



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/02.23.19.23-TDI

## FUSÃO DE DADOS ALS, TLS E FOTOGRAFÉTRICOS DE CURTO ALCANCE PARA A MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE EDIFICAÇÕES

Paulo Roberto da Silva Ruiz

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Cláudia Maria de Almeida, e Marcos Benedito Schimalski, aprovada em 26 de fevereiro de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/4489CKE>>

INPE  
São José dos Campos  
2021

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)  
Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
CEP 12.227-010  
São José dos Campos - SP - Brasil  
Tel.:(012) 3208-6923/7348  
E-mail: pubtc@inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**

**Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

**Membros:**

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)  
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)  
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)  
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon  
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/02.23.19.23-TDI

## FUSÃO DE DADOS ALS, TLS E FOTOGRAFÉTRICOS DE CURTO ALCANCE PARA A MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE EDIFICAÇÕES

Paulo Roberto da Silva Ruiz

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Cláudia Maria de Almeida, e Marcos Benedito Schimalski, aprovada em 26 de fevereiro de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/4489CKE>>

INPE  
São José dos Campos  
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Ruiz, Paulo Roberto da Silva.

R859f      Fusão de dados ALS, TLS e fotogramétricos de curto alcance para a modelagem tridimensional de edificações / Paulo Roberto da Silva Ruiz. – São José dos Campos : INPE, 2021.  
xxvi + 146 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/02.23.19.23-TDI)

Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021.

Orientadores : Drs. Cláudia Maria de Almeida, e Marcos Benedito Schimalski.

1. Fotogrametria. 2. ARP. 3. Drone. 4. LiDAR. 5. BIM.  
I.Título.

CDU 528.7:528.856

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**  
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

**DEFESA FINAL DE TESE DE PAULO ROBERTO DA SILVA RUIZ**

**BANCA Nº 020/2021, REG 100153/2017**

No dia 26 de fevereiro de 2021, as 14h, por teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Doutor em Sensoriamento Remoto. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca Examinadora e revisão final pelo(s) orientador(es).

**Título: "FUSÃO DE DADOS ALS, TLS E FOTOGRAMÉTRICOS DE CURTO ALCANCE PARA A MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE EDIFICAÇÕES"**

Eu, Thales Sehn Körting, como Presidente da Banca Examinadora, assino esta ATA em nome de todos os membros.

Dr. Thales Sehn Körting - Presidente - INPE

Dra Cláudia Maria de Almeida - Orientadora - INPE

Dr. Marcos Benedito Schimalski - Orientador - UDESC

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Membro da banca - INPE

Dr. Elcio Hideiti Shiguemori - Membro da banca - IEAv

Dra Camila Souza dos Anjos Lacerda - Convidada - IF/Sul de Minas

Dr. Edson Aparecido Mitishita - Convidado - UFPR



Documento assinado eletronicamente por **Thales Sehn Korting, Pesquisador**, em 01/03/2021, às 15:15 (horário oficial de Brasília), com fundamento no art. 6º do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **6555905** e o código CRC **01C009FD**.



---

**Referência:** Processo nº 01340.001151/2021-20

SEI nº 6555905

*“Ando devagar porque já tive pressa  
E levo esse sorriso  
Porque já chorei demais  
  
Hoje me sinto mais forte  
Mais feliz, quem sabe  
Só levo a certeza  
De que muito pouco sei  
Ou nada sei  
(...)”*

Almir Eduardo Melke Sater / Renato Teixeira de Oliveira



A MEUS PAIS,  
que me trouxeram até aqui.  
Sem eles, nada disto seria possível!



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à minha família, por me incentivar, apoiar e contribuir com minha formação.

À Dra. Renata Sampaio da Rocha pela inspiração, incentivo e apoio.

À Raquel Iria da Silva pelo apoio, compreensão e carinho nos momentos mais difíceis deste trabalho.

À Profa. Dra. Cláudia Maria de Almeida, por confiar em meu trabalho e dar a oportunidade de desenvolver este estudo. Agradeço pelas orientações e inúmeras palavras de incentivo. Obrigado por contribuir com meu desenvolvimento e capacidade intelectual.

Ao Prof. Dr. Marcos B. Schimalski, por ter viabilizado e caminhado conosco nesta pesquisa. Agradeço imensamente suas orientações, dicas e caminhos que sempre mostrava a seguir, com sua dedicação, capacidade, sempre passando confiança nos rumos do trabalho.

Ao Prof. Dr. Veraldo Liesenberg, por ter se disposto a realizar conosco o trabalho de campo para obtenção dos dados TLS.

Ao Dr. Reynier Hernandez Torres pelo incentivo e valiosas dicas.

Ao Me. Rorai Pereira Martins Neto pelas valiosas dicas de processamento.

Ao amigo Sérgio B. Pereira, por me ajudar nos levantamentos em campo. Meu profundo agradecimento pela valiosa contribuição!

Aos Profs. Drs. Edson Mitishita e Leonardo Ercolin pela cessão dos dados ALS.

Ao Departamento de Engenharia Florestal da UDESC pela cessão do equipamento TLS.

Aos docentes do Curso de Sensoriamento Remoto do INPE, que nesses seis anos, incluindo o mestrado, contribuíram e engrandeceram minha formação acadêmica com seus valiosos conhecimentos.

À Coordenação de Curso, especialmente à Profa. Dra. Ieda Sanches, que, com sua competência, dedicação e disposição, sempre me deu total apoio.

Aos docentes do curso de Pós-graduação em Ciências Cartográficas da FCT-UNESP pelas valiosas aulas que muito contribuíram com este trabalho.

Aos colegas do Curso de Sensoriamento Remoto do INPE e da Ciência Cartográfica da FCT-UNESP.

À UFPR, por tornar possível os trabalhos de campo e permitir o acesso ao campus, mesmo com a suspensão de atividades devido à pandemia. Agradeço aos Profs. Drs. Sérgio Braga Michelotto e Leonardo Ercolin e aos funcionários da manutenção, limpeza e vigilância, que sempre estiveram dispostos em ajudar.

Ao Laboratório de Integração e Testes (LIT) do INPE, por ter emprestado equipamento e realizado calibrações. Agradeço à sua competente e disposta equipe técnica.

À CAPES, pelo financiamento desta pesquisa.

E, finalmente, a todos os brasileiros que, com seus impostos, contribuem com toda e qualquer pesquisa neste país!

## RESUMO

Atualmente, levantamentos LiDAR e fotogramétricos, dadas as suas facilidades operacionais e de automação no processo de aquisição de informações métricas, vêm contribuindo com eficiência na reconstrução tridimensional de edificações, necessárias para a atualização cadastral e modelagem de Informação da Construção (*Building Information Modelling* – BIM) de edifícios existentes por meio da captura de dados relevantes em todo o seu ciclo de vida. Nesse sentido, o presente trabalho avalia a elaboração de nuvens de pontos obtidas a partir de plataformas *Light Detection Range* (LiDAR) e fotogramétrica para a construção de modelos *as-is* BIM (em relação ao edifício tal como está) em nível de detalhamento (*Level of Detail* - LoD) 3 por meio da fusão ou integração múltipla de dados. Os dados LiDAR foram obtidos por plataforma de varredura a laser fixa terrestre (*Terrestrial Laser Scanning* - TLS) e aérea (*Aerial Laser Scanning* - ALS), e os fotogramétricos por Aeronave Remotamente Pilotada (ARP). Para a realização desta pesquisa, foi selecionado o edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional – CETO – localizado no Campus da Universidade Federal do Paraná (UFPR) em Curitiba, Brasil. A metodologia desenvolvida neste trabalho aborda o processamento das nuvens de pontos primárias para serem integradas entre si, gerando cinco modelos de nuvens de pontos do edifício, sendo eles: (i) ALS + TLS; (ii) ALS + Fotogrametria de fachada; (iii) TLS + Fotogrametria de telhado; (iv) Fotogrametria de telhado e fachada; (v) híbrido múltiplo - ALS + TLS + Fotogrametria de telhado e fachada. A partir dos modelos de nuvens de pontos, foram gerados outros cinco modelos *as-is* BIM do edifício em LoD3. Os dados ALS foram processados na plataforma computacional LASTools. As varreduras TLS foram registradas no *software* Faro Scene e segmentadas no *software* CloudCompare. As nuvens de pontos fotogramétricas foram obtidas por Fotogrametria no *software* Agisoft PhotoScan. As integrações das nuvens primárias foram realizadas com o *software* CloudCompare empregando o método de registro "Ponto Mais Próximo Iterativo" (*Iterative Closest Point* – ICP). As modelagens *as-is* BIM foram realizadas no *software* Autodesk Revit. A qualidade das modelagens realizadas foi verificada por métodos de inspeção visual e comparações com as medições realizadas em campo. A integração das nuvens de pontos primárias alcançou desvios padrão inferiores a 15 cm, compatível com a literatura. Os modelos 3D de edificações, obtidos de nuvens de pontos baseados em TLS apresentaram as melhores acurácias. O modelo híbrido múltiplo *as-is* BIM não apresentou carência de dados, representando adequadamente o edifício de estudo em LoD3.

Palavras-chave: Fotogrametria. ARP. Drone. LiDAR. BIM. SfM. ICP. Modelagem 3D.



# ALS, TLS AND SHORT-RANGE PHOTOGRAMMETRIC DATA FUSION FOR BUILDINGS 3D MODELING

## ABSTRACT

3D Remote Sensing techniques contribute to an efficient registration and updating of constructed buildings through the digital acquisition and representation of relevant data throughout their life cycle, a process known as Building Information Modeling (BIM). This work evaluates different categories of point clouds, obtained from Light Detection and Ranging (LiDAR) and photogrammetric platforms, for the construction of as-is BIM models at a level of detail (LoD) 3 by means of multiple data fusion approaches. LiDAR data were obtained by Terrestrial Laser Scanning (TLS) and Aerial Laser Scanning (ALS) platforms, while photogrammetric data by a Remote Piloted Aircraft (ARP). Data acquisition was carried out for the Occupational Therapy Clinic School building, located on the Campus of the Federal University of Paraná (UFPR) in Curitiba, Brazil. The building has different blocks with distinct heights, facade retreats and extended rounded slabs on some of its facades. All these characteristics in addition to the uneven terrain and trees in the building surroundings made it difficult to obtain facade data. The methodology included the processing of primary point clouds to be integrated with each other, generating five models of building point clouds: (i) ALS + TLS; (ii) ALS + facade photogrammetry; (iii) TLS + roof photogrammetry; (iv) roof photogrammetry + facade photogrammetry; (v) multiple hybrid model - ALS + TLS + roof and facade photogrammetry. Based on the point cloud models, five as-is BIM models of the in LoD3 were generated. ALS data were processed in the LASTools platform. TLS were registered in Faro Scene and segmented in the CloudCompare software. Photogrammetric point clouds were obtained by Structure from Motion (SfM) in Agisoft PhotoScan. Data integration was performed using CloudCompare tools and the Iterative Closest Point (ICP) registration method. The as-is BIM modeling was performed using Autodesk Revit software. The results quality assessment was verified by means of visual inspection, physical measurements and deviation analyses. The primary integration point cloud showed deviations less than 15 cm, compatible with the literature. TLS-based point cloud models reached the best accuracy. On the other hand, as-is BIM models solely based on photogrammetry presented the smallest differences in relation to point cloud models. The multiple hybrid model-based as-is BIM did not experience lack of data, and hence, properly represented the studied building in LoD3.

Keywords: Photogrammetry. RPA. Drone. LiDAR. BIM. SfM. ICP. 3D Modeling.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Exemplo de sobreposição entre imagens: longitudinal (a) e lateral (b).....	11
Figura 2.2 – Plataformas terrestres para imageamento LiDAR. Escaneamento por plataformas fixas: (a) panorâmico, (b) híbrido e (c) câmera. (d) e (e) exemplo de um sistema de escaneamento dinâmico veicular (Modelo Velodyne HDL-64E). .....	15
Figura 2.3 – Parâmetros de configurações: (a) FOV, (b) abertura de varredura (Modelo Faro Focus3D 120).....	16
Figura 2.4 – Princípio do imageamento LiDAR aerotransportado. ....	17
Figura 2.5 – Mecanismos do espelho de varredura óptico mecânico: (A) Espelho oscilante; (B) Polígono Rotatório; (C) Varredura Palmer; (D) Varredura de fibras .....	18
Figura 2.6 –Configuração da varredura em relação ao tipo de espelho óptico mecânico: (A) Espelho oscilante; (B) Espelho oscilante com dois eixos; (C) Polígono Rotatório; (D) Varredura Palmer; (E) Varredura de fibras rotatórias. ....	18
Figura 2.7 – Exemplo de registro de nuvens de pontos. ....	21
Figura 2.8 – Nuvens de pontos registradas pelo método ICP: (a) a serem registradas e (b) resultado final. ....	22
Figura 3.1 – Localização do edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional – CETO. ....	34
Figura 3.2 – Dimensões do edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional – CETO. ....	35
Figura 3.3 – Equipamentos utilizados para coleta LiDAR. ....	35
Figura 3.4 – Equipamento utilizado para coleta de dados fotogramétricos. ....	36
Figura 3.5 – Tela da plataforma LASTools.....	38
Figura 3.6 – Tela do <i>software</i> Faro® Scene.....	39
Figura 3.7 – Tela do <i>software</i> Agisoft PhotoScan. ....	40
Figura 3.8 – Tela do <i>software</i> CloudCompare.....	41
Figura 3.9 – Tela do <i>software</i> Autodesk® Revit. ....	42

Figura 3.10 – Passos metodológicos adotados.....	43
Figura 3.11 – Posições de varredura da plataforma TLS. ....	45
Figura 3.12 – Detalhe de posições de varredura da plataforma TLS. ....	46
Figura 3.13 – Etapas do processamento dos dados ALS. ....	47
Figura 3.14 – Identificação de alvos artificiais no Faro Scene.....	49
Figura 3.15 – Plano de voo com altitude de 50 m. ....	51
Figura 3.16 – Metodologia para obtenção de fotografias de fachada com sobreposições frontal e lateral.....	52
Figura 3.17 – Árvores, desníveis e prédio anexo que impediram a aproximação da ARP.....	53
Figura 3.18 – Fluxo de trabalho de <i>software</i> com abordagem SfM. ....	55
Figura 3.19 – Grupo da nuvem de pontos densa da fachada principal, com os marcadores para alinhamento sinalizados por pontos ( <i>point</i> ) numerados. ....	56
Figura 3.20 – Posicionamento das fotografias alinhadas ao redor do edifício. ....	57
Figura 3.21 – Detalhe de criação de níveis ( <i>Level</i> ) de pavimentos no Autodesk® Revit.....	60
Figura 3.22 – Detalhe da localização de uma vidraça na nuvem de pontos. ...	60
Figura 3.23 – Distinção dos conceitos de acurácia e precisão.....	62
Figura 3.24 – Conceito básico utilizado nos métodos de cálculo de distância. ....	63
Figura 3.25 – Conceito usado na modelagem de superfície local. ....	65
Figura 3.26 – Detalhe dos elementos selecionados para mensuração. ....	66
Figura 4.1 – Nuvens de pontos primárias.....	69
Figura 4.2 – Edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional modelado com a integração de dados ALS e TLS.....	71
Figura 4.3 – Edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional modelado com a integração de dados ALS e Fotogrametria de fachada. ....	71
Figura 4.4 – Edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional modelado com a integração de dados TLS e Fotogrametria de telhado. ....	72
Figura 4.5 – Edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional modelado por Fotogrametria de telhado e de fachada.....	72
Figura 4.6 – Edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional modelado com a integração de dados ALS, TLS, Fotogrametria de telhado e de fachada. ....	73

Figura 4.7 – Distâncias entre nuvens de pontos ALS e TLS. ....	85
Figura 4.8 – Histograma e função gaussiana das distâncias ALS e TLS. ....	86
Figura 4.9 – Histograma e função gaussiana de probabilidade de distâncias entre pontos ALS e TLS no intervalo de tolerância de 50 cm. ....	86
Figura 4.10 – Distribuição das distâncias entre as nuvens de pontos ALS e TLS no intervalo de tolerância de 50 cm. ....	87
Figura 4.11 – Distâncias entre nuvens de pontos ALS e fotogramétrica de fachada. ....	88
Figura 4.12 – Histograma e modelo gaussiano das distâncias entre ALS e Fotogrametria de fachada. ....	88
Figura 4.13 – Histograma e função gaussiana de probabilidade de distâncias entre pontos ALS e fotogramétricos de fachada no intervalo de tolerância de 50 cm. ....	89
Figura 4.14 – Distribuição das distâncias entre as nuvens de pontos ALS e fotogramétricos no intervalo de tolerância de 50 cm. ....	89
Figura 4.15 – Distâncias entre nuvens de pontos TLS e fotogramétrica de telhado. ....	90
Figura 4.16 – Histograma e modelo gaussiano das distâncias entre TLS e Fotogrametria de telhado. ....	91
Figura 4.17 – Histograma e função gaussiana de probabilidade de distâncias entre pontos TLS e fotogramétricos de telhado no intervalo de tolerância de 50 cm. ....	91
Figura 4.18 – Distribuição das distâncias entre as nuvens de pontos TLS e fotogramétricos de telhado no intervalo de tolerância de 50 cm. ....	92
Figura 4.19 – Distâncias entre nuvens de pontos LiDAR e fotogramétrica. ....	93
Figura 4.20 – Histograma e probabilidade gaussiana das distâncias entre nuvens de pontos LiDAR e fotogramétrica. ....	94
Figura 4.21 – Função gaussiana de probabilidade de distâncias entre pontos LiDAR e fotogramétricos em intervalo de maior agregação de dados. ....	94
Figura 4.22 – Distâncias entre nuvens de pontos LiDAR e fotogramétrica em intervalo de maior agregação de dados. ....	95

Figura 4.23 – Síntese da precisão de integração das nuvens de pontos primárias.....	96
Figura 4.24 – Erro absoluto médio por classe apresentado pelos modelos de nuvens de pontos. ....	97
Figura 4.25 – Erro médio percentual por classe apresentado pelos modelos de nuvens de pontos. ....	98
Figura 4.26 – Erro médio absoluto e percentual geral apresentado pelos modelos de nuvens de pontos.....	99
Figura 4.27 – RMSE apresentada pelos modelos de nuvens de pontos. ....	100
Figura 4.28 – Regressão linear do modelo ALS + TLS. ....	101
Figura 4.29 – Regressão linear do modelo TLS + Fotogrametria.....	101
Figura 4.30 – Regressão linear do modelo ALS + Fotogrametria. ....	102
Figura 4.31 – Regressão linear do modelo fotogramétrico.....	102
Figura 4.32 – Regressão linear do modelo híbrido.....	103
Figura 4.33 – Histograma e função gaussiana das distâncias do modelo BIM ALS+TLS.....	104
Figura 4.34 – Distribuição das distâncias do modelo BIM ALS+TLS. ....	104
Figura 4.35 – Histograma e função gaussiana das distâncias do modelo BIM ALS + Fotogrametria. ....	105
Figura 4.36 – Distribuição das distâncias do modelo BIM ALS + Fotogrametria. ....	106
Figura 4.37 – Histograma e função gaussiana das distâncias do modelo BIM TLS + Fotogrametria. ....	107
Figura 4.38 – Distribuição das distâncias do modelo BIM TLS + Fotogrametria. ....	107
Figura 4.39 – Histograma e função gaussiana das distâncias do modelo BIM fotogramétrico. ....	108
Figura 4.40 – Distribuição das distâncias do modelo BIM fotogramétrico. ....	109
Figura 4.41 – Histograma e função gaussiana das distâncias do modelo BIM híbrido. ....	110
Figura 4.42 – Distribuição das distâncias do modelo BIM híbrido. ....	110

Figura 4.43 – Média e desvio padrão das distâncias dos modelos BIM em relação aos modelos de nuvens de pontos. ....	111
Figura 4.44 – Comparação de uma janela representada por TLS e Fotogrametria. ....	112
Figura 4.45 – Oclusão do feixe laser em pavimentos elevados. ....	113
Figura A.1 – Modelos <i>as-is</i> BIM ALS + Fotogrametria de fachada e TLS + Fotogrametria de telhado. ....	133
Figura B.1 – Análise de regressão referente às dimensões do modelo de nuvem de pontos ALS + TLS. ....	135
Figura B.2 – Análise de regressão referente às dimensões do modelo de nuvem de pontos ALS + Fotogrametria. ....	136
Figura B.3 – Análise de regressão referente às dimensões do modelo de nuvem de pontos TLS + Fotogrametria. ....	136
Figura B.4 – Análise de regressão referente às dimensões do modelo de nuvem de pontos fotogramétrica. ....	137
Figura B.5 – Análise de regressão referente às dimensões do modelo de nuvem de pontos híbrida múltipla. ....	137



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 – Especificações técnicas do sensor Optech ALTM Pegasus HD 500. ....	36
Tabela 3.2 – Especificações técnicas do equipamento Faro <i>LASER scanner</i> Focus 3D 120. ....	37
Tabela 3.3 – Especificações técnicas da câmera RGB da ARP Phantom 3 Standard. ....	37
Tabela 3.4 – Especificações técnicas do computador utilizado nos processamentos. ....	42
Tabela 3.5 – Classes de medidas utilizadas na verificação da acurácia. ....	67
Tabela 4.1 – Informações sobre as nuvens de pontos primárias. ....	70
Tabela 4.2 – Modelos de nuvens de pontos ALS + TLS e Fotogrametria de telhado + TLS do edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional. ....	75
Tabela 4.3 – Modelos de nuvens de pontos ALS + Fotogrametria de fachada e Fotogrametria de telhado + Fotogrametria de fachada do edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional. ....	77
Tabela 4.4 – Modelo de nuvem de pontos híbrido múltiplo do edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional. ....	79
Tabela 4.5 – Comparação entre modelos BIM do edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional. ....	82



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ALS	<i>Aerial Laser Scanner</i> (Laser Scanner Aerotransportado)
ARP	Aeronave Remotamente Pilotada
ASPRS	<i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i> (Associação Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto)
BIM	<i>Building Information Modelling</i> (Modelagem de Informação da Construção)
C2C	<i>Cloud to Cloud</i> (Nuvem a Nuvem)
CPD	<i>Coherent Point Drift</i> (Deriva de Ponto Coerente)
DGPS	<i>Differential Global Positioning Systems</i> (Sistema de Posicionamento Global Diferencial)
FOV	<i>Field of View</i> (Campo de Visão)
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> (Sistema de Navegação Global por Satélite)
ICP	<i>Iterative Closest Point</i> (Ponto Mais Próximo Iterativo)
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i> (Unidade de Medida Inercial)
INS	<i>Inertial Navigation System</i> (Sistema de Navegação Inercial)
LADAR	<i>LASER Detection and Ranging</i> (Detecção e Variação do Laser)
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> (Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação)
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i> (Detecção e Alcance da Luz)
LoDS	<i>Levels of Detail</i> (Níveis de Detalhes)
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDSn	Modelo Digital de Superfície normalizado
MDT	Modelo Digital de Terreno
OGC	<i>Open Geospatial Consortium</i> (Consórcio Geoespacial Aberto)
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> (Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio)
SVR	<i>Support Vector Registration</i> (Registro de Vetor de Suporte)
SfM	<i>Structure from Motion</i> (Estrutura a partir do Movimento)
TIN	<i>Triangular Irregular Network</i> (Grade Irregular Triangular)
TLS	<i>Terrestrial Laser Scanner</i> (Laser Scanner Terrestre)

UDESC Universidade do Estado de Santa Catarina

UFPR Universidade Federal do Paraná

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Hipótese.....	4
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo geral .....	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	7
2.1 Fotogrametria .....	7
2.1.1 Fotogrametria de curto alcance.....	8
2.1.2 Reconstrução fotogramétrica 3D.....	9
2.2 Tecnologia de varredura a laser .....	12
2.2.1 Imageamento por LiDAR .....	13
2.2.2 Plataformas LiDAR .....	13
2.2.3 Processamento de dados laser .....	19
2.3 Integração ou fusão de dados .....	20
2.4 Reconstrução tridimensional de edificações.....	25
2.4.1 Padrão geoespacial de representação urbana 3D .....	26
2.4.2 Avaliação de qualidade .....	28
2.5 Modelagem tridimensional de edifícios .....	29
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	33
3.1 Área de estudo .....	33
3.2 Dados de entrada .....	35
3.3 Softwares utilizados.....	38
3.3.1 LASTools.....	38
3.3.2 Faro® Scene .....	39
3.3.3 Agisoft PhotoScan.....	39
3.3.4 CloudCompare .....	40
3.3.5 Autodesk® Revit.....	41
3.4 Recursos computacionais.....	42

3.5	Procedimentos metodológicos.....	43
3.6	Escaneamento a laser .....	44
3.6.1	Coleta de dados .....	44
3.6.2	Extração de telhados.....	46
3.7	Extração de fachadas .....	48
3.8	Fotogrametria .....	50
3.8.1	Coleta de dados .....	50
3.8.2	Processamento de dados fotogramétricos .....	53
3.9	Integração de dados .....	57
3.10	Padrão geoespacial de representação urbana 3D .....	59
3.11	Avaliação dos resultados.....	61
3.11.1	Análise de desvios .....	62
3.11.2	Acurácia dos modelos de nuvens de pontos .....	65
3.11.3	Análise de desvio dos modelos BIM.....	68
4	RESULTADOS .....	69
4.1	Modelagem por nuvens de pontos.....	69
4.2	Modelagem BIM.....	81
4.3	Avaliação dos resultados .....	84
4.3.1	Integração das nuvens de pontos .....	84
4.3.1.1	Integração ALS e TLS .....	84
4.3.1.2	Integração ALS e Fotogrametria de fachada.....	87
4.3.1.3	Integração TLS e Fotogrametria de telhado .....	90
4.3.1.4	Integração LiDAR e Fotogrametria.....	92
4.3.2	Acurácia dos modelos de nuvens de pontos .....	96
4.3.3	Precisão dos modelos <i>as-is</i> BIM .....	103
4.4	Discussão .....	112
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	117
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	121
	APÊNDICE A – MODELOS <i>AS-IS</i> BIM .....	133
	APÊNDICE B - RESULTADOS DAS ANÁLISES DE REGRESSÃO LINEAR	135
	ANEXO A – RELATÓRIO DE CALIBRAÇÃO DA TRENA LASER DIGITAL ..	139

## 1 INTRODUÇÃO

Desde a Revolução Industrial, nos séculos XVIII e XIX, a urbanização tornou-se um fenômeno de larga escala em nível mundial, transferindo grandes contingentes de população rural para centros urbanos. Este fenômeno se acentuou no século XX e continua em franca ascensão no século atual. A população urbana global, que é de 54% em 2020, deverá atingir 60% até 2030, alcançando índices próximos de 70% em 2050, conforme indicam projeções da Organização das Nações Unidas (ONU) (KNORR et al., 2018). No caso do Brasil, o último censo demográfico, realizado em 2010, indica que 84% da população vive nas cidades (IBGE, 2012). Nesse sentido, também se verifica o aumento das megacidades, que são aquelas que possuem mais de dez milhões de habitantes, passando de 10, em 1990, para 37 em 2015, correspondendo a quase meio bilhão de residentes, ou seja, 12% da população mundial (UNITED NATIONS, 2018). Portanto, em vista de abrigarem a maior parte da população mundial, é inegável que as cidades devam receber importantes intervenções em prol da qualidade de vida de sua população.

O crescimento da população urbana proporciona uma elevada pressão no setor da construção civil, o qual experimenta o crescimento da demanda face à execução de reformas em moradias e à realização de novas construções. Com isso, aumentam as necessidades de esforços em se projetar, cadastrar e documentar edifícios existentes, planejados ou em construção. Em centros urbanos de países desenvolvidos, verifica-se uma tendência de diminuição de construção de novas moradias e um conseqüente aumento no número de projetos de reforma e manutenção em edifícios existentes (KIM et al., 2020). Já em países em desenvolvimento, como o Brasil, evidencia-se um elevado déficit habitacional, incrementado pela especulação imobiliária, imóveis ociosos, abandonados ou inacabados. Uma das conseqüências é o aumento de favelas e a ocupação de edifícios em situação precária, os quais se tornam o lar provisório de milhares de pessoas carentes (RAMÍREZ-OROZCO, 2019). Nesse contexto, é necessário elaborar diagnósticos e documentação adequada de edifícios públicos ou privados que estejam inacabados, abandonados ou

ociosos, a fim de melhorar seu desempenho, funcionalidade e qualidade ambiental, objetivando atender aos atuais padrões de sustentabilidade.

Em muitos casos, cadastrar ou revitalizar construções antigas tornam-se tarefas difíceis devido à falta de documentação (TRAN; KHOSHELHAM, 2019). Essa tarefa pode ser atendida pela modelagem tridimensional urbana, a qual desempenha um importante papel na integração de dados econômicos e sociais, auxiliando empresas privadas e a esfera pública na tomada de decisões. Atualmente, modelos tridimensionais (3D) de edificações e, por extensão, urbanos são amplamente utilizados em vários campos, como, por exemplo, avaliação pós-ocupação (APO) e patologia de construções, construção de edifícios e cidades inteligentes, proteção ao patrimônio arquitetônico, paisagístico e arqueológico, gestão urbana e em muitas outras áreas nos âmbitos público e privado. O rápido desenvolvimento dos diversos setores econômicos e industriais demandam igualmente um crescente avanço das tecnologias de aquisição e processamento de dados de ambientes urbanos.

A captura de dados de edifícios permite atualizar a chamada Modelagem de Informação da Construção, conhecida pela sigla BIM (*Building Information Modelling*), possuindo grande potencial para contribuir com o inventário de edifícios (POCOBELLI et al., 2018; MAIEZZA, 2019). Com isso, na última década, emerge uma nova categoria denominada *as-is* BIM (BIM como está de fato), a qual é considerada um processo de engenharia reversa, em que, a partir de dados de campo, reconstrói-se o projeto do edifício (HICHRI et al., 2013). Mas, utilizar métodos tradicionais de mensuração é lento, moroso e impreciso pela necessidade de mensurações em campo (ANIL et al., 2013). Nesse cenário, o Sensoriamento Remoto é capaz de oferecer técnicas para automatizar esse processo. A utilização de nuvens de pontos tridimensionais, obtidas por meio da Fotogrametria Digital ou varredura a laser, esta última conhecida como *Light Detection and Ranging* - LiDAR (em português, Detecção e Alcance da Luz), oferece uma representação do estado atual das edificações, sendo útil, entre outras finalidades, para construções antigas (LU; LEE, 2017), inclusive edifícios históricos (CARNEVALI, et al., 2019). Assim, a

partir das nuvens de pontos, é possível atualizar os modelos BIM, ou criá-los, se forem inexistentes.

