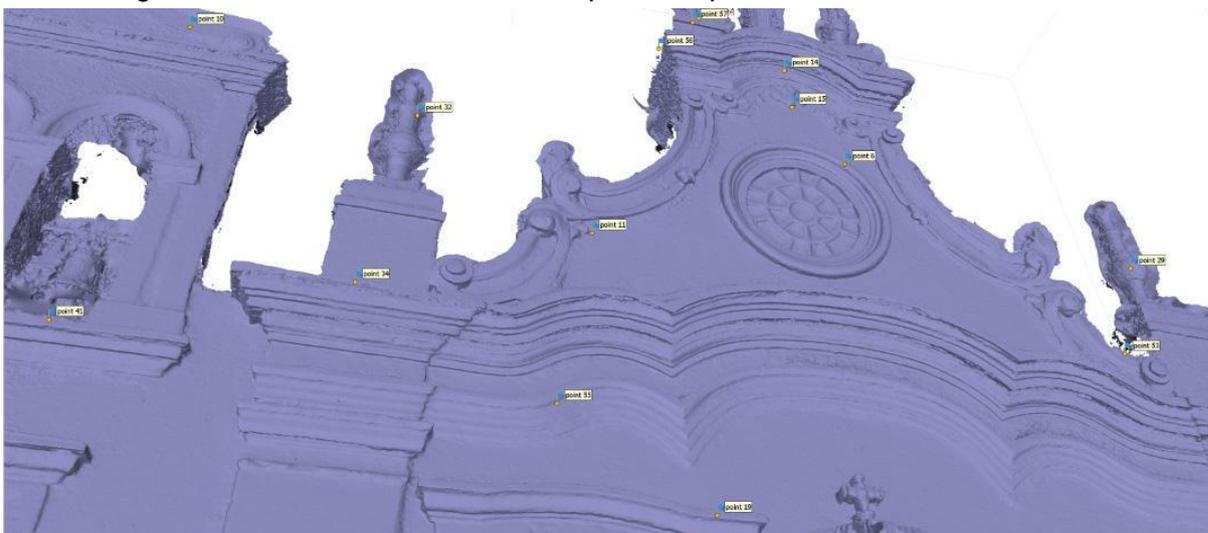


Fonte: O Autor (2022)

É possível notar que todos os erros aparecem em áreas sem variações de cores ou volumétricas, caracterizada por sua cor avermelhada indicando um nível de confiança mais baixo. Nível esse abordado no item 6.4. Essa falha é repassada para a modelagem *mesh* e para texturização. Por mais que existam scripts de fechamento de buracos na malha, o resultado é ruim, o que não representa a realidade.

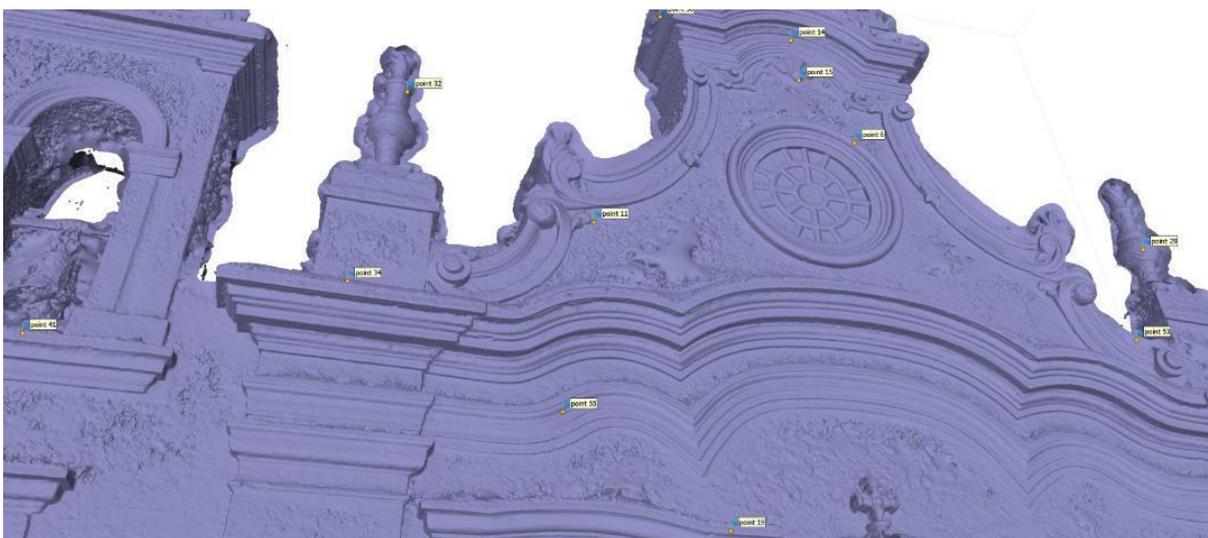
Apesar da maior qualidade e detalhes das quinas e adornos da edificação apresentada na versão mais recente, essas bolhas prejudicam todo o modelo, conforme apresentadas na Figura 65 e 66.

Figura 65 - Modelo na versão 1.5.2 que não apresenta erros nas faces lisas.



Fonte: O Autor (2022)

Figura 66 - Melhor definição das bordas no modelo da versão 1.7, mas apresenta falhas e bolhas.



Fonte: O Autor (2022)

Pela necessidade de visualização do correto volume arquitetônico, bem como seus característicos detalhes, os testes realizados foram concentrados no alto e ultra alto. No quadro 7, a compilação dos resultados dos testes variando a forma de alinhamento, o tipo de cálculo e, como resultado: O tempo de processamento, memória consumida, espaço consumido para os *Depth Maps*. No quadro 8, os resultados dos mesmos testes para a nuvem de pontos, contendo também a quantidade de pontos gerados.

Quadro 7 - Consumo do sistema para os Depth maps

CÓD	LENTE	PONTOS DE ALINHAMENTO	ERRO MÁXIMO (PX)	DEPTH MAPS	MEMÓRIA UTILIZADA (GB)	ESPAÇO UTILIZADO (GB)	TEMPO DEPTH MAPS (H)
250AH032	250mm	Automáticos	7.684	High	5.68	0.81	0:51
250AU032	250mm	Automáticos	7.684	Ultra-high	20.94	3.42	3:16
250PH032	250mm	Homólogos	2.768	High	5.77	0.385	1:03
250PU032	250mm	Homólogos	2.768	Ultra-high	24.76	3.51	3:12
55AH032	55mm	Automáticos	1.159	High	4.93	0.57	1:01
55AU032	55mm	Automáticos	1.159	Ultra-high	18.71	2.27	2:51
55PH016	55mm	Homólogos	1.258	High	4.61	0.562	1:03
55PU032	55mm	Homólogos	1.258	Ultra-high	17.18	2.24	2:34

Fonte: O Autor (2022)

Quadro 8 - Consumo do sistema e quantidade de pontos para o Dense Cloud

CÓD	LENTE	PONTOS DE ALINHAMENTO	ERRO MÁXIMO (PX)	DENSE CLOUD	MEMÓRIA UTILIZADA (GB)	ESPAÇO UTILIZADO (GB)	QTE PONTOS (10 ⁶)	TEMPO DENSE CLOUD (H)
250AH032	250mm	Automáticos	7.684	High	15.78	1.37	95.98	0:29
250AU032	250mm	Automáticos	7.684	Ultra-high	44.20	6.07	422.11	2:17
250PH032	250mm	Homólogos	2.768	High	15.94	1.34	95.06	0:31
250PU032	250mm	Homólogos	2.768	Ultra-high	44.02	6.18	433.61	2:24
55AH032	55mm	Automáticos	1.159	High	9.69	0.63	44.18	0:32
55AU032	55mm	Automáticos	1.159	Ultra-high	37.56	2.58	183.4	1:10
55PH016	55mm	Homólogos	1.258	High	11.69	0.64	43.15	0:29
55PU032	55mm	Homólogos	1.258	Ultra-high	37.60	2.61	180.21	1:14

Fonte: O Autor (2022)

Analisando os resultados, a quantidade de pontos da nuvem cresce com a quantidade de fotos tomadas e o tipo de cálculo. Nos testes da lente com 55mm foram tomadas 137 fotos gerando, em média, nuvens com 44 milhões de pontos no high e 180 milhões de pontos no ultra-high. Nos testes com a 250mm foram tomadas 279 fotos, gerando 95 milhões de pontos no high e 430 no ultra-high.

Os testes foram realizados com a mesma câmara, mesma lente, mesmo sensor, mesma resolução e variação apenas da distância focal e quantidade de fotos tomadas.

4.1.4 O nível de confiança

A partir da versão 1.6 de 2019 um recurso foi adicionado no Metashape para controle estatístico dos pontos gerados. A cada um dos pontos, um nível de confiança é atrelado, facilitando o filtro dos pontos de acordo com seu nível de confiança.

A nuvem gerada tem cores e é possível notar o poste de iluminação em lugar errado, devido ao erro de alinhamento inicial, conforme Figura 67

Figura 67 - Nuvem de pontos colorida

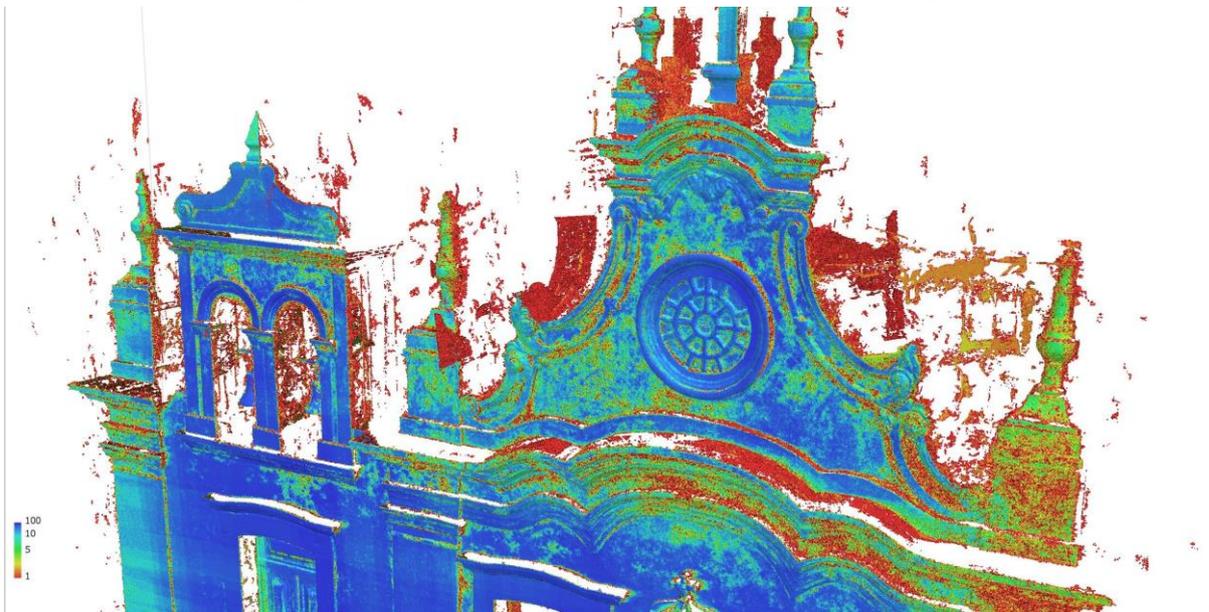


Fonte: O Autor (2022)

Esses pontos são representados por cores, um espectro que vai de vermelho a azul com valores que variam de 0 a 255. Na nuvem de pontos com o nível de

confiança do teste 250AH032 é possível confirmar o erro de alinhamento pela mancha vermelha com nível de confiança entre 0-1. A nuvem sem alteração é apresentada na Figura 68.

Figura 68 - Nuvem de pontos com nível de confiança

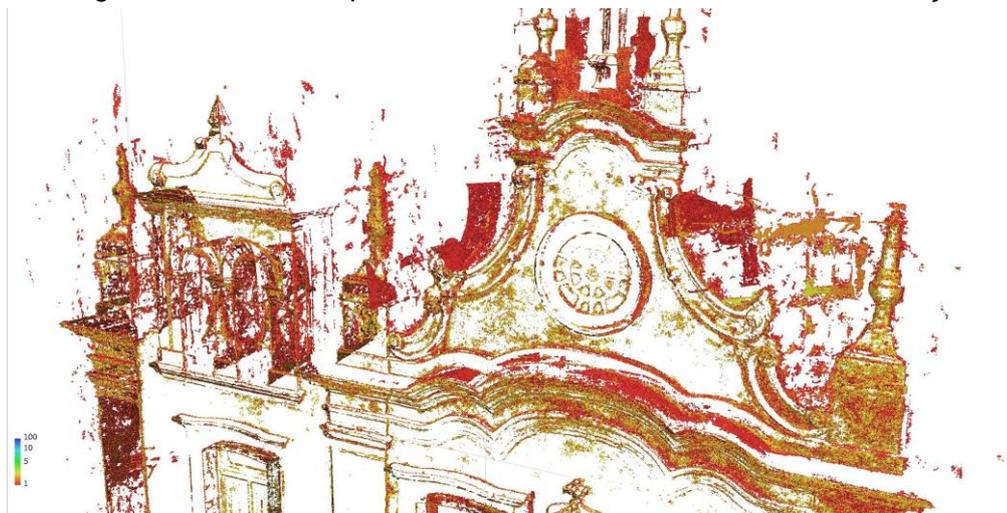


Fonte: O Autor (2022)

Os limites dos níveis de confiança vão de 0 a 255, mas a escala colorida na lateral seus limites são 1 e 100. Essa escala é não-linear e a justificativa do desenvolvedor é que o interesse é restrito normalmente nos níveis 0 até 5.

Pode-se filtrar os pontos para eliminar os indesejados. Na Figura 69, apenas os pontos com intervalo de nível de confiança 0-3:

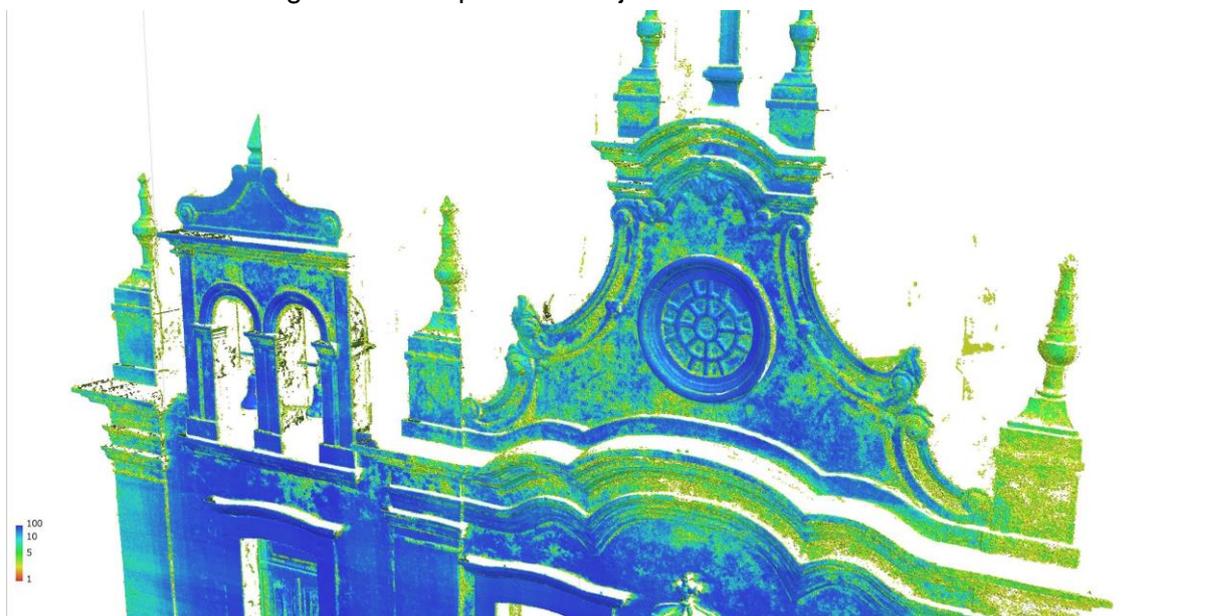
Figura 69 - Filtro dos pontos com intervalo 0-3 do nível de confiança



Fonte: O Autor (2022)

Eliminando os pontos indesejados, o filtro desativado apresentando o resultado com o intervalo 3-255, conforme Figura 70:

Figura 70 - Os pontos desejados com intervalo 3-255:



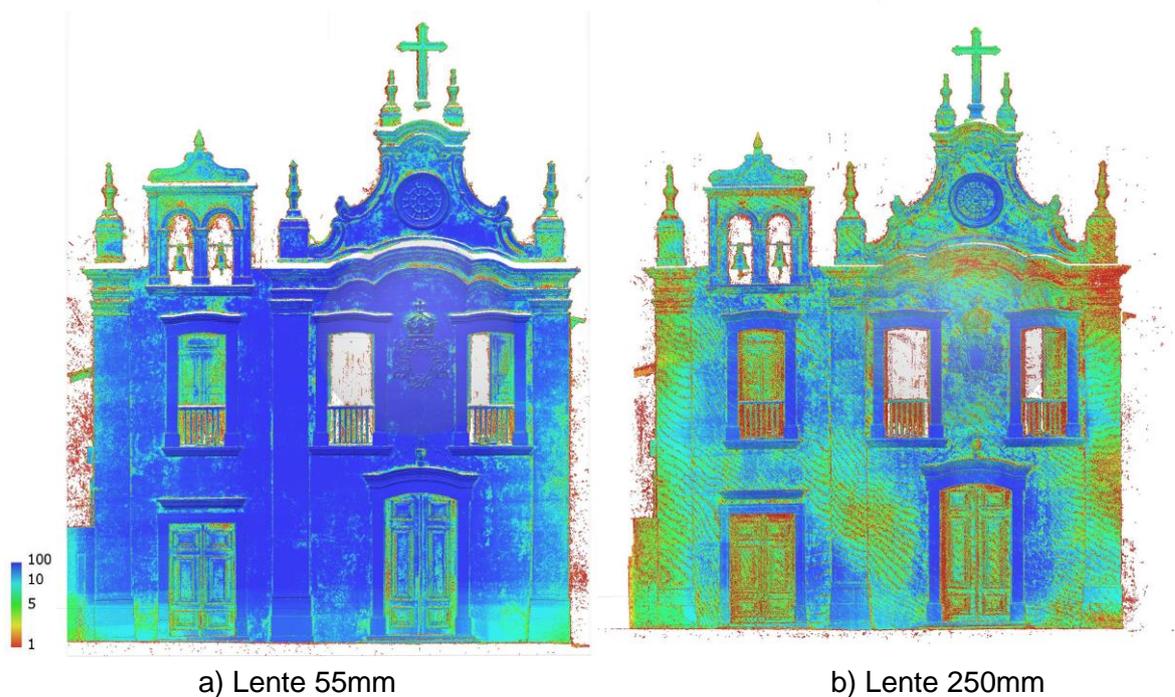
Fonte: O Autor (2022)

Cada intervalo de números inteiros pode ser isolado e excluído, e a vantagem de filtrar os tais pontos é facilitar a retirada dos menos confiáveis e deixar para o processamento da malha apenas os pontos com melhor índice. Isso justifica o maior processo em ultra ou até high para se gerar uma grande quantidade de pontos e filtrá-los posteriormente.

Outra justificativa para o filtro dos pontos é a diminuição da quantidade para o processamento da malha. Na geração do *mesh* alguns testes não conseguiram ser executados, apesar de inúmeras tentativas e da potência dos computadores, os testes com mais pontos falharam. O teste com 180 milhões de pontos foi a maior quantidade com sucesso, o teste com 213 milhões de pontos foi o mais baixo com falha, indicando que, para os computadores em questão, o limite físico para viabilizar uma malha *mesh* gira na ordem dos 200 milhões de pontos.

Os níveis de confiança das nuvens de pontos dos modelos gerados pelas lentes de 55mm e 250mm são apresentados na Figura 71.

Figuras 71 - Comparação dos níveis de confiança em lentes distintas

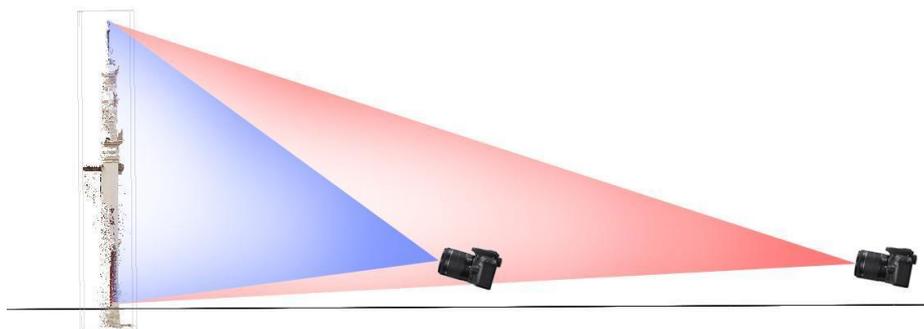


Fonte: O Autor (2022)

As dimensões dos modelos não tiveram diferenças dimensionais visíveis entre si, apesar da lente de 55mm possuir distorções maiores que a 250mm, alguns defeitos da arquitetura, como o pináculo direito que possui uma leve inclinação, foi identificado corretamente em ambas as nuvens. As diferenças foram no nível de confiança, maior na lente de 55mm, e a área de sombra ser menor na 250mm. É possível notar que nas partes superiores de janelas e cornijas, a lente de 250mm, pela sua distância do objeto, foi possível capturar imagens e entregar uma nuvem mais completa em termos de cobertura, mas em menor nível de confiança.

A posição terrestre, nesse caso, auxilia as lentes mais fechadas. Requerem maior distância e, dessa forma, evitam-se áreas de sombra em elementos mais altos, conforme esquema gráfico na Figura 72.

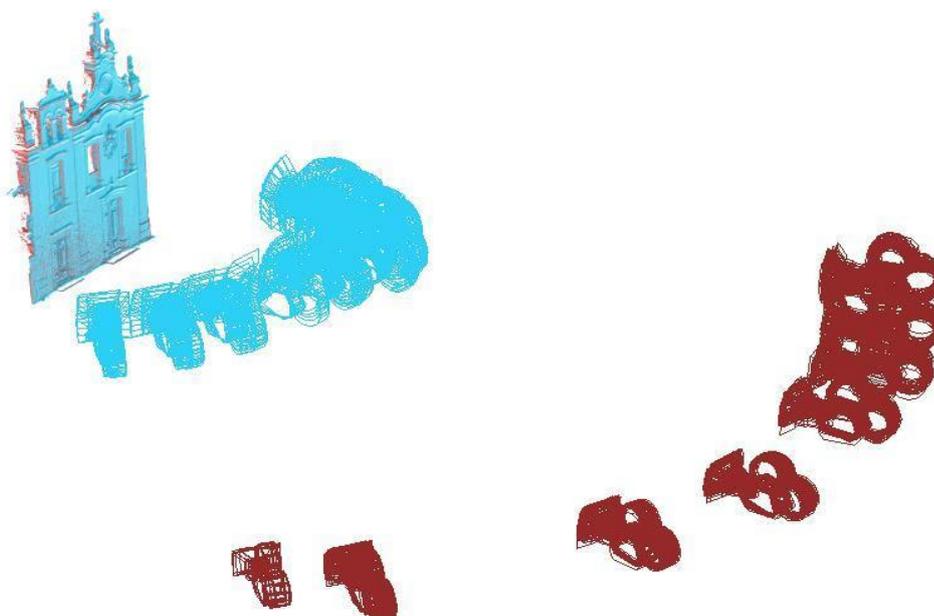
Figura 72 - Esquema comparativo entre lentes de diferentes aberturas observando o mesmo objeto



Fonte: O Autor (2022)

Os modelos distintos foram combinados em forma de sobreposição para se observar as diferenças. Não foram encontradas quaisquer visuais diferenças dimensionais entre os modelos de 55mm, em azul, e 250mm, em vermelho. Conforme Figura 73.

Figura 73 - Sobreposição dos modelos para comparação



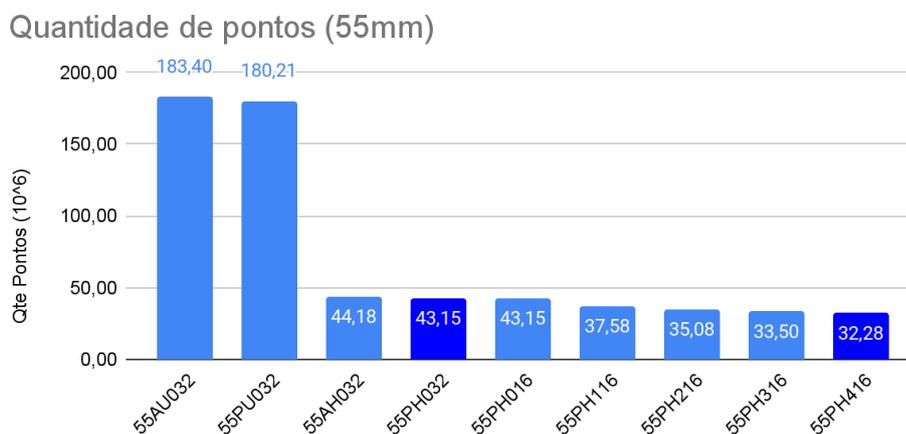


Fonte: O Autor (2022)

Apesar da diferença entre os níveis de confiança, a escolha da lente de dará pelo entorno da edificação-objeto. Se houver espaço à frente e dos lados, é preferível uma lente mais fechada como a 250mm. Se o espaço disponível for pouco, como uma rua estreita, mas tiver acesso superior nos prédios à frente, a lente mais aberta cumpre o objetivo, não havendo diferenças perceptíveis nos modelos gerados pelas duas lentes.

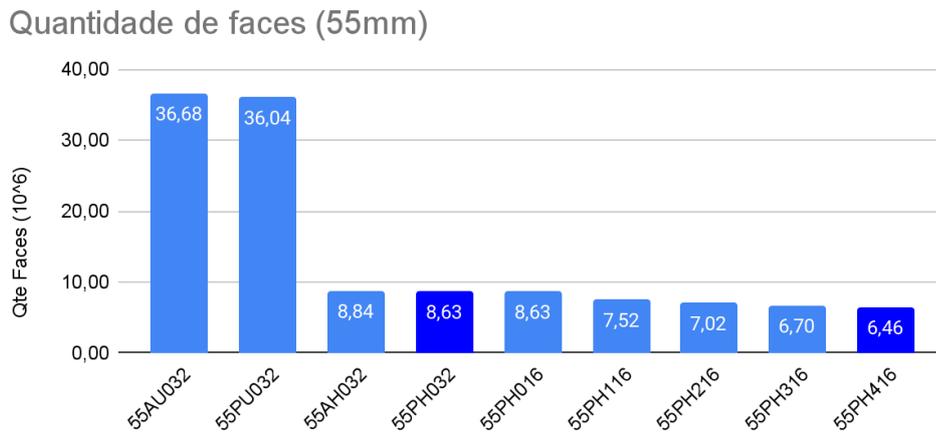
Quando se remove os pontos com nível de confiança mais baixo há uma diferença de pontos úteis para ser utilizada, que impactará na malha, na memória e no tempo de processamento das etapas. Nos testes da 55mm, com filtro entre 0 e 4, conforme Figuras 74, 75, 76 e 77:

Figura 74 - A quantidade de pontos nos testes (55mm)



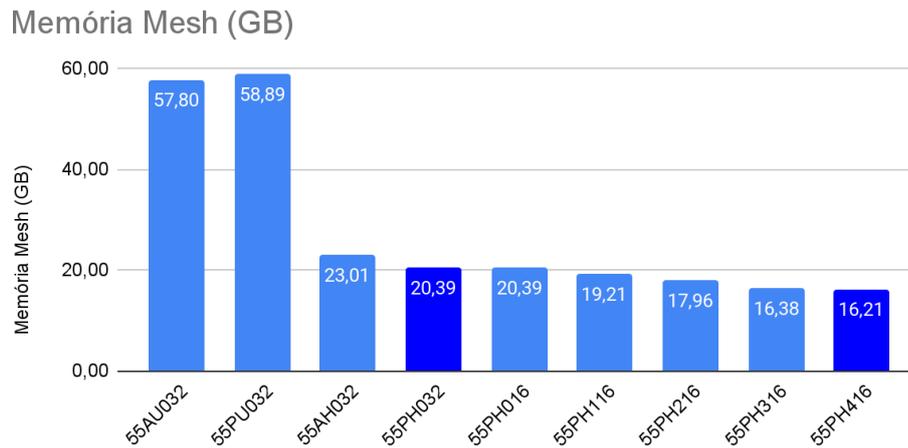
Fonte: O Autor (2022)