Objetivando padronizar o processo de modelagem e documentação de edificações, a Administração de Serviços Gerais (*General Service Administration* – GSA) (GSA, 2020) dos Estados Unidos da América (EUA) definiu quatro níveis de detalhes (*Level of Detail* - LoDs), iniciando com a simples projeção bidimensional (LoD1), agregando estruturas simples como colunas (LoD2), estruturas detalhadas de fachada (LoD3) até detalhes internos dos edifícios (LoD4) (GROGER et al., 2008). Diante do desenvolvimento tecnológico atual, a literatura destaca que, para alcançar maiores níveis de detalhamento, é necessário integrar dados de diferentes plataformas de aquisição (MOHAMMED et al., 2015; WEN, et al. 2019).

Para recobrir a fachada e telhado de edifícios, podem ser utilizados dados fotogramétricos e LiDAR oriundos de diferentes plataformas. Pontos de fachada e interior podem ser adquiridos por plataformas LiDAR terrestres, denominadas *Terrestrial Laser Scanning* (TLS). Já as plataformas aéreas, denominadas *Aerial Laser Scanning* (ALS), são comumente utilizadas para obter dados de telhados (TEO; HUANG, 2014). Da mesma forma, dados fotogramétricos podem ser obtidos a partir de posições terrestres ou aéreas, dependendo da plataforma utilizada. Assim, dados provenientes de plataformas distintas podem ser integrados para modelar desde os telhados até detalhes internos dos edifícios, alcançando o maior nível possível de detalhamento.

Apesar do desenvolvimento de plataformas aéreas, como as Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs), capazes de obter dados de fachada de edifícios e de telhado, o aprofundamento de técnicas e análises sobre a integração de dados continua sendo necessária, pois ainda não é possível obter dados integrais de edifícios através de uma única plataforma. Nos últimos anos, vários trabalhos contemplam os diversos tipos e métodos de integração de dados para a modelagem de edifícios, desde fusão ALS e TLS (ABDULLAH et al., 2017) até LiDAR e Fotogrametria (COGIMA et al., 2020).

Dentro do contexto da integração de dados, a literatura também destaca o desenvolvimento de algoritmos de registro de dados provenientes de plataformas distintas, visto que essa é uma etapa essencial da integração de dados. Verificam-se muitos trabalhos utilizando as mais variadas estratégias para alcançar melhores acurácias: como a filtragem da nuvem de pontos (POMERLEAU et al., 2015), detecção do contorno de construções (CHENG X. et al., 2018) e até contexto de horizonte (LIANG et al., 2020). Sobretudo, métodos tradicionais iterativos, como o Ponto Mais Próximo Iterativo ou, em inglês, *Iterative Closest Point* (ICP), continuam sendo amplamente utilizados, como em Carnevali et al. (2019) e Cogima et al. (2020).

Diante do exposto, existem diversos aspectos que necessitam ser mais bem investigados, objetivando demonstrar a capacidade de se desenvolver modelos BIM com elevados níveis de detalhes a partir de nuvens de pontos tridimensionais e utilizando a integração ou fusão de dados.

## **1.1 Hipótese**

Dada a evolução das plataformas e sensores de obtenção de dados tridimensionais, o presente trabalho apresenta a seguinte hipótese:

A integração de nuvens de pontos tridimensionais proporcionará o aporte necessário para uma adequada modelagem *as-is* BIM de um edifício com múltiplos pavimentos em um nível de detalhe LoD3?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Avaliar o potencial da fusão ou integração múltipla de dados de diferentes plataformas e sensores para a reconstrução tridimensional de um edifício urbano de cinco pavimentos em nível LoD3, contemplando alto nível de detalhamento e garantindo a acurácia geométrica do edifício reconstruído.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Para alcançar o objetivo geral, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- a) Extração de pontos referentes ao edifício das nuvens de pontos ALS e TLS.
- b) Elaborar e executar uma metodologia de campo para obtenção de dados fotogramétricos de fachada e telhado do edifício.
- c) Obter nuvens de pontos fotogramétricas do edifício para a geração de um modelo de nuvem de pontos.
- d) Reconstruir tridimensionalmente o edifício em nível LoD3, integrando os seguintes dados: ALS e TLS; ALS e fotogramétrico de fachada; TLS e fotogramétrico de telhado; fotogramétrico de telhado e de fachada; ALS, TLS e fotogramétrico de telhado e fachada.
- e) Elaborar metodologia para obtenção de dimensões do edifício em campo.
- f) Determinar a acurácia dos resultados.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo contempla os aspectos teóricos relacionados às tecnologias adotadas, destacando os fundamentos da Fotogrametria de curto alcance e LiDAR. Nesse sentido, apresenta uma revisão teórica do estado da arte em aplicações urbanas.

### 2.1 Fotogrametria

A palavra Fotogrametria é derivada das palavras gregas *photos* - que significa luz, *gramma* - algo desenhado ou escrito (representado) e *metron* - significa medir. Assim, Fotogrametria significaria “medir graficamente usando luz”. De outro modo, pode ser definida como uma técnica para extrair de fotografias as formas, dimensões e posições dos objetos. Uma das maiores vantagens do uso da Fotogrametria é remover a necessidade do acesso físico em cada ponto no qual a medida é necessária, substituindo as medidas em campo por fotogramétricas. Dessa forma, ganha-se em custo e tempo de aquisição, mantendo a acurácia e a informação dos objetos de estudo (GROETELAARS; AMORIM, 2004).

Os primórdios da Fotogrametria estão intimamente relacionados com o advento das fotografias. Em meados do século XIX, os princípios geométricos de perspectivas eram utilizados para desenhar vastas áreas e objetos com elevada exatidão geométrica a partir de fotografias. Ainda no século XIX, fotografias aéreas começaram a ser utilizadas para mapeamento. No início do século XX, essa técnica ganhou enorme impulso com o início da aviação, que permitiu maior alcance em relação aos balões, pombos e pipas utilizados até então. As primeiras aplicações da Fotogrametria estão relacionadas a mapeamento de praças, áreas arqueológicas, geleiras, montanhas, cidades e em uso militar para reconhecimento de áreas inimigas e deslocamento de tropas (ROCHA et al., 2004; ESPARTEL, 1973).

Durante a maior parte do século XX, o principal meio de construção de mapas topográficos eram os instrumentos estereoscópicos. Por muitos anos, a Fotogrametria tem sido empregada nas geociências mediante a visualização

estereoscópica e análise de pares homólogos de fotografias aéreas (PILLMORE, 1964). Duas fotografias de um mesmo objeto (chamado estereopar) são obtidas com centros de perspectiva diferentes, em que as direções dos eixos óticos sejam paralelos entre si e perpendiculares ao plano do objeto. Esse efeito é utilizado na restituição do objeto fotografado por ser similar à visão humana e garantir a visualização estereoscópica, ou seja, tridimensionalmente (YANAGA, 2006).

### **2.1.1 Fotogrametria de curto alcance**

A proximidade entre a câmera e o objeto permitiu avanços no contexto da chamada Fotogrametria de curto alcance. Essa aproximação é conseguida por novas plataformas de aquisição de dados. Com os avanços na engenharia e computação verificados nos últimos anos, a produção de dados e extração de informação por meio da Fotogrametria sofreu um grande salto quantitativo e qualitativo. Verifica-se uma melhoria na precisão, acurácia, qualidade da imagem, diversificação de produtos, rapidez na aquisição com novas plataformas e velocidade na produção com modernos *softwares* de processamento (LUHMANN et al., 2006).

Devido ao avanço tecnológico, a Fotogrametria de curto alcance é mais eficiente e econômica do que há poucas décadas. Tradicionalmente, são utilizadas câmeras fotogramétricas que possuem como principais características o rigor na construção e na definição dos parâmetros geométricos que a regem. Por outro lado, câmeras de baixo custo, que não são projetadas para fins fotogramétricos, são frequentemente empregadas na Fotogrametria. O constante desenvolvimento da tecnologia digital permite melhorias significativas nas câmeras digitais, melhorando a resolução espacial e o alcance na captura de dados. O desenvolvimento de novas plataformas aéreas, as Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs), permitiram um ressignificado na obtenção e qualidade dos dados, devido a automação do processo de obtenção de dados, baixo custo e facilidades operacionais. Assim, a aerofotogrametria ganha flexibilidade e economia, possibilitando ampliar sua utilização.

No meio urbano, a Fotogrametria de curto alcance tem sido empregada na representação de fachadas (RODRIGUES, 2016), reconstrução tridimensional de edifícios e documentação de estruturas históricas (CARVALHO et al., 2020, AL KHALIL, 2020). Os produtos derivados da Fotogrametria são utilizados para distintas finalidades, bem como subsídios para a reforma de edifícios por meio da atualização da modelagem das construções (LU; LEE, 2017)

### **2.1.2 Reconstrução fotogramétrica 3D**

Através de fotografias sobrepostas, é possível calcular a localização tridimensional (3D) de um conjunto determinado de pontos homólogos, e a partir daí, é possível reconstituir o objeto. Para isso, é preciso extrair as posições relativas da câmera, as direções e as coordenadas de cada ponto 3D.

Na Fotogrametria convencional, as estimativas iniciais dos pontos homólogos geralmente são obtidas pelo fornecimento das coordenadas tridimensionais de pontos de controle obtidos antes do processamento, incorporando estimativas de erro e um sistema de referência terrestre. Dessa forma, é realizado um “ajuste de feixe”, compreendido por uma otimização de todas as variáveis para produzir um modelo 3D consistente, com erro residual global minimizado. Sobretudo, *softwares* de Fotogrametria convencional apresentam a necessidade de informações adicionais e muitas vezes têm complexidades e intolerâncias elevadas, requerendo criteriosos requisitos para coleta de imagens e pontos de controle (LUHMANN et al., 2006).

Nas últimas décadas, surgiram avanços na área de visão computacional chamada “Estrutura a partir do Movimento” (*Structure from Motion - SfM*), a qual permite a produção automatizada de modelos a partir de uma coleção de imagens sem a necessidade de informações adicionais. Isso permite o uso de plataformas de aquisição de imagens acessíveis, tanto para aplicações aéreas como terrestres. O SfM difere da Fotogrametria tradicional principalmente em três aspectos: (i) os recursos podem ser automaticamente identificados e combinados em imagens em diferentes escalas, ângulos de visão e orientações, o que é benéfico quando são utilizadas pequenas plataformas

instáveis, como ARPs; (ii) as equações utilizadas no algoritmo podem ser resolvidas sem informações das posições da câmera ou pontos de controle do solo, embora possam ser utilizadas; (iii) a calibração da câmera pode ser automaticamente resolvida ou refinada durante o processamento (MICHELETTI et al., 2015).

O SfM pode entregar automaticamente modelos fotogramétricos sem exigir uma homogeneidade rigorosa em imagens sobrepostas, posições de câmeras e calibrações (FONSTAD et al., 2013). O algoritmo detecta pontos característicos nas imagens, identificando elementos geométricos como bordas ou detalhes específicos dos objetos em cena e, posteriormente, monitora o movimento dessas características ao longo da sequência de imagens. Por ser dependente de recursos extraídos dos objetos imageados, o SfM apresenta melhor desempenho em um conjunto de imagens com grande proporção de sobreposição entre imagens (WESTOBY et al., 2012).

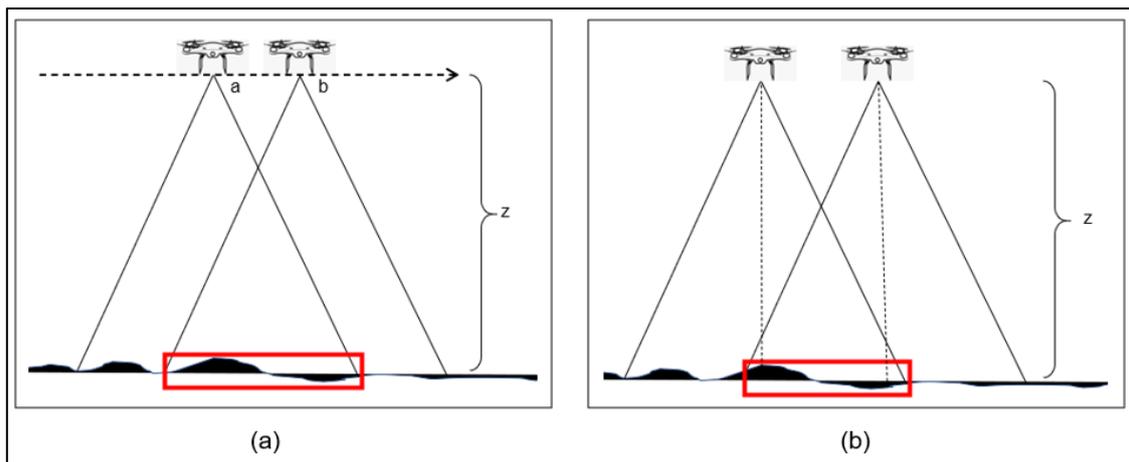
Normalmente, a Fotogrametria utilizando SfM é utilizada para definir todo o fluxo de trabalho de reconstrução 3D. No entanto, o SfM refere-se à etapa específica de fornecimento de parâmetros de câmera para a geração de uma nuvem de pontos densa, que depende dos pontos homólogos chaves. Embora alguns estudos utilizem apenas a nuvem de pontos esparsa (com baixa densidade de pontos), em alguns casos, é preciso utilizar algoritmos de correspondência densa de imagem, como o estéreo multivisão (*Multi Vision Stereo - MVS*), para densificar a nuvem de pontos (IGLHAUT et al., 2019). A descrição detalhada do fluxo de trabalho SfM encontra-se na Seção 3.8.2.

Atualmente, a utilização de ARPs associada a processamento SfM ampliou o leque de aplicações da mesma. Com sua capacidade de intervenções rápidas e sistêmicas, as ARPs estão qualificadas para serem utilizadas em diversas operações, como, por exemplo, a análise de cenários de catástrofes, agricultura de precisão e diversas aplicações de reconstrução tridimensional de objetos e ambientes, sobretudo urbanos. Sua principal diferença para plataformas tradicionais é a altura do voo. Os voos mais baixos associados à sua instabilidade tornam necessário obter mais imagens para evitar lacunas e

assegurar sobreposição, objetivando aumentar a redundância na interseção tridimensional melhorando o aspecto geométrico 3D dos alvos (RODRIGUES, 2016).

O uso associado de imagens obtidas por ARPs e SfM permite enormes vantagens, pois são tecnologias complementares. Para ser possível a geração de modelos tridimensionais com alta acurácia, *softwares* SfM exigem uma sobreposição lateral mínima de 60% entre as imagens de faixas de voo vizinhas, e longitudinal mínima de 80% entre imagens subsequentes na mesma faixa de voo, a fim de aumentar a redundância de raios ou medidas de pontos homólogos (AGISOFT, 2016). A Figura 2.1 ilustra a sobreposição lateral e frontal exigidas em um levantamento fotogramétrico.

Figura 2.1 – Exemplo de sobreposição entre imagens: longitudinal (a) e lateral (b).



Fonte: Produção do autor.

Muitas tecnologias estão sendo utilizadas para realizar levantamentos cujo objetivo é a reconstrução tridimensional de objetos. Atualmente, as técnicas mais utilizadas para obter modelos tridimensionais urbanos de forma automática ou semiautomática são a Fotogrametria de curto alcance e a varredura a laser (LiDAR). Em diversas aplicações, as duas técnicas são utilizadas em conjunto de forma a obter modelos com maior acurácia e realismo. A próxima seção abordará as características dos sistemas de escaneamento a laser, o LiDAR.

## 2.2 Tecnologia de varredura a laser

Lasers são dispositivos que produzem intensos feixes de luz coerentes, isto é, formados por ondas de mesma frequência e direção que mantêm uma relação de fase constante entre si, e altamente colimados, isto é, paralelos. O comprimento de onda da luz do laser é extremamente puro quando comparado a outras fontes de luz, ou seja, monocromático. Devido à coerência, todos os raios de luz individuais possuem o mesmo comprimento de onda. A luz de um laser normalmente tem uma divergência muito baixa, podendo viajar por grandes distâncias ou ser focado em um ponto muito pequeno. Por causa dessas propriedades, os lasers são usados em uma ampla variedade de aplicações (HITZ et al., 2012).

Em 1958, Charles Townes e Arthur Schalow apresentaram os princípios operacionais básicos do laser. Dois anos mais tarde, em 1960, Theodor Maiman apresentou no Laboratório de Pesquisa Hughs, o primeiro laser funcional baseado na emissão estimulada de radiação luminosa, cujo estudo previa a possibilidade de estimular um corpo a liberar energia com características constantes e uniformes em forma de radiação eletromagnética (WEHR; LOHR, 1999). Desde então, diversos tipos de lasers foram inventados, encontrando aplicações práticas em áreas científicas, industriais, comerciais, médicas, militares, dentre outras.

O termo laser é um acrônimo em inglês para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, o que em português significa Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação. Nessa área, são aceitas e utilizadas diversas nomenclaturas para o método de captura de dados a partir do laser, tais como o termo LADAR, em inglês *LAser Detection and Ranging* (em português, Detecção e Alcance do Laser), e LiDAR, que, conforme anteriormente exposto, corresponde ao acrônimo em inglês *Light Detection and Ranging* (em português, Detecção e Alcance da Luz). Já no Brasil, é comum a utilização dos termos "Laser scanner", "Varredura Laser" (DALMOLIN; SANTOS, 2004) e "Perfilamento a Laser". Ao longo deste trabalho, por motivo de padronização, será adotada a nomenclatura LiDAR.

### **2.2.1 Imageamento por LiDAR**

A utilização de sensores laser para fins topográficos é recente e está em constante crescimento. Instalados em diferentes tipos de plataformas terrestres, aéreas e orbitais, o LiDAR permite a aquisição e o registro dos pontos com coordenadas 3D, viabilizando obter as propriedades geométricas de objetos da superfície terrestre. Como se trata de um sensor ativo, sua operação ocorre geralmente na região do infravermelho próximo (IVP), entre 1.040 e 1.060 nm, podendo se dar também na região do verde (532 nm), como no caso do laser altímetro em nível orbital a bordo do Satélite ICESat2 (SPACE, 2021), permitindo a aquisição de dados durante a noite (BOLAND, et al., 2004).

Didaticamente, o LiDAR pode ser dividido em três componentes principais: a unidade de medição laser, que emite e recebe o sinal laser refletido, um sistema de varredura e uma unidade de registro de medições de apoio (BALTSAVIAS, 1999). Conforme Tommaselli (2003), os recursos de varredura são implementados através de espelhos controlados por servomotores encarregados de redirecionar o feixe emitido. O resultado do processo de medição e processamento é um conjunto de pontos com coordenadas tridimensionais, medidos na superfície do terreno e de objetos existentes nesta. Além das coordenadas de cada ponto atingido pelo feixe de laser, a intensidade do sinal de retorno, captada pelo sensor, é também registrada e armazenada. Assim, o produto obtido por meio da tecnologia LiDAR é conhecido como nuvem de pontos, em inglês *point cloud*, a qual possui a posição tridimensional em relação a um sistema de referência terrestre (x, y e z) para cada ponto imageado (SATO, 2017), possibilitando a obtenção de informações 3D da área.

### **2.2.2 Plataformas LiDAR**

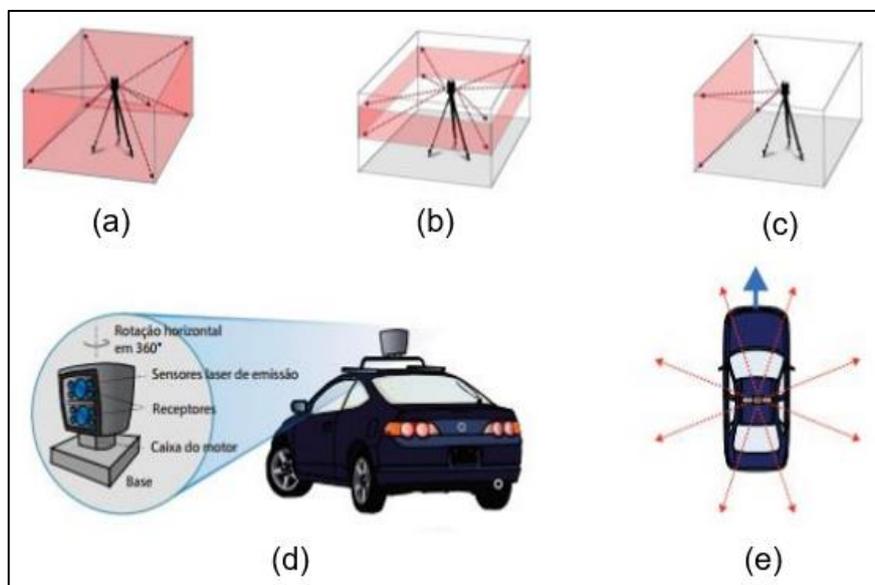
A aquisição de dados a partir de LiDAR pode ser realizada por plataformas terrestres (*Terrestrial Laser Scanner - TLS*), como automóveis, portáteis ou dispositivos fixos em tripés; a bordo de aeronaves (*Aerial Laser Scanners -*

ALS), como helicópteros, aviões, ARPs, ou ainda, plataformas orbitais. Convém salientar que os sensores laser orbitais se prestam como altímetros, dispositivos para correção de apontamento de telescópios e para estudos de vegetação, gelo e recursos hídricos, nuvens, aerossóis, clima e oceanos (APPLICATIONS, 2021), mas não para fins de geração de modelos tridimensionais urbanos.

As plataformas terrestres podem ser divididas em fixas ou dinâmicas. No primeiro caso, o imageamento é realizado de três diferentes modos: (i) Panorâmico (Figura 2.2(a)), limitado somente pelo campo de visada de sua própria base; (ii) híbrido (Figura 2.2(b)), neste caso, o ângulo vertical é limitado a uma determinada abertura; e (iii) Câmera (Figura 2.2(c)), possuindo limitações em ambos os ângulos, tanto vertical quanto azimutal (STAIGER, 2003).

As plataformas terrestres dinâmicas podem ser portáteis, i.e., autotransportadas pelo usuário (fixas e sustentadas com o auxílio de uma mochila, ou então, seguradas pela mão do usuário e em constante movimento pendular), ou estarem a bordo de veículos que possuem sensores acoplados em suportes na parte superior (Figura 2.2(d)) ou, como no caso dos veículos autônomos, espalhados em sua fuselagem (Figura 2.2(e)) a fim de garantir a máxima abrangência da área. Possuem o mesmo princípio do escaneamento fixo, acrescido do sistema de georreferenciamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e por uma unidade de medida inercial (*Inertial Measurement Unit – IMU*), para garantir a correção das variações de movimento ao longo do percurso, coletando tanto os deslocamentos angulares quanto à aceleração linear da plataforma.

Figura 2.2 – Plataformas terrestres para imageamento LiDAR. Escaneamento por plataformas fixas: (a) panorâmico, (b) híbrido e (c) câmera. (d) e (e) exemplo de um sistema de escaneamento dinâmico veicular (Modelo Velodyne HDL-64E).



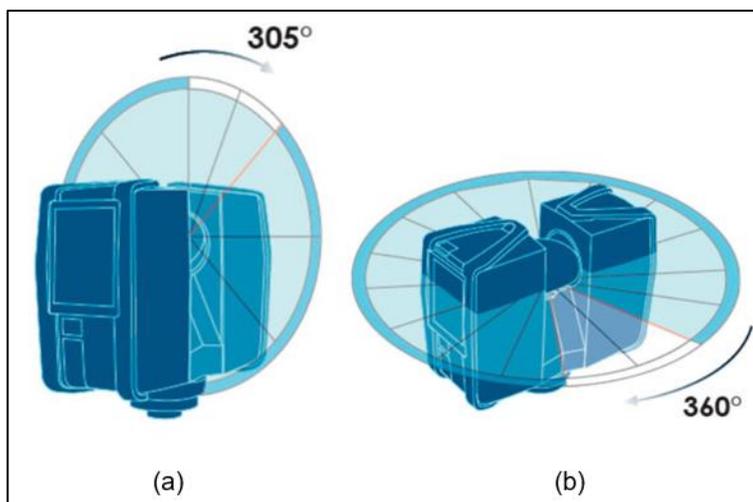
Fonte: Adaptado de Staiger (2003).

Um TLS fixo, como o que foi utilizado neste trabalho, possui como elementos principais o emissor do feixe laser, um espelho ou prisma rotativo para facilitar a deflexão do feixe, codificadores angulares, para registrar a orientação do feixe, e um motor de rotação em torno do eixo principal de todo o conjunto do equipamento. O princípio de seu funcionamento consiste basicamente na emissão de um feixe de luz infravermelho até o centro do espelho rotativo. O espelho desvia o laser em rotação vertical ao redor de toda a área escaneada. A seguir, cada feixe laser, ao atingir a superfície de um objeto, é refletido e parte dele retorna para o equipamento, permitindo calcular a distância até o ponto atingido pelo feixe (FARO, 2010).

A resolução do escaneamento é definida pela distância média entre os pontos obtidos. Quanto menor a distância entre o equipamento e o objeto, menor será a distância entre os pontos e, conseqüentemente, melhor a resolução espacial. Uma resolução espacial melhor significa uma nuvem de pontos mais densa e um levantamento de campo mais moroso. Geralmente, os equipamentos permitem configurar alguns parâmetros. O campo de visão (*Field of View* – FOV) constitui o maior ângulo de abertura do defletor (Figura 2.3(a)). A

abertura de varredura consiste no ângulo máximo de abertura em torno do eixo principal do TLS, ao longo do qual são realizadas as mensurações de pontos (Figura 2.3(b)).

Figura 2.3 – Parâmetros de configurações: (a) FOV, (b) abertura de varredura (Modelo Faro Focus3D 120).



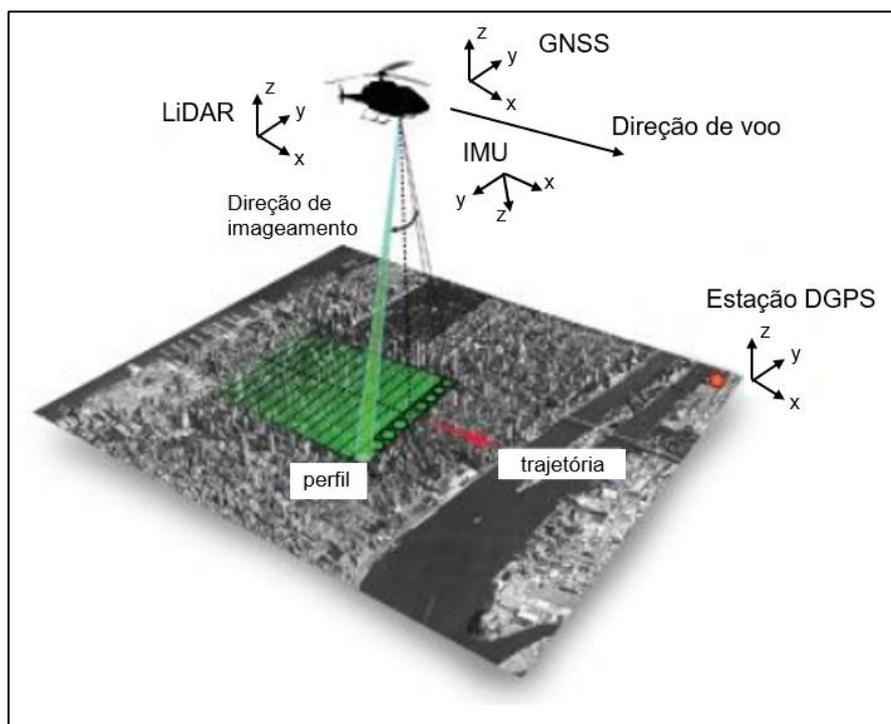
Fonte: Faro (2010).

A disposição do TLS em campo para a obtenção de dados é essencial para o sucesso do levantamento, determinando inclusive a acurácia obtida. A metodologia *single-scan* (escaneamento simples) consiste em fixar o TLS em um único ponto, a partir do qual é gerada a nuvem. Já na metodologia *multiple-scan* (escaneamento múltiplo), é proposta uma triangulação na obtenção dos dados com múltiplas posições do TLS, de forma a minimizar o sombreamento e oclusões do feixe laser. Diversos estudos demonstram que o escaneamento simples apresenta maior rapidez e menor custo na obtenção dos dados, mas há um aumento na incerteza dos dados, embora em precisões aceitáveis. Por sua vez, o escaneamento múltiplo, embora reduza o sombreamento e oclusões, exige mais tempo e recursos para o levantamento (LIANG; HYYPÄ, 2013).

As plataformas de escaneamento a laser aerotransportado permitem adquirir dados de maiores áreas (Figura 2.4). Esse sistema pode ser comumente dividido em quatro partes principais: a) sistema de varredura a laser, responsável por registrar o tempo entre a emissão e o retorno do sinal em

determinado ponto na superfície terrestre e transformar o sinal analógico em digital por meio de um conversor; b) sistema de varredura, tal como um espelho oscilante ou um prisma rotativo, para escanear a área de interesse; c) receptor GNSS, capaz de fornecer a altitude e a localização da plataforma, podendo trabalhar conjuntamente com um receptor GNSS instalado sobre um vértice geodésico, consistindo assim em um sistema de posicionamento global diferencial, do termo em inglês *Differential Global Positioning Systems* – DGPS e; d) Sistema Inercial de Navegação (*Inertial Navigation System* - INS) que utiliza uma IMU para determinar a orientação, posição, altitude e a velocidade da plataforma, e a partir desses, com os parâmetros de montagem, são determinados esses parâmetros para o sensor acoplado na aeronave (WEHR; LOHR, 1999; GIONGO et al., 2010).

Figura 2.4 – Princípio do imageamento LiDAR aerotransportado.