Figura 75 - A quantidade de faces nos ensaios (55mm)



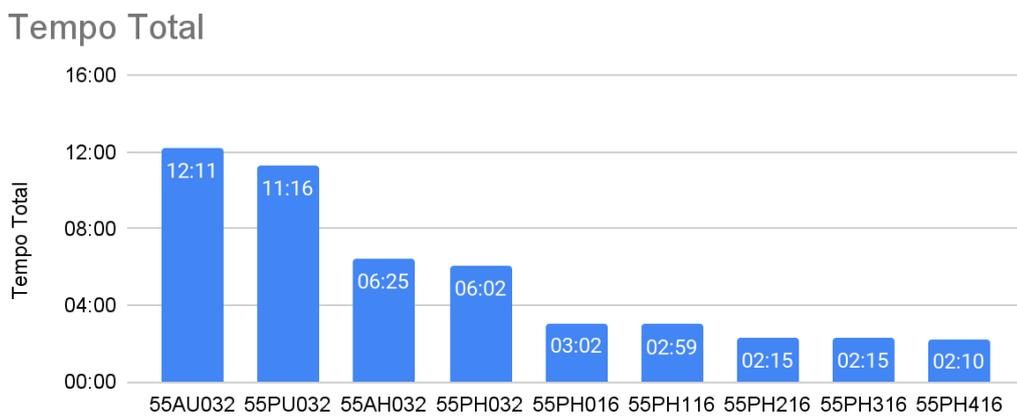
Fonte: O Autor (2022)

Figura 76 - A quantidade de memória utilizada na criação da malha (55mm)



Fonte: O Autor (2022)

Figura 77 - O tempo consumido para a criação do modelo texturizado ao final do processo (55mm)

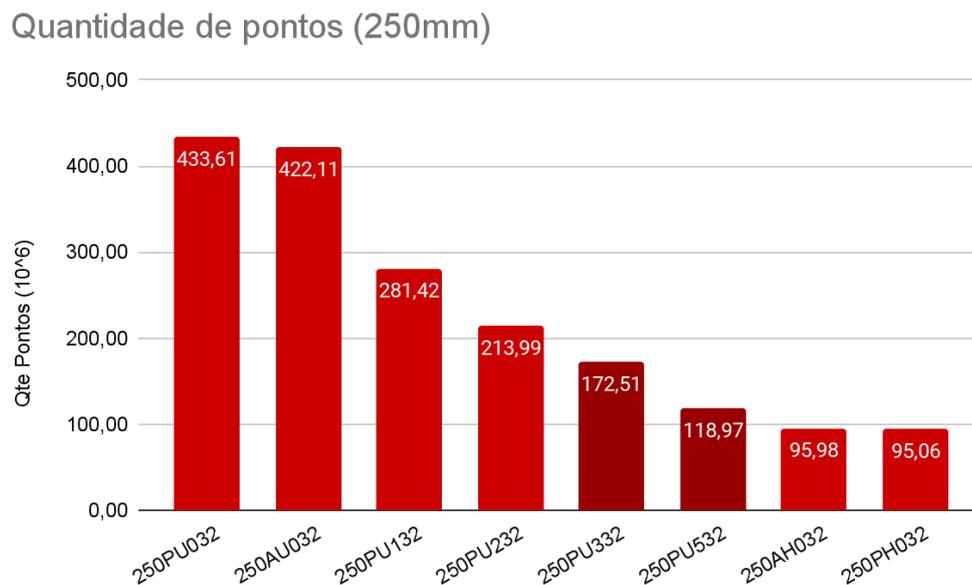


Fonte: O Autor (2022)

Como resultado dos gráficos, comparando os resultados de todos os pontos (ensaio 55PH016, 0 até 255) com o modelo filtrado (ensaio 55PH416, 4 até 255), é possível verificar as diferenças: Diminuição 25,2% de pontos finais de 43,15 mi para 32,28 mi, redução de 20,5% da memória utilizada de 20,39 Gb para 16,21 Gb, redução em 25,3% do tempo total de processamento, de 3:02h para 2:16h.

No caso da lente 250mm, por ter mais fotos, houve uma criação do *dense cloud* com número bastante expressivo de pontos, chegando a 433 milhões. Ao tentar gerar a malha, alguns resultados apresentaram erros, descontinuando o experimento imediatamente. O limite de uma ordem de grandeza de 200 mi de pontos foi apresentado quando todos os testes que passavam desse limite falharam de forma sistemática, conforme Figura 78.

Figura 78 - A quantidade de pontos gerados nos ensaios (55mm)

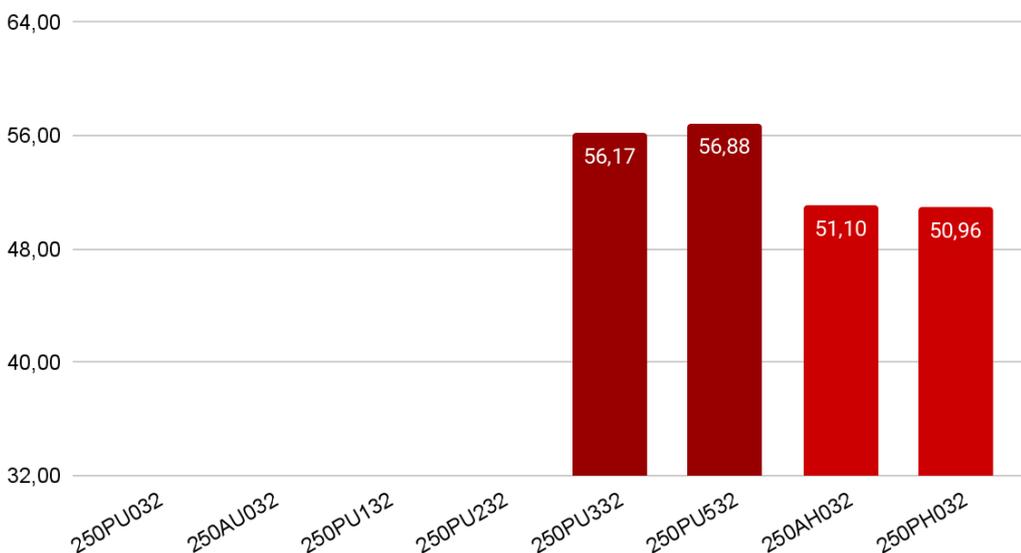


Fonte: O Autor (2022)

A memória utilizada nos testes chegava à quase 57Gb, consumindo toda a memória da máquina que o processa, que possui 64Gb, conforme Figura 79:

Figura 79 - A quantidade de memória utilizada na criação da malha (55mm)

Memória consumida (250mm)

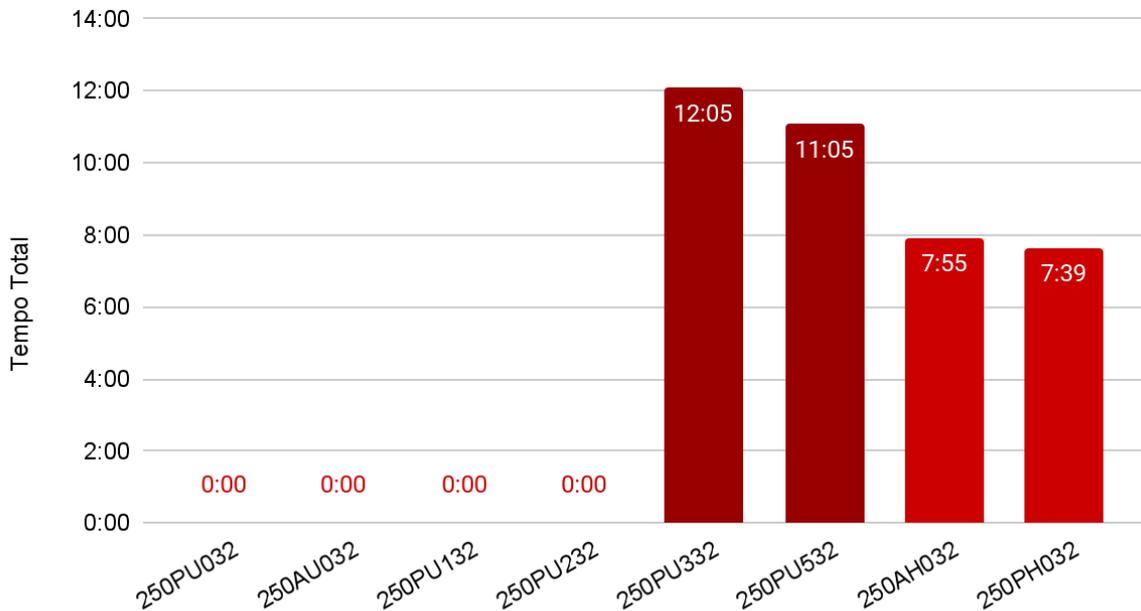


Fonte: O Autor (2022)

Dos 64 Gb totais disponíveis para o computador que o processa, uma parte é consumida pelo sistema operacional, outra pelos softwares abertos no momento do cálculo e o restante, utilizado. O resultado desse processamento com o consumo de memória no limite é a extrapolação do tempo utilizado para o processamento. É possível observar o aumento considerável de tempo em comparação aos testes que não atingiram o limite, conforme Figura 80.

Figura 80 - O tempo consumido para processamento total dos testes

Tempo total (250mm)



Fonte: O Autor (2022)

4.1.5 A malha *mesh*

Após a conclusão do processamento dos pontos, a limpeza do nível de confiança, é necessário a conversão desses pontos em uma malha triangular *mesh*, interligando os pontos e representará o modelo objeto como um modelo tridimensional, desse modelo é possível a extração e detalhamento das formas, desenhos, volumes, quantitativos e outros produtos. Essa malha é composta por triângulos, e sua contagem de faces é numericamente igual a 1/5 (20%) da quantidade de pontos em *high*, 1/15 em *medium* (6,66%) e 1/45 (2,22%) em *low*.

É de se esperar que, pelo objetivo de produzir elementos arquitetônicos, seja utilizada a quantidade máxima possível de faces para correta representação do objeto e de seus detalhes. Contudo, tal prática além de gerar peso nos arquivos produzidos, e uma dificuldade de manipulação do modelo, manter um modelo com mais faces não necessariamente terá mais definição. Os resultados que demonstram tal afirmação são discutidos e apresentados mais à frente no presente trabalho.

Muitas faces levam a um processamento partido, onde há a divisão do modelo em etapas distintas para, posteriormente, juntá-los em um único modelo. Com

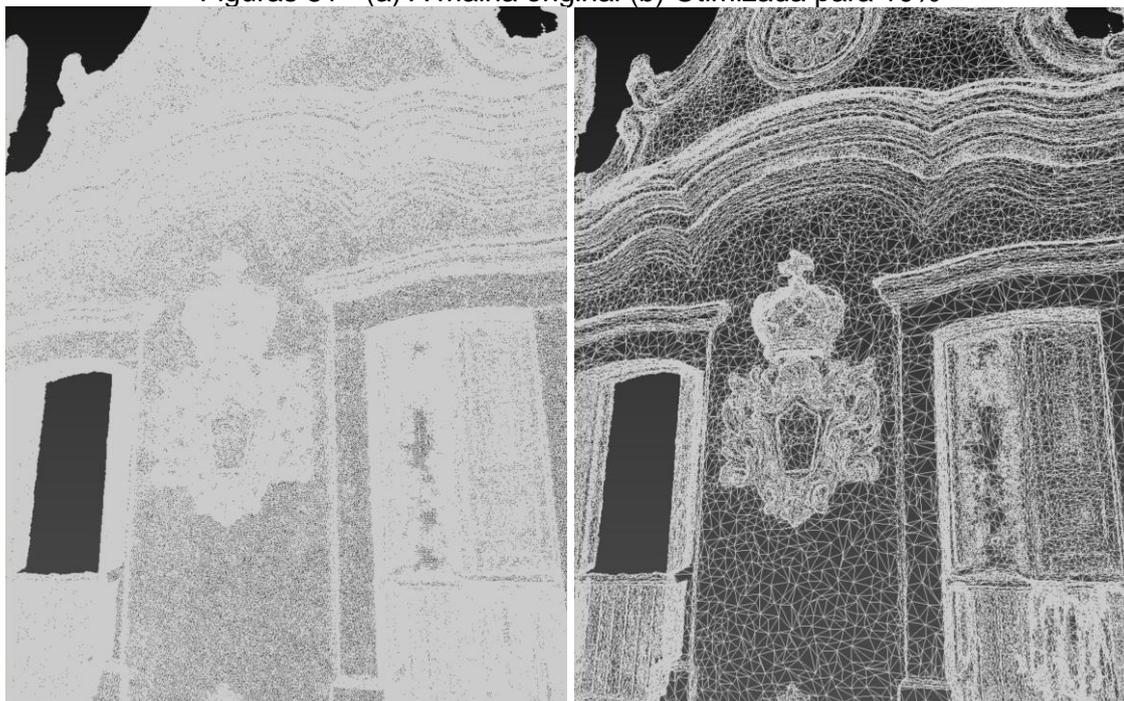
edificações de grande porte, essa quantidade de triângulos pode inviabilizar a utilização do modelo combinado. Por outro lado, executar o modelo em qualidade baixa, irá gerar uma nuvem de pontos com pouca definição e, conseqüentemente, um modelo que não terá a qualidade necessária para a correta representação dos objetos.

Uma das soluções é a simplificação otimizada da malha mesh produzida. Consiste em reduzir a quantidade de triângulos e de vértices, mas não de forma uniforme. Os algoritmos mais eficazes reduzem a malha com ênfase em superfícies mais planas, onde não se há a necessidade de manter uma malha muito densa, mantendo assim o detalhamento nos adornos onde estão as formas mais orgânicas. Algoritmos mais simples são mais ágeis, mas reduzem a malha por igual e foge do objetivo do presente trabalho.

Existem vários modelos matemáticos diferentes, com resultados igualmente distintos em cada script de automação nos softwares. Contudo, esses scripts de manipulação 3D não informam exatamente qual o algoritmo utilizado, pode-se estimar, pelo resultado e tempo de processamento, mas sem a confirmação da desenvolvedora.