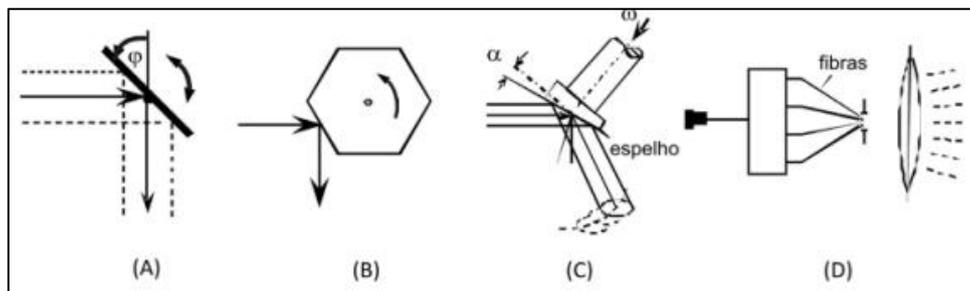


Fonte: Adaptado de Shan e Toth (2008).

Os sistemas LiDAR aerotransportados podem empregar quatro diferentes tipos de mecanismos de varredura que geram, cada um deles, um padrão de espaçamento e localização dos pontos amostrados no terreno. A Figura 2.4 apresenta as diferentes configurações do espelho de varredura, baseados em:

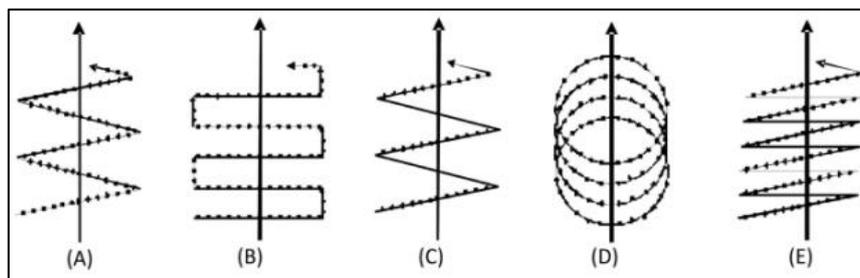
espelho oscilante (Figura 2.5A), polígono rotatório (Figura 2.5B), varredura Palmer (Figura 2.5C) e em fibras ópticas (Figura 2.5D) (WEHR; LOHR, 1999). Cada sistema produz um tipo de varredura, que é apresentado na Figura 2.6. De forma geral, os espelhos oscilantes produzem uma varredura dos pontos com uma disposição em forma de “ziguezague” (Figura 2.6A). Por sua vez, os espelhos oscilantes com dois eixos realizam a varredura em forma de “U” (Figura 2.6B). Já, os espelhos de polígono de rotação possuem varredura unidirecional em forma de linhas paralelas (Figura 2.6C). A varredura Palmer ocorre em forma de elipsoide (Figura 2.6D). Enfim, a varredura de fibra rotatória é muito similar ao polígono de rotação, por igualmente possuir varredura unidirecional em forma de linhas paralelas (Figura 2.6E) (GIONGO et al., 2010).

Figura 2.5 – Mecanismos do espelho de varredura óptico mecânico: (A) Espelho oscilante; (B) Polígono Rotatório; (C) Varredura Palmer; (D) Varredura de fibras



Fonte: Adaptado de Wehr e Lohr (1999).

Figura 2.6 –Configuração da varredura em relação ao tipo de espelho óptico mecânico: (A) Espelho oscilante; (B) Espelho oscilante com dois eixos; (C) Polígono Rotatório; (D) Varredura Palmer; (E) Varredura de fibras rotatórias.



Fonte: Adaptado de Wehr e Lohr (1999).

### 2.2.3 Processamento de dados laser

Após a aquisição, um conjunto de diferentes dados será processado. Compõem esse conjunto os dados do receptor GNSS terrestre, dados de navegação (GNSS e IMU) – para plataformas aerotransportadas e dado de amplitude, parâmetros de imageamento (ângulos de imageamento), além da contagem de retornos.

No caso dos dados TLS, as varreduras das múltiplas posições de escaneamento precisam ser transformadas em um sistema de coordenadas cartesiano local, agregando os diferentes sistemas internos de coordenadas esféricas para obter uma única nuvem de pontos de todo o levantamento (FAN et al., 2015). Cada varredura, ou nuvem de pontos, será obtida em um referencial 3D local. As varreduras independentes são transformadas para um único referencial 3D local, geralmente a primeira delas é utilizada como sendo a base ou podem ser diretamente referenciais para um frame geodésico cartesiano tridimensional, se forem utilizados pontos de apoio. Em cada varredura, as medidas de distância e ângulos são feitas com base em um sistema esférico. A partir dessas, são obtidas coordenadas no *frame* local 3D. Muitos métodos de registro foram descritos na literatura, podendo ser baseados em alvos artificiais externos ou em recursos extraídos da sobreposição dos alvos nas próprias nuvens de pontos (BESL; MCKAY, 1992; FAN et al., 2015; LIU et al., 2017). Maiores informações sobre o registro das varreduras utilizadas neste trabalho são apresentadas na Seção 3.7.

No caso dos dados obtidos por meio de plataformas aerotransportadas, a primeira parte do processamento consiste na correção dos dados GNSS aerotransportados em relação aos dados do receptor GNSS terrestre. Em seguida, esses dados são integrados às medidas IMU para representar o percurso do voo. Assim, é realizada a transformação dos dados  $x$ ,  $y$  e  $z$  medidos em sistema geodésico mundial (WGS-84 - *World Geodetic System*) para o sistema de coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  no sistema geodésico de interesse (BERALDIN et al., 2010).

Com isso, é possível classificar os pontos da varredura ALS a partir da altura dos alvos, gerando seus principais produtos primários. Os pontos referentes ao solo são utilizados para gerar o Modelo Digital de Terreno (MDT), que pode ser estruturado por uma Rede Triangular Irregular (*Triangular Irregular Network* - TIN). Além disso, é possível gerar um modelo que inclui, além dos pontos do solo, pontos de objetos a eles superpostos, esse é o denominado Modelo Digital de Superfície (MDS). Os pontos classificados como acima do solo têm suas alturas em relação ao solo calculadas empregando-se como superfície de referência o MDT. Por meio da interpolação das grades do MDT e MDS, é possível calcular suas diferenças, criando uma terceira grade que contém pontos apenas dos objetos acima do solo. Essa grade é chamada de Modelo Digital de Altura ou Modelo Digital de Superfície normalizado (MDSn) (WEIDNER; FOERSTNER, 1995).

O objetivo do processamento de dados laser consiste em separar pontos pertencentes ao objeto alvo dos demais pontos da nuvem de pontos laser. Esse processo é realizado por meio de ferramentas de classificação de uma dada região na nuvem de pontos, a qual basicamente consiste em rotulá-la conforme características de altura, planaridade e rugosidade. Com isso, através das nuvens de pontos ALS e TLS, é possível identificar e particularizar áreas para serem estudadas em variadas aplicações.

### **2.3 Integração ou fusão de dados**

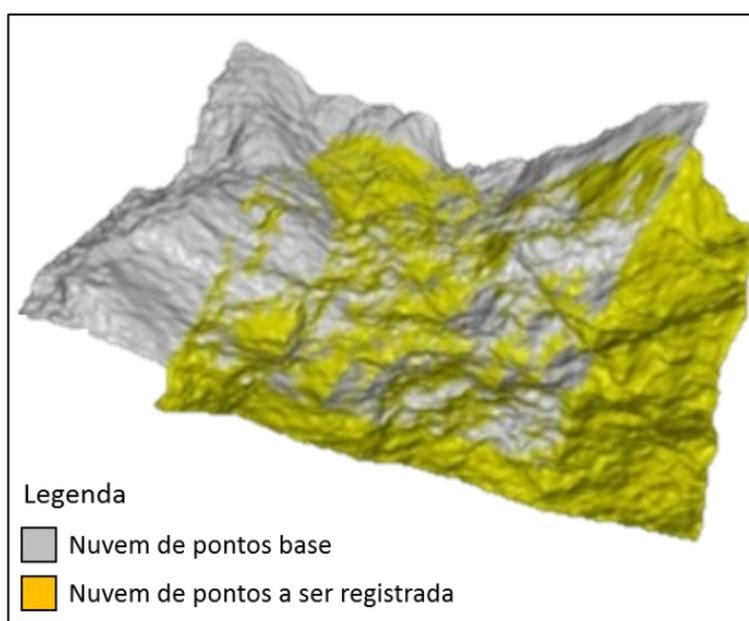
A integração ou fusão de dados permite unir diferentes fontes de dados para obter melhores resultados em diversas atividades de imageamento. No contexto deste trabalho, os sistemas TLS possuem excelente capacidade de obter pontos de fachadas de edifícios para sua reconstrução tridimensional, mas, quando se trata dos telhados, essa característica já não é evidenciada. Assim, dados provenientes de um sistema ALS, que apresentam pontos de telhado, podem ser incorporados a dados TLS para a tarefa de reconstruir tridimensionalmente o edifício. Existem diversas modalidades para a fusão ou integração de dados laser: dados ALS e TLS, dados TLS e Fotogrametria de

curto alcance, e tripla integração, envolvendo sistemas ALS, TLS e Fotogrametria de curto alcance (TEO; HUANG, 2014).

Na concepção da integração de dados, os conjuntos de dados devem ser primeiramente registrados. Isso é necessário porque os sensores possuem diferentes sistemas de coordenadas e resoluções espaciais. O registro de dados é realizado por algoritmos específicos, sendo possível determinar a precisão dos dados integrados com base na avaliação de precisão. Após essas etapas, é possível gerar o modelo 3D, identificando e reconstruindo os alvos (ABDULLAH, 2017).

O registro de dados consiste na aplicação de procedimentos que permitem transformar o sistema de coordenadas de um conjunto de dados para outro sistema, característico dos dados que servirão de base para a integração (MOHAMMED, 2015). Frequentemente, cada nuvem de pontos está em um sistema de referência distinto, devendo ser realizado o registro para que todos os dados estejam em um mesmo sistema de referência, o que possibilita a sobreposição de dados obtidos em datas e plataformas diferentes. A Figura 2.7 ilustra dois conjuntos de dados 3D a serem registrados.

Figura 2.7 – Exemplo de registro de nuvens de pontos.

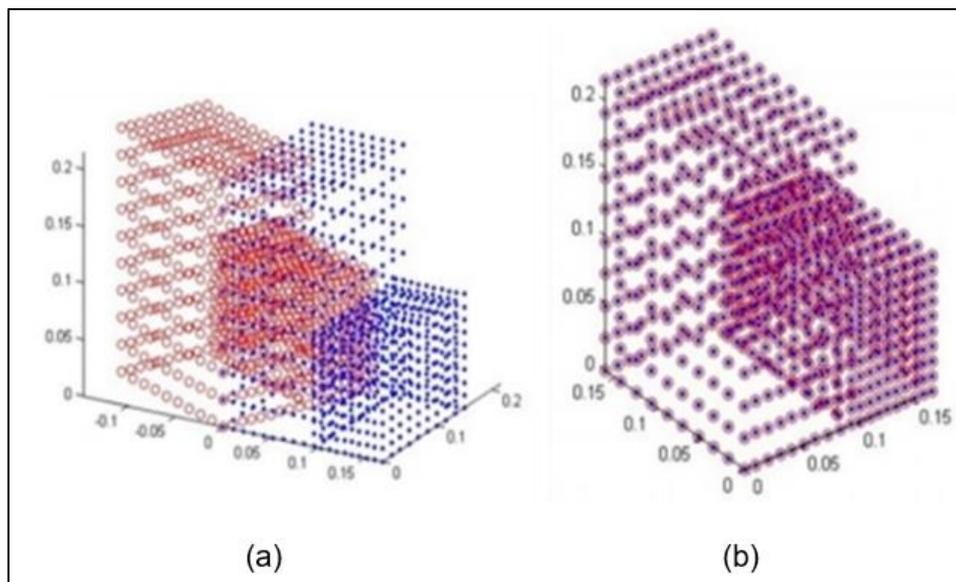


Fonte: Adaptado de Pereira (2016).

Um dos métodos de registro mais simples e amplamente utilizado em diversas aplicações é o *Iterative Closest Point* (ICP). Originalmente desenvolvido por Besl e Mckay (1992), inicialmente o ICP estabelece pseudocorrespondências ponto a ponto entre os pares de nuvens de pontos. Nesse sentido, o algoritmo admite que os pontos mais próximos sejam correspondentes. A seguir, um problema de otimização deve ser resolvido. Iterativamente, o ICP minimiza a distância euclidiana entre os pontos e calcula os parâmetros de transformação (PAVAN; SANTOS, 2015).

Um exemplo ilustrativo do ICP é apresentado na Figura 2.8. Na Figura 2.8a, tem-se um exemplo de duas nuvens de pontos em uma configuração inicial, indicadas pelas cores vermelha e azul, já na Figura 2.8b, observa-se o resultado do alinhamento entre os dois conjuntos de dados.

Figura 2.8 – Nuvens de pontos registradas pelo método ICP: (a) a serem registradas e (b) resultado final.



Fonte: Adaptado de Pereira (2016).

O funcionamento do método ICP será detalhado a seguir, baseado em Pereira (2016). Uma das nuvens de pontos é considerada como referência, os parâmetros de rotação e translação são calculados em cada iteração, sendo aplicados sobre a nuvem alvo (a ser registrada), objetivando minimizar a função custo apresentada na Equação 2.1.

$$F(q) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|x_i - (\mathbf{R}(q_R)p_i + \mathbf{T})\|^2, \quad (2.1)$$

em que  $N$  é o número de pontos,  $x_i$  o  $i$ -ésimo vetor relacionado ao conjunto alvo,  $p_i$  o  $i$ -ésimo vetor relacionado ao conjunto de entrada,  $\mathbf{R}$  é a matriz de rotação obtida pelo ICP e  $\mathbf{T}$  é igual ao  $q_T$ , que é o vetor de translação obtido pelo ICP.

O método ICP se baseia em uma análise do vetor quatérnion  $q = [q_R | q_T]^t$ , em que  $q_R = [q_0, q_1, q_2, q_3]$  representa o vetor responsável por mapear a rotação e  $q_T = [q_4, q_5, q_6]$  é o vetor responsável pela translação. O vetor  $q_R$  representa o autovetor correspondente ao máximo autovalor da matriz  $Q(C_{XP})$  (Equação 2.2), em que  $C_{XP}$  representa a matriz de covariância cruzada dos conjuntos  $x$  e  $p$ .

$$Q(C_{XP}) = \begin{pmatrix} \text{tr}(C_{XP}) & \Delta^T \\ \Delta & C_{XP} + C_{XP}^T - \text{tr}(C_{XP})\mathbf{I}_3 \end{pmatrix}, \quad (2.2)$$

em que  $\Delta = [A_{23}, A_{31}, A_{12}]^T$  é obtido da matriz  $A = C_{XP} - C_{XP}^T$ .

Os valores de  $q_R$  são então aplicados à matriz  $\mathbf{R}$  (Equação 2.3), a fim de obter a rotação ótima da iteração presente.

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 + q_2^2 - q_1^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 + q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 \end{pmatrix}. \quad (2.3)$$

Por fim, o vetor  $q_T = T$ , o qual representa a translação ótima, é obtido pela Equação 2.4.

$$q_T = \mu_X - R(q_R)\mu_P, \quad (2.4)$$

em que  $\mu_X$  e  $\mu_P$  representam os vetores de média dos respectivos conjuntos. A cada iteração, são obtidas uma rotação e uma translação. O processo iterativo se encerra quando a diferença entre os erros quadráticos médios entre duas iterações subsequentes dos conjuntos de dados se torna inferior a um limiar determinado pelo usuário. O fim de todo o processo do método ICP indica o registro das nuvens de pontos.

Métodos alternativos ao ICP foram desenvolvidos e foram apresentados na literatura, objetivando superar as limitações de sobreposição e alinhamento inicial do ICP. Dentre eles, podem ser destacados os métodos baseados em probabilidades, como o *Coherent Point Drift* (CPD), desenvolvido por Myronenko e Song (2010), sendo robusto a ruídos e *outliers*, e o *Support Vector Registration* (SVR), proposto por Campbell e Peterson (2015), tendo eficiência em tratar de oclusões e ausência de dados, como avaliados em Ruiz et al. (2021, no prelo). Além destes, métodos baseados em primitivas, explorando recursos como ponto, linha ou superfície, são especialmente úteis para registrar dados que apresentam baixa sobreposição, caso daqueles obtidos em perspectivas diferentes, como de telhados provenientes de nuvem de pontos ALS e de fachadas extraídas de dados TLS. Nesse contexto, é realizada uma análise preliminar dos dados para extrair e comparar as primitivas. Esse processo pode ser realizado por filtragem das nuvens de pontos e, a partir daí, estabelecer correspondências entre os conjuntos de dados. Inserem-se neste contexto o método desenvolvido por Pomerleau et al. (2015), o qual utiliza filtragem, e o método desenvolvido por Cheng X. et al. (2018), fazendo uso do contorno de construções. Outra abordagem é a determinação de contexto de horizonte, explorada por Liang et al. (2020), na qual, por meio de comparação de coordenadas, são identificadas possíveis áreas em nuvens de pontos ALS para serem inseridos automaticamente dados TLS, otimizando o processo de registro para grandes volumes de dados.

Destacam-se também os algoritmos de aprendizado profundo (*deep learning*) para otimizar o processo de registro de nuvens de pontos, como o desenvolvido por Li et al. (2020).

## **2.4 Reconstrução tridimensional de edificações**

Desde a década de 1980, já existem pesquisas objetivando a reconstrução de objetos em 3D. Com o avanço tecnológico alcançado nas décadas seguintes, estas pesquisas foram intensificadas, possibilitando a aplicação, aperfeiçoamento e desenvolvimento de diversas tecnologias e metodologias nessa área (BOTELHO, 2007). Nesse sentido, o uso do Sensoriamento Remoto está se tornando comum em aplicações urbanas, sobretudo para a extração de feições de fachadas, telhados de edifícios e geração de modelos tridimensionais.

O levantamento e atualização de documentação dos edifícios existentes é considerado um processo de engenharia reversa, em que, a partir de informações obtidas do estado atual das construções, é possível criar ou atualizar sua documentação (HICHRI et al., 2013). Tradicionalmente, este procedimento é realizado por levantamentos manuais, verificando pontualmente as condições das construções, incluindo suas dimensões e materiais por meio do uso de fotografias e fitas métricas. Esses dados são utilizados para atualizar os modelos e desenhos, ou no caso de ausência de documentação pertinente dos edifícios, gerar esses documentos digitais (ANIL et al., 2013; DEZEN-KEMPTER, 2015).

Neste sentido, as tecnologias de Sensoriamento Remoto apresentam-se como alternativas promissoras aos levantamentos manuais. Fotogrametria e LiDAR oferecem condições para a automatização de processos, permitindo coletar grande densidade de informações de forma rápida, registrando com precisão o estado atual das edificações, suas imperfeições e irregularidades decorrentes do processo construtivo e as deformações e desgastes do ciclo de vida da edificação (GROETELAARS; AMORIM, 2004).

A reconstrução tridimensional de edifícios para fins de documentação insere-se no contexto da Modelagem de Informação da Construção (BIM). O conceito BIM é bem amplo, sendo confundido como tecnologia, mas defendido como um processo (LU; LEE, 2017; POCOBELLI et al., 2018) de acompanhamento do ciclo de vida de uma construção, desde sua concepção, construção, reformas e atualizações de estruturas e documentação. Existem várias definições para BIM, as quais refletem cada fase do ciclo de vida do edifício. Para novos edifícios, um *as-planned* BIM (como planejado) é criado na fase de projeto, e um *as-built* BIM (como construído) é estabelecido atualizando o *as-planned* BIM sempre que ocorrerem alterações durante a construção. Já o *as-is* BIM (como está) é utilizado para documentar como está o edifício muito tempo após sua construção, geralmente edifícios construídos sem nenhum tipo de documentação BIM (TANG et al., 2011; LU; LEE, 2017).

Geralmente, a construção de modelos *as-is* BIM é realizada de forma manual, por isso, além de ser demorada e morosa, insere subjetividade na acurácia dos modelos. Significativos avanços estão sendo alcançados no desenvolvimento de métodos automáticos e semiautomáticos para a conversão de nuvens de pontos em modelos *as-is* BIM, como em Xiong et al. (2013), Quintana et al. (2018) e Bassier et al. (2019). Apesar disso, o enriquecimento semântico e estrutural de todos os elementos construídos ainda requer esforços para alcançar altas taxas de acurácia, diminuindo o tempo de modelagem e a intervenção do operador.

A seguir, serão apresentados os padrões e níveis de detalhamentos especificados para a adequada modelagem de edifícios.

#### **2.4.1 Padrão geoespacial de representação urbana 3D**

Com o objetivo de padronizar os formatos de arquivos e quantificar os níveis de detalhamento de um modelo virtual 3D urbano, o Consórcio Geoespacial Aberto (*Open Geospatial Consortium – OGC*) criou o padrão *CityGML* para o estabelecimento de entidades, atributos e relações em modelos 3D urbanos. O padrão consiste em um modelo semântico comum para representações 3D de

ambientes urbanos, que contempla um conceito de modelagem com alto grau de interoperabilidade, permitindo a integração, interpretação, uso e gestão de dados, com maior agilidade no processo de obtenção dos modelos de objetos de acordo com o nível de detalhe requerido para sua aplicação, aumentando assim as possibilidades de uso.

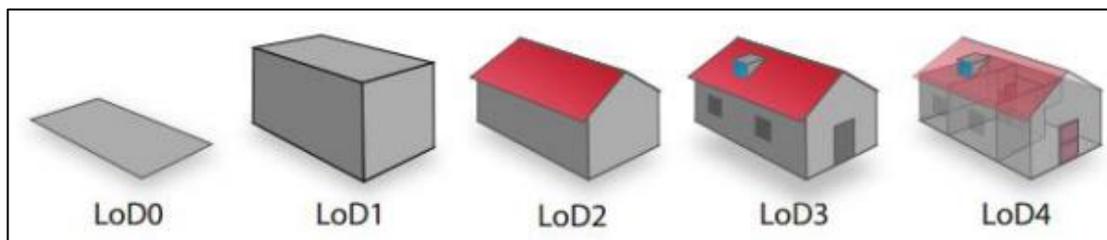
Desenvolvido como código aberto em formato XML, o padrão *CityGML* adere à Linguagem de Marcação Geográfica 3 (GML - *Geography Markup Language 3*), que, por sua vez, representa o padrão internacional para troca de dados espaciais e de codificação, idealizado pelo OGC e ISO TC2116 (KRESSE; FADAIE, 2004), sendo que ISO TC corresponde a Comitê Técnico da Organização Internacional para Padronização (*International Standardization Organization - Technical Committee*).

As classes do padrão *CityGML* e suas relações são definidas de acordo com as propriedades geométricas, topológicas, semânticas e de aparência dos objetos topográficos. Assim, uma classe “cidade” ou “*City*”, por exemplo, compreende não somente estruturas artificiais, como também características como elevação, vegetação, corpos d’água, entre outros (GRÖGER et al., 2008). O *CityGML* especifica também os níveis de detalhamento, denominados LoDs (*Levels of Detail*), nos quais cada objeto possui uma determinada representação 3D, ou seja, objetos em uma mesma cena podem possuir níveis de detalhamento maiores do que outros.

Os LoDs são classificados em cinco níveis: o primeiro, LoD0, corresponde ao nível básico de detalhamento, compreendendo as informações 2D das edificações. O segundo nível, LoD1, corresponde à representação 3D, tal que os edifícios são representados por superfícies horizontais, descrevendo a sua localização espacial e altura. No nível LoD2, são agregadas as entidades estruturais simples, como colunas externas ou garagens. O nível LoD3 apresenta detalhes estruturais externos mais refinados. Nesse nível, são agregados componentes de textura e aberturas em suas fachadas, como portas, janelas e sacadas. Por fim, o último nível LoD4, representa o nível de detalhamento mais alto, com informações da estrutura interna dos objetos,

adquirida normalmente por instrumentos terrestres (KOLBE et al., 2005). Na Figura 2.9, são ilustrados os cinco níveis de detalhamento descritos acima.

Figura 2.9 – Níveis de detalhamento (LoDs) do padrão *CityGML* para modelos 3D de edificações.



Fonte: Adaptado de Kolbe et al. (2005).

A seguir, será abordada a avaliação da qualidade de modelos tridimensionais de edifícios.

#### **2.4.2 Avaliação de qualidade**

Os principais métodos de avaliação da qualidade de modelos tridimensionais de edifícios realizados a partir de nuvens de pontos são: inspeção visual, método de medição física e análise de desvio. Os dois últimos fornecem uma avaliação quantitativa e a possibilidade de avaliar como o elemento está deslocado ou deformado.

O método de inspeção visual, como o próprio nome diz, permite a comparação visual da nuvem de pontos com o modelo BIM construído a partir dela, para a identificação de qualquer anomalia. Com ela, já é possível verificar os aspectos básicos da edificação, mas não fornece uma avaliação quantitativa para auxiliar na análise. Geralmente, esse método é adotado em todo o processo de elaboração do BIM, para que os erros possam ser ajustados antes da finalização do projeto (STOJANOVIC et al., 2017).

A medição física compara um conjunto de medições virtuais no modelo e as medições físicas correspondentes obtidas no edifício real por meio de instrumentos convencionais ou digitais ou, até mesmo, em plantas cadastrais. Os valores comparados são analisados estatisticamente para obter um valor

que explique a qualidade do modelo. A medição física é potencialmente o melhor método para verificar a precisão de uma medição específica no modelo, uma vez que as medidas virtuais são comparadas com as medidas de referência. Mas, por outro lado, apresenta algumas limitações. Por não oferecer cobertura completa de todas as medições possíveis, inviabiliza identificar todas as áreas de erros presentes no modelo, sobretudo quando se trata de modelos BIM. Além disso, é um processo demorado, pois requer uma elevada quantidade de aferições. Por fim, é difícil obter dados altamente precisos com métodos de medição baseados em operação manual (como no caso da trena a laser), ainda que o equipamento seja sofisticado e de elevada precisão, é desafiador devido às limitações de acessibilidade para medir todas as estruturas do edifício (CHEOK; FRANASZEK, 2009, ANIL et al., 2013).

O método de análise de desvio é aplicado para avaliar a qualidade da modelagem *as-is* BIM, comparando-a com o modelo de nuvem de pontos que lhe serviu de base. Ele é composto por três etapas principais. Na primeira delas, os desvios são computados através do cálculo de distâncias entre o modelo de nuvem de pontos e o modelo *as-is* BIM. Geralmente é utilizado o cálculo da distância euclidiana do vizinho mais próximo (maiores detalhes são encontrados na Seção 3.11.1). Na segunda etapa, os desvios computados são visualizados tridimensionalmente, auxiliando na identificação dos padrões de erros do modelo *as-is* BIM. Na etapa final, os padrões de desvio são analisados para identificar as fontes, tipos e magnitudes de erros (ANIL et al., 2013).

## **2.5 Modelagem tridimensional de edifícios**

A presente seção objetiva apresentar o estado da arte em modelagem de edifícios a partir de nuvens de pontos tridimensionais.

Inicialmente, é importante destacar a finalidade de qualquer modelagem de edifício. A modelagem é utilizada no contexto da construção civil para gerir todo o ciclo de vida de um edifício, desde seu planejamento, construção, manutenção, e eventualmente sua demolição (CARNEVALI et al., 2019). Essa atividade está inserida na área denominada BIM, como explicado na Seção 2.4.

Sua concepção remonta à década de 1970 (EASTMAN et al., 2011), mas sua difusão ocorreu nos últimos dez anos, devido ao desenvolvimento de *softwares* específicos para modelagem 3D.

Nos últimos cinco anos, a metodologia BIM está sendo adotada dentro do ciclo de trabalho de diversos setores da construção civil, reduzindo significativamente custos e proporcionando interlocução entre profissionais e empresas (CARNEVALI et al., 2019). Algumas informações semânticas vitais para a documentação de uma construção, como geometrias reais, suas funções e topologias atuais, só podem ser incorporadas em BIMs construídos (TANG et al. 2011). Além disso, a condição construída difere de quando ela foi projetada devido a alterações de design ou erros inesperados e obras de reforma e ampliação (XUE et al., 2019). Assim, novas metodologias foram e estão sendo desenvolvidas para elaborar modelagens de edifícios já existentes (MURPHY et al., 2009, HICHRI et al., 2013, CARNEVALI et al., 2019).

A adoção de técnicas de Sensoriamento Remoto para a representação tridimensional dos elementos das estruturas dos edifícios ganha destaque no enriquecimento de detalhes, na precisão das metodologias de levantamento geométrico e na confiabilidade dos modelos de restituição (ANIL et al., 2013). Podem ser obtidos dados por diferentes plataformas e sensores em ambientes internos e externos e processados para a geração de nuvens de pontos tridimensionais, como abordado nas seções anteriores. A fim de explorar as possibilidades de extração de informações semânticas de edifícios, diversas pesquisas exploram nuvens de pontos voltadas para a detecção, filtragem, segmentação, extração automática de elementos de edifícios, reduzindo o tempo na extração de dados e definição das características principais de edifícios (RODRIGUES, 2016; SANTOS, et al., 2018; CARRILHO et al., 2019). Pesquisas também foram desenvolvidas na tarefa de reconstruir tridimensionalmente edifícios por meio de nuvens de pontos e documentá-los, como nos trabalhos de Dezen-Kempter et al. (2015), que modelaram um edifício construído em 1964 por meio de LiDAR e Fotogrametria; Carnevali et al. (2019), que modelaram uma estação ferroviária por meio de dados LiDAR;

Usmani et al. (2019), que modelaram e documentaram um edifício na Malásia, além de modelagens de igrejas e estruturas arqueológicas realizadas nos trabalhos de Soria-Medina et al. (2013), Cogima et al. (2020), Moyano et al. (2020).

Extrapolando-se a modelagem tridimensional de edifícios para o ambiente urbano, visto que as abordagens metodológicas são as mesmas, é mister mencionar as inúmeras possibilidades de aplicações de tais modelos, em que se inserem a simulação de impacto de demolições em estruturas lindeiras, a previsão de áreas de atendimento de telefonia celular, o estabelecimento de rotas de veículos aéreos, o suporte a ações emergenciais em caso de desastres, o planejamento de reformulações viárias e instalação de infraestrutura, gestão de arborização urbana, inferência populacional de alta precisão, estudos aprofundados de microclima urbano e design urbano para conforto ambiental, avaliação de potencial para implantação de energia solar, planejamento participativo online, realidade virtual, navegação realista, simulações de intervenções de arte e marketing urbanos, cidades inteligentes, bem como a proteção a sítios de interesse para o patrimônio arquitetônico, paisagístico e arqueológico, entre outras.

Devido à complexidade e riqueza de detalhes dos edifícios, uma única plataforma não é capaz de obter dados para reconstruí-los em níveis de detalhes mais elevados. Para superar essa limitação, a integração de dados é explorada por diversos trabalhos, alcançando sobretudo níveis de detalhes LoD3. Uma das primeiras abordagens nesse contexto foi a integração de dados de fachada com dados de telhado, fusionando dados ALS e TLS (KEDZIERSKI; FRYSKOWSKA, 2014; MOHAMMED, 2015; ABDULLAH, 2017), inclusive com o desenvolvimento de métodos de registro automático (YANG et al. 2015; CHENG X. et al., 2018; LIANG et al., 2020). A popularização da Fotogrametria devido à facilidade na obtenção de fotografias de telhados e fachadas com câmeras digitais e ARPs também contribuíram para a integração de dados, como, por exemplo, combinando diferentes perspectivas de obtenção de fotografias (LI, 2016; HUANG et al., 2020; MARTÍNEZ-

CARRICONDO et al., 2020) ou integrando com dados LiDAR (SORIA-MEDINA et al., 2013; DEZEN-KEMPTER et al., 2015; WEN et al., 2019; CAPOLUPO, 2020; COGIMA et al., 2020).

Apesar de a literatura apresentar excelentes artigos de reconstrução tridimensional e modelos BIM de edifícios (CARNEVALI et al., 2019; HUANG et al., 2020), há uma carência de trabalhos focando a fusão ou integração de dados. Percebe-se até o momento que poucos trabalhos apresentam análises de integrações múltiplas de nuvens de pontos provenientes de diferentes plataformas para a geração de modelos BIM de edifícios em nível de detalhamento LoD3.

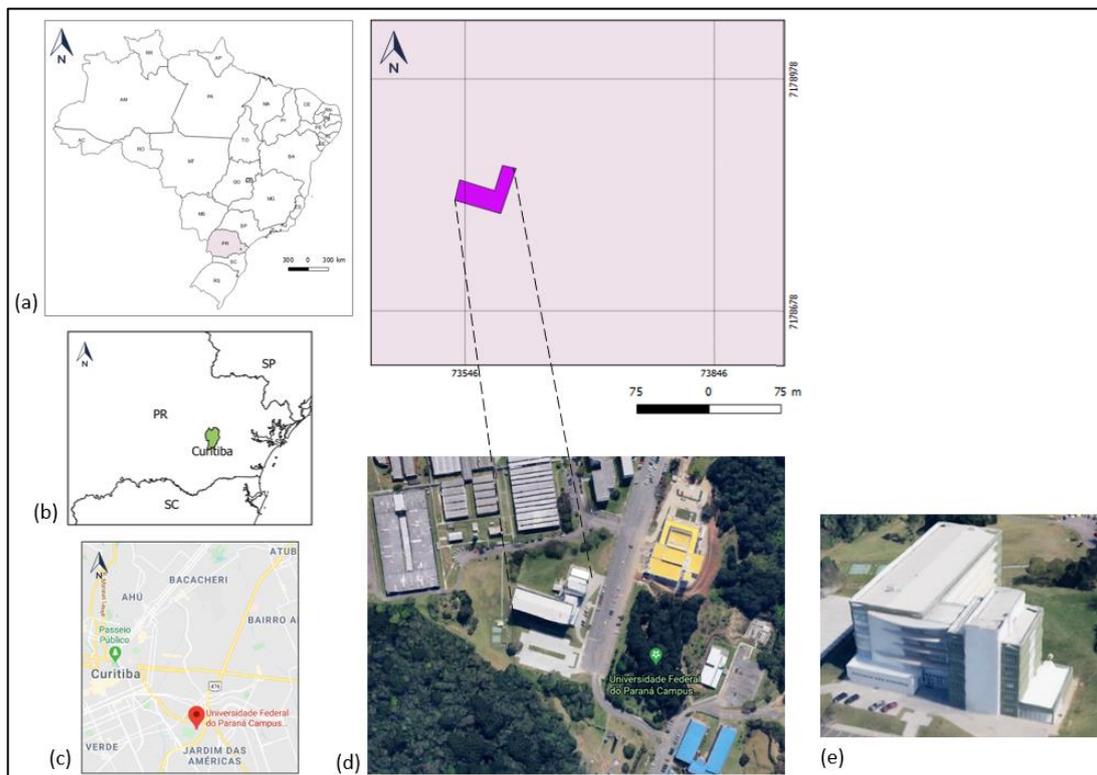
### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Área de estudo**

A área de estudo é constituída pelo edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional – CETO, localizado no campus da Universidade Federal do Paraná (UFPR), situado no município de Curitiba-PR (Figura 3.1). Primeiramente, foi escolhido por estar na área contemplada pelo voo que ocorreu em 2012, o qual gerou os dados ALS. O edifício é composto pelo pavimento térreo e 4 andares. Possui arquitetura moderna com formato retilíneo, contendo lajes avançadas curvas nas fachadas sudeste e sudoeste, demarcando os pavimentos. Possui diversos recuos e uma torre principal, além de contar com diversas áreas envidraçadas. Sua cobertura possui platibanda, e nas fachadas sudeste e sudoeste, as lajes avançadas arredondadas e retilíneas atuam como beirais.

O edifício escolhido possui elementos desafiadores para as técnicas de reconstituição tridimensional por Sensoriamento Remoto. Por isso, foi intencionalmente escolhido por enfatizar a necessidade da adoção de diversos métodos de levantamento para promover sua modelagem. Sua altura, tamanho, diversas faces, formato em L, além de diversas árvores próximas configuraram-se desafios extras aos levantamentos. Os elementos em sua fachada, como lajes em semiarcos, vidraças, recuos e desníveis no telhado, foram desafiadores às técnicas de modelagem empregadas. Para realizar o levantamento completo do edifício, foi necessária a utilização de diversas técnicas em vários dias de levantamento de campo, inclusive em épocas distintas. Todos estes elementos exigiram dispendiosos esforços em campo e no processamento, por gerar um volume muito elevado de dados, o que pode ser verificado pela alta densidade de pontos das nuvens tridimensionais na seção de resultados. Assim, a modelagem do edifício promoveu uma avaliação efetiva das técnicas em condições habituais de levantamento com a presença de elementos desafiadores, tanto em sua própria estrutura como em seu entorno.

Figura 3.1 – Localização do edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional – CETO.

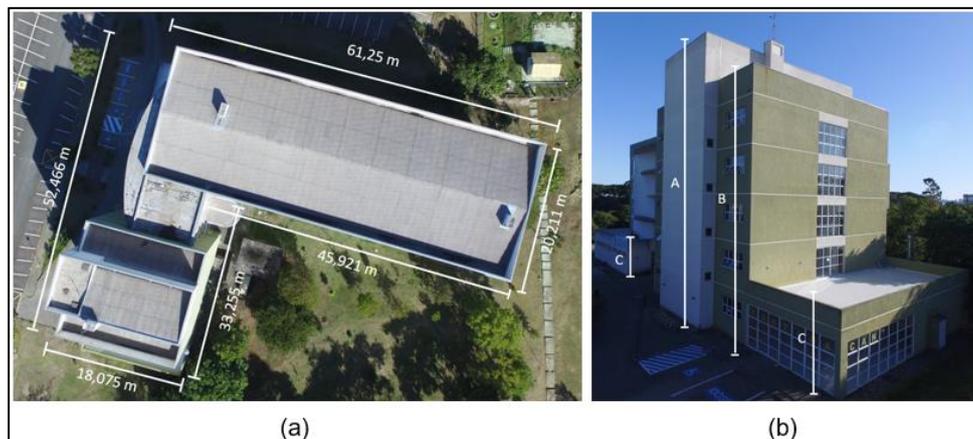


(a) Brasil e estado do PR; (b) estado do Paraná e município de Curitiba; (c) campus da UFPR em Curitiba; (d) imagem Google Earth localizando o edifício; (e) detalhe da fachada do edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional.

Fonte: Mapa principal: Produção do autor; (a) e (b) IBGE (2017); (c) GOOGLE MAPS (2020); (d) e (e) GOOGLE EARTH (2020).

O edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional apresenta as dimensões presentes na Figura 3.2(a). A Figura 3.2(b) apresenta as diferentes alturas do edifício. A altura indicada pela letra A corresponde à caixa d'água, variando de 23,780 a 23,890 m. A letra B refere-se à platibanda do telhado principal, variando entre 20,208 m e 20,369 m. E a letra C refere-se à platibanda dos edifícios anexos no pavimento térreo, em cores verde e branco, este último situado ao lado da entrada na fachada principal, sendo verificadas medidas de 4,819 m a 4,925 m.

Figura 3.2 – Dimensões do edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional – CETO.



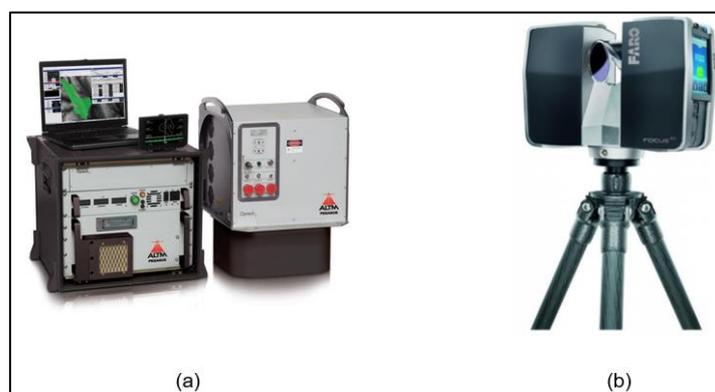
(a) dimensões aferidas por medição eletromagnética de distância (*electromagnetic distance measurement* – EDM), por meio da trena a laser, (b) detalhe das alturas aferidas.

Fonte: Produção do autor.

### 3.2 Dados de entrada

Neste trabalho, foram utilizados dados LiDAR e fotogramétricos de plataformas terrestres e aerotransportadas. Os dados ALS são provenientes do sensor Optech ALTM Pegasus HD 500 acoplado a uma aeronave. Dados TLS foram obtidos a partir da plataforma Faro *LASER scanner Focus 3D 120* (Figura 3.3). Por sua vez, os dados fotogramétricos foram obtidos por meio de uma ARP Phantom 3 Standard (Figura 3.4).

Figura 3.3 – Equipamentos utilizados para coleta LiDAR.



(a) sensor Optech ALTM Pegasus HD 500, (b) Faro LASER scanner Focus 3D 120.

Fonte: Faro (2010), Optech (2020).

Figura 3.4 – Equipamento utilizado para coleta de dados fotogramétricos.



Fonte: DJI (2020).

As Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 apresentam as características técnicas dos equipamentos utilizados.

Tabela 3.1 – Especificações técnicas do sensor Optech ALTM Pegasus HD 500.

<b>Parâmetro</b>	<b>Especificação</b>
Comprimento de onda	1.064 nm
Precisão horizontal	1/5.500 x altitude; $1\sigma$
Precisão de elevação	<5-15 cm, $1\sigma$
Taxa de repetição efetiva do laser	Programável, 100-500 kHz
FOV	Programável, 0-75°
Frequência de escaneamento	Programável, 0-140 Hz
Distância de separação vertical do alvo	<1 m

Fonte: Adaptado de Optech (2020).

Tabela 3.2 – Especificações técnicas do equipamento Faro *LASER scanner* Focus 3D 120.

<b>Parâmetro</b>	<b>Especificação</b>
Comprimento de onda	905 nm
Velocidade de medição	Até 976.000 pontos/segundo
Precisão	± 2 mm
Peso	5,2 kg
Tamanho	240 x 200 x 100 mm
Faixa de foco	0,6 – 120 m
Resolução geométrica da câmera	70 megapixel (colorido)
Campo de visão horizontal	300° a 360°

Fonte: Adaptado de Faro (2010).

Tabela 3.3 – Especificações técnicas da câmera RGB da ARP Phantom 3 Standard.

<b>Parâmetro</b>	<b>Especificação</b>
Sensor	1/2,3" CMOS
Resolução geométrica	12 megapixels
Lente	FOV 94° 20 mm (Formato equivalente a 35 mm)
Faixa ISO (Sensibilidade a luz)	100-3.200 (vídeo) 100-1.600 (foto)
Velocidade do obturador	8s – 1/8.000s
Tamanho máximo da imagem	4.000 x 3.000 pixels
Modos de fotografia	Disparo único Disparo contínuo: 3/5/7 quadros Bracketing de exposição automática: 3/5 quadros a 0,7 EV bias Intervalo

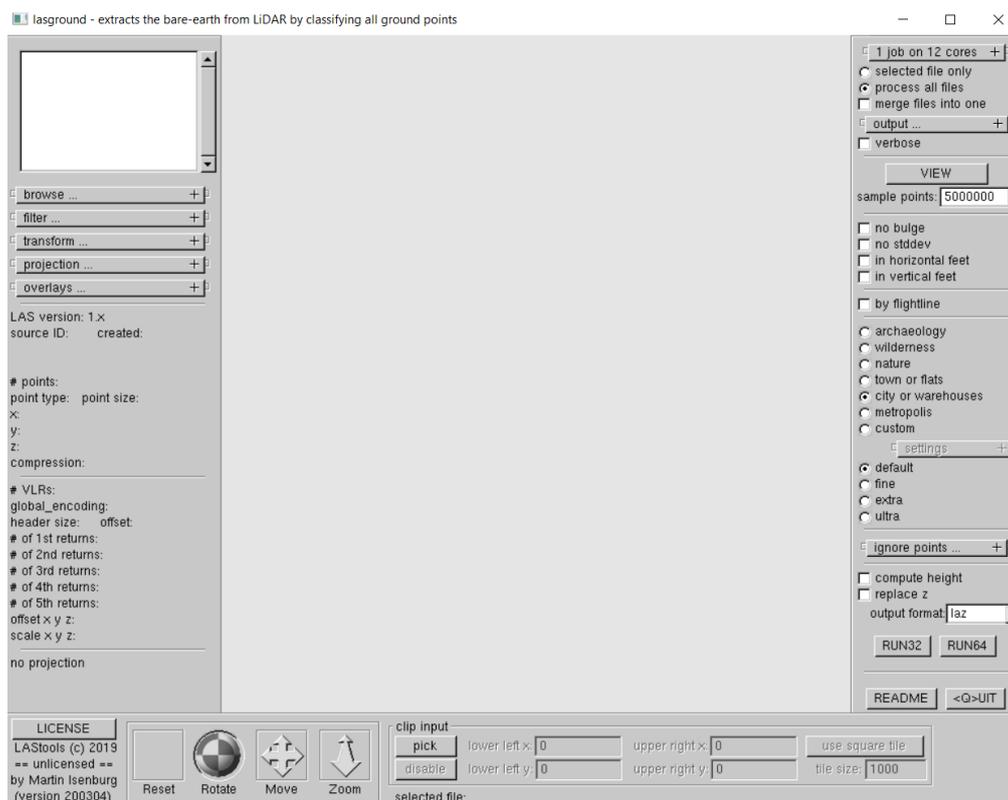
Fonte: Adaptado de DJI (2020).

### 3.3 Softwares utilizados

#### 3.3.1 LASTools

A plataforma LASTools (ISENBURG, 2020) é composta por um conjunto de funções gratuitas para pesquisas científicas. As funções foram desenvolvidas para cada uma das etapas de processamento de nuvens de pontos, podendo ser facilmente executadas por linha de comando ou interface nativa e estão disponíveis como caixa de ferramenta de processamento LiDAR em *softwares* comerciais, como o ArcGIS, e gratuitos, como o QGIS. A plataforma é muito intuitiva e fácil de ser usada, conta com fórum de dúvidas em sua página web e é muito utilizada pela comunidade científica em diversos tipos de aplicações (Figura 3.5). Os dados ALS foram processados utilizando diversas funções desta plataforma computacional.

Figura 3.5 – Tela da plataforma LASTools.

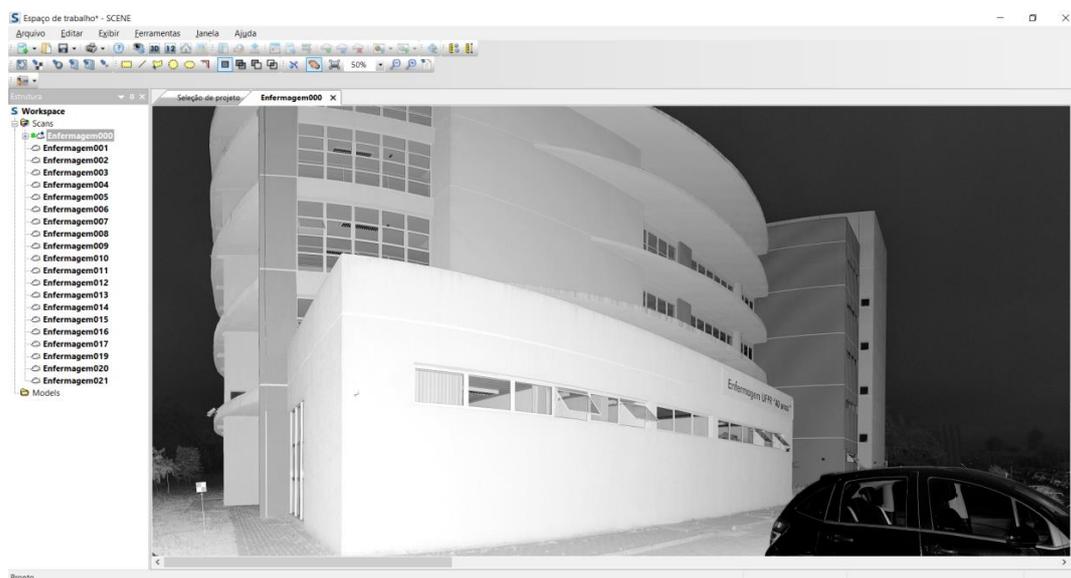


Fonte: Produção do autor.

### 3.3.2 Faro® Scene

Após a coleta dos dados TLS, é necessário registrar as diversas varreduras. Para isso, foi utilizado o *software* Faro® Scene (FARO, 2020), o qual apresenta diversas funções de configuração e controle para as plataformas de escaneamento da família Faro®. Permite a configuração e gerenciamento do processamento de varreduras tridimensionais de alta resolução espacial, além de ser utilizado para visualização, processamento, consolidação e registro automático ou manual das nuvens de pontos. Ainda é possível obter medidas lineares e a exportação dos dados em formato ASCII com coordenadas tridimensionais (x, y, z), intensidade e valores de nível de cinza ou cores RGB. A Figura 3.6 apresenta a tela do Faro® Scene na etapa de identificação dos alvos artificiais por meio de fotografias tomadas no momento do escaneamento da nuvem de pontos. Neste trabalho, foi utilizada sua versão de teste por 30 dias.

Figura 3.6 – Tela do *software* Faro® Scene.



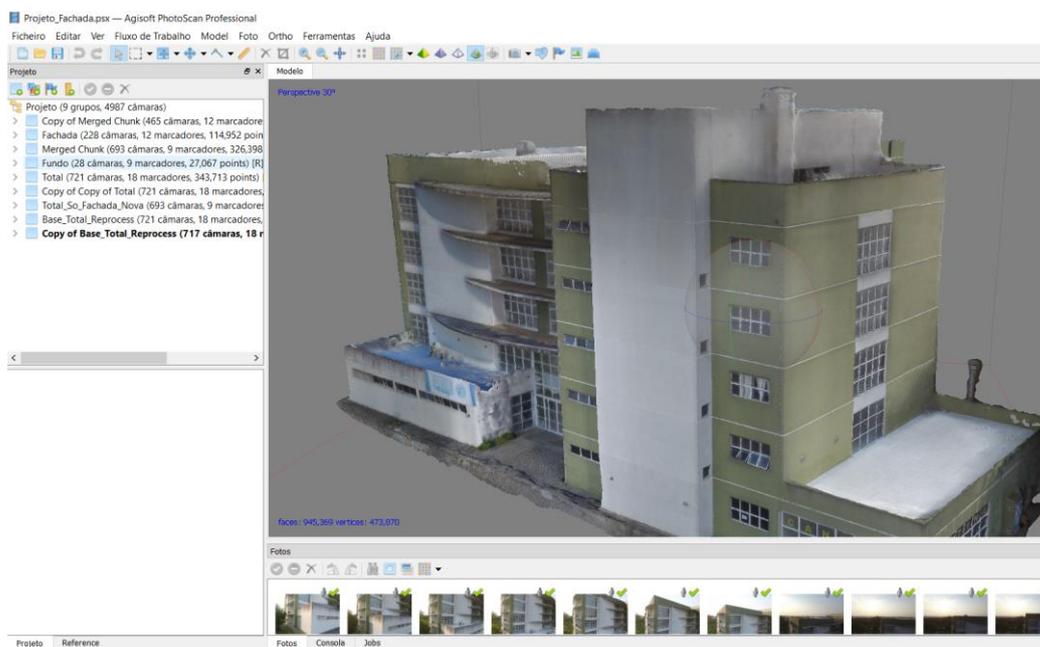
Fonte: Produção do autor.

### 3.3.3 Agisoft PhotoScan

O processamento dos dados fotogramétricos foi realizado no *software* Agisoft PhotoScan (AGISOFT, 2020). Trata-se de um aplicativo comercial completo de Fotogrametria, possuindo fluxo de trabalho intuitivo e automatizado. O *software*

permite a geração de nuvem de pontos densa, ortofotos georeferenciadas em alta resolução e modelos digitais de elevação texturizados excepcionalmente detalhados, utilizando técnicas de Fotogrametria associada a modernos algoritmos de visão computacional. Na Figura 3.7, observa-se ao centro a nuvem de pontos fotogramétrica processada, algumas fotografias na porção inferior e, na lateral esquerda, as etapas do projeto. Devido à alta complexidade computacional e manipulação de dados 3D, requer configurações avançadas de hardware para a obtenção de resultados em nível elevado de detalhamento. O aplicativo foi utilizado em sua versão gratuita de teste por 30 dias.

Figura 3.7 – Tela do *software* Agisoft PhotoScan.



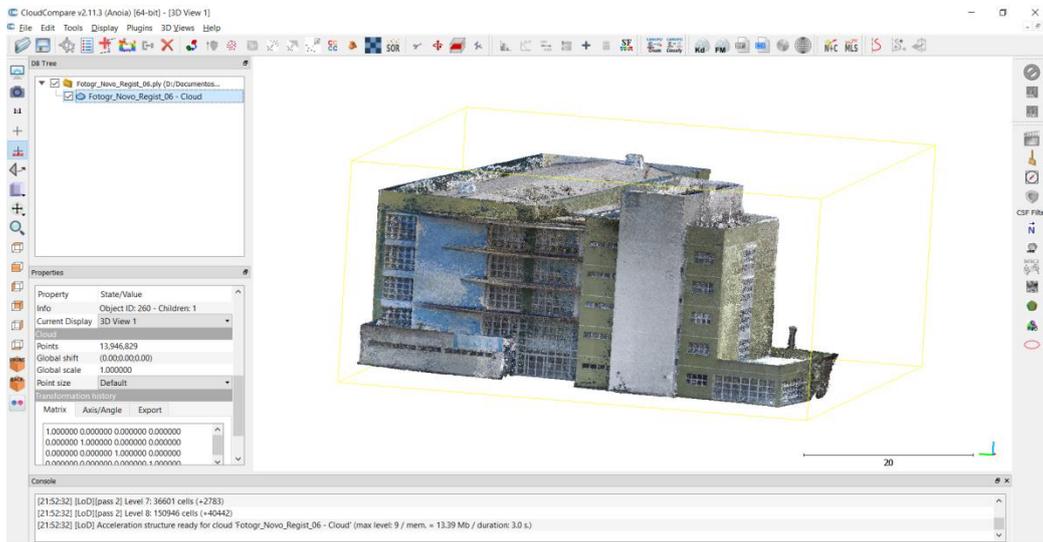
Fonte: Produção do autor.

### 3.3.4 CloudCompare

As atividades de visualização, manipulação, registro, comparação e combinação de nuvens de pontos foram realizadas no *software* CloudCompare (CLOUDCOMPARE, 2020). É um *software* livre e de código aberto que possui ferramentas avançadas de processamento de nuvens de pontos 3D, contando com interface intuitiva, manual de usuário e fórum *online* mantido pelos desenvolvedores. As funções são simples de serem utilizadas e facilmente

compreendidas com as explicações *in-box* no *software*. A Figura 3.8 apresenta o CloudCompare com a nuvem fotogramétrica ao centro, e suas propriedades, na lateral esquerda.

Figura 3.8 – Tela do *software* CloudCompare.

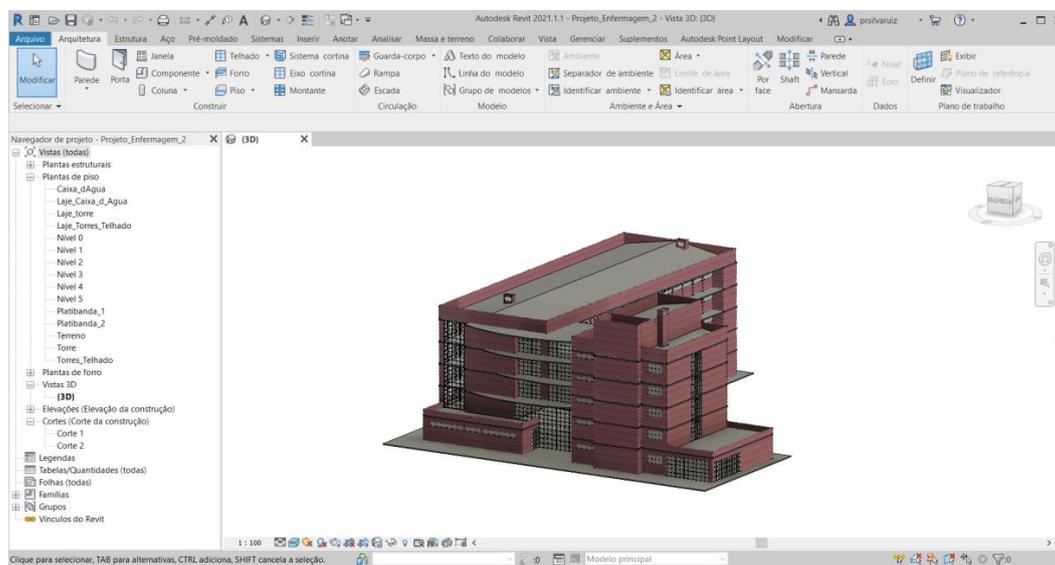


Fonte: Produção do autor.

### 3.3.5 Autodesk® Revit

A modelagem do edifício em 3D foi realizada no *software* Autodesk® Revit (AUTODESK, 2020). O aplicativo permite projetar edifícios, estruturas e seus componentes em 3D e anotações no modelo de desenhos 2D. É possível acessar elementos e informações de construção a partir do banco de dados do modelo. O Revit também possui ferramentas otimizadas para projetar edificações a partir das informações de nuvens de pontos tridimensionais, permitindo modelar edifícios existentes, inclusive históricos. Na Figura 3.9 é possível observar a modelagem BIM do edifício ao centro, e as propriedades do projeto, no painel à esquerda. O *software* foi utilizado com uma licença de estudante.

Figura 3.9 – Tela do software Autodesk® Revit.



Fonte: Produção do autor.

### 3.4 Recursos computacionais

Para realizar os processamentos, foi utilizado um computador portátil com as configurações apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Especificações técnicas do computador utilizado nos processamentos.

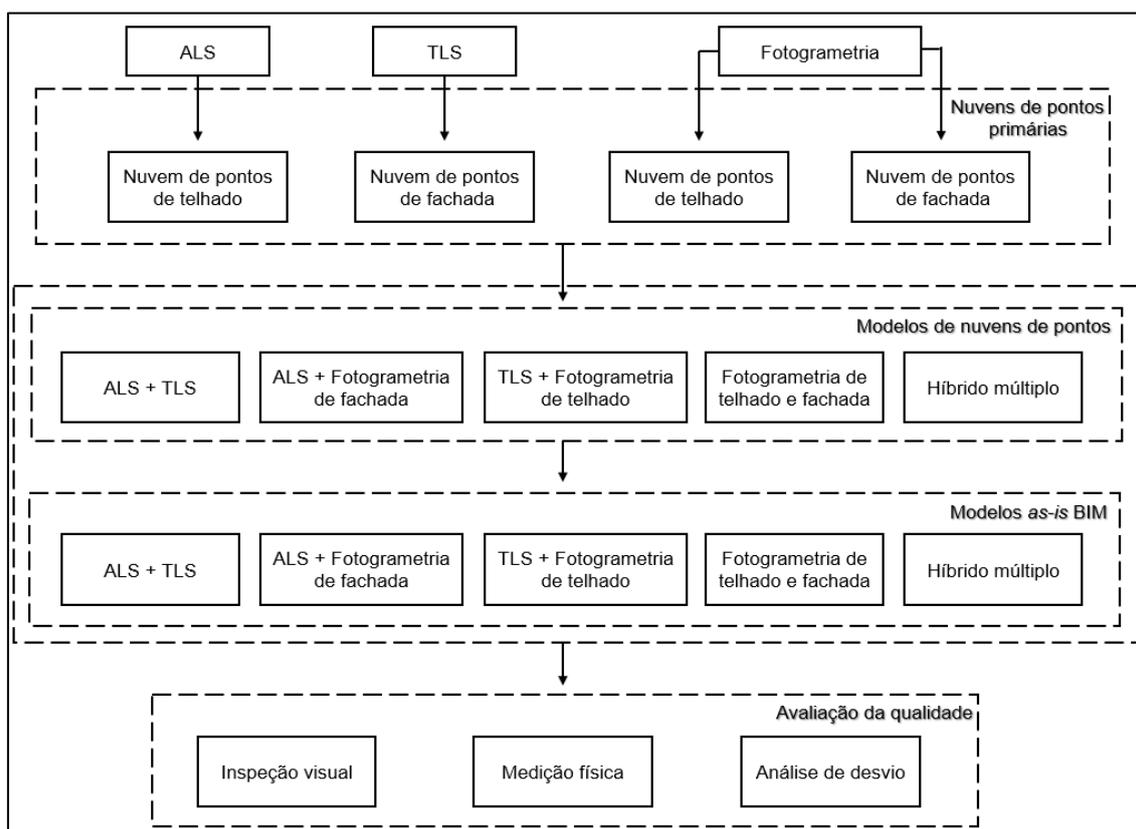
Parâmetro	Especificação
Fabricante	Dell computers
Formato	Notebook
Processador	Intel® core™ i7-8750H
Frequência do Processador	2,2 GHz
Frequência Turbo max	4,10 GHz
Número de Processadores	6
Memória RAM	24 GB DDR4 SDRAM 2.666 MHz
Armazenamento	1 TB HD; 128 GB SSD
Placa de Vídeo	NVIDIA® GeForce® GTX 1050 Ti; 4 GB GDDR5
Sistema Operacional	Windows 10

Fonte: Adaptado de DELL (2021), INTEL (2021).