No ensaio inicial da 55mm, não catalogado, foi reduzida a malha com 6,7mi pontos para 10% do total, resultando em 0,67 mi. A redução foi propositalmente exagerada para se analisar o resultado da perda de qualidade visual do modelo, conforme Figura 81.

Figuras 81 - (a) A malha original (b) Otimizada para 10%



Fonte: O Autor (2022)

Aplicando sua textura original com 32k, igual nos dois modelos, temos os resultados do render da imagem conforme Figura 82:

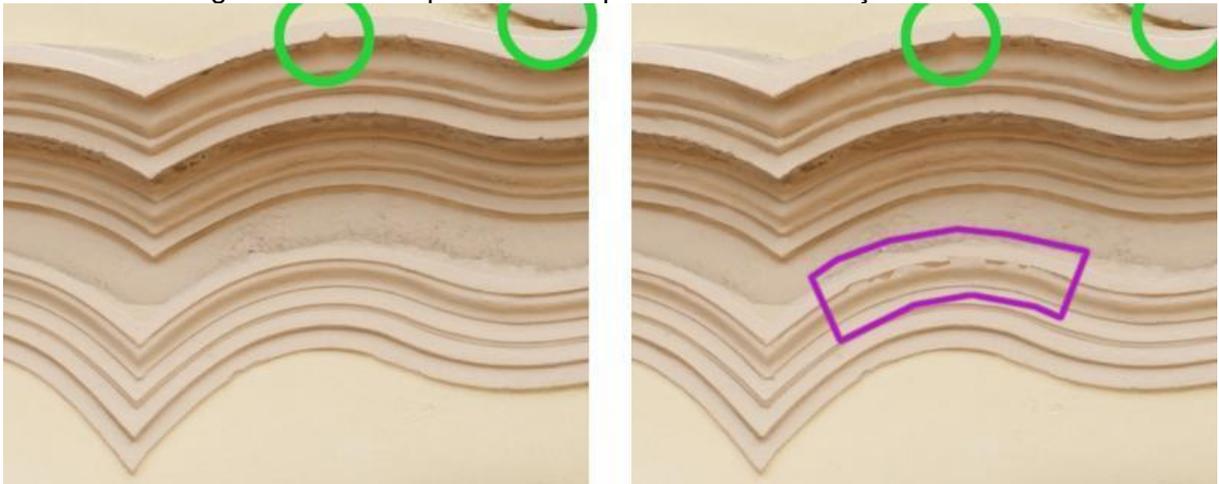
Figura 82 - As imagens resultantes (a) Malha original (b) Malha otimizada



Fonte: O Autor (2022)

Apesar de parecer o resultado do mesmo modelo em um primeiro momento, é possível notar algumas falhas pontuais pela otimização agressiva. Algumas quinas dos adornos foram comprometidas podendo levar a um erro de análise. Na comparação de um trecho, as falhas apontadas nas áreas verdes são defeitos já existentes na edificação e as falhas geradas pela otimização da malha estão marcadas em roxo, conforme Figura 83.

Figuras 83 - Exemplo de falhas pontuais na otimização da malha

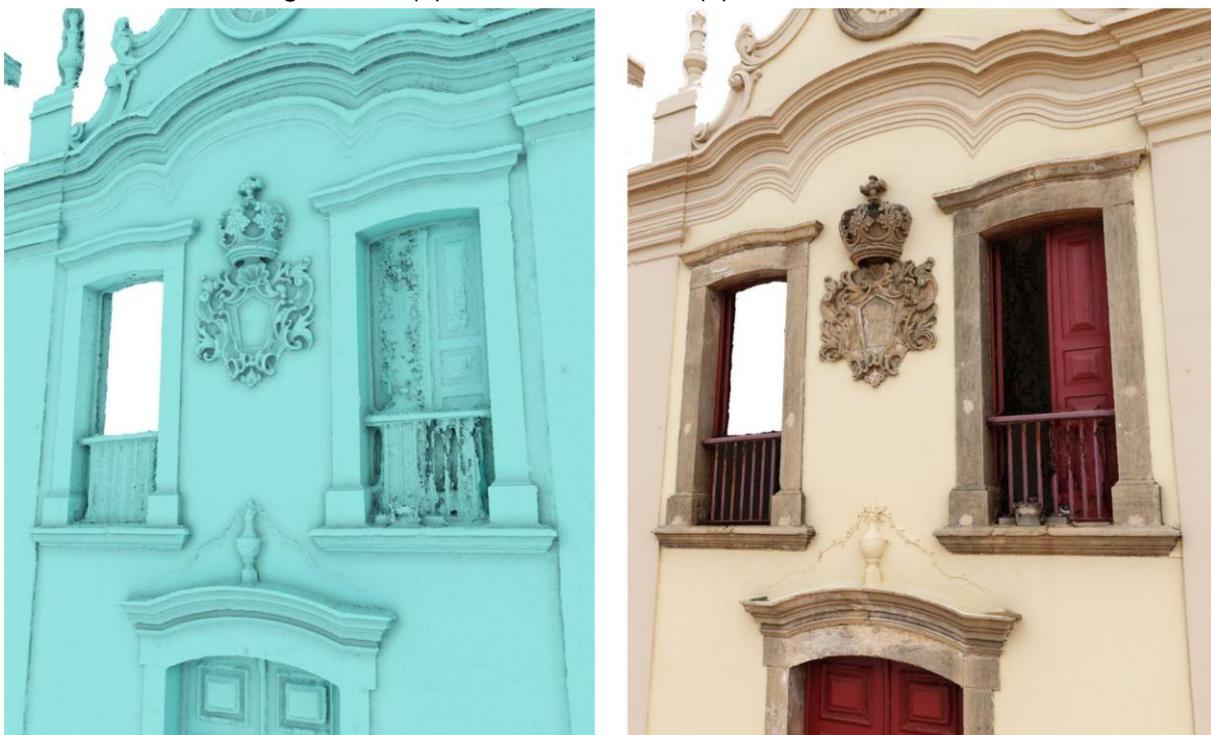


Fonte: O Autor (2022)

4.1.6 A texturização do modelo

O último processo consiste em criar uma imagem que dará cores à malha mesh. Funciona como um envelope e, de forma exclusiva, cada textura é gerada para apenas um modelo. Essa textura pode ter qualquer tamanho e proporção, mas no Metashape, se apresenta em formato quadrado e possui um direcionamento em que cada pixel colorido é direcionado para uma posição pré-definida no modelo. O modelo sem textura e com textura da lente 55mm são apresentados na Figura 84.

Figura 84 - (a) Mesh sem textura (b) Mesh texturizado



Fonte: O Autor (2022)

Esse procedimento de direcionar o mapa para cada face é chamado de mapeamento. Análogo, como exemplo, é a utilização de um mapa do mundo em projeção cilíndrica que, se texturizada em uma esfera, a distorção retrai e, no modelo, volta à posição original no modelo. Isso, assumindo como uma esfera a forma da terra simplificada.

Um exemplo de uma textura do modelo inicial da lente 55mm é apresentado na Figura 85.

Figura 85 - A textura do modelo inicial da lente 55mm.



Fonte: O Autor (2022)

Essa textura é calculada com base nas fotos iniciais fornecidas e tem o formato distorcido que encaixa com a malha aberta nesse quadrado pré-definido. A definição das linhas e formas dependerá, exclusivamente, do tamanho dessa textura no momento de sua criação. Por ter um formato distorcido e com as partes não contínuas dentro desse quadrado, fazer uma manipulação manual de uma parte da malha se torna inviável.

Contudo, dentro do metashape é possível definir a qualidade dessa textura e a quantidade de texturas. Por padrão o software oferece uma textura 8k: 8192 pixels em cada lado, resultando em 67,1 milhões de pixels. Essa texturização pode ser trocada por dezesseis texturas com 2048px como exemplo, resultando o mesmo modelo igual e mesma quantidade de pixels. E não houve diferença considerável no

consumo da memória ao executar o teste 55PU032 com uma textura única com resolução em 32k ou dezesseis texturas em 8k.

Para os testes, foi escolhido trabalhar com uma textura única, apenas para facilitar a organização dos arquivos e transferência entre os softwares envolvidos, e processado em 32k de cada lado, resultando em 1,073 bilhões de pixels. Não foram feitos testes em 64k, provavelmente causaria despejo de memória e os 32k se mostraram nítidos o suficiente para fazer o comparativo.

Nesses ensaios de textura houve a clara percepção que a texturização bem definida gera um resultado visual melhor que a malha mais bem definida. Claro, para qualidade máxima uma malha definida e uma textura em alta definição trabalham de forma cooperativa, mas, para arquitetura, a textura se mostrou mais importante para visualização dos detalhes.

É possível facilmente reduzir a quantidade de pixels da textura para testá-la com resoluções distintas, sem a necessidade de reprocessar em diferentes resoluções. As mesmas foram reduzidas para 8k (8192 px), 4k (4096 px) e 2k (2048 px) de forma a tentar identificar diferenças visuais no modelo.

O primeiro comparativo foi da porta principal, um elemento que ocupa uma dimensão considerável dentro do modelo e quase não identifica as diferenças entre as resoluções das texturas, conforme Figura 86.

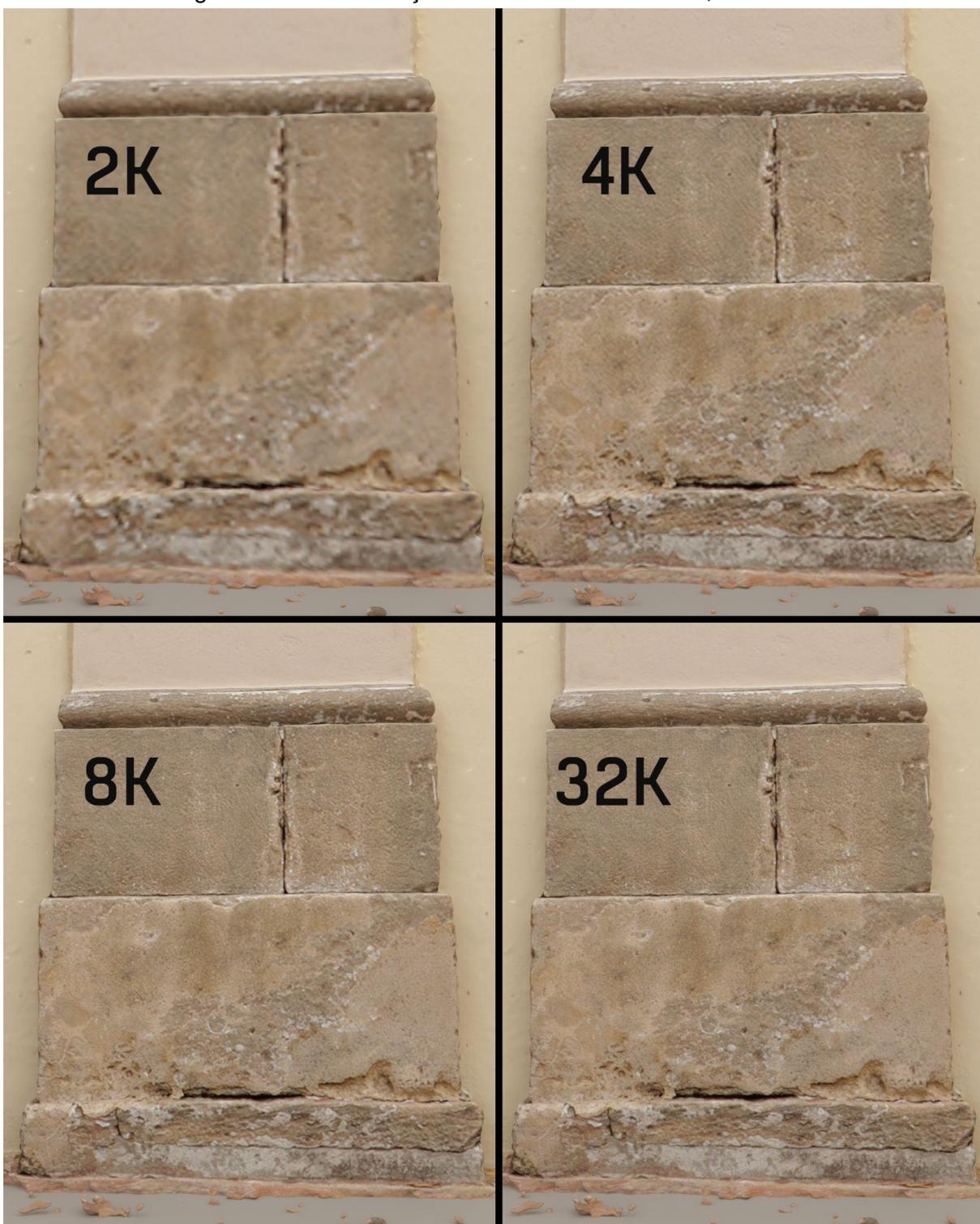
Figura 86 - A texturização do modelo inicial 55mm, 2k a 32k.



Fonte: O Autor (2022)

Nessas dimensões a análise é mais difícil. Aparentemente o resultado é semelhante. Ao adentrar em trechos menores do modelo as diferenças começam a ser perceptíveis. A base do pilar já apresenta diferença considerável de representação utilizando as mesmas texturas, conforme Figura 87.

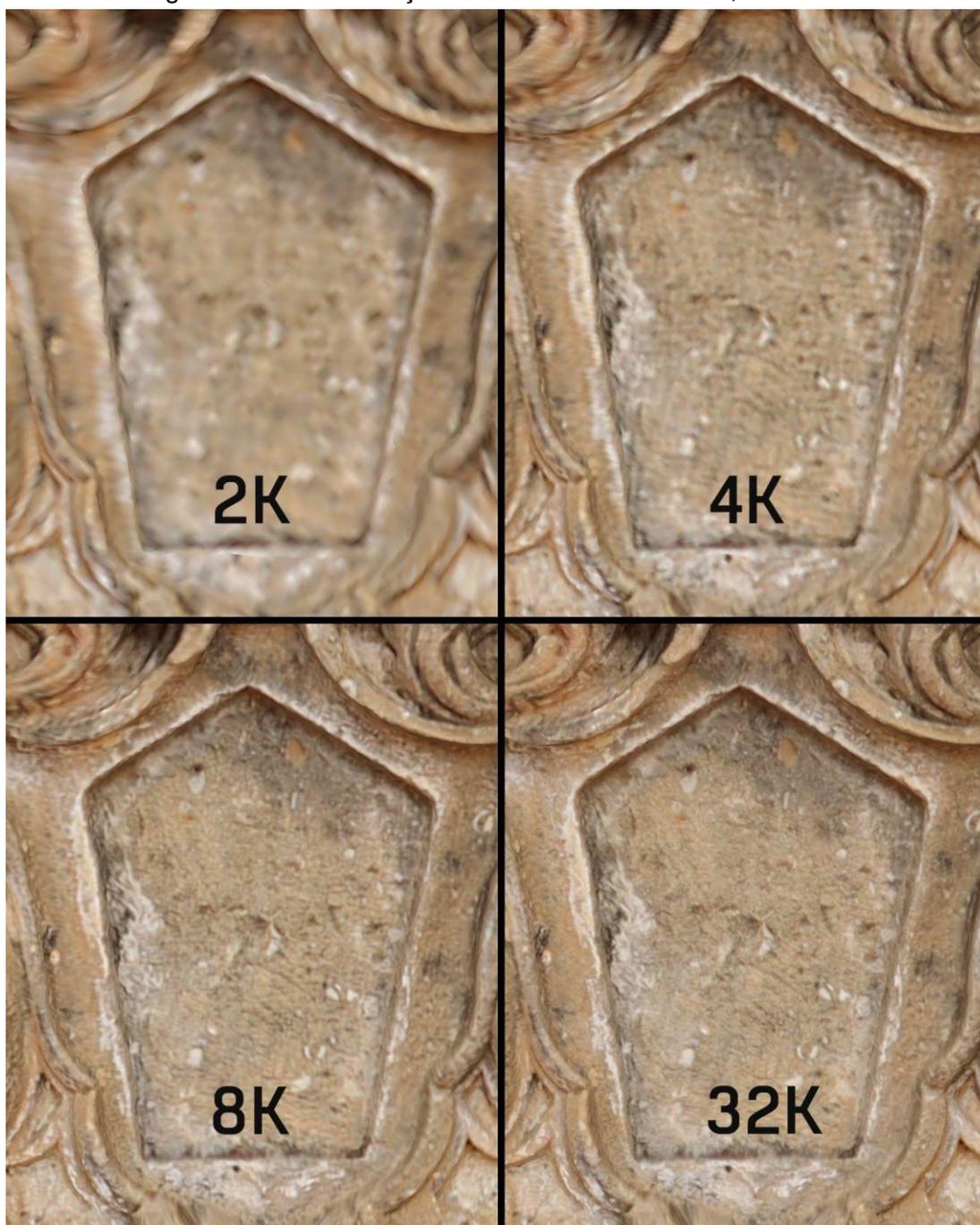
Figura 87 - A texturização do modelo inicial 55mm, 2k a 32k.



Fonte: O Autor (2022)

E, quanto mais se aproxima, mais se mostra nítida essa diferença de detalhamento no modelo. No pentágono do adorno central, é apresentada a resolução das texturas em 2, 4, 8 e 32k, conforme Figura 88.

Figura 88 - A texturização do modelo inicial 55mm, 2k a 32k.



Fonte: O Autor (2022)

A texturização se mostrou uma etapa que trará a definição desejada para correta interpretação do modelo, mas acompanhada de um custo computacional elevado.

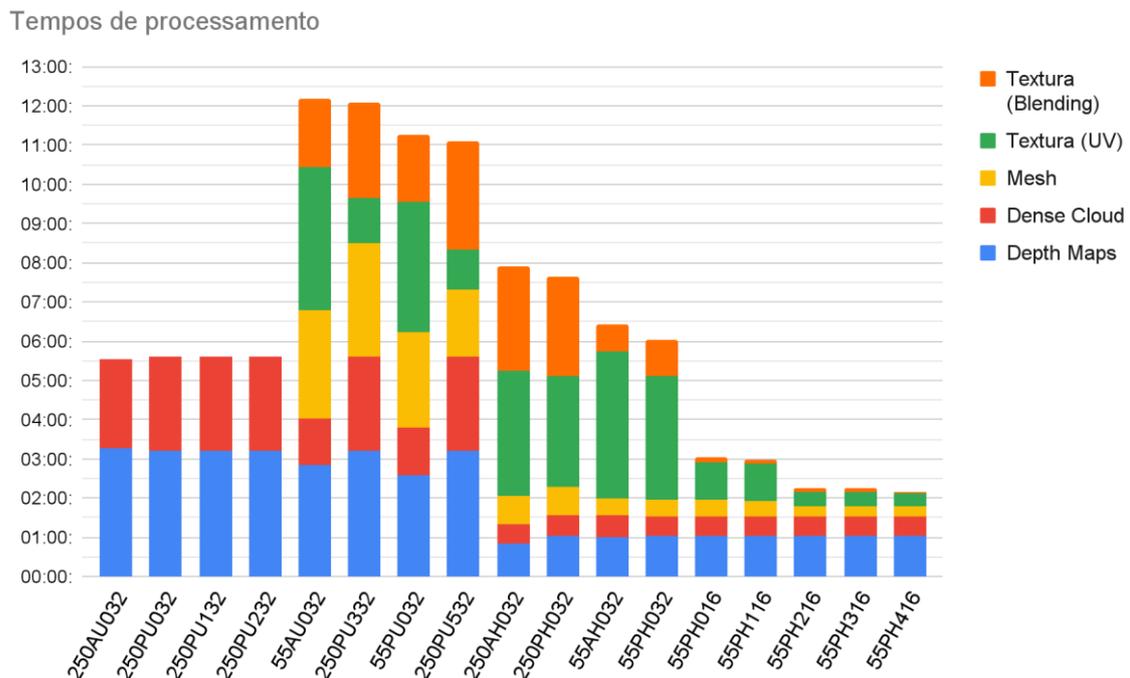
Como estimativa e ordem de grandeza de referência, a textura com 8k possui 67 milhões de pontos distribuídos em 155m² de área de fachada, resultando em 433mil pontos por metro quadrado de fachada. A mesma textura calculada com 32k

possui 1.07 bilhões de pontos, resultando em aproximadamente 6.9 milhões de pontos por metro quadrado de fachada.

O cálculo do tempo total de criação do modelo texturizado ocorre nas etapas: Criação dos mapas de profundidade (depth maps), criação da nuvem de pontos densa (dense cloud), criação da malha triangular (mesh), e a texturização que é subdividida em duas etapas: O mapeamento UV e a mistura dos mapas (blending). Existe também o tempo de alinhamento das fotos, processo inicial, mas como é relativamente rápido, em torno de cinco minutos, e foi semelhante em todos os testes, não seria necessário contabilizar como variável.

Os quatro testes da 250mm que falharam pela quantidade de pontos acima dos 200 milhões, aparecem apenas como seus dois primeiros tempos contabilizados, os testes da 55 e da 250mm apresentaram um aumento considerável ao modificar a textura de 8k para 32k, mostrando o custo computacional que tal processamento pode causar, conforme Figura 89.

Figura 89 - Os tempos de processamento por etapa nos testes



Fonte: O Autor (2022)

4.1.7 A ortoimagem do modelo

Com o modelo texturizado é possível comparar a ortoimagem dos modelos, para o caso, foi tomado quatro extremos de processamento. Essa ortoimagem, com dimensões conhecidas, é tomada com base para a produção de arquitetura, isso se utilizado um sistema tradicional CAD. Para modelos BIM, a analogia é a mesma, contudo, se espera um modelo tridimensional para a modelagem dos detalhes.

O modelo tridimensional pode ser visto e analisado por softwares específicos para arquitetura. Aqui, para esses resultados em papel impresso, é mais prático a apresentação apenas das ortoimagens produzidas. A maior imagem tem 468 Mpx, da 250PH032, correspondendo a aproximadamente 19,5x a capacidade de uma imagem da câmara analisada, e a menor, 184 Mpx, correspondendo a aproximadamente 8x a capacidade da mesma câmara.

Os testes da 55PH416, 55PU032, 250PH032 e 250PU332 mostram resultados semelhantes em termos de proporção, não apresentando erro ou distorção no modelo geral, conforme Figura 90.

Figura 90 - Comparativo das ortoimagens 55PH416, 55PU032, 250PH032 e 250PU332





Fonte: O Autor (2022)

Os resultados são semelhantes, dimensionalmente iguais no modelo da igreja, mas nos detalhes há algumas diferenças inerentes ao processo. Analisaremos os detalhes e variações sutis apresentadas nos resultados.

O pináculo direito tem uma certa inclinação, representada corretamente em todos os testes, conforme Figura 91. A princípio, pensou-se ser um erro de processamento ou de distorção da lente. Mas, observando no local é possível notar a leve inclinação no referido pináculo.

Figura 91 - Pináculos tortos nos testes 55PH416, 55PU032, 250PH032 e 250PU332



Fonte: O Autor (2022)

O teste 250PU332, por ter mais pontos em níveis de confiança menores, para ser viabilizada a geração da malha, foi necessário remover os pontos com intervalo 0-3 do nível de confiança e descer abaixo dos 200 milhões de pontos. O resultado é que, mesmo com mais pontos, o modelo apresentou mais falhas de continuidade em áreas aleatórias, conforme Figura 92.

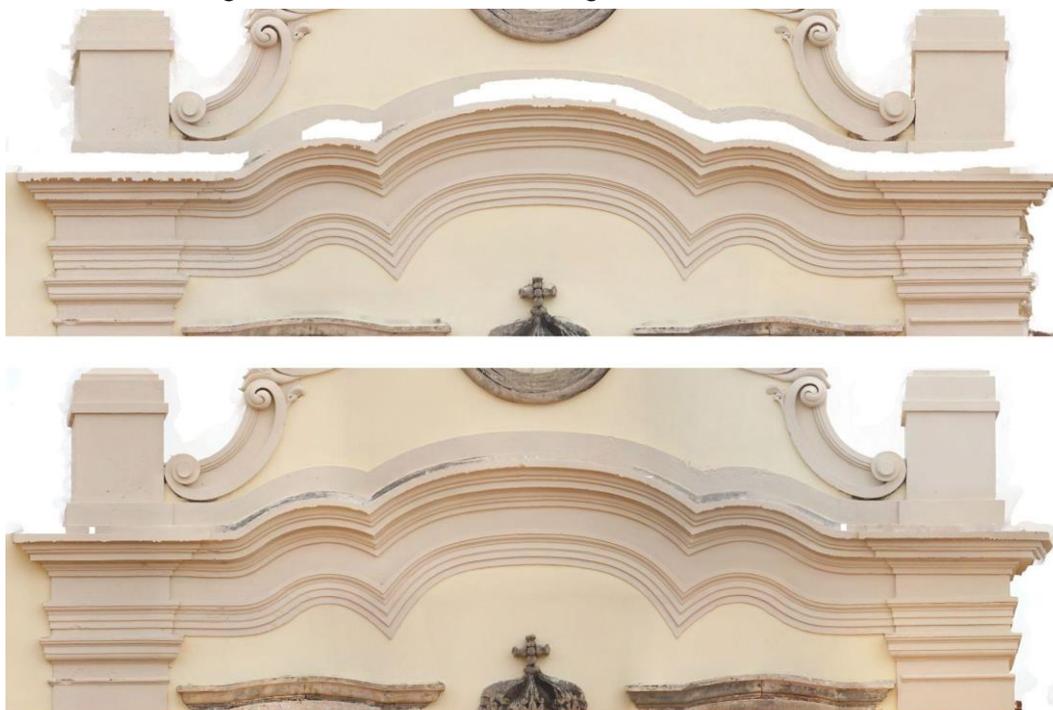
Figura 92 - Falhas na ortoimagem do teste 250PU332



Fonte: O Autor (2022)

A distância tomada para as fotos de 250mm em comparação à de 55mm, resultou em uma menor área de sombra na parte superior aos elementos de saque da edificação, conforme Figura 93.

Figura 93 - Falhas na ortoimagem do teste 250PU332



Fonte: O Autor (2022)

Em áreas em que não houve a exclusão dos pontos com baixa confiança, uma malha errônea é criada ao redor do modelo, com projeção da textura que pode levar a um erro de interpretação do operador. No teste da 250PH032 não houve essa limpeza dos pontos e, conseqüentemente, a criação desses erros, conforme Figura 94.

Figura 94 - Falhas de projeção no teste 250PH032



Fonte: O Autor (2022)

Diante dos testes de processamento no Metashape, com as fotos tomadas nas lentes de 55 e 250mm, com o objetivo de analisar a qualidade do modelo mesh e da ortomagem, foi concluído que para garantir a qualidade visual necessária para a representação da fachada, é necessário calcular os pontos do dense cloud com a qualidade máxima, remover os pontos com baixa confiança e afastados da fachada, com o devido cuidado de manter os que pertencem à edificação.

Posteriormente, o cálculo da malha mesh em modo máximo, *ultra* não apresentou ter aumentado a qualidade visual. A malha em *high* se apresentou suficiente para densificação e correta representação do modelo. A textura, que fornece a qualidade visual dos adornos da fachada, deve ser calculada com parâmetros específicos, diferentes dos padrões fornecidos no Metashape. A textura com 8k, resultando em 433mil px/m² apresentou ótima qualidade com pouca perda visual em relação à textura de 32k e 6,9mi px/m². Contudo, o tempo de processamento e o consumo computacional nessa segunda opção são demasiadamente elevados para os padrões atuais dos computadores, e deve ser levado em consideração para escolher o cálculo desta etapa.

4.2 OS TESTES COM LENTES E CÂMARAS DISTINTAS

Os testes agora envolvem uma combinação de câmaras e lentes com diferentes resoluções, distâncias focais, tamanho do sensor e qualidade do equipamento, resultando em diferentes resoluções espaciais. O objetivo é verificar

as alterações dos resultados em função do conjunto do equipamento fotográfico. Os pontos de controle serão os mesmos para todos os testes e os resultados de sua acurácia poderão ser mensurados, bem como a diferença de qualidade visual.