### 3.5 Procedimentos metodológicos

Os passos metodológicos seguidos neste trabalho são apresentados na Figura 3.10. A partir do processamento dos dados ALS, TLS e fotogramétricos, foram geradas as quatro nuvens de pontos primárias de fachada e telhado. Por meio da integração de dados, foram gerados cinco modelos de nuvens de pontos, os quais serviram de base para elaborar seus respectivos modelos *as-is* BIM. A acurácia dos modelos foi verificada por meio de inspeção visual, medição em campo e análise de desvio. A inovação da metodologia adotada neste trabalho está nas múltiplas integrações de dados para a criação de modelos tridimensionais e *as-is* BIM do edifício.

Figura 3.10 – Passos metodológicos adotados.



Fonte: Produção do autor.

Nas seções seguintes, será descrita detalhadamente cada etapa do procedimento metodológico.

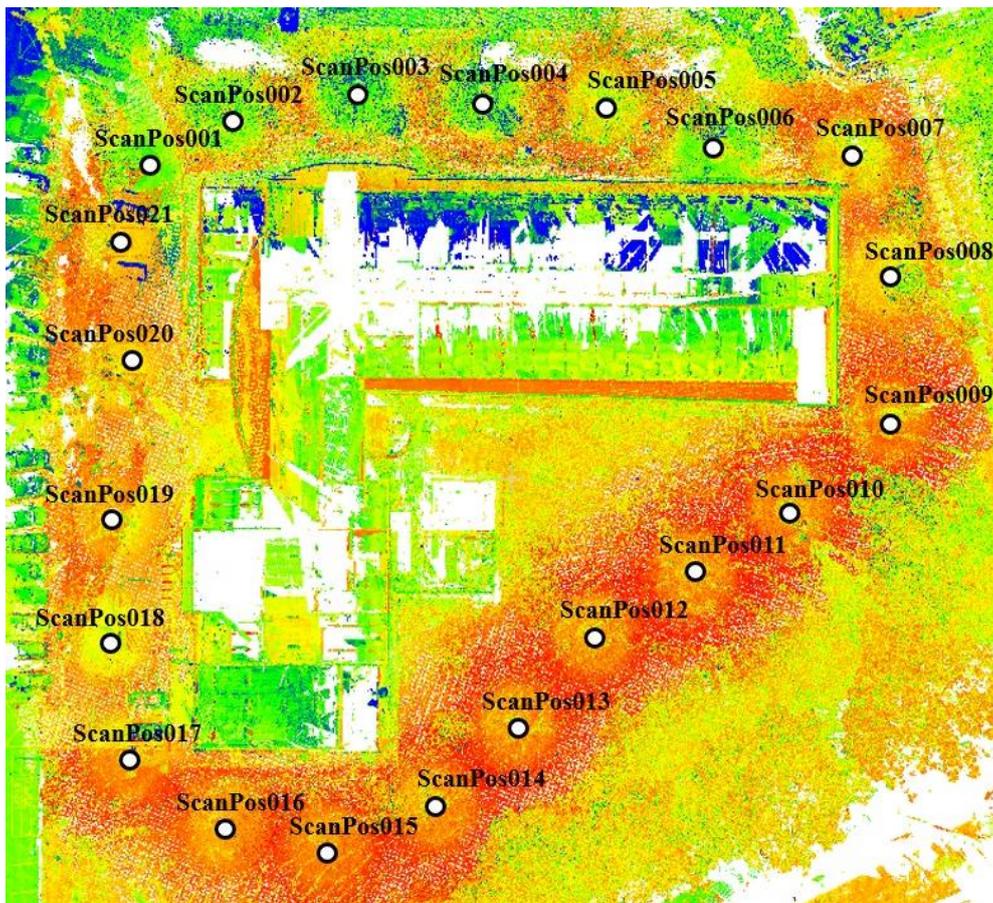
## **3.6 Escaneamento a laser**

### **3.6.1 Coleta de dados**

Os dados ALS foram obtidos por uma aeronave no dia 07 de agosto de 2012 e cedidos pela Engefoto Engenharia e Aerolevantamentos S/A. A Tabela 3.1 apresenta algumas características do sensor utilizado. A aeronave voou a 1.600 m de altura, recobrando parte do campus da UFPR, com velocidade de 135 kts (250 km/h), ângulo de varredura de aproximadamente 25°, frequência de perfilamento de 300 kHz e frequência de varredura de 23 Hz.

Os dados TLS foram obtidos em um trabalho de campo realizado no dia 01 de dezembro de 2016 em conjunto com a equipe da UDESC, proprietária do equipamento. Para a aquisição, foi aplicado o método de varreduras múltiplas, objetivando o maior detalhamento da fachada do edifício. Para isto, foi realizada uma prévia análise do entorno do edifício, verificando-se desníveis de terreno e árvores próximas. A plataforma foi situada em 21 posições de escaneamento ou varredura (*Scan Positioning* – ScanPos) em caminhamento horário em torno do edifício, objetivando eliminar as interferências das árvores próximas (Figura 3.11).

Figura 3.11 – Posições de varredura da plataforma TLS.



Fonte: Produção do autor.

Para promover o registro dos dados, foram utilizados alvos artificiais em campo. A inclusão destes alvos, os quais são considerados como pontos de controle dentro da área estudada, minimizam a incerteza, otimizando a orientação no registro das varreduras (FASSI et al., 2011). Estes alvos constituem-se em hastes de aproximadamente 1 m, com placas metálicas redondas (*sphere*) e quadradas nas suas extremidades, estas últimas contendo desenhos de tabuleiros de xadrez (*checkerboard*) (Figura 3.12), as quais foram distribuídas em campo ao redor da plataforma de escaneamento em cada uma das varreduras. A cada nova posição da plataforma, os alvos eram cuidadosamente redistribuídos para serem visualizados por duas ou mais varreduras repetidamente e sem oclusões, a fim de garantir a coleta de dados de alta precisão.

Figura 3.12 – Detalhe de posições de varredura da plataforma TLS.

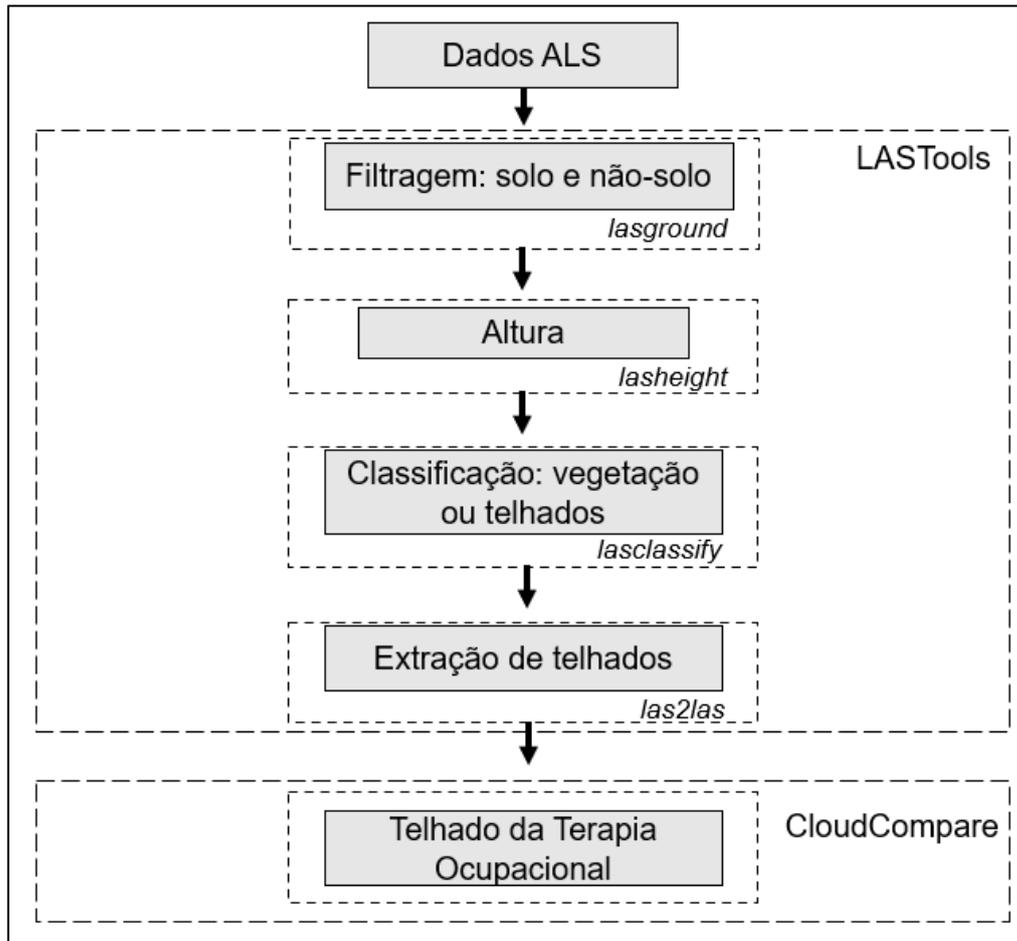


Fonte: Produção do autor.

### 3.6.2 Extração de telhados

Os procedimentos utilizados nesta etapa foram realizados na plataforma LAsTools e no CloudCompare. A Figura 3.13 apresenta detalhadamente as etapas utilizadas para o processamento dos dados ALS.

Figura 3.13 – Etapas do processamento dos dados ALS.



Fonte: Produção do autor.

Primeiramente os pontos foram filtrados como pertencentes ao solo ou acima do solo, empregando-se a função *lasground*, sendo a primeira classificação realizada na nuvem de pontos. Essa função utiliza o método de filtragem baseado na densificação progressiva de Rede Triangular Irregular (TIN – *Triangular Irregular Network*) desenvolvido por Axelsson (2000). Este método consiste em utilizar parâmetros limiares derivados dos dados LiDAR para gerar uma superfície conectada, com pontos referentes ao solo distribuídos subaleatoriamente, adicionando-se progressivamente novos pontos à estrutura TIN (AXELSSON, 2000). Os parâmetros são facilmente definidos na interface do LASTools, sendo eles: (a) *step* - que determina a escala; (b): *spike* – remove pontos acima e abaixo do TIN grosseiro; (c) *offset* – define o nível máximo de inclusão de novos pontos na superfície de terreno atual.

A altura de cada ponto classificado como não solo foi obtida pela função *lasheight*. A partir disso, é possível criar o MDT, MDS e MDSn, o qual permite a obtenção direta da altura das construções. Determinada a altura dos pontos acima do solo, a função *lasclassify* foi utilizada para classificá-los em uma das seguintes classes: telhados ou vegetação. Por meio da análise da altura de cada ponto, essa função padroniza sua distribuição em uma certa vizinhança, conferindo características planas ou irregulares. Dessa forma, é possível classificar os pontos em superfícies irregulares (vegetação) ou superfícies planas (telhado). Essa função possui três parâmetros: (a) *planar* – limite de planaridade (em cm) para considerar se a vizinhança é plana; *rugged* – verifica irregularidade da vizinhança, definindo um limite (em cm) para classificar os pontos em vegetação; *ground\_offset* – altura mínima (em m) que um ponto deve ter para ser classificado como edificação ou vegetação. Desta forma, a nuvem de pontos foi classificada como: solo, vegetação ou telhado, conforme a rotulação estabelecida pela ASPRS (2013).

Para extrair somente os pontos referentes aos telhados, foi utilizada a função *las2las*. Por meio de seu parâmetro *keep\_class*, é possível extrair os pontos referentes à classificação desejada. A última etapa foi separar somente os pontos pertencentes ao telhado do edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional, visto que os dados ALS recobriam parte do campus da UFPR, e utilizou-se para isto a ferramenta de segmentação do *software* CloudCompare (CLOUDCOMPARE, 2021).

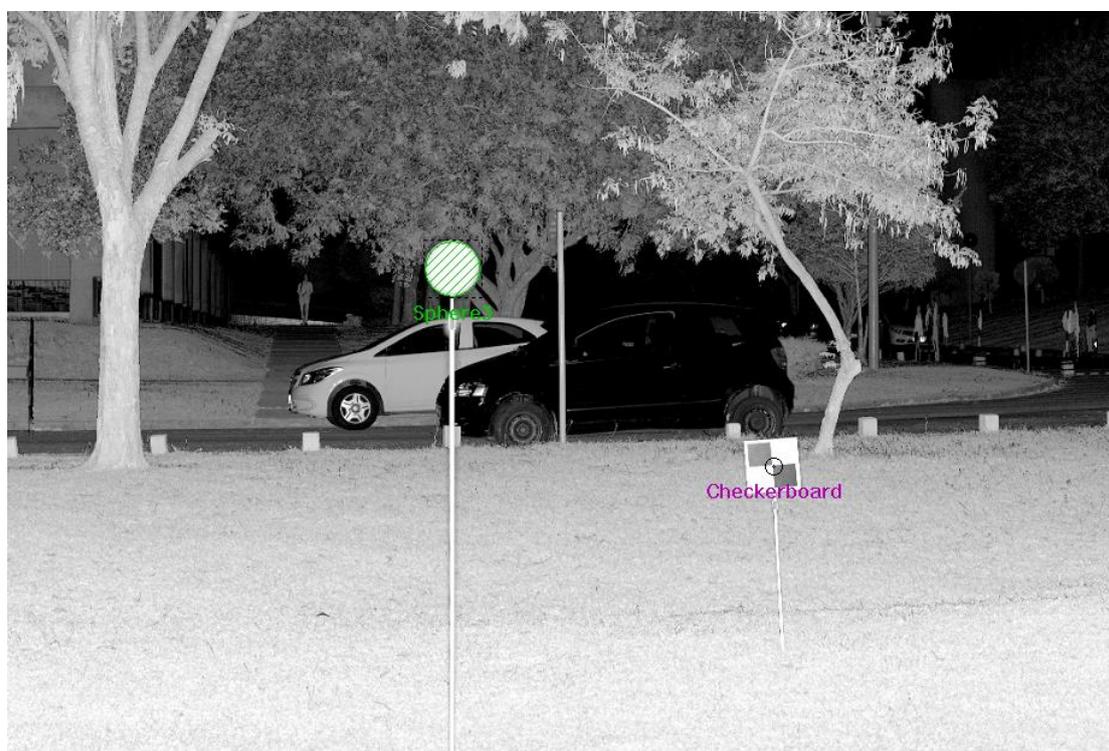
### **3.7 Extração de fachadas**

Após a coleta dos dados TLS, iniciou-se a etapa de processamento. A primeira etapa consistiu no registro das múltiplas varreduras, transformando os sistemas de coordenadas locais em um sistema de coordenadas único. Esta etapa é comumente denominada de registro de nuvem de pontos, obtendo-se uma nuvem de pontos única e precisa, com detalhes de toda a área levantada, pronta para o processo de modelagem ou análise de interferências. O registro de nuvem de pontos obtidos em diferentes locais permite minimizar o efeito de

ocusão e melhorar substancialmente a qualidade dos dados (ZHAO et al., 2011).

Cada nuvem de pontos foi carregada no aplicativo Faro® Scene, e foi iniciado o processo de registro, o qual consistiu em duas etapas. A primeira delas refere-se ao alinhamento das posições de varredura por meio da identificação automática dos alvos artificiais. Na etapa seguinte, foi necessário conferir manualmente os alvos para a exclusão daqueles marcados erroneamente. Isso permite que o usuário confirme que a extração de alvo artificial está correta e, se necessário, adicione alvos naturais dos dados de varredura para auxiliar no processo de registro. A Figura 3.14 apresenta a etapa de identificação dos alvos artificiais. Após a verificação dos alvos artificiais em cada nuvem de pontos, a ferramenta de registro foi usada dentro do *software*, consolidando as varreduras em uma única nuvem de pontos. Foram utilizadas as configurações padrão para registro.

Figura 3.14 – Identificação de alvos artificiais no Faro Scene.



Fonte: Produção do autor.

Após o processo de registro das varreduras, foi realizada a delimitação da fachada do edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional, excluindo os pontos referentes a outros alvos, como solo, árvores, dentre outros. Este processo foi realizado de forma manual no *software* CloudCompare por meio de sua ferramenta de segmentação.

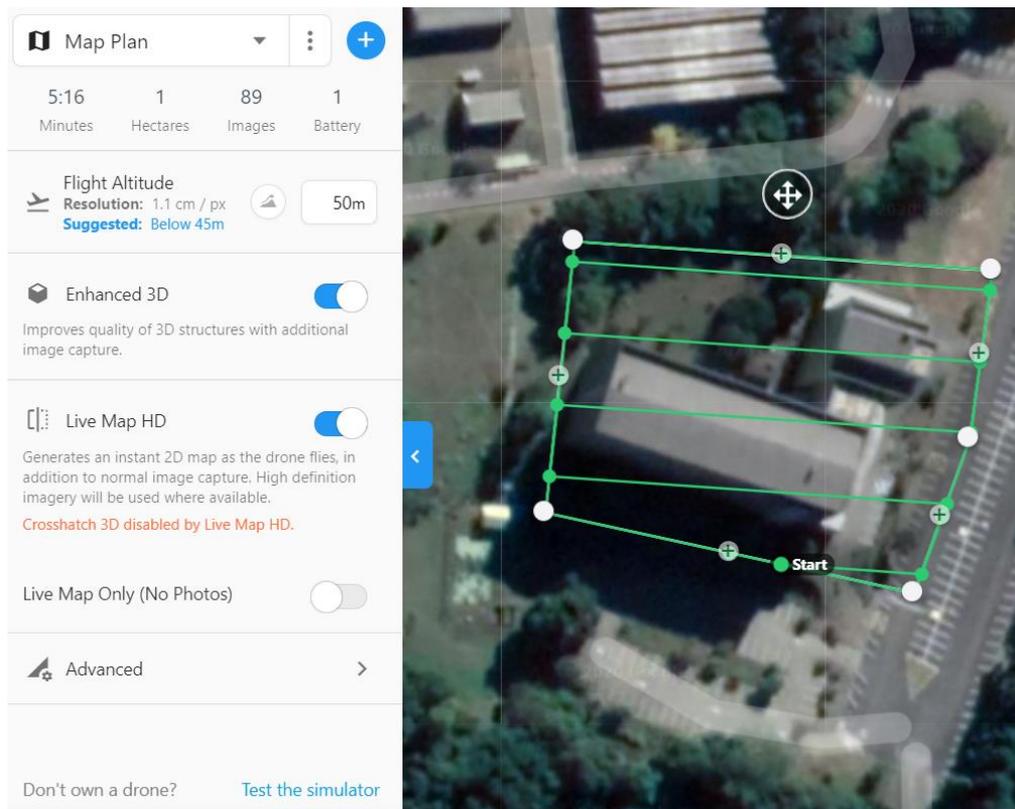
### **3.8 Fotogrametria**

#### **3.8.1 Coleta de dados**

Os dados fotogramétricos foram obtidos com a ARP Phantom 3 de propriedade da Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR) do INPE nos dias 7 e 8 de junho de 2020. Os dados do telhado do edifício foram obtidos por meio de voos automáticos a 50 m de altura. Voos manuais paralelos e oblíquos às paredes foram utilizados para modelar a fachada. Os voos foram realizados entre as 11:00 h e 16:00 h, para garantir luminosidade e baixa cobertura de sombras.

Foram realizados voos automáticos de testes com altura variando entre 50 e 100 m. Para aproveitar a máxima resolução do equipamento, foram utilizados os dados do voo de 50 m. Nesta configuração, foram obtidas 89 fotografias, sobreposição frontal de 80% e lateral de 75%, resultando em um GSD (*Ground Sample Distance*) de 1,1 cm/px. A Figura 3.15 apresenta o plano de voo utilizado no voo de 50 m, realizado com o aplicativo DroneDeploy (DRONEDEPLOY, 2020).

Figura 3.15 – Plano de voo com altitude de 50 m.

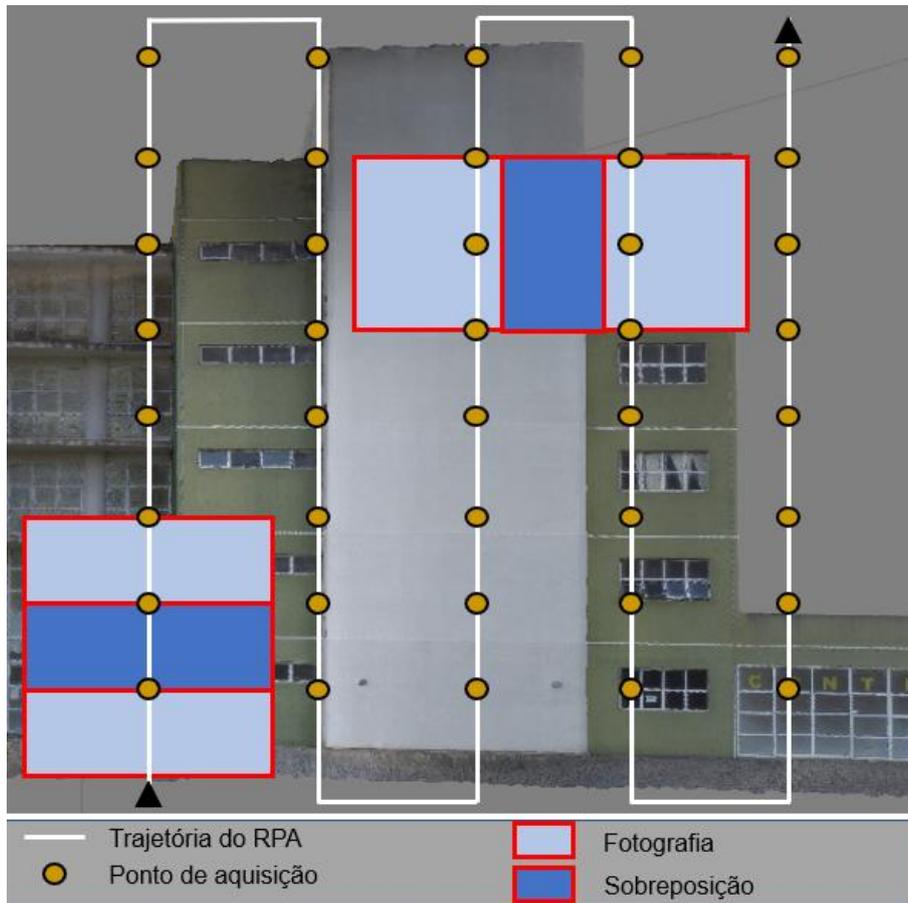


Fonte: Produção do autor.

Os dados de fachada foram obtidos através de voos manuais. A ARP foi deslocada cuidadosamente em voo paralelo as paredes do edifício a uma distância máxima de 3 m, obtendo fotografias paralelas e oblíquas. As fotografias foram tomadas manualmente, controlando a sobreposição entre elas. Pelo fato de este processo ter sido manual, não foi possível mensurar a sobreposição e a resolução das fotografias no momento do imageamento. Foram obtidas 793 fotografias, das quais 632 foram utilizadas no processamento, sendo descartadas aquelas com falhas e baixa luminosidade.

A sobreposição entre as fotografias no modo manual foi realizada empiricamente, verificando o enquadramento da imagem antes de obtê-la. A ARP descreveu movimentos verticais próxima às paredes do edifício, com a câmera posicionada a 90°. Quando uma sobreposição visual aceitável era atingida, a fotografia era obtida (Figura 3.16).

Figura 3.16 – Metodologia para obtenção de fotografias de fachada com sobreposições frontal e lateral.



Fonte: Produção do autor.

As diversas árvores, prédio anexo e desníveis no terreno proporcionaram desafios extras para a obtenção dos dados de fachada (Figura 3.17). A solução adotada foi obter: (a) fotografias mais distantes do edifício com grande sobreposição; (b) fotografias oblíquas próximas ao edifício, a fim de se obter dados de áreas ocultadas pelas árvores. Esta estratégia aumentou significativamente o número de fotografias, mas não alcançou êxito em todas as situações de oclusão por obstáculos.

Figura 3.17 – Árvores, desníveis e prédio anexo que impediram a aproximação da ARP.



Fonte: Produção do autor.

### 3.8.2 Processamento de dados fotogramétricos

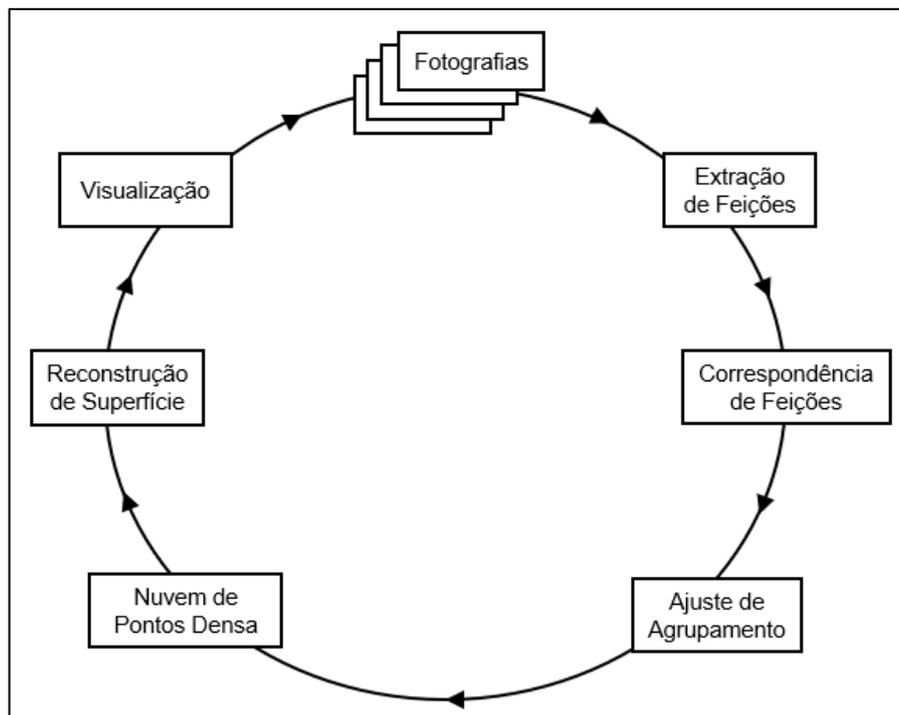
O processamento de dados fotogramétricos pode ser feito por meio de diversos *softwares*, os quais utilizam algoritmos SfM que possuem um fluxo de trabalho intuitivo e automatizado para o usuário. As fotografias são obtidas a partir de diferentes ângulos, distâncias e perspectivas sobrepostas para recriar a geometria 3D do objeto (SCHWIND, 2016). Ou seja, algoritmos SfM representam uma abordagem fotogramétrica que reproduz computacionalmente a capacidade humana de compreender a estrutura tridimensional de um objeto por meio de uma coleção de fotografias (SZELISKI, 2010), a qual se assemelha a um movimento de deslocamento sequencial em torno do objeto. Para isso, contempla uma série de algoritmos para criar nuvens de pontos tridimensionais, as quais podem criar modelos digitais de elevação (*Digital Elevation Models – DEM*), modelos de terreno e imagens de mosaico ortorretificadas (GREEN et al., 2014; SCHWIND, 2016).

Neste trabalho, foi utilizado o *software* Agisoft PhotoScan® Pro v1.4.3, que possui um conjunto de processamento integrado, desenvolvido e comercializado pela empresa Agisoft® (AGISOFT, 2020). A Figura 3.18 apresenta um fluxo de trabalho genérico em *softwares* com abordagem SfM, constituído das seguintes etapas:

- Conjunto de Fotografias: consiste em selecionar as fotografias sequenciais.
- Extração de Feições: Essa etapa gera um conjunto de pontos homólogos a partir das feições das fotografias. Para isso, é utilizado o algoritmo denominado "Transformada de Feições Invariantes à Escala" (em inglês, *Scale Invariant Feature Transform* – SIFT) desenvolvido por Lowe (1999). O SIFT identifica os pontos-chaves, cria um descritor invariável e os combina mesmo com possíveis variações de translação, dimensionamento e rotação, bem como com mudanças de iluminação e projeção 3D (LOWE, 1999; JAUD, 2019).
- Correspondência de Feições: O objetivo dessa etapa consiste em identificar pontos homólogos entre as fotografias, combinando os pontos-chaves identificados na etapa anterior.
- Ajuste de Agrupamento: A partir dos pontos homólogos entre as fotografias, busca-se estabelecer uma geometria entre elas para estimar a nuvem de pontos esparsa, seguida de uma etapa de refinamento da reconstrução visual. Empregando técnicas de Geometria Multivisada (em inglês, *Multi-View Geometry* – MVG). O algoritmo Levenberg-Marquardt (MARQUARDT, 1963) estabelece calibrações intrínsecas de câmera, também conhecidas como “modelos de câmera”, para cada uma das fotografias, usando os pontos de empate para criar a nuvem de pontos esparsa 3D (SCHWIND, 2016; JAUD, 2019).
- Nuvem de Pontos Densa: Essa etapa densifica a nuvem de pontos esparsa. Através dos modelos de câmera e da correspondência entre os pontos esparsos, o algoritmo de triangulação Estéreo Multivisada (em inglês, *Multi-View Stereo* – MVS) filtra dados ruidosos e obtém os pontos 3D da nuvem de pontos densa de alta resolução para toda a cena (SCHWIND, 2016; JAUD, 2019).

- Reconstrução de Superfície: O objetivo é gerar uma imagem ortorretificada corrigida geometricamente por meio de várias imagens sobrepostas (KAZHDAN et al., 2006).
- Visualização: A etapa final é inspecionar visualmente os resultados. O PhotoScan possui um visualizador integrado.

Figura 3.18 – Fluxo de trabalho de *software* com abordagem SfM.