Para esse teste foram sete combinações distintas, envolvendo uma câmara mirrorless, uma compacta superzoom e dois aparelhos celulares dotados de câmara embutida. As fotos foram tomadas no mesmo ângulo e cobrindo a fachada, com sobreposição, resultando em quantidades distintas de tomadas, conforme quadro 9:

Quadro 9 - Combinação de câmaras e lentes para os testes

CÓDIGO	CÂMARA	TIPO	LENTE	DISTÂNCIA FOCAL TOMADA	35MM EQUIV	QTE FOTOS
M50-18	CANON M50	MIRRORLESS	EF-S 10-18mm F/4.5-5.6 IS STM	18mm	27mm	36
M50-45	CANON M50	MIRRORLESS	EF-M 15-45mm f/3.5-6.3 IS STM	45mm	72mm	119
M50-55	CANON M50	MIRRORLESS	EF-S 55-250mm f/4-5.6 IS STM	55mm	88mm	175
M50-250	CANON M50	MIRRORLESS	EF-S 55-250mm f/4-5.6 IS STM	250mm	400mm	464
P520	NIKON P520	COMPACTA ZOOM	4.3-180mm f/3-5.9	12mm	70mm	86
NOTE10	NOTE 10+	CELULAR	6mm f/2.1	6mm	52mm	146
iPHONE 7	iPHONE 7	CELULAR	4mm f/1.8	4mm	28mm	92

Fonte: Sites dos fabricantes

Como exemplo de abrangência de cada distância focal dos conjuntos câmara e lente, algumas fotos de referência são apresentadas nas Figura 95:

Figura 95 - Fotos tomadas em campo da Igreja N. S. de Piedade



(a) M50-18



(b) M50-45



(c) M50-55



(d) M50-250



(e) P520



(f) NOTE10

(g) IPHONE7

Fonte: O Autor (2022)

O cálculo nessa etapa foi executado com os parâmetros no Metashape: Alinhamento no máximo, nuvem densa no máximo, retirada dos pontos da nuvem densa com confiança até 3, criação da malha mesh no high e textura em 16k, oferecendo uma boa relação benefício por performance computacional.

Os sete processamentos do conjunto câmara e lente, combinados com os pontos de controle adquiridos, apresentaram imagens distintas, Figura 96. A resolução final de todas é relativamente grande para ser impressa no presente

documento, um QRcode para download dessas imagens é apresentada na Figura 96:

Figura 96 - Os resultados dos processamentos câmara + lente e pontos de controle



M50-18

(b) M50-45



(c) M50-55

(d) M50-250



(e) P520



(f) NOTE10



(g) iPHONE7



(h) QRcode para download

Fonte: O Autor (2022)| <http://bit.ly/3gKiDpz>

Os resultados das etapas dos processamentos são apresentados na tabela 1:

Tabela 1 - Resultados dos processamentos com pontos de controle

CÓDIGO	QTE FOTOS	NUVEM ESPARSA (pontos)	NUVEM Densa (pontos)	MALHA MESH (faces)	ORTOMOSAICO (dimensão)	RESOLUÇÃO ESPACIAL (mm/px)
M50-18	36	58.489	7.307.5790	1.417.156	42Mpx	2.09
M50-45	119	145.180	20.417.830	4.085.566	111Mpx	1.29
M50-55	175	200.760	35.909.276	7.181.854	190Mpx	0.961
M50-250	464	703.703	101.697.180	20.339.434	353Mpx	0.55
P520	86	90.332	11.994.903	2.398.980	72Mpx	1.69
NOTE10	146	194.187	7.479.291	1.495.857	41Mpx	2.07
iPHONE7	92	115.967	4.022.521	804.502	22Mpx	2.90

Fonte: O Autor (2022)

Como comparativo visual da resolução espacial das ortoimagens, a sequência do maior pro menor é apresentada na Figura 97:

Figura 97 - Comparativo de sobreposição dos resultados obtidos.

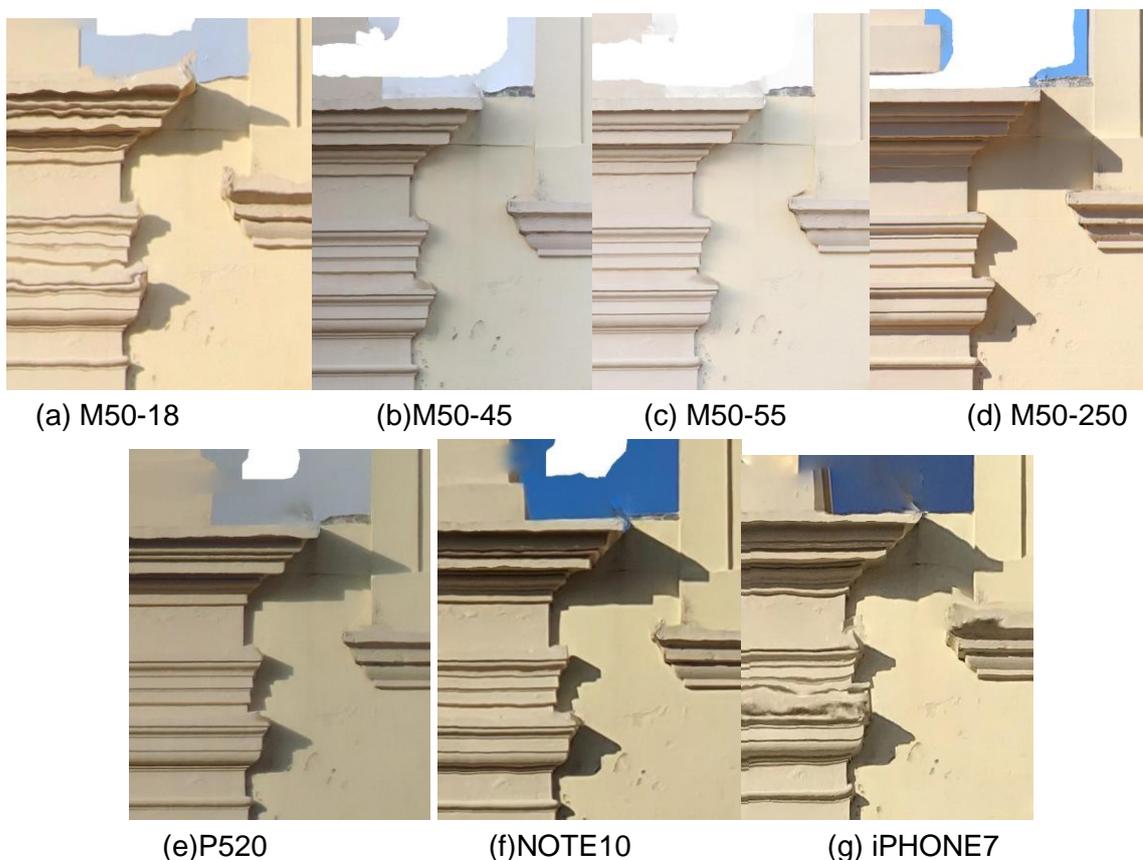
M50-250



Fonte: O Autor (2022)

As diferenças visuais dos resultados não se limitam apenas à resolução espacial ou ao tamanho da imagem. Comparando o mesmo trecho da igreja em processamentos de conjuntos ópticos distintos, é possível notar que a qualidade da representação é diferente com variações de lente ou câmara, afetando diretamente na leitura das proporções e formas dos adornos, conforme Figura 98:

Figura 98 - Detalhes das ortoimagens com pontos de controle



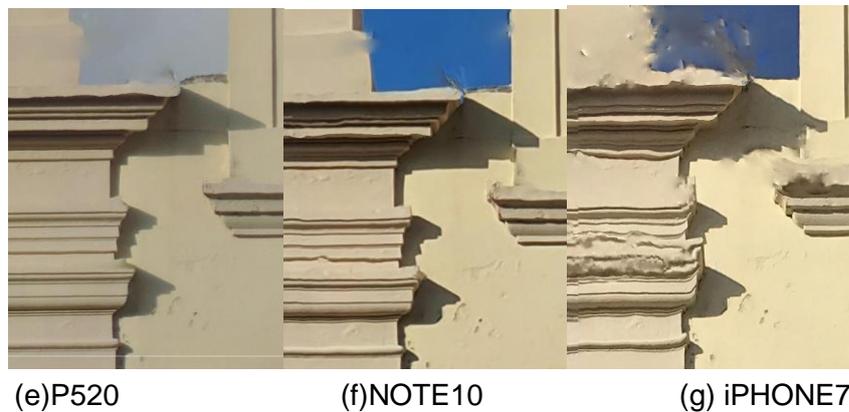
Fonte: O Autor (2022)

Os resultados apresentados mostram que as imagens com a Canon M50 e as lentes de 45, 55 e 250mm obtiveram os melhores resultados nos detalhes de adornos altos. Com a instalação da lente de 18mm, mais aberta, foi obtido o pior resultado dos sete testes para esse comparativo.

Nas câmaras menores, a Nikon P520 obteve um resultado bom, melhor do que a Canon M50 com a lente de 18mm, mas longe, em níveis de qualidade visual, das outras. O aparelho celular Note 10 ficou com uma qualidade próxima à P520 e o resultado com o iPhone7 foi o de pior representação.

Os resultados com barras de escala não tiveram diferença significativa de tamanho das ortoimagens, a representação visual também se mostrou falha em igual nível nos mesmos testes, conforme Figura 99:

Figura 99 - Detalhes das ortoimagens com barras de escala



Fonte: O Autor (2022)

4.3 A ACURÁCIA DAS REPRESENTAÇÕES

Após a análise comparativa das ortoimagens com base nos pontos de controle estabelecidos em campo, será necessário analisar a acurácia dessas representações ortogonais para tentar identificar distorções na identificação dos erros causados pela variação do conjunto óptico.

O processo de cálculo pode ser realizado dentro do próprio software, o Metashape. Contudo, o ajustamento foi feito utilizando o AstGeoTop para verificar por erros grosseiros, acurácia posicional, discrepância e evitando assim, o sistema fechado. De posse dos dados, os valores de erro médio quadrático bidimensional

Os resultados dos ajustamentos planimétricos, planialtimétricos e altimétricos, que forneceu o erro médio quadrático e, suas respectivas acurácias, podem ser conferidos nas tabelas 2 e 3:

Tabela 2 - Acurácia dos modelos com pontos de controle

CÓDIGO	RAIO	EMQ2D (PONTOS DE CONTROLE)	EMQZ	EMQ3D
M50-18	10mm	7.3mm	6.4mm	9.7mm
M50-45	5mm	7.5mm	2.7mm	7.9mm
M50-55	10mm	4.0mm	10.0mm	11.1mm
M50-250	3mm	5.3mm	5.0mm	7.3mm
P520	10mm	8.2mm	7.8mm	11.3mm
NOTE10	10mm	9.0mm	3.7mm	9.8mm
iPHONE7	7mm	18.2mm	10.3mm	20.9mm

Fonte: O Autor (2022)

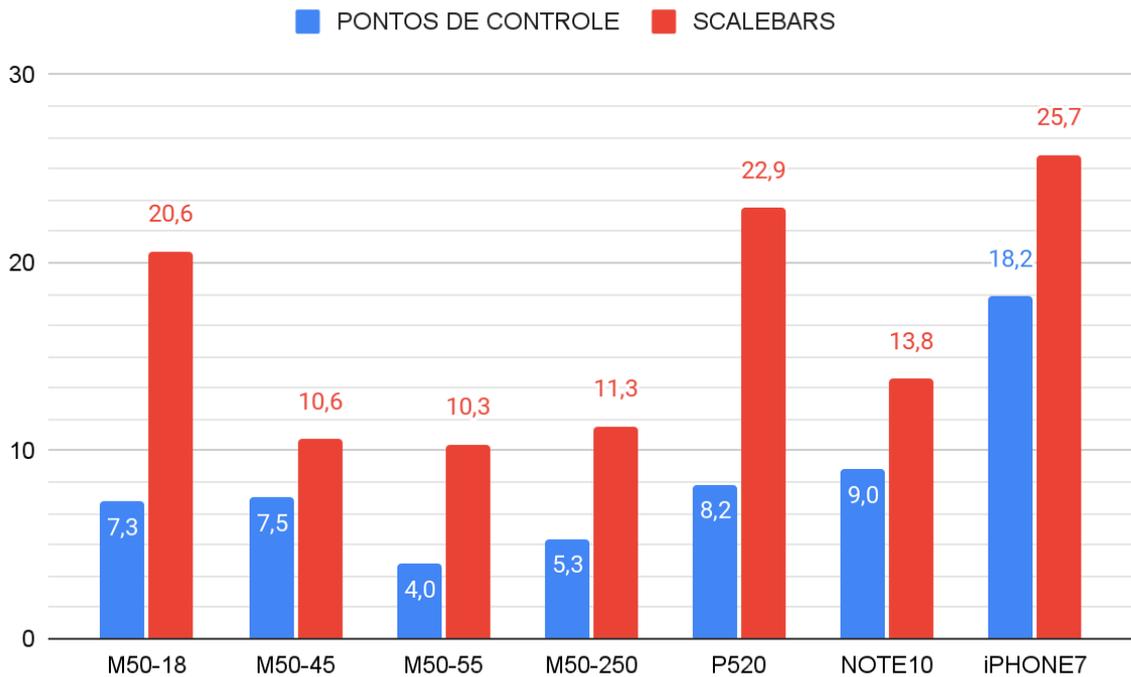
Tabela 3 - Acurácia dos modelos com barras de escala

CÓDIGO	EMQ2D (barras de escala)
M50-18	20.6mm
M50-45	10.6mm
M50-55	10.3mm
M50-250	11.3mm
P520	22.9mm
NOTE10	13.8mm
iPHONE7	25.7mm

Fonte: O Autor (2022)

Um comparativo das acurácias posicionais entre as lentes e entre os pontos de controle e as barras de escala são apresentadas na Figura 100:

Figura 100 - Comparativo das acurácias posicionais



Fonte: O Autor (2022)