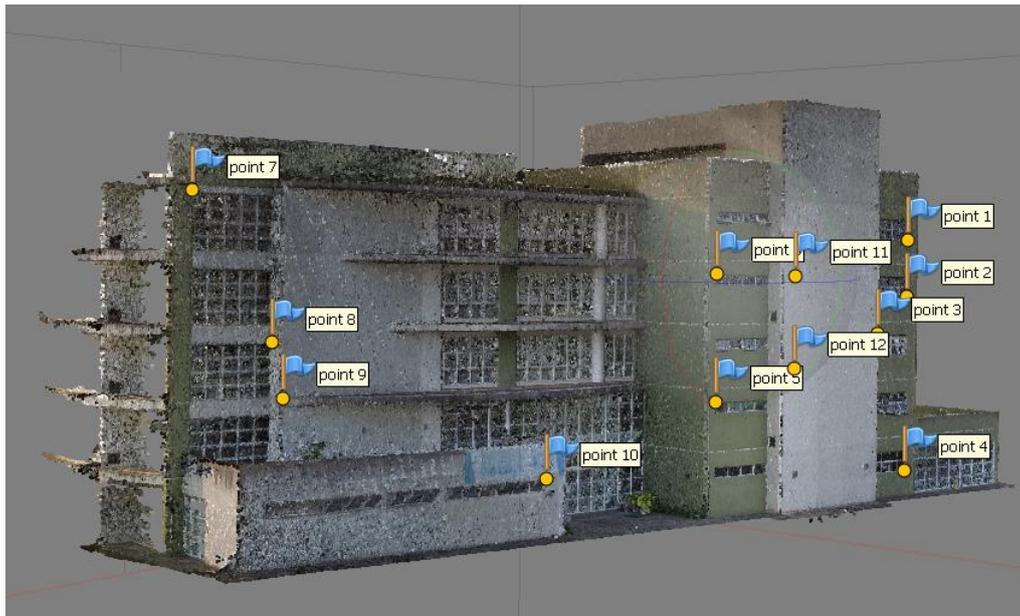


Fonte: Schwind (2016).

O processamento seguiu o fluxo de trabalho do PhotoScan, descrito anteriormente. Todas as fotos tomadas no levantamento fotogramétrico foram utilizadas. Não foram utilizados pontos de apoio. As feições e suas correspondências foram extraídas para promover o agrupamento das fotografias, processo que, no *software*, é denominado alinhamento. Devido aos vários voos realizados, não foi possível alinhar todas as fotografias de forma automática, sendo preciso recorrer ao alinhamento semiautomático. O *software* permite criar diferentes grupos de fotografias para gerar a nuvem de pontos densa. O alinhamento entre os grupos foi realizado, demarcando-se pontos conjugados em cada nuvem de pontos para promover o alinhamento entre

elas. Para isto, foi utilizada a função “Alinhar Grupos”, que utiliza os marcadores para fusionar as nuvens de pontos. A Figura 3.19 apresenta o grupo da nuvem de pontos densa da fachada principal, com os marcadores, para ser alinhada com os demais grupos (AGISOFT, 2016).

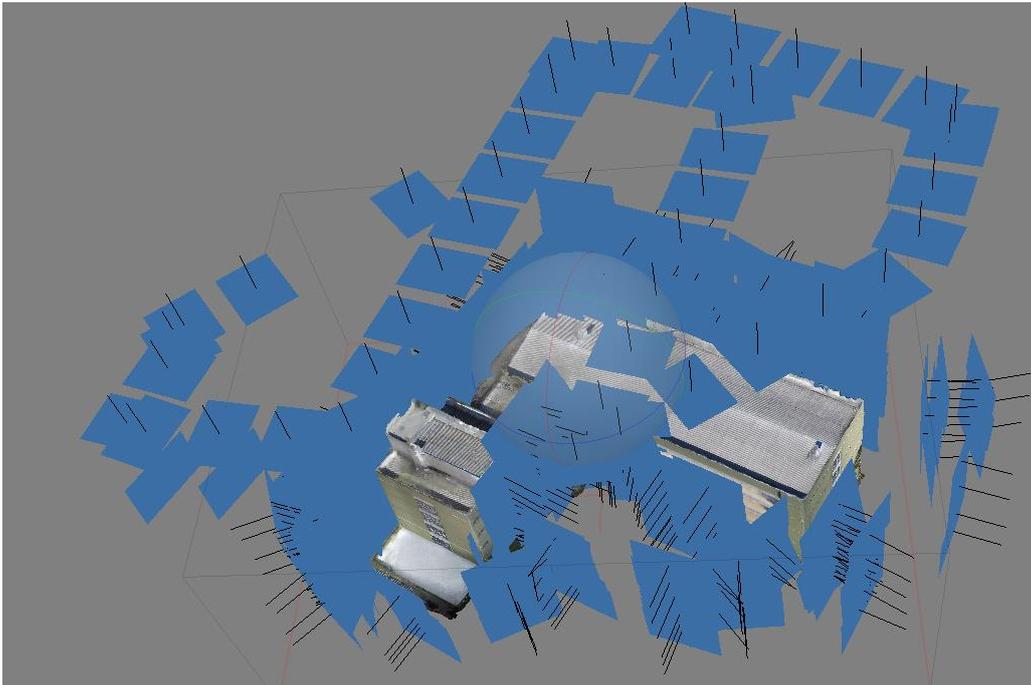
Figura 3.19 – Grupo da nuvem de pontos densa da fachada principal, com os marcadores para alinhamento sinalizados por pontos (*point*) numerados.



Fonte: Produção do autor.

O alinhamento dos grupos também significa que todas as fotografias estão alinhadas. A Figura 3.20 apresenta o posicionamento das fotografias (retângulos em azul) em volta do edifício, verificando um aparente alinhamento entre elas.

Figura 3.20 – Posicionamento das fotografias alinhadas ao redor do edifício.



Fonte: Produção do autor.

Com isso, foi possível gerar as nuvens de pontos esparsa e densa. A partir daí, foi reconstruída toda a fachada e telhado do edifício, recriando-se sua superfície em 3D. Por fim, a nuvem de pontos densa foi exportada em extensão .ply, para ser analisada e processada no CloudCompare nas etapas seguintes.

### 3.9 Integração de dados

A integração de dados foi realizada, combinando-se os dados provenientes das diferentes plataformas. Foram realizadas as seguintes fusões ou integrações: (a) ALS com TLS; (b) ALS com Fotogrametria de fachada; (c) TLS e Fotogrametria de telhado; (d), ALS, TLS e Fotogrametria de fachada e telhado. O modelo de nuvem de pontos de Fotogrametria de fachada e de telhado foi criado diretamente no *software* Agisoft PhotoScan.

A primeira etapa da integração é o registro dos dados. O procedimento de registro foi realizado no CloudCompare. O *software* possui diversas ferramentas de registro de dados, sendo utilizada a ferramenta semiautomática de alinhamento por pares de pontos e o registro automático ICP. A literatura

destaca algumas fragilidades do método ICP, nas quais destacam-se a sensibilidade a grandes deslocamentos e a necessidade de uma sobreposição inicial entre o conjunto de dados para que a convergência seja obtida (ZHU et al., 2019).

A primeira análise sobre os conjuntos de dados revelou grande deslocamento e baixa sobreposição, o que levou a uma etapa preliminar de alinhamento semiautomático das nuvens de pontos. A ferramenta semiautomática de alinhamento por pares de pontos do CloudCompare necessita da intervenção do usuário para a seleção de pares de pontos conjugados nas nuvens de pontos. Embora o processo seja manual, ele pode ser relativamente rápido e preciso, pois a ferramenta é capaz de detectar automaticamente o centro das nuvens de pontos a partir de, no mínimo, três pares de pontos conjugados. A ferramenta é intuitiva e apresenta iterativamente o erro relativo a cada par de ponto selecionado. Ao final da seleção dos pontos, o alinhamento é realizado, apresentando a precisão obtida.

Após a etapa preliminar de alinhamento semiautomático, foi aplicado o registro automático por meio do método ICP. A interface possui configurações padrão, mas que podem ser alteradas pelo usuário. É possível definir a nuvem referência e a que será alinhada. O critério de parada pode ser determinado pelo número máximo de iterações ou pela precisão mínima desejada. Também é possível determinar a porcentagem de sobreposição final dos dados, a qual pode ser utilizada quando não houver correspondência total entre as nuvens de pontos. Essa característica é verificada entre os dados ALS e TLS, onde a sobreposição final fica restrita entre as faces da platibanda e parte do telhado, pois são dados obtidos em perspectivas diferentes. Neste trabalho, a nuvem de pontos TLS foi definida como referência. Em relação ao alinhamento entre ALS e TLS, por estes apresentarem perspectivas de aquisição diferentes, foi utilizado 10% de sobreposição final, determinado de forma empírica.

Após o processo de registro, foi realizada a integração combinando os dados para representar tridimensionalmente o edifício. Para isto, foi utilizada a ferramenta de combinação de dados do CloudCompare denominada "Mesclar

Várias Nuvens”. Sua finalidade é criar um arquivo único, agregando pontos oriundos das nuvens de pontos.

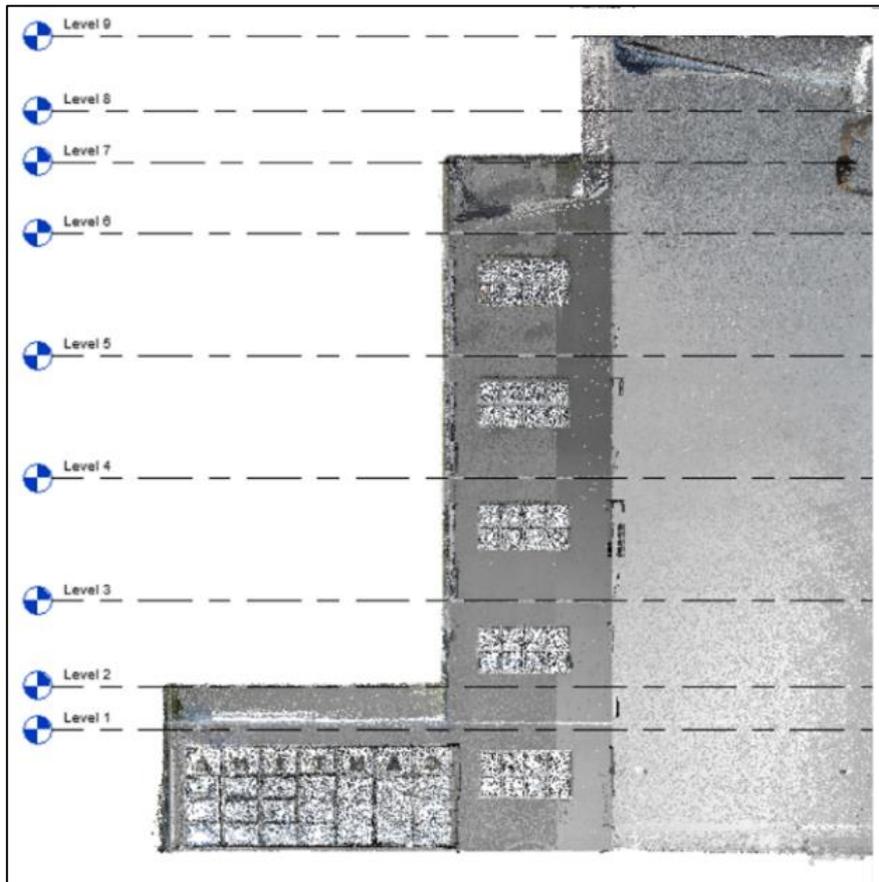
O processo de integração de dados originou quatro modelos de nuvens de pontos que, juntamente com a nuvem de pontos fotogramétrica, representam integralmente o edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional. São eles: (a) ALS + TLS; (b) ALS + Fotogrametria de fachada; (c) TLS + Fotogrametria de telhado; (d) ALS + TLS + Fotogrametria de fachada e telhado.

### **3.10 Padrão geoespacial de representação urbana 3D**

A modelagem BIM do edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional foi realizada no *software* Autodesk® Revit 2021, o qual possui ferramentas otimizadas para realizar a modelagem tendo por base nuvens de pontos tridimensionais. Apesar de existirem métodos semiautomáticos, neste trabalho optou-se por realizar uma modelagem manual, devido à inviabilidade em se adquirir licenças de plugins extras.

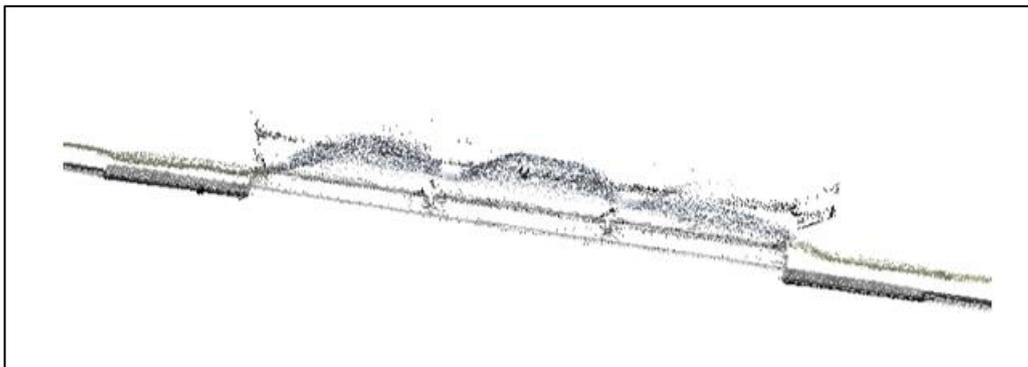
O procedimento é intuitivo e tem por base a nuvem de pontos. Ou seja, a modelagem é realizada com base na definição geométrica do objeto, representada pela nuvem de pontos. Primeiramente, ela foi importada para um novo projeto no Revit. A seguir, foram criados os níveis do projeto, referentes aos andares, platibandas e caixa d'água (Figura 3.21). Na sequência, a modelagem foi realizada nível a nível. Iniciou-se pelo pavimento térreo, o maior deles. A delimitação de paredes, vigas, portas, janelas e vidraças foram determinadas e localizadas por meio da nuvem de pontos de forma manual. O software permite inserir em vista de planta portas, janelas e vidraças localizados a partir da nuvem de pontos. A Figura 3.22 apresenta um recorte na nuvem de pontos, em que é possível localizar os limites de uma vidraça, podendo ser facilmente modelada por apresentar os limites das paredes e da vidraça. Neste procedimento, áreas ausentes na nuvem de pontos não foram modeladas, resultando em falhas na modelagem realizada. Após a inserção de todos os elementos em vista de planta nível a nível é possível visualizar o edifício em 3D.

Figura 3.21 – Detalhe de criação de níveis (Level) de pavimentos no Autodesk® Revit.



Fonte: Produção do autor.

Figura 3.22 – Detalhe da localização de uma vidraça na nuvem de pontos.



Fonte: Produção do autor.

O processo de modelagem seguiu o padrão ortogonal horizontal e vertical. Nessa abordagem, não são consideradas imperfeições construtivas, como desaprumos, desalinhamentos, desnivelamentos, dentre outras detectadas pelo laser scanner. Como o objetivo do trabalho foi avaliar a possibilidade de

modelar edifícios por meio das nuvens de pontos, a modelagem apresentou certo desvio em relação à nuvem de pontos, não sendo adotada nenhuma tolerância. Isso significa que as paredes foram modeladas paralelas umas às outras, apesar do desalinhamento longitudinal verificado.

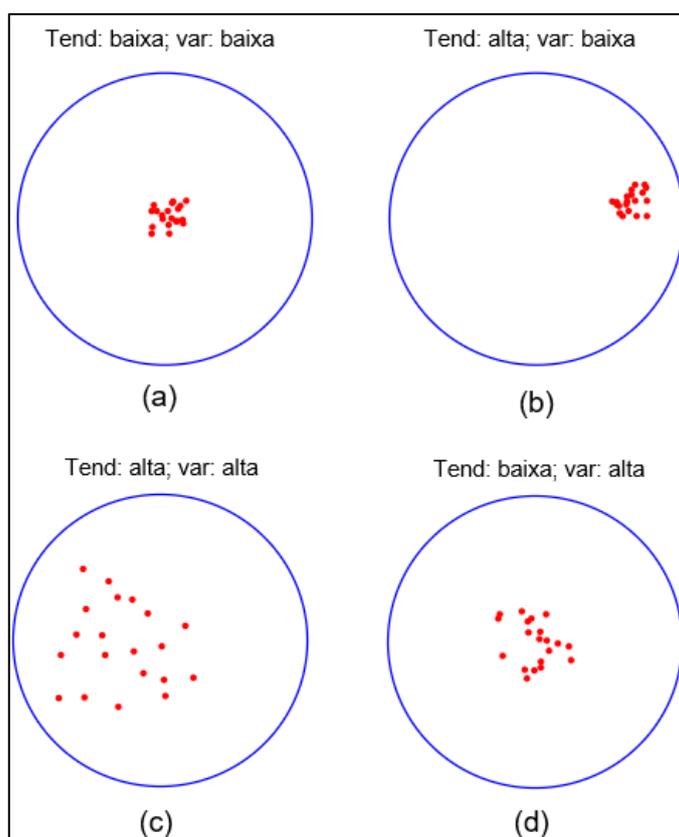
### **3.11 Avaliação dos resultados**

A avaliação dos resultados comumente envolve três conceitos importantes, muitas vezes considerados como sinônimos, mas de significado muito distinto no contexto estatístico, sendo eles: (a) Acurácia: proximidade da medida relativamente ao verdadeiro valor da variável; (b) Precisão: proximidade entre os valores obtidos pela repetição do processo de mensuração; (c) Exatidão: correção, perfeição ou ausência de erro em uma medida ou cálculo. Assim, quanto mais acurado o processo de mensuração mais próximo está o resultado da medida do valor verdadeiro, de modo que a acurácia está ligada à presença de tendenciosidade, enquanto a precisão diz respeito à repetibilidade das medidas, e quanto maior a precisão, menor a variabilidade entre as medidas. A exatidão, portanto, assume dois estados: o processo de mensuração ou cálculo é exato ou não. Uma mensuração por contagem ou a razão entre números que são múltiplos um do outro, por exemplo, irão produzir resultados exatos, enquanto uma pesagem ou uma medição de distância geralmente será inexata e terá sua acurácia dependente do aparelho de medida (MIKHAIL e ACKERMAN, 1976 apud MONICO et al., 2009).

A Figura 3.23 auxilia na distinção dos conceitos de precisão e acurácia. A Figura 3.23(a) é de alta acurácia, pois a tendenciosidade é baixa (i.e., as medições estão próximas ao esperado, que é o alvo, no centro do círculo), e de alta precisão, visto que a variabilidade é baixa (as sucessivas medições encontram-se próximas umas às outras). A Figura 3.23 (b) é de baixa acurácia, pois a tendenciosidade é alta (i.e., as medições estão distantes do alvo, no centro do círculo), e de alta precisão, visto que a variabilidade é baixa (as sucessivas medições encontram-se próximas umas às outras). A Figura 3.23 (c) é de baixa acurácia, pois a tendenciosidade é alta (i.e., as medições estão distantes do alvo, no centro do círculo), e de baixa precisão, visto que a

variabilidade é alta (as sucessivas medições encontram-se distantes umas das outras). A Figura 3.23(d) é de alta acurácia, pois a tendenciosidade é baixa (i.e., as medições estão próximas ao alvo, no centro do círculo), e de baixa precisão, visto que a variabilidade é alta (as sucessivas medições encontram-se distantes umas das outras) (MIKHAIL e ACKERMAN, 1976 apud MONICO et al., 2009).

Figura 3.23 – Distinção dos conceitos de acurácia e precisão.



(a) Alta acurácia e alta precisão, (b) Baixa acurácia e alta precisão (c) Baixa acurácia e baixa precisão, (d) Alta acurácia e baixa precisão.

Fonte: Adaptada de Topico (2021).

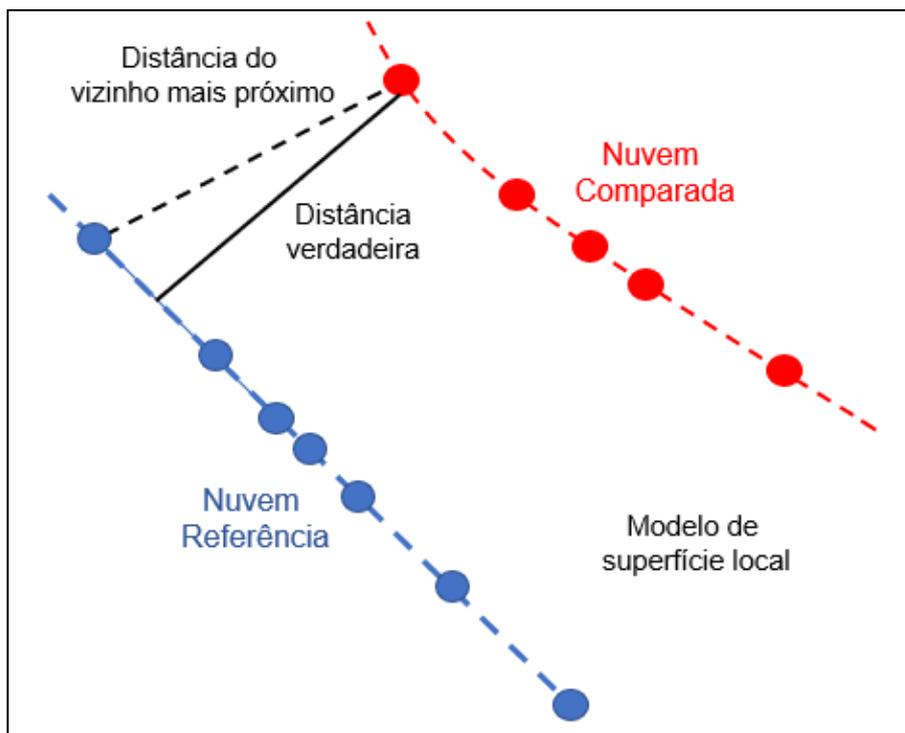
A seguir, será descrito como os resultados deste trabalho foram avaliados.

### 3.11.1 Análise de desvios

A análise de desvios foi utilizada para avaliar a integração de dados e os modelos *as-is* BIM. Nesta etapa, foi realizado o cálculo de distâncias entre as nuvens de pontos integradas e entre os modelos *as-is* BIM e os modelos de

nuvem de pontos integrados que lhes serviram de base. Para isto, foram utilizadas as ferramentas “Distância Nuvem/Nuvem” e “Distância Nuvem/Malha” do CloudCompare. A ferramenta utiliza um método matemático para calcular as distâncias entre duas nuvens de pontos ou entre uma nuvem de pontos e uma malha, ou Rede Irregular Triangular (TIN). A Figura 3.24 apresenta o conceito básico utilizado nos métodos.

Figura 3.24 – Conceito básico utilizado nos métodos de cálculo de distância.



Fonte: Adaptado de Ahmad Fuad et al. (2018).

O método calcula a distância do vizinho mais próximo entre a nuvem ou malha de referência e a nuvem comparada. Para cada ponto na nuvem comparada, é pesquisado seu vizinho mais próximo na referência, e sua distância euclidiana é calculada (AHMAD FUAD et al., 2018).

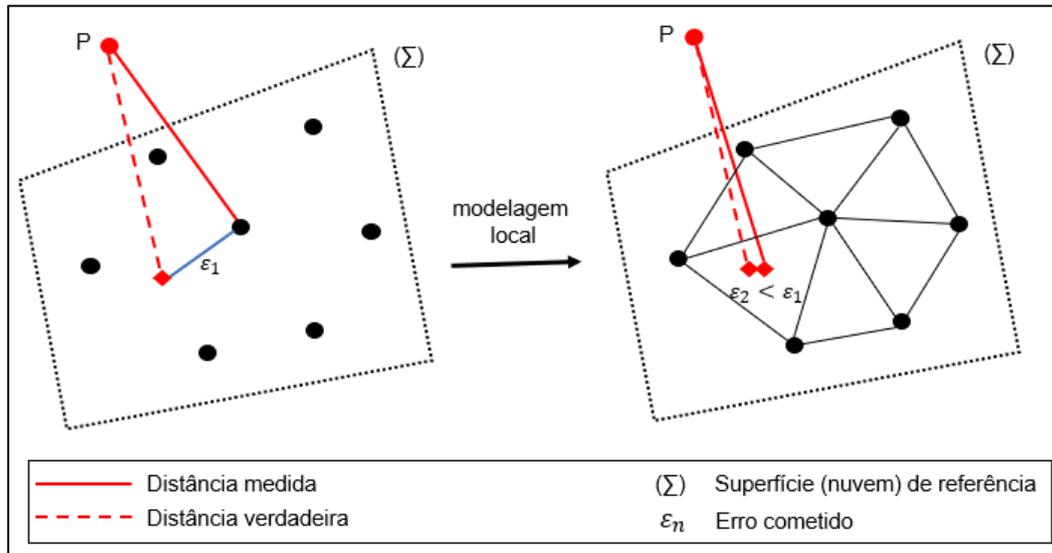
No caso da “Distância Nuvem/Nuvem”, quando a nuvem de pontos referência tem baixa densidade ou tem grandes áreas sem pontos, o vizinho mais próximo não é necessariamente o ponto mais próximo na superfície representada pela nuvem de pontos. Neste caso, para obter uma melhor aproximação da distância real à superfície de referência, pode ser utilizado um modelo de

superfície local. Essa estratégia consiste em calcular um modelo local em torno do ponto mais próximo, de modo a aproximar a superfície real e obter uma melhor estimativa das distâncias (CLOUDCOMPARE, 2021).

Os métodos de modelo de superfície local modelam localmente a superfície da nuvem de referência, ajustando uma primitiva matemática no ponto mais próximo e em vários de seus vizinhos. Este processo é realizado a partir da determinação do ponto mais próximo na nuvem de referência. A distância de cada ponto da nuvem a ser comparada com seu ponto mais próximo na nuvem de referência é substituída por sua distância a esse modelo (Figura 3.25). O CloudCompare oferece três métodos de modelo de superfície local: (a) plano calculado por mínimos quadrados; (b) triangulação 2,5D de Delaunay; (c) função quadrática de altura. Maiores informações sobre os modelos podem ser encontradas na documentação do *software* em CloudCompare (2021).

Para adotar a adequada configuração da ferramenta, foram observadas as características das nuvens de pontos. Nas integrações ALS + TLS, TLS + Fotogrametria de telhado e híbrida múltipla os dados TLS foram tomados como referência. Na integração ALS + Fotogrametria de fachada os dados fotogramétricos foram tomados como referência. Comumente, dados de fachada e telhado são obtidos por perspectivas diferentes, apresentando baixa sobreposição de dados. Nesse caso, foi adotada a configuração de cálculo de distância “nuvem a nuvem” (*Cloud to Cloud - C2C*), utilizando um modelo de superfície local para atender a estas características. Assim, foi adotado o modelo calculado por mínimos quadrados, por este apresentar, conforme a documentação do CloudCompare, melhores resultados com menor custo computacional, processando nuvens de pontos e representando alvos com grande variação geométrica (CLOUDCOMPARE, 2021).

Figura 3.25 – Conceito usado na modelagem de superfície local.



Fonte: Adaptado de Ahmad Fuad et al. (2018).

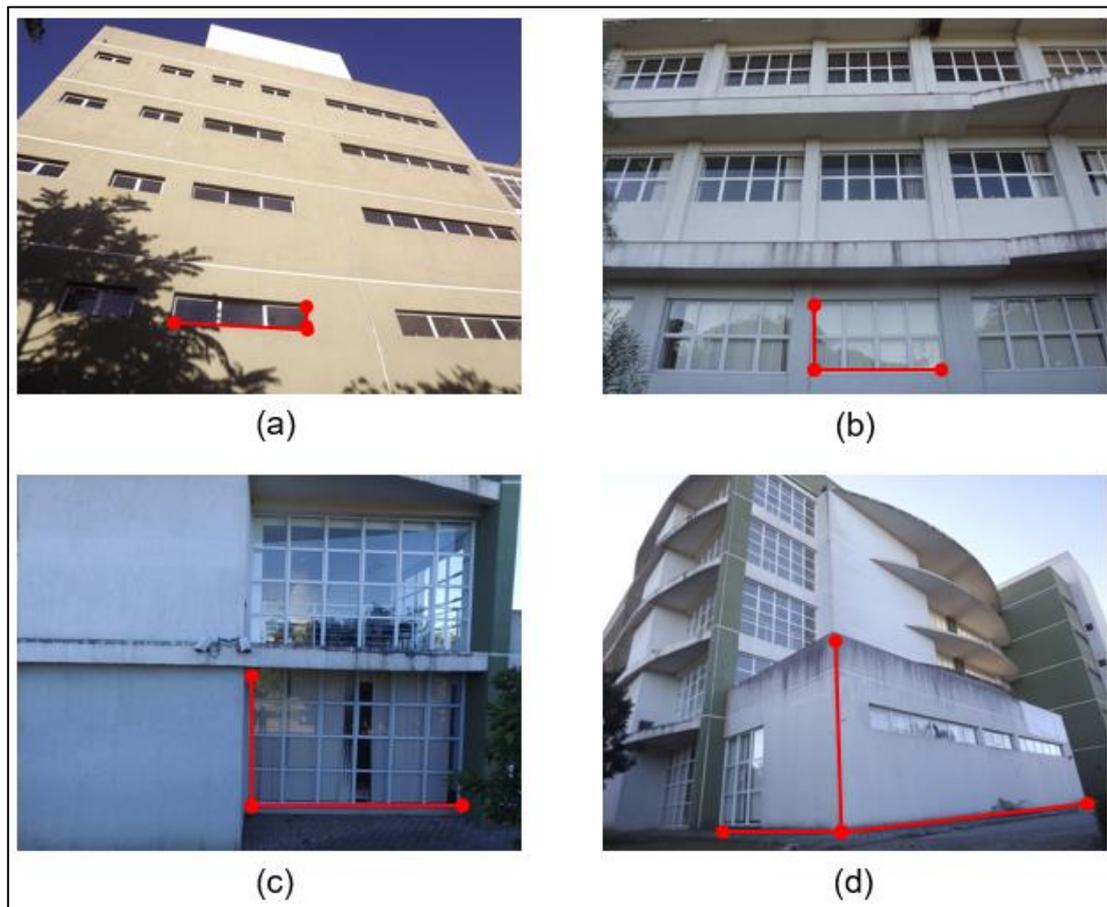
### 3.11.2 Acurácia dos modelos de nuvens de pontos

A acurácia dos modelos foi realizada por meio do método de avaliação física, que compara as medidas obtidas em campo com as medidas virtuais obtidas nos modelos. Foram realizadas medições de diversos elementos de fachada e telhado do edifício, utilizando uma trena a laser Leica DISTO™ Classic. A acurácia do equipamento foi verificada por meio de calibrações realizadas no Laboratório de Metrologia Mecânica pertencente ao Laboratório de Integração e Testes (LIT) do INPE (Anexo A).

A obtenção das informações geométricas do edifício requereu uma quantidade significativa de aferições. Primeiramente, foi realizado um planejamento para identificar nas nuvens de pontos possíveis áreas candidatas a mensurações em campo. Este procedimento foi efetivado por meio do CloudCompare, visualizando, verificando e medindo as potenciais áreas para levantamento em campo. Foram priorizados elementos de fachada que estivessem bem representados nas nuvens de pontos, para que suas dimensões pudessem ser verificadas com a ferramenta de seleção de pontos dos CloudCompare. Além disso, foram selecionadas áreas que contemplassem diversos intervalos de comprimentos, para ser possível representar a geometria do edifício (Figura

3.26). Foram considerados elementos representativos da fachada, como janelas de banheiros e salas de aula ou terapia, vidraças e paredes de variados tamanhos. Para melhor representar a geometria do edifício, foram mensuradas as larguras e alturas destes elementos em vários pontos da fachada.

Figura 3.26 – Detalhe dos elementos selecionados para mensuração.



(a) Janela de banheiro, (b) Janela de sala de aula ou terapia, (c) Vidraça, (d) Parede  
Fonte: Produção do autor.

Em campo, as áreas previamente selecionadas foram aferidas em cinco séries de medições para cada uma delas, sendo considerado o valor médio. Como não foi possível obter acesso a todos os pontos previamente selecionados, alguns deles foram excluídos. Diante disto, foram selecionadas 79 medidas de elementos do edifício, com dimensões variando de 0,695 m a 23,82 m. Devido a uma grande variação nas dimensões e para melhor análise e compreensão, as medidas foram divididas em classes, descritas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Classes de medidas utilizadas na verificação da acurácia.

<b>Classe</b>	<b>Intervalo (m)</b>	<b>Quantidade</b>
1	< 1,99	14
2	2,00 – 2,99	29
3	3,00 – 5,99	15
4	6,00 – 9,99	9
5	> 10,00	12

Fonte: Produção do autor.

Os procedimentos de verificação de acurácia foram baseados em Klein et al. (2012). As dimensões obtidas pela trena a laser (EDM), consideradas como “verdade de campo”, foram então utilizadas para verificar as dimensões correspondentes extraídas dos modelos. Primeiramente, foi calculado o erro absoluto, que corresponde ao módulo da diferença da dimensão EDM e a correspondente obtida nos modelos, obtendo os erros relativos percentuais calculados a partir da Equação 3.1. Os erros relativos percentuais são considerados como a acurácia dos modelos.

$$PE = \frac{|medida\ EDM - medida\ modelo|}{medida\ EDM} * 100. \quad (3.1)$$

Para analisar a variação das dimensões verificadas nos modelos em relação às dimensões EDM, foram calculados os valores de RMSE. Essa análise é considerada medida padrão de acurácia estimada em modelos, capaz de indicar a magnitude do erro e indicando a qualidade de ajuste dos dados. O valor de RMSE dá a medida do erro médio que está sendo cometido (GHILANI, 2006), conforme a Equação 3.2.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - x_j)^2}, \quad (3.2)$$

em que  $n$  = número de dados;  $y$  = dimensões nos modelos;  $x$  = dimensões EDM.

A análise de concordância entre as dimensões foi verificada por meio da correlação linear simples. Este conceito da estatística descritiva objetiva medir o grau de relacionamento entre duas variáveis, descrevendo-o por meio de uma equação de regressão. A equação matemática descreve o relacionamento entre as dimensões independentes (EDM) e as dimensões dependentes (modelos). O grau de relação linear entre as variáveis é medido pelo coeficiente de determinação de Pearson, conhecido como  $R^2$ . Esse coeficiente representa a proporção da variação da variável dependente que é explicada pela variação da variável independente. O  $R^2$  é comumente utilizado para determinar se o modelo se ajusta bem aos dados. Seu valor varia de 0 a 1, e quanto mais alto o valor, melhor o ajuste do modelo (KENNEDY, 2008). Foram verificados os critérios para a regressão: normalidade dos dados e homogeneidade da variância.

### **3.11.3 Análise de desvio dos modelos BIM**

Os modelos *as-is* BIM foram avaliados comparativamente com os modelos de nuvem de pontos, utilizados como base de sua modelagem. Ao longo da elaboração, foi utilizado o método baseado em inspeção visual, a fim de possibilitar a correção de erros antes da finalização dos projetos. Após a finalização da modelagem BIM, foi utilizado o método de análise de desvio para avaliar a qualidade dos modelos por meio do cálculo de distâncias, classificando-as e permitindo entender os tipos e magnitudes dos erros distribuídos tridimensionalmente no modelo (ANIL et al., 2013).

O cálculo das distâncias foi realizado no CloudCompare por meio da ferramenta “Distância Nuvem/Malha”, explicado em detalhes na Seção 3.11.1.

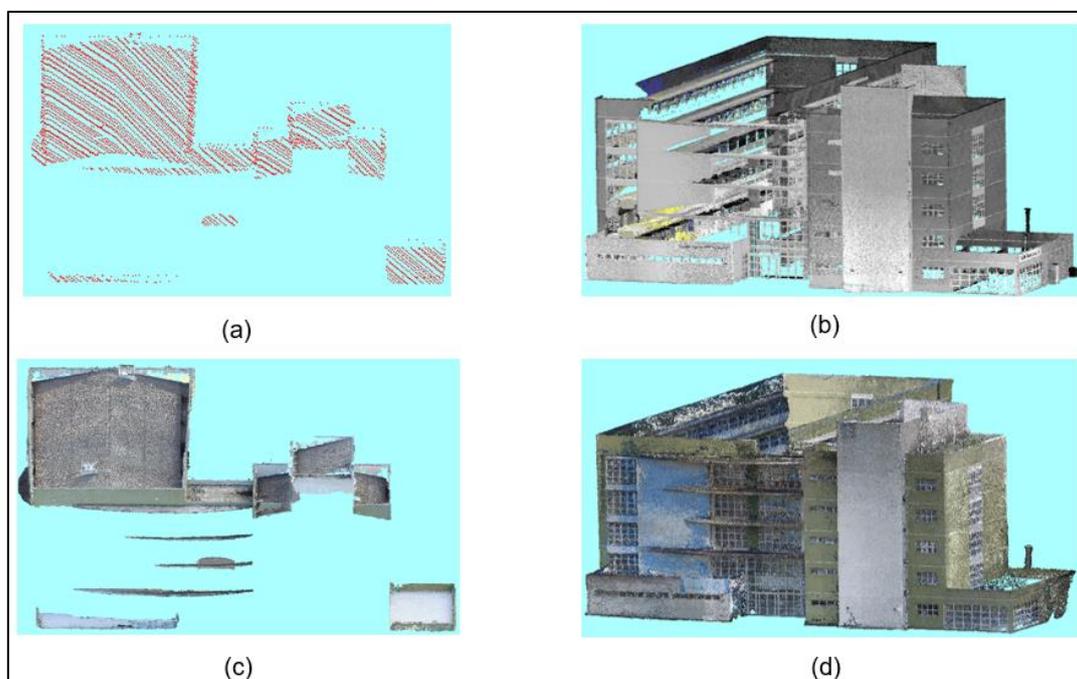
## 4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados das modelagens em quatro perspectivas: (a) sudeste – compreende a fachada principal; (b) nordeste – apresenta os desníveis do setor da cantina; (c) noroeste – destaca a lateral norte, o fundo e a vidraça da escadaria; (d) sudoeste – compreende a maior lateral do edifício. Também é apresentada uma tabela comparativa das modelagens, com fotos do edifício.

### 4.1 Modelagem por nuvens de pontos

Primeiramente, foram geradas quatro nuvens de pontos primárias do edifício, sendo elas: ALS, TLS, fotogramétrica aérea e fotogramétrica de fachada (Figura 4.1). A Tabela 4.1 apresenta os dados de cada nuvem de pontos. A densidade de pontos foi calculada no CloudCompare, o qual considera a distância entre os pontos em um raio de 1 m. A nuvem de pontos TLS apresenta a maior quantidade e densidade média de pontos; em contrapartida, a nuvem ALS apresenta os menores valores.

Figura 4.1 – Nuvens de pontos primárias.



(a) ALS, (b) TLS, (c) Fotogramétrica aérea, (d) Fotogramétrica de fachada.

Fonte: Produção do autor.

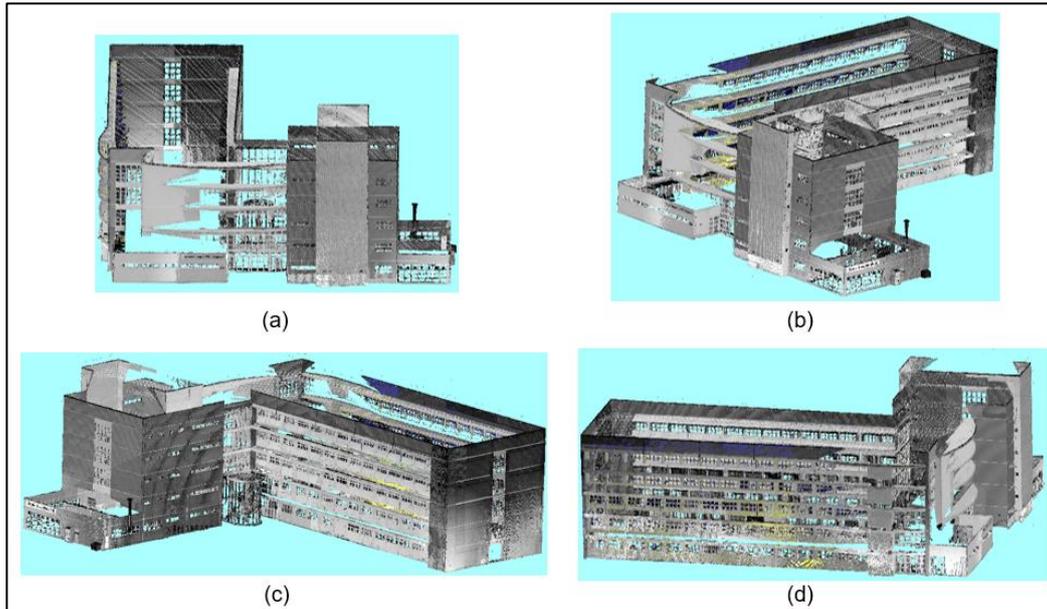
Tabela 4.1 – Informações sobre as nuvens de pontos primárias.

<b>Nuvem de ponto</b>	<b>Quantidade de pontos</b>	<b>Densidade média de pontos (pts/m<sup>2</sup>)</b>
ALS	5.097	1,71
TLS	60.202.824	13.360
Fotogramétrica Aérea	3.335.543	1.076
Fotogramétrica de Fachada	7.457.622	1.136

Fonte: Produção do autor.

As Figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam as modelagens do edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional a partir da integração das nuvens de pontos primárias. Devido a baixa densidade de pontos dos dados ALS, os modelos ALS + TLS e ALS + Fotogrametria de fachada não apresentam detalhes do telhado. Modelos compostos de fachada derivados apenas de dados TLS (ALS + TLS e TLS + Fotogrametria de fachada), apresentam ausência de dados em diversas áreas, devido às diferentes alturas do edifício, aos recuos do piso térreo e às lajes avançadas curvas, que produziram oclusões ao feixe laser. Os modelos derivados de dados fotogramétricos (ALS + Fotogrametria de fachada, TLS + Fotogrametria de telhado e Fotogrametria de fachada + Fotogrametria de telhado) apresentam os detalhes dos telhados, mas carência de dados na fachada, devido à presença de árvores que comprometeram sua obtenção. O modelo híbrido múltiplo, agregando dados de todas as nuvens de pontos primárias, apresenta complementaridade ampla de dados. Áreas não representadas em uma nuvem foram adequadamente representadas pelas outras nuvens de pontos, cada qual contribuindo com a modelagem dos detalhes arquitetônicos externos do edifício, o que justifica o uso da integração de dados.

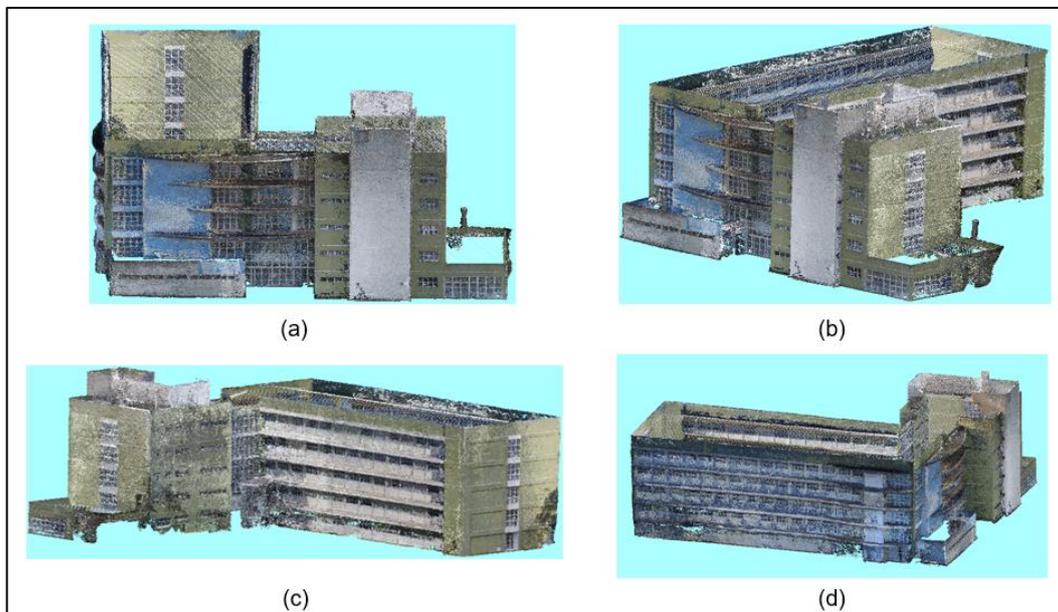
Figura 4.2 – Edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional modelado com a integração de dados ALS e TLS.



(a) Face sudeste, (b) Face nordeste, (c) Face noroeste, (d) Face sudoeste.

Fonte: Produção do autor.

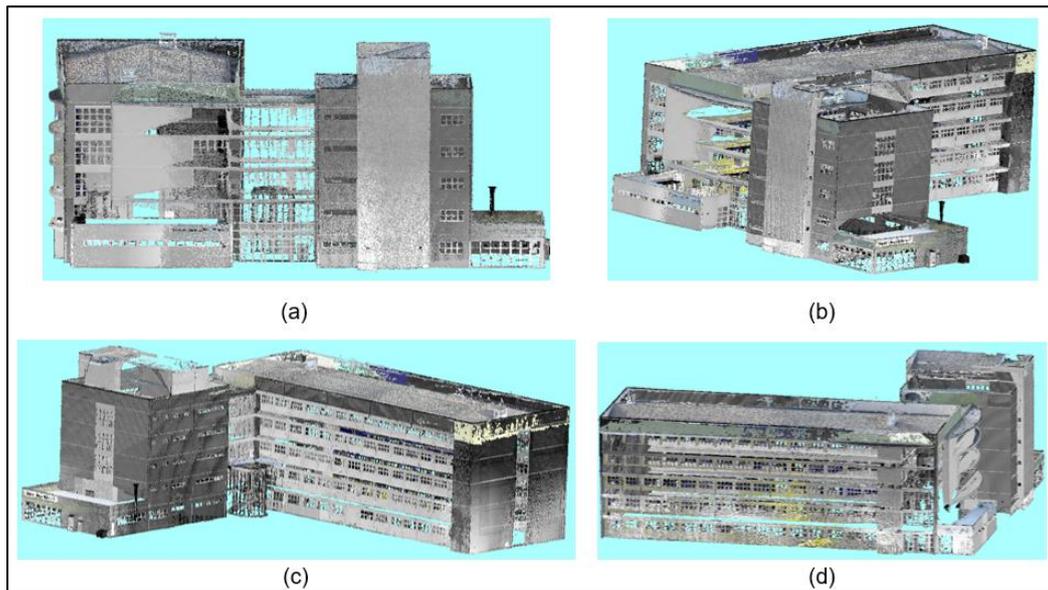
Figura 4.3 – Edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional modelado com a integração de dados ALS e Fotogrametria de fachada.



(a) Face sudeste, (b) Face nordeste, (c) Face noroeste, (d) Face sudoeste.

Fonte: Produção do autor.

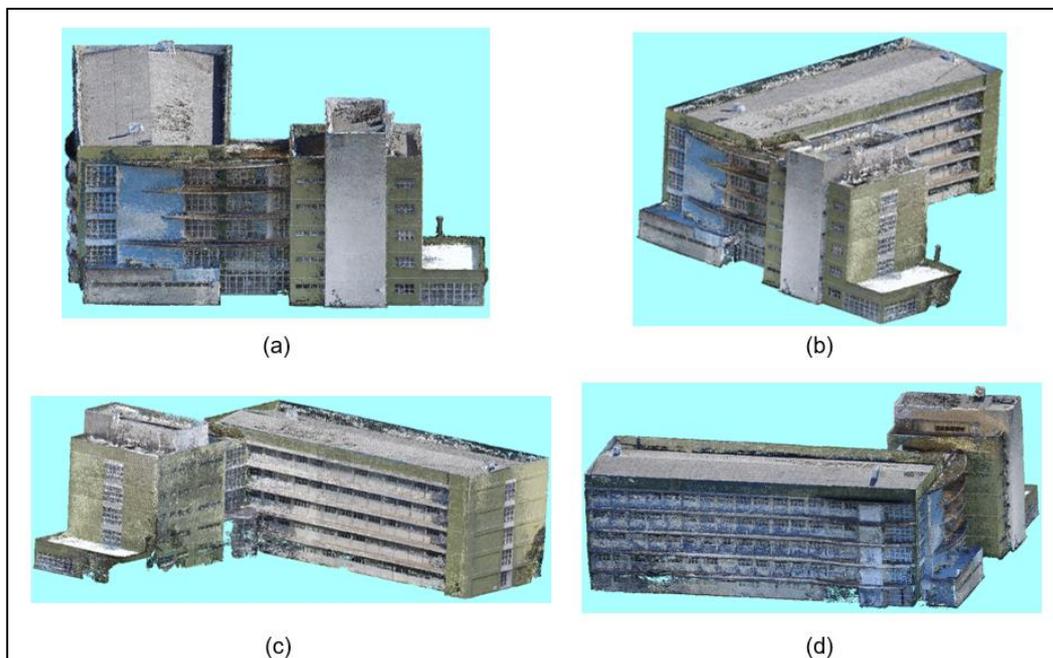
Figura 4.4 – Edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional modelado com a integração de dados TLS e Fotogrametria de telhado.



(a) Face sudeste, (b) Face nordeste, (c) Face noroeste, (d) Face sudoeste.

Fonte: Produção do autor.

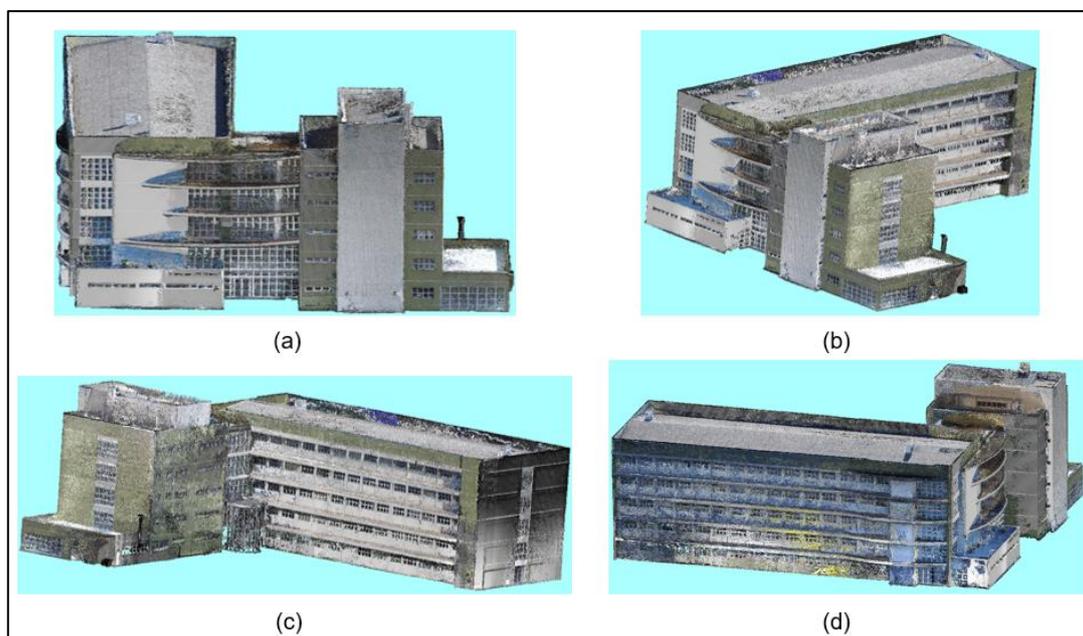
Figura 4.5 – Edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional modelado por Fotogrametria de telhado e de fachada.



(a) Face sudeste, (b) Face nordeste, (c) Face noroeste, (d) Face sudoeste.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.6 – Edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional modelado com a integração de dados ALS, TLS, Fotogrametria de telhado e de fachada.



(a) Face sudeste, (b) Face nordeste, (c) Face noroeste, (d) Face sudoeste.

Fonte: Produção do autor.

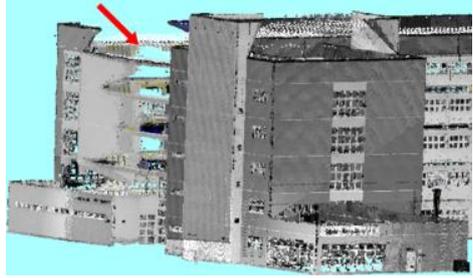
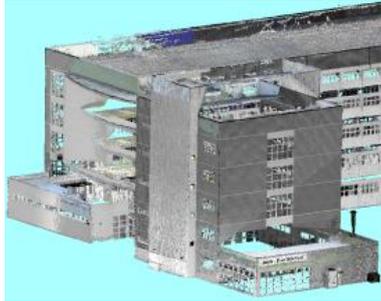
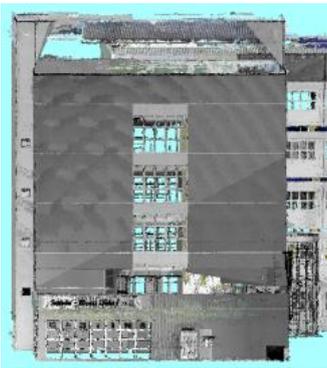
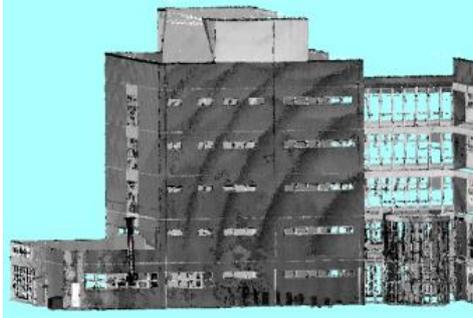
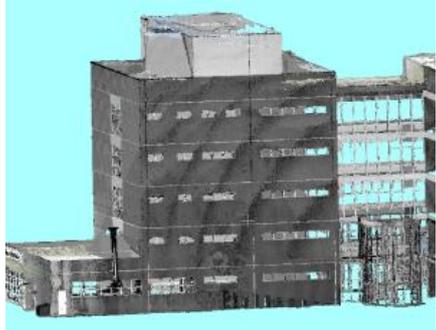
A Tabela 4.2 apresenta os modelos de nuvens de pontos criados por meio da integração de dados ALS + TLS e Fotogrametria de Telhado + TLS. As setas vermelhas indicam as áreas de carência de dados, as quais se concentram nas porções superiores da fachada, sobretudo devido à oclusão do feixe laser ocasionada pela proximidade entre a plataforma e as paredes do edifício no momento da aquisição dos dados. O avanço das lajes como elemento decorativo também proporcionou oclusão ao feixe laser, como observado na face sudeste. A complementaridade dos dados TLS na área de telhado foi maior na integração com a Fotogrametria de telhado, já que a nuvem de pontos ALS possui baixa densidade de pontos, o que resultou em muitas carências de dados, conforme observado nas faces nordeste, norte, sudoeste e ortogonal.

A Tabela 4.3 apresenta os modelos de nuvens de pontos oriundos da integração da Fotogrametria de fachada com ALS e Fotogrametria de fachada com Fotogrametria de telhado. Em ambos os casos, a carência de dados de

fachada ficou restrita às áreas inferiores das paredes, devido à presença de árvores que dificultaram o levantamento fotogramétrico, o que é possível ser verificado pelas setas vermelhas nas faces nordeste, norte, oeste 1, oeste 2 e sudoeste. A baixa densidade dos dados ALS prejudicou a modelagem de detalhes do telhado, como se verifica nas faces nordeste e ortogonal.

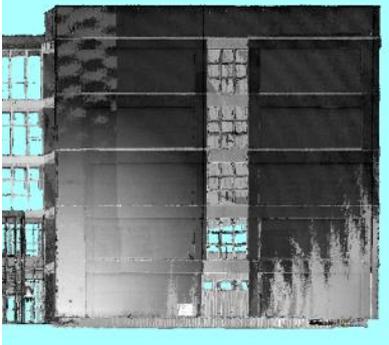
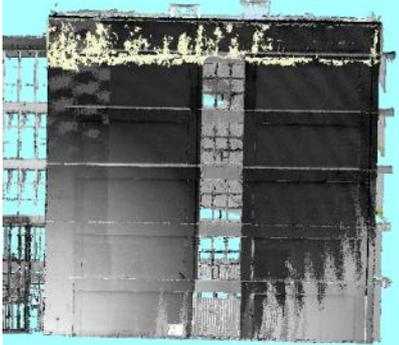
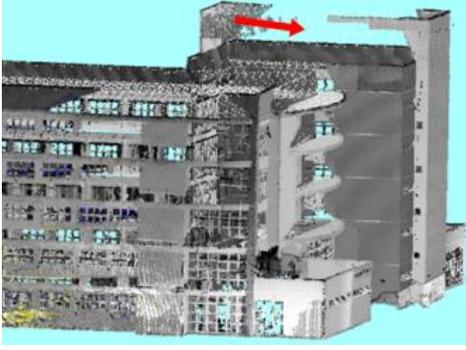
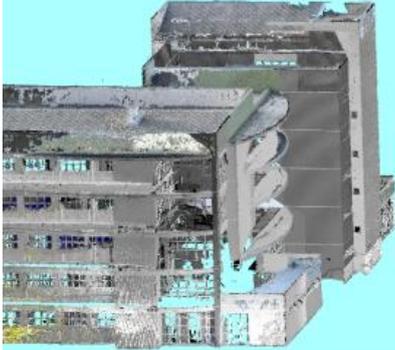
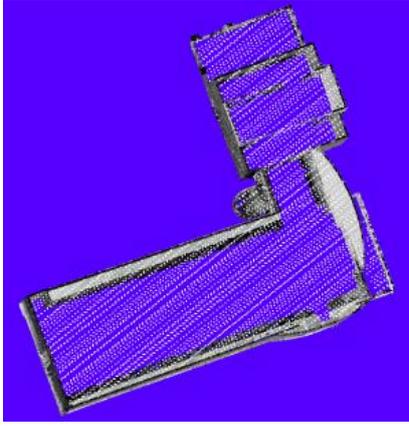
O modelo de nuvem de pontos híbrido múltiplo, resultante da integração de todas as nuvens de pontos primárias, é apresentado na Tabela 4.4. Verifica-se uma grande complementaridade de dados, o que proporcionou a modelagem do edifício sem carência de dados. As áreas complementares permitiram a eliminação das carências de dados identificadas nos modelos apresentados nas Figuras 4.2 e 4.3 por meio da adição de pontos oriundos de uma das nuvens de pontos integradas. As setas amarelas indicam áreas adicionadas por nuvem de pontos fotogramétrica. As indicações de áreas nas faces nordeste e norte foram adicionadas pela nuvem de pontos fotogramétrica de fachada, sobretudo nas porções superiores. Já as setas amarelas nas faces sudoeste e ortogonal indicam áreas adicionadas pela nuvem de pontos fotogramétrica de telhado. Por sua vez, as áreas incorporadas pela nuvem de pontos TLS são indicadas pelas setas azuis e estão concentradas nas partes inferiores da fachada, como é possível observar nas faces nordeste, norte, oeste 1, oeste 2 e sudoeste.

Tabela 4.2 – Modelos de nuvens de pontos ALS + TLS e Fotogrametria de telhado + TLS do edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional.

Face	ALS + TLS	Fotogrametria de telhado + TLS
Sudeste		
Nordeste		
Norte		
Oeste 1		

(Continua)

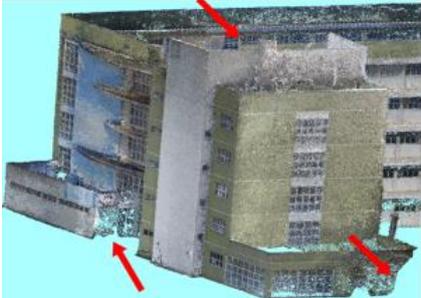
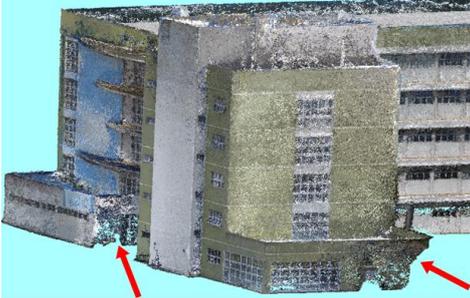
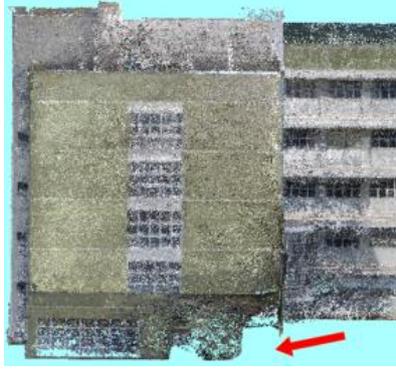
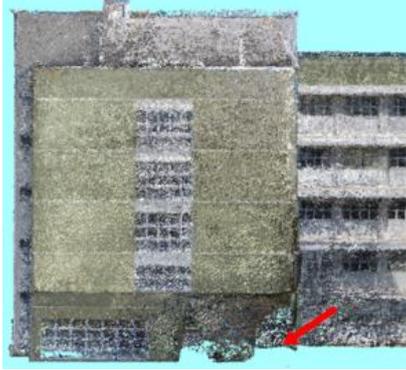
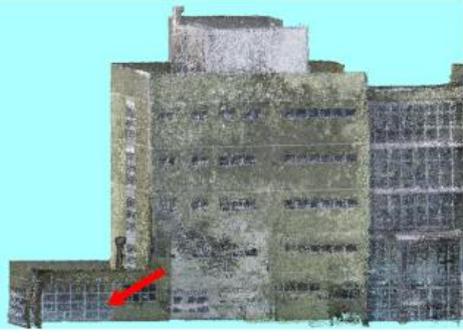
Tabela 4.2 – Conclusão.