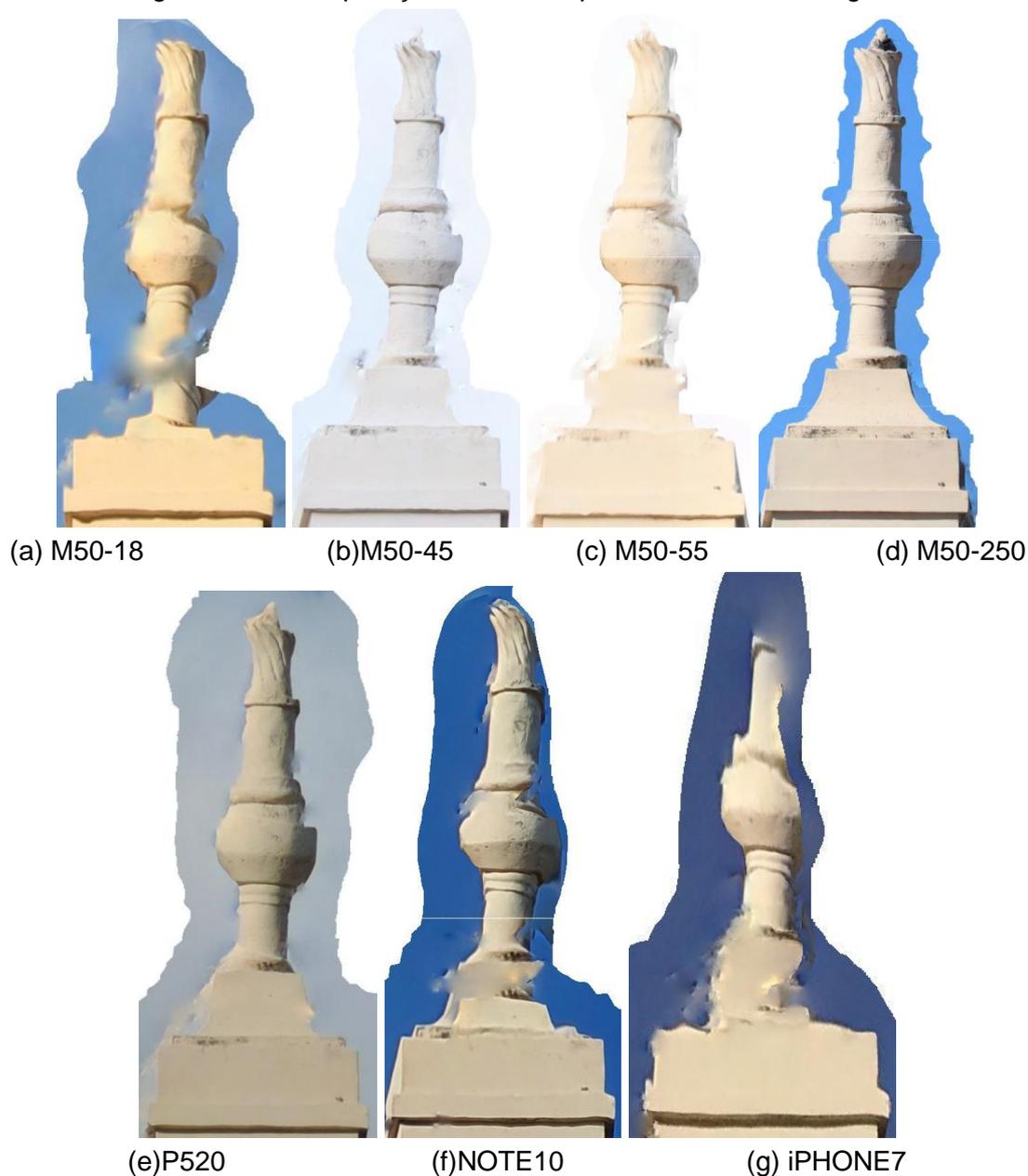
No comparativo do método de controle, todos os ensaios com os mesmos conjuntos ópticos mostraram uma acurácia maior nos modelos calculados com pontos de controle. Contudo a variação não é grande. O melhor resultado foi do conjunto câmara Canon M50 com lente 55mm que apresentou 4,0 milímetros de acurácia planimétrica na fachada quando calculada com pontos de controle, enquanto que, com barras de escala, apresentou 10,3mm. O pior resultado foi o do celular iPhone7, com 18,2 mm de erro médio quadrático planimétrico com pontos de controle e 25,7mm ao ser calculado com barras de escala.

Apesar das discrepâncias, os resultados dos testes com barra de escala se mostraram relativamente precisos, mesmo com essa discrepância em relação aos pontos de controle, se mostrando uma técnica barata, rápida e útil para a extração das fachadas.

O conjunto da Canon M50 com a lente de 18mm ficou quase equiparado ao do iPhone 7, não somente nos níveis de acurácia como também em sua qualidade visual, mostrando que nem sempre o equipamento mais caro, mais moderno, ou com maior resolução será o melhor para fotogrametria terrestre.

Apesar dos números, em níveis de detalhamento visual em alguns testes se mostraram ruins para sua utilização em arquitetura, chegando em algumas situações extremas a não serem úteis para sua utilização em levantamento. A fim de comparação visual, é apresentado o pináculo superior direito de todos os testes, Figura 101:

Figura 101 - Comparação visual dos pináculos nas ortoimagens



Fonte: O Autor (2022)

Neste caso o melhor resultado foi a lente de 250mm, que apresentou mais detalhes no adorno apresentado com resultados visualmente iguais nos cálculos obtidos pelos controles com pontos e com barras. O resultado com a Canon M50 e 18mm se mostrou distorcido, equivalente ao do iPhone 7.

5 CONCLUSÕES

Diante dos ensaios de fotogrametria terrestre da fachada principal da Igreja de Piedade foram observados alguns comportamentos quando variando os conjuntos ópticos, formas de cálculo e formas de controle.

Em uma primeira etapa foi possível determinar que, objetivando a extração dos detalhes para arquitetura, os cálculos devem estar quase no máximo, ou no máximo. O principal fator para se obter uma melhor qualidade visual nos detalhes do modelo, é aumentando a taxa da textura, alterando o padrão, 2k, para valores superiores como 8, 16 ou 32k, a depender do tamanho da fachada. Dessa forma é possível conseguir modelos mais fiéis para análise arquitetônica, que se mostrou mais útil que o próprio adensamento da malha, chegando a representar corretamente os detalhes e formas necessárias para o uso para arquitetura.

Foi também possível observar alguns fenômenos variando os dados iniciais. Nas lentes, o modelo geral não teve diferenças geométricas significantes da edificação comparando as lentes de 55mm com a 250mm, mas obteve uma diferença com uma leve vantagem na 55mm, que mesmo apresentando uma maior distorção, e menor resolução espacial, o processamento obteve um alinhamento mais rápido e preciso, e uma nuvem de pontos com um melhor nível de confiança.

Os computadores que processaram os modelos possuem 64Gb de memória RAM. Até 120 milhões de pontos o modelo alocava por completo na memória, mostrando que a velocidade está diretamente relacionada à disposição de RAM. Quando o modelo chegava na ordem 200 milhões de pontos, o modelo falhava, impossibilitando seu teste. Entre os 120 e 200, com a memória completamente alocada, o tempo de processamento aumentava, indicando a necessidade de expansão para continuidade dos testes.

O resultado das acurácias identificou uma melhor performance no conjunto Canon M50 com a lente de 55mm, contudo, a lente de 250mm, com a mesma câmara, apresentou resultados bem próximos na acurácia, mas com qualidade visual maior nos adornos arquitetônicos, resultado de uma maior resolução espacial da lente nas tomadas de fotos.

O processamento com controle por barras de escala apresentou um resultado visual semelhante aos dos processados por pontos de controle, mas o ajustamento dos pontos determinou uma acurácia pior do que as por pontos de controle.

Contudo, essa técnica com as barras, apesar de apresentar pouca variação, se mostra útil com inúmeras vantagens quando não se é possível adquirir os pontos em campo.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13133**. Execução de levantamento topográfico: Procedimento. Rio de Janeiro, 1994.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13133**. Execução de levantamento topográfico: Procedimento. Rio de Janeiro, 2021.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14166**. Rede de referência cadastral : Procedimento. Rio de Janeiro, 1998.
- AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS (AIA). **AIA G202: Project Building Information Modeling Protocol Form**. Nova York, 2013.
- AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS (AIA), **AIA G203: Building Information**. Nova York, 2013.
- ALBERTZ, J. (2001). **Albrecht Meydenbauer – Pioneer of Photogrammetric Documentation of the Cultural Heritage**. Proceedings of the 18th International Symposium CIPA.. Alemanha, 2001.
- ALIDOOST, F.; AREFI, H. An image-based technique for 3d building reconstruction using multi-view UAV images. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 2015. v. 40, n. 1W5, p. 43–46.
- AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS (AIA). **LOD Specification 2015**. 2015
- AMORIM, A. L. **A Documentação Digital do Patrimônio Construído: Possibilidade e Desafios**. ENANPARQ - I Encontro Nacional da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. (2010).
- AMORIM, N. C. De. **Avaliação Do Desempenho Da Técnica Structure From Motion Para Mapeamento De Corredores**. [S.l.]: UFPR, 2020. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/69364>>.
- ANDRADE, J. B. **Photogrammetric Refraction**. Dissertation. Columbus, Ohio, U.S.A, University (1977).
- ANDRADE, J. B.; OLIVAS, M.A.A. Calibração de câmaras aerofotogramétricas. **Boletim da Universidade Federal do Paraná**. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Geodésia. nº 26. Curitiba, 1981.
- ANDRADE, J. B.. **Injunções num Referencial Local**. Boletim da UFPR - Geodésia, Curitiba, v. 38, p. 1, (1990).
- ANDRADE, José Bittencourt de. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998. 258p.
- ARAUJO, Anna Paula de, CUNHA, Fernanda Ferreira da. Instituto IDD - Pós Graduação em Gestão Colaborativa de Projetos – Ênfase BIM, Curitiba (2015).

ARIAS, P. et al. Methods for documenting historical agro-industrial buildings: a comparative study and a simple photogrammetric method. *Journal of Cultural Heritage*, 2006. v. 7, n. 4, p. 350–354.

BANFI F., CHOW L., ORTIZ M. R., OUIMET C., S. FAI; *Building Information Modeling for Cultural Heritage: The Management of Generative Process for Complex Historical Buildings*. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature (2018).

BAZIN, Germain. **Arquitetura religiosa barroca no Brasil** (Vol. I). Rio de Janeiro: Record, 1983.

BRAGA, M. *Conservação e Restauro - Livro 03*. Editora Rio, 2004.

BUENO, Beatriz. *Desenho e Desígnio: O Brasil dos engenheiros militares (1500-1822)*. São Paulo: EDUSP, 2011.

BARBOSA, F. S.; GARNÉS, S. J. A.; SILVA, T. F. **A escala da base multipilar da UFPE**. In.: **Anais**. III SIMGEO – Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife – PE, 27 a 30 jun., 2010.

BURITY, E. F. *Determinação da vulnerabilidade física em áreas de risco de deslizamento a partir do posicionamento GNSS, com técnica RTK-NTRIP*. 2016. xxviii, 287 f., il. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

CARNEIRO, A. F. T. **Possibilidades metodológicas para obtenção de um Campo de Pontos com Vistas ao Cálculo de Volume de Objetos**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 1993.

CASTRO, Adler Homero. *Muralhas de pedra, canhões de bronze, homens de ferro: Fortificações do Brasil de 1504 a 2006*. Rio de Janeiro: Fundação Cultural Exército Brasileiro, v. 1, 2009.

CHAREF, Rabia & Alaka, Hafiz & Emmitt, Stephen. (2018). **Beyond the Third Dimension of BIM: A Systematic Review of Literature and Assessment of Professional Views**. *Journal of Building Engineering*. 19. 10.1016/j.jobe.2018.04.028.

CHAREF, Rabia. (2022). The use of Building Information Modelling in the circular economy context: Several models and a new dimension of BIM (8D). *Cleaner Engineering and Technology*. 7. 100414. 10.1016/j.clet.2022.100414.

CORONA, Eduardo; LEMOS, Carlos. *Dicionário da arquitetura brasileira (2ª Edição ed.)*. São Paulo: Romano Guerra, 2017.

CULTURAL HERITAGE IMAGING (CHI). **Guidelines for Calibrated Scale Bar Placement and Processing**. *Cultural Heritage Imaging*, p. 1–11, 2021.

DALMOLIN, Q. **Ajustamento de observações pelo processo iterativo**. Dissertação (Mestrado em Geodésia) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 1976.

DALMOLIN, Q. **Projeto fotogramétrico**. Imprensa universitária da UFPR. Curitiba, 1999.

GRUEN, Armin; HUANG, Thomas S. **Calibration and orientation of cameras in computer vision**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013. v. 34. Citado 1 vez na página 28.

GUERRETTA, L. F.; PAULO, S. **A Modelagem da Informação da Construção (BIM) em empresas instaladoras de sistemas prediais**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Pós-Graduação em Ciências em Inovação na Construção Civil. São Paulo, 2017, 125p.

MEG, L.; ART, R. **Rock art recording using 3D laser scanning**. Durham Research Online. v. 44, n. June, p. 1–6, 2008.

ESPARTEL, L. **Curso de Topografia**. Ed. Globo. 9 Ed. Rio de Janeiro, 1987.

DAL'FORNO, G. L.; AGUIRRE, A. J.; HILLEBRAND, F. L. e GREGÓRIO, F. V. Transformação de Coordenadas Geodésicas em Coordenadas no Plano Topográfico Local pelo Métodos da Norma NBR 14166:1998 e o de Rotações e Translações. Anais do III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, 2010.

EL-DIN FAWZY, H. **3D laser scanning and close-range photogrammetry for buildings documentation: A hybrid technique towards a better accuracy**. Alexandria Engineering Journal, 2019. v. 58, n. 4, p. 1191–1204. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.10.003>>.

FIRZAL, Y. Architectural Photogrammetry: a Low-Cost Image Acquisition Method in Documenting Built Environment. **International Journal of GEOMATE**, 1 maio. 2021. v. 20, n. 81, p. 100–105.

FERREIRA, A. Inventário e conservação do patrimônio cultural arquitetônico. O contributo da fotogrametria. Boletim da Comissão de Cartografia (COCAR), num 07, 1987.

FREITAS, RAISSA. O Processo de Adoção do BIM em Empresas Públicas e em Construtoras de Infraestrutura. São Paulo, 2020.

FREYRE, Gilberto. **Sobrados e Mucambos**. São Paulo: Global, 2006.

FRITSCH, D.; BECKER, S.; ROTHERMEL, M. **Modeling Façade Structures Using Point Clouds From Dense Image Matching**. Proceedings of the Intl. Conf. on Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering, 2013. n. Author 2, p. 57–64.

FRITSCH, D. et al. Batak Toba Cultural Heritage and Close-range Photogrammetry. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2015. v. 184, n. August 2014, p. 133–140. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.05.079>>.

GALO, Maurício. **Calibração e aplicação de câmaras digitais**. Dissertação (mestrado em Ciências Geodésicas). Curitiba: UFPR, 1993. 151 p.