Face	ALS + TLS	Fotogrametria de telhado + TLS
Oeste 2		
Sudoeste		
Ortogonal		

Nota:  Principais áreas de carência de dados

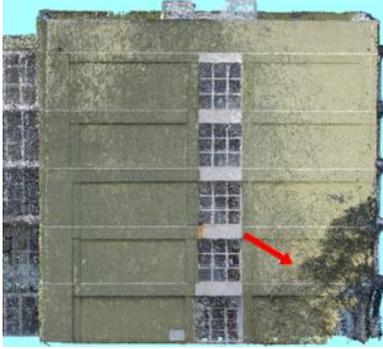
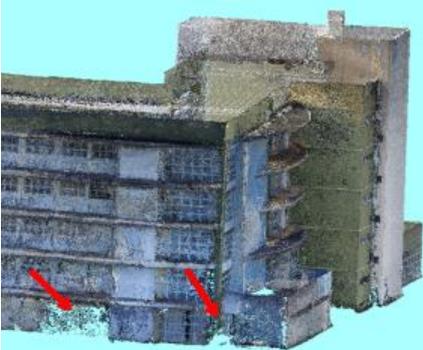
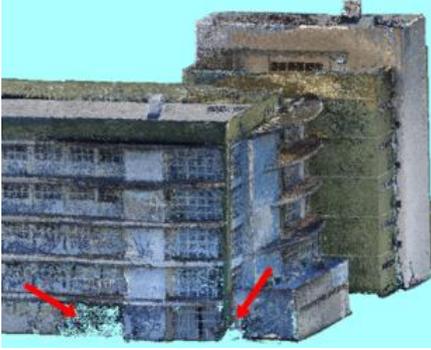
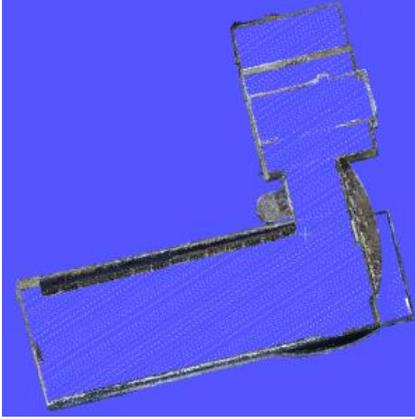
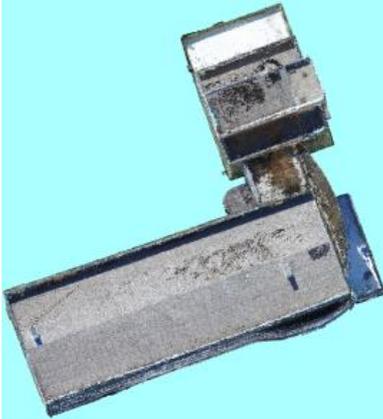
Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.3 – Modelos de nuvens de pontos ALS + Fotogrametria de fachada e Fotogrametria de telhado + Fotogrametria de fachada do edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional.

Face	ALS + Fotogrametria de fachada	Fotogrametria de telhado + Fotogrametria de fachada
Sudeste		
Nordeste		
Norte		
Oeste 1		

(Continua)

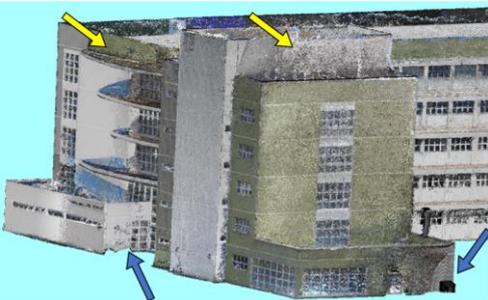
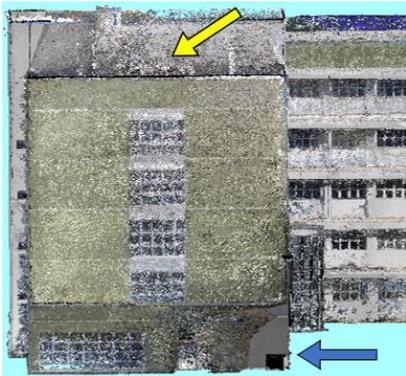
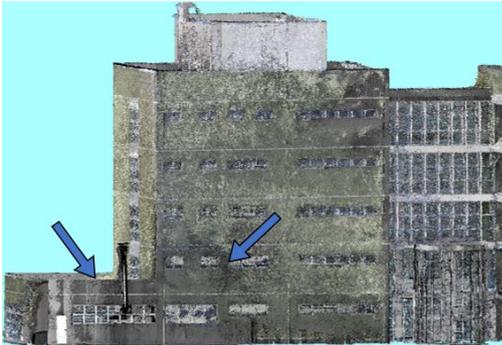
Tabela 4.3 – Conclusão.

Face	ALS + TLS	Fotogrametria de telhado + TLS
Oeste 2		
Sudoeste		
Ortogonal		

Nota:  Principais áreas de carência de dados

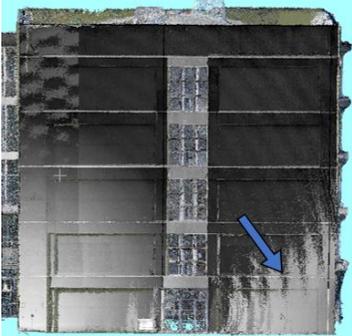
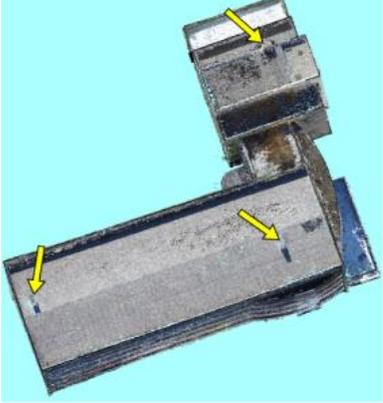
Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.4 – Modelo de nuvem de pontos híbrido múltiplo do edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional.

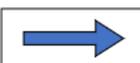
Face	Híbrida Múltipla
Sudeste	
Nordeste	
Norte	
Oeste 1	

(Continua)

Tabela 4.4 – Conclusão.

Face	Híbrida Múltipla
Oeste 2	
Sudoeste	
Ortogonal	

Nota:  Áreas adicionadas por Fotogrametria

 Áreas adicionadas por LiDAR

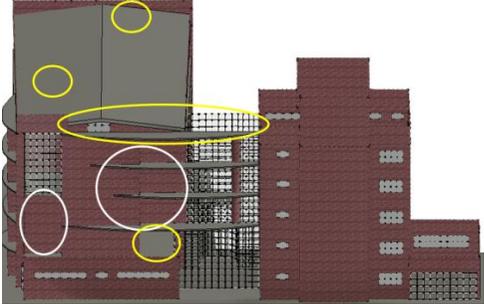
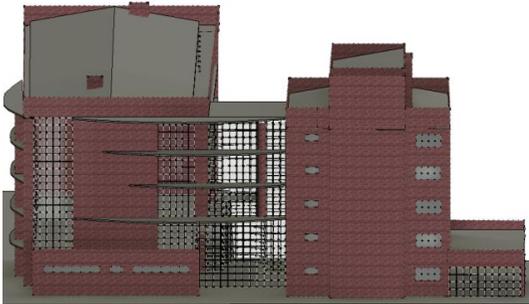
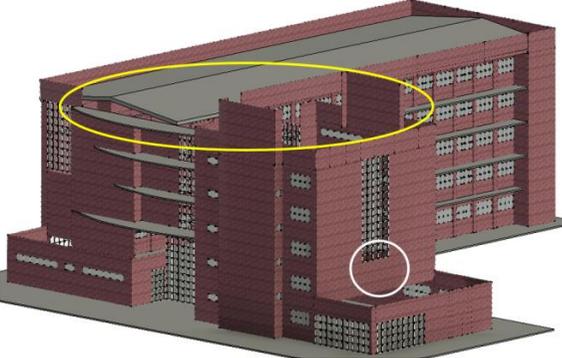
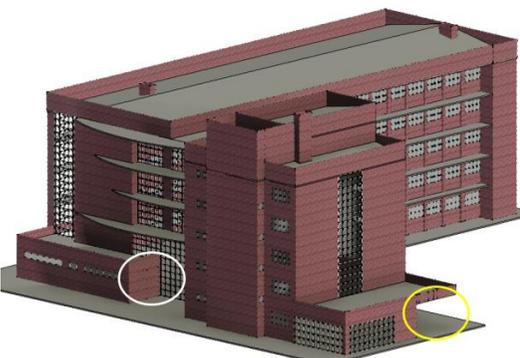
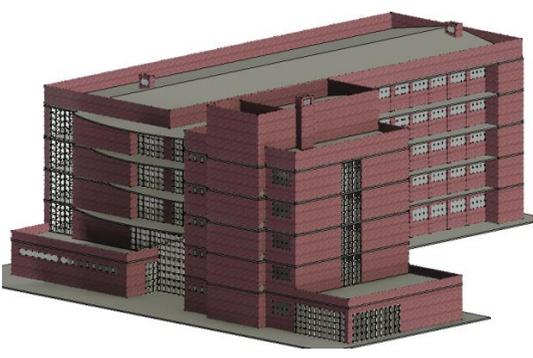
Fonte: Produção do autor.

## 4.2 Modelagem BIM

A modelagem BIM do edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional foi realizada por meio dos modelos de nuvens de pontos do edifício. As modelagens foram realizadas objetivando atingir o nível de detalhe LoD3, representando a fachada e o telhado, incluindo detalhes arquitetônicos, como portas, janelas, vidraças, recuos de paredes e desníveis de profundidade e altura. Como os modelos de nuvens de pontos referem-se a três técnicas de obtenção de dados, sendo elas o ALS, TLS e Fotogrametria, optou-se por apresentar as vantagens e limitações de cada técnica para modelar o edifício em LoD3. A partir da análise destes três modelos BIM, é possível verificar a capacidade de cada técnica em representar os detalhes de telhado e fachada do edifício. Os demais modelos BIM ALS + Fotogrametria de fachada e TLS + Fotogrametria de telhado são apresentados no Apêndice A.

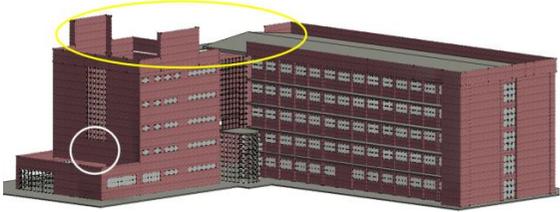
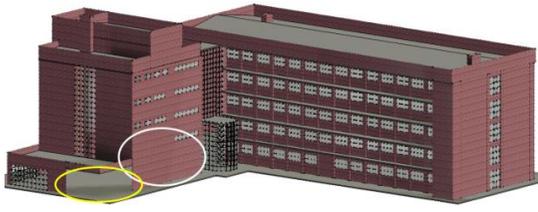
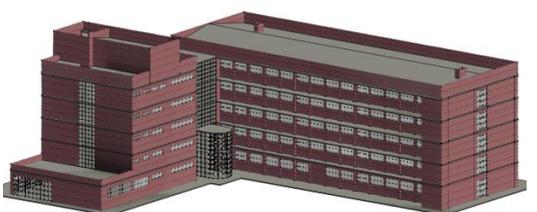
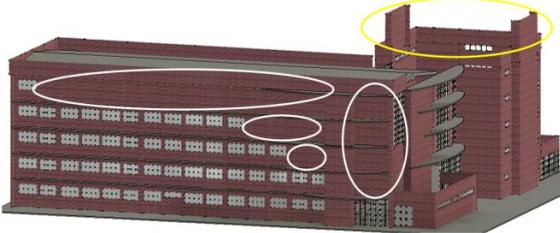
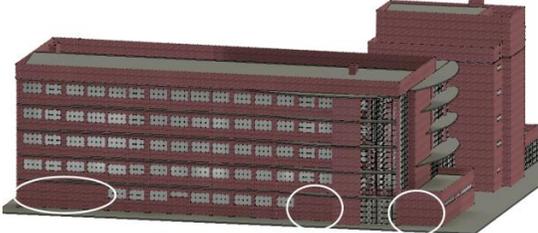
A Tabela 4.5 apresenta uma comparação entre os modelos BIM derivados dos modelos ALS + TLS, fotogramétrico e híbrido múltiplo. É possível verificar os modelos BIM por quatro faces distintas: sudeste, nordeste, noroeste e sudoeste. Quando facilmente visíveis nas nuvens de pontos, as paredes foram devidamente representadas nos modelos *as-is* BIM. O mesmo não ocorreu com algumas janelas e vidraças, por estas estarem parcialmente representadas nas nuvens de pontos, dificultando a identificação correta de suas dimensões e seu posicionamento. Essas dificuldades configuraram carências parciais nos modelos *as-is* BIM, as quais são indicadas por círculos brancos. Já quando a parede não estava visível na nuvem de pontos, não foi possível modelá-la, indicando carências totais de modelagem e indicadas pelos círculos amarelos. No modelo ALS + TLS, são observadas carência total de modelagem no telhado, platibandas superiores e face sudoeste. Já as áreas com carência parcial de modelagem estão presentes nas fachadas em todas as faces apresentadas. O modelo fotogramétrico apresenta carência parcial e total de modelagem restritas às porções inferiores das paredes da fachada. O modelo híbrido múltiplo não apresenta nenhum tipo de carência, sendo possível a modelagem completa do edifício.

Tabela 4.5 – Comparação entre modelos BIM do edifício da Clínica Escola da Terapia Ocupacional.

	ALS + TLS	Fotogrametria de fachada e telhado	Híbrido Múltiplo
Sudeste			
Nordeste			

(Continua)

Tabela 4.5 – Conclusão.

	ALS + TLS	Fotogrametria de fachada e telhado	Híbrido Múltiplo
Noroeste			
Sudoeste			

Nota:  Áreas de carência total de modelagem  
 Áreas de carência parcial de modelagem

Fonte: Produção do autor.

O modelo *as-is* BIM ALS + TLS apresentou carências provocadas por oclusões ao feixe laser TLS e pela baixa densidade de pontos do ALS. A proximidade entre as paredes e a plataforma TLS proporcionou oclusão ao feixe laser, prejudicando a obtenção de dados a partir do segundo andar do edifício. Além disso, o feixe laser foi obstruído por árvores próximas ao edifício. A baixa densidade de pontos do ALS não permitiu a modelagem de detalhes do telhado do edifício.

O modelo *as-is* BIM baseado em Fotogrametria de fachada e de telhado apresenta carências parciais devido a sua resolução espacial e carências totais pela proximidade de árvores. Em alguns casos, a resolução espacial não permitiu identificar as dimensões e posicionamento de janelas e vidraças para modelá-las adequadamente. As árvores ao redor do edifício significaram um desafio extra para a obtenção de dados fotogramétricos, o que em algumas áreas resultou em carências totais de modelagem.

A seguir, será abordada a avaliação detalhada dos resultados.

### **4.3 Avaliação dos resultados**

#### **4.3.1 Integração das nuvens de pontos**

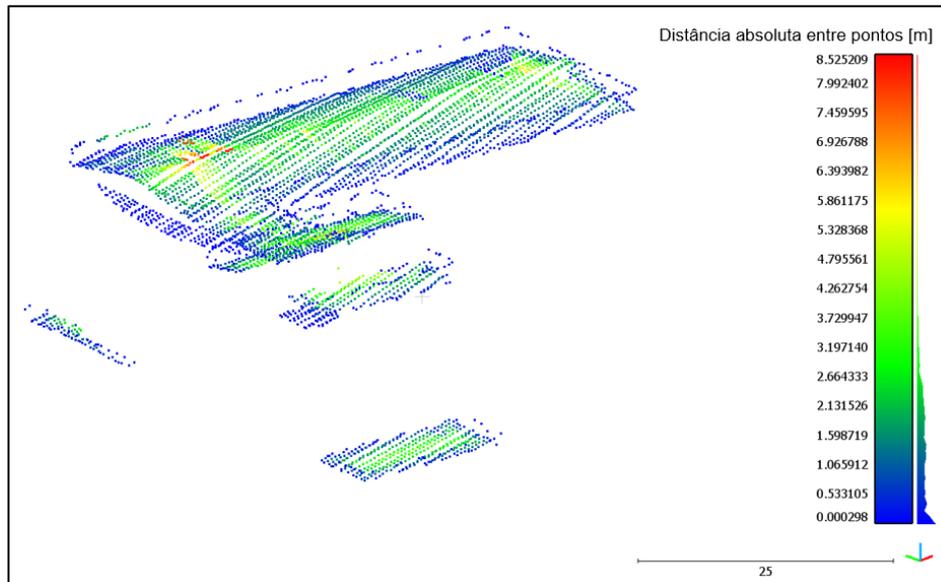
A integração de dados foi avaliada por meio do cálculo das distâncias entre as nuvens de pontos primárias, que originaram os modelos de nuvens de pontos do edifício. A seguir, serão apresentadas quatro avaliações de integração, visto que o modelo fotogramétrico de fachada e de telhado foi criado diretamente no *software* de Fotogrametria.

##### **4.3.1.1 Integração ALS e TLS**

A integração ALS e TLS deu origem ao modelo LiDAR. Foi calculada a distância entre cada ponto da nuvem ALS e seu ponto mais próximo na nuvem TLS. Dessa forma, as distâncias são apresentadas em relação aos pontos da nuvem ALS (Figura 4.7). Como elas foram obtidas em perspectivas diferentes, há baixa sobreposição de dados. Nas áreas onde os dados TLS estão disponíveis, as distâncias variam em apenas alguns centímetros e são

indicadas pela cor azul. A falta de dados TLS resulta em uma mudança de cor azul para verde, amarelo e vermelho, que excede o valor de 1 m. O aumento das distâncias revela a ausência de dados TLS. A proximidade entre os pontos é verificada nas paredes, platibandas e lajes avançadas curvas na parte superior do edifício.

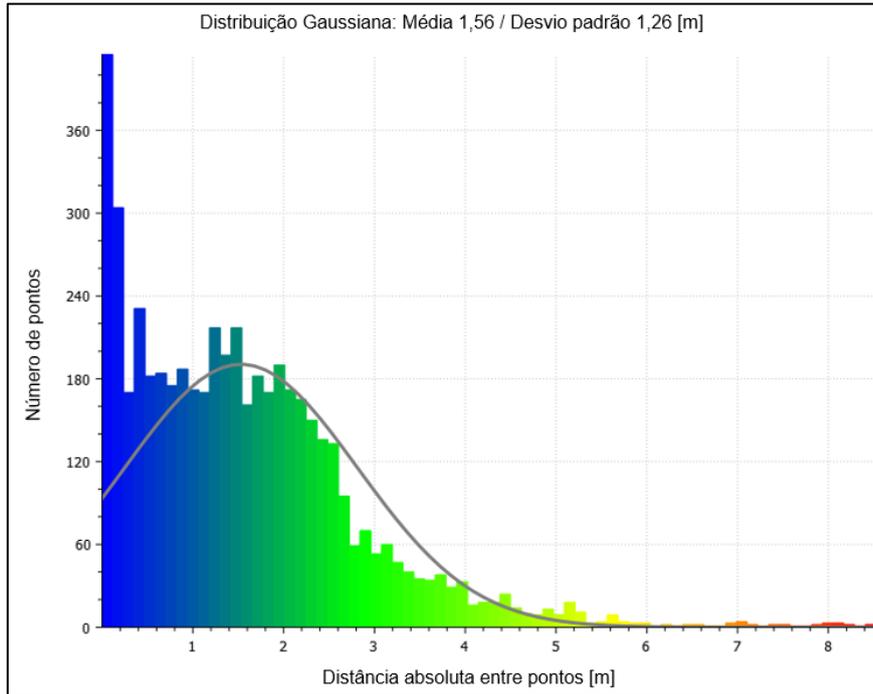
Figura 4.7 – Distâncias entre nuvens de pontos ALS e TLS.



Fonte: Produção do autor.

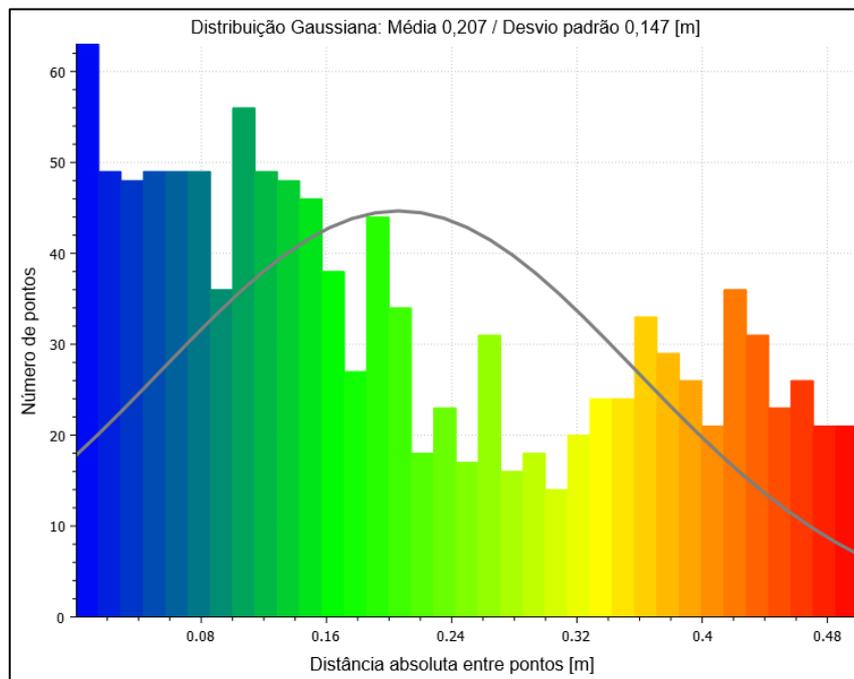
O histograma da quantidade de pontos pela distância e a função gaussiana de probabilidade é apresentado na Figura 4.8. A média de distância geral foi de 1,56 m. Considerando que a agregação dos dados está presente em áreas específicas de junção entre o telhado e a fachada e envolve um baixo número de pontos, é importante analisar a integração em um menor intervalo de distâncias. Para isto, foram separadas as distâncias até 50 cm e ajustada a função gaussiana para este intervalo (Figura 4.9). A precisão da integração neste intervalo de tolerância é de 20,7 cm, com desvio padrão de 14,7 cm. A distribuição tridimensional das distâncias dos pontos no intervalo é apresentada na Figura 4.10. Como pode ser visto, os pontos estão distribuídos nas áreas de junção entre as nuvens de pontos, ou seja, entre o telhado e platibandas, paredes e lajes representadas pelo TLS.

Figura 4.8 – Histograma e função gaussiana das distâncias ALS e TLS.



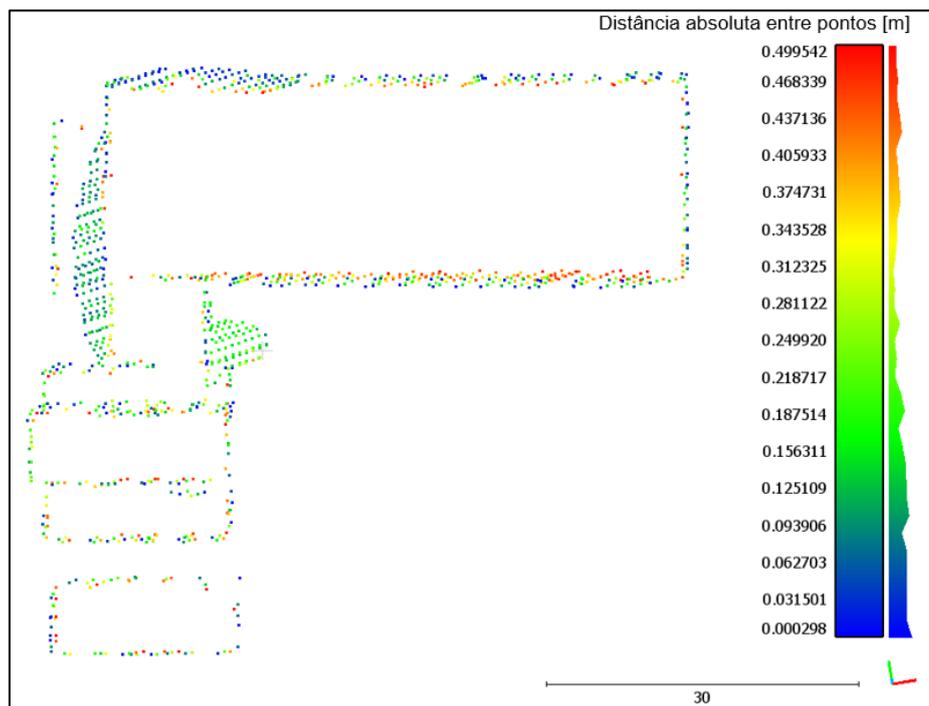
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.9 – Histograma e função gaussiana de probabilidade de distâncias entre pontos ALS e TLS no intervalo de tolerância de 50 cm.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.10 – Distribuição das distâncias entre as nuvens de pontos ALS e TLS no intervalo de tolerância de 50 cm.

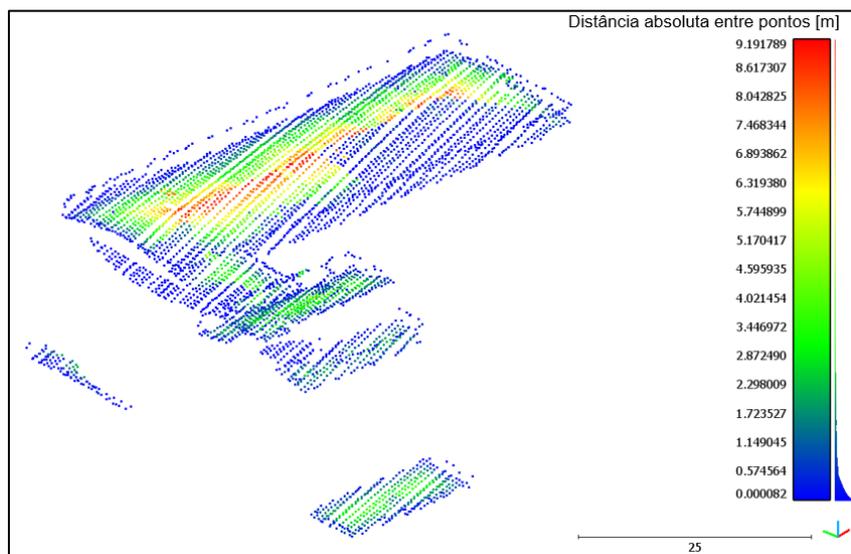


Fonte: Produção do autor.

#### 4.3.1.2 Integração ALS e Fotogrametria de fachada

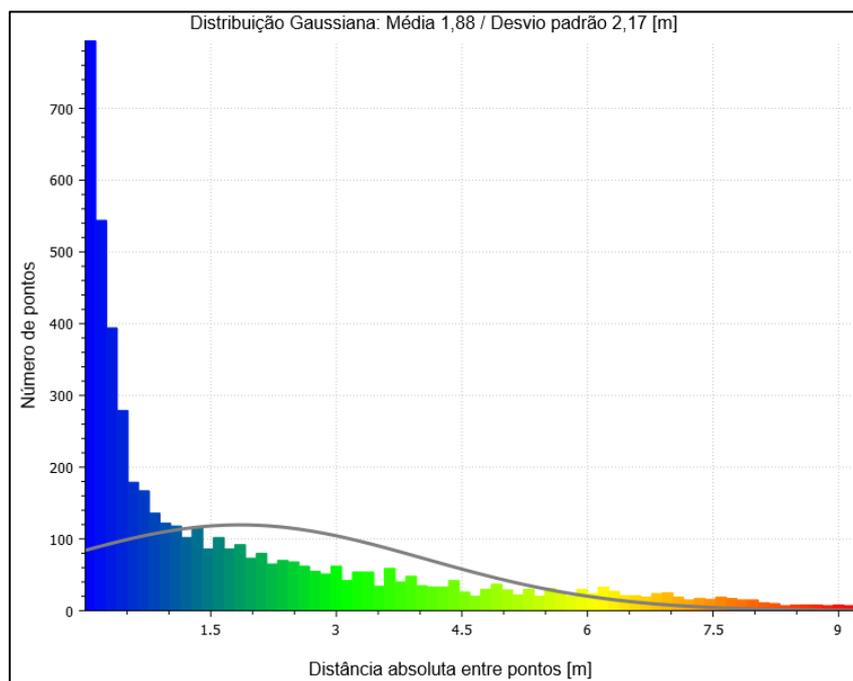
Do mesmo modo, a integração ALS e Fotogrametria de fachada é avaliada por meio do cálculo de distâncias, apresentadas em relação aos pontos da nuvem ALS (Figura 4.11). O histograma e a função gaussiana de probabilidade das distâncias são apresentados na Figura 4.12. Verifica-se uma distribuição com curva mais alongada, com média de 1,88 m e desvio padrão de 2,17 m. Para avaliar somente a área de sobreposição entre as nuvens de pontos, foi realizada a delimitação de tolerância de 50 cm. A Figura 4.13 apresenta o histograma e a função gaussiana deste intervalo, indicando que a precisão de integração das nuvens de pontos apresenta média de 19 cm e desvio padrão de 13 cm. Como pode ser visto na Figura 4.14, a distribuição das distâncias