GALO, M.; TOMMASELLI, A.M.G.; HASEGAWA, J. K.; CAMARGO, P.O. **Significância dos parâmetros de orientação interior na calibração de câmaras**. *In*: II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife - PE, 8-11 de setembro de 2008.1-10 p.

GARNÉS, S. J. dos A; SAMPAIO, R. J. B. de.; DALMOLIN, Q. Ajustamento paramétrico por mínimos quadrados com análise na estabilidade da solução. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v.2, p.24-35, 1997.

GARNÉS, S. J. dos A. Resolução das ambigüidades gps para linhas de base curta: análise dos algoritmos de otimização. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas). Curitiba, UFPR, 2001. 218 p.

GARNÉS, S. J. A.. **Sistema de Projeção e Orientação das Plantas Topográficas**. *In*: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, 1998, Florianópolis. 3º COBRAC. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1998. v. 1. p. 1-29.

GARNÉS, S. J. A.; SIQUEIRA, V. P. ; CACHO, Jerson Perez . **Definição para implantação do sistema topográfico local de Campo Grande - MS e análise das fórmulas da NBR 14166**. *In*: IV CBCG, 2005, Curitiba. IV Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas. Curitiba - PR: Departamento de Geomática da UFPR, 2005. p. 1-6.

GARNÉS, S. J. A. AstGeoTop. **Software**. v. 2020. Departamento de Engenharia Cartográfica. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2020.

GARAGNANI, S., LUCIANI, S., MINGUCCI, R.; Collaborative design for existing architecture: the Building Information Modeling as a frontier for coordinated process. *SIGRADI 2012 | FORMA (IN) FORMAÇÃO* (2012).

GEMAEL, C. **Introdução à geodésia geométrica: 1ª parte**. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1977. 148 f.

GEMAEL, C. Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas. Curitiba: Editora UFPR, 1994.

GROETELAARS, Natalie Johanna. **Criação de modelos BIM a partir de “nuvens de pontos”**: estudo de métodos e técnicas para documentação arquitetônica. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura, UFBA, Salvador (2015).

GROETELAARS, N. J.; AMORIM, A. L. Técnicas de restituição fotogramétricas digitais aplicadas à Arquitetura: um estudo de caso. Florianópolis: Anais COBRAC 2004., 2004. p. 1–12.

GRUSSENMEYER. P., Hanke. K, and Streilein. A., "Architectural photogrammetry," in **Digital Photogrammetry**, 2002, pp. 300–339.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **Global positioning system: theory and practice**. 3. ed. New York: Springer-Verlag Wien, 1994. 355 p.

HOON. Y., J., and Hong. S., "Three-dimensional digital documentation of cultural heritage site based on the convergence of terrestrial laser scanning and unmanned aerial vehicle photogrammetry," *ISPRS Int. J. Geo-Information*, vol. 8, no. 2, Jan. 2019, DOI: 10.3390/ijgi8020053.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Resolução-PR nº 23, de 21 de fevereiro de 1989: Altera o Apêndice II da R.PR-22/83. Rio de Janeiro, 1989.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Resolução-PR nº 1, de 25 de fevereiro de 2005: Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro. Rio de Janeiro, 2005.

INCRA. Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. **Norma técnica para georreferenciamento de imóveis rurais**. 3a Ed. Brasília, 2013.

HUANG, Y. D. (1998). Calibration of the wild P32 câmara using the câmara-on-theodolite method. *Photogrammetric Record*, 16(91), 97-104. doi:10.1111/0031-868X.00118.

JAIN, A.; MAHAJAN, M.; SARAF, R.; Standardization of the Shape of Ground Control Point (GCP) and the Methodology for Its Detection in Images for UAV-Based Mapping Applications. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019.

JIANG, R.; JÁUREGUI, D. V.; WHITE, K. R. Close-range photogrammetry applications in bridge measurement: Literature review *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 2008.

KARRAS. G., PETSAS. E., KARRAS. G. E., MOUNTRAKIS. G., PATIAS. P.; PETSAS. E., Modeling Distortion Of Super-Wide-Angle Lenses For Architectural And Archaeological Applications *SAVEMEDCOASTS (Sea level rise scenarios along the Mediterranean coasts)*, 2001. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/2357325>.

KORTABERRIA, G. et al. Close Range Photogrammetry for Direct Multiple Feature Positioning Measurement without Targets. v. 2017, 2017.

KRAVCHYCHEPR, M. E.; **A Educação e tecnologias inteligentes**. Revista Escola de pais do Brasil – Seção Salvador. (1999).

KARABÖRK, H.; KARASAKA, L.; YALDIZ, E. A Case Study: Documentation Method with Close Range Photogrammetry of Muqarnas Which is to be an Ornamentation Type Specific to the Islamic Architecture. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2015. v. 15, p. 133–140.

KIM, S.; KIM, S.; LEE, D.-E. **Sustainable Application of Hybrid Point Cloud and BIM Method for Tracking Construction Progress**. *Sustainability* 2020, 12, 4106. <https://doi.org/10.3390/su12104106>

LEICK, A. **GPS satellite surveying**. 2 ed. John Wiley & Sons, Inc., 1995.

LERMA, J. L. et al. Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science*, 2010.

LOWE, David G. **Distinctive image features from scale-invariant keypoints**. *International journal of computer vision*, Springer, v. 60, n. 2, p. 91–110, 2004.

LUGNANI, J.B. **O problema dos sistemas de equações lineares mal condicionados e suas implicações em geodésia**. Dissertação (Mestrado em Geodésia) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 1975.

LUGNANI, J. B. **Introdução à fototriangulação**. Imprensa Universitária da UFPR. Curitiba, 1987.

LUNA, R.M.R.; GARNÉS, S.J.A.; CABRAL, J.J.S.P.; SANTOS, S. M. **Groundwater overexploitation and soil subsidence monitoring on Recife plain (Brazil)**. *Nat Hazards*. Springer Science, 2017.

MEDINA, Alex Soria; SILVA, Claudia Vergetti de A.; MENDONÇA, Francisco Jaime B; ARAÚJO, Mércia Pedrosa de. **Estudo fotogramétrico para restauração de monumentos**. *In: Anais do Seminário e Workshop de Geoprocessamento*. Recife: 1991. p. 05/01-05/06.

MENDONÇA, F. J. B. Reconstituição geométrica da fachada de um conjunto arquitetônico com fotogrametria terrestre. *In: Anais do XIV Congresso Brasileiro de Cartografia*, Gramado -RS, 1989. V-1, p. 96-100.

MEDINA, A. S. ; GARNÉS, S. J. A. ; MEDINA, S. S. S. Topographic **survey of the control points for photogrammetric record..** *In: XIX Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000. Amsterdã. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Amsterdã: ISPRS, 2000. v. XXXIII.

MEDINA, S. S. S. Análise de produtos fotogramétricos para cadastramento de monumentos arquitetônicos. Tese (Doutorado em em Ciências Geodésicas). Curitiba, 2002.

MICHELETTI, N.; CHANDLER, J. H.; LANE, S. N. **Structure from motion (SFM) photogrammetry British Society for Geomorphology**. British Society for Geomorphology, 2019. p. 208.

MITISHITA, Edson Aparecido. Monorestituição digital de aerofotos, associada com sistema de computação gráfica C.A.D., para fins de mapeamento na área florestal. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Curitiba: UFPR, 1997. 253p.

MODRO, N. **Métodos para inversão de matrizes : aplicações às ciências geodésicas**. Dissertação (Mestrado em Geodésia) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 1981.

MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicação. 2ª ed. São Paulo: UNESP, 2008. 476p.

MONIWA, H. Analytical photogrammetric system with self - Calibration and its applications. Ph.D. Thesis. Department of surveying engineering, UNB, 1977.

MONTERO, O.; SARDI, J.; HERMIDA, M.-A. **Posibilidades de la reconstrucción tridimensional de zonas patrimoniales en base a fotogrametría y escáner LIDAR**. El Barranco de la ciudad de Cuenca como caso de estudio. Maskana, 28 dez. 2017. v. 8, n. 2, p. 83–98.

MONTENEGRO, G.; **Desenho de Projetos**, ed. Blucher, 2007.

MOORE, G. E. **Cramming more components onto integrated circuits**. Electronics, Volume 38, Number 8, April 19, 1975.

MOREIRA, A. **COMUNICAÇÃO NO CANTEIRO DE OBRAS: PROBLEMAS E PROPOSTAS**. Revista Científica Semana Acadêmica. Fortaleza, ano MMXIX, Nº. 000165, 2019.

NASCIMENTO, C. R.; SILVA, T.R.F.; SEIXAS, A. de. **Reconstrução 3d da igreja nossa senhora do rosário, bairro da várzea, recife – pernambuco com emprego de estação total**. Anais.. VI Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife-PE, 2016.

NÚÑEZ ANDRÉS, M. A.; BUIILL POZUELO, F. Evolution of the architectural and heritage representation. Landscape and Urban Planning, 2009. v. 91, n. 2, p. 105–112.

OLIVAS, Mary Angélica de Azevedo. **Calibração de câmaras fotogramétricas**. Dissertação (mestrado em Ciências Geodésicas). Curitiba: UFPR, 1980.

OLIVEIRA, Mário Mendonça de. **A documentação como ferramenta de preservação da memória**. Brasília, DF: IPHAN / Programa Monumenta, 2008, Caderno 7.

OLIVEIRA, M. M. **Na Bahia uma Experiência de Fotogrametria de Monumentos**. Planejamento, Salvador, v. 7, n.1, p. 51-69, jan./mar. 1979.

OLIVEIRA, Viviane J. Aplicação do dense stereo matching (dsm) no levantamento da fachada da igreja do boqueirão em Salvador/BA. Salvador/BA, UFBA, 2019.

PIRES, R. W.; BERNARDES, M. M.; LINDEN, J.C. **Existe bibliografia consagrada sobre desenho técnico no Brasil?**. Conferência Geometrias & Graphica (2015).

POLLIO, Vitruvius. **Tratado de Arquitetura**. Tradução de Justino MACIEL. São Paulo: Martins Fontes, 2007.

QUARESMA, Antonio Martins. Alexandre Massai - A "Escola Italiana" de engenharia militar no litoral alentejano (séculos XVI e XVII). Lisboa: Centro Cultural Emmerico Nunes, 2007.

ROTH, Leland M. **Entender a arquitetura: Seus elementos, história e significado**. Leland M. Roth; [tradução Joana Canêdo]. -- São Paulo: Gustavo Gili, 2017.

SANTOS, A. A. **Representações cartográficas**. Universidade Federal de Pernambuco. Ed. Universitária, Recife, 1985.

SANTOS, C.; SEIXAS, A.; GARNÉS, S.; PÓVOAS, Y. A Medição e Análise de Primagem e Planeza na Construção de Fachadas e Pisos/Lajes de Edifícios. Revista Brasileira de Cartografia, 2021.

SANTOS, Paulo. **A arquitetura religiosa de Ouro Preto**. São Paulo: Kosmos, 1951.

SILVA, C.; Processamento de nuvens de pontos para estudos do património cultural: Caso do Mosteiro de Alcobaça. Universidade de Lisboa, 2019.

SEEBER, G. **Satellite geodesy**. 2a Ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2003.

SILVA, D. C. considerações práticas em fotogrametria a curta distância aplicada ao levantamento de um tanque e a questão da precisão e exatidão. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 1995.

SILVA, C. V. A. Estudos das discrepâncias relativas entre as altitudes ortométricas e geométricas e suas implicações em trabalhos de engenharia. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Centro de Tecnologias e Geociências. Departamento de Engenharia Cartográfica. Recife, 2012.

SILVA, A. M. S.; SILVA, D. C. **Resseção espacial em fotogrametria com quatérnios**. Boletim de Ciências Geodésicas. Sec. Artigos, Curitiba, v. 21, no 4, p.750-764, out-dez, 2015.

SILVA, T. R. F., NASCIMENTO, C. R.; SEIXAS, A. de. Levantamento Topográfico Planialtimétrico da Igreja Nossa Senhora do Rosário, Bairro da Várzea, Recife - Pernambuco e seu entorno. Anais.. VI Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife-PE, 2016.

SILVEIRA, L. C. da. **Cálculos Geodésicos no sistema UTM aplicados à topografia**. Criciúma, Editora e livraria Luana Ltda, 1990. 166p.

SOUZA, J. K. S. de; CAMPOS, M. F. M. **Um dispositivo automático para aquisição da forma 3D de objetos**. SIBGRAPI 98 - International Symposium on Computer Graphics, Image Processing and Vision, 1998.

SOUZA, W. O.; GARNÉS, S. J. A. Análises de projeções cartográficas para grandes escalas. In: **Anais... IV Simpósio Brasileiro de Ciências geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife – PE, 06-09 de Mai de 2012. p.001-009.**

SOUZA, A. N.; GARNÉS, S. J. A.; MARQUES, H. A. Avaliação do posicionamento GNSS obtido pelos métodos cinemático RTK/NTRIP e PPP em tempo real. Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto. **Revista Brasileira de Cartografia**. Nº 66/5, 2014. p. 1117-1133.

SUŽIEDELYTĖ-VISOCKIENĖ, J., BAGDŽIŪNAITĖ. R., MALYS. N. AND MALIENE. V., "**Close-range photogrammetry enables documentation of environment-induced deformation of architectural heritage**," Environ. Eng. Manag. J., vol. 14, no. 6, pp. 1371–1381, 2015, DOI: 10.30638/eemj.2015.149.

TAMASHIRO, H. A.; **Desenho Técnico Arquitetônico: Constatação do atual ensino nas escolas brasileiras de arquitetura e urbanismo**; São Carlos, 2003.

TRETYAKOVA, Z. O. et al.; **Geometric modelling of building forms using BIM, VR, AR-technology**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (2019).

TIERRA CRIOLLO, A. R. **Comparação da precisão dos métodos cinemáticos para distâncias menores a dez quilômetros**. Dissertação (Mestrado em Geodésia) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1993.

UOTILA, U.A. **Introduction to adjustment computations with matrices**. Lecture Notes. Published by the Depart. of Geod. Science. O.S.U, Columbus, Ohio, 1967.

YAKAR, M.; YILMAZ, H. M.; GULEC, S. A.; KORUMAZ, M. Advantage of Digital Close Range Photogrammetry in Drawing of Muqarnas in Architecture. Information Technology Journal, 2009. n. 8, p. 202- 207. Disponível em: <<https://scialert.net/abstract/?doi=itj.2009.202.207>>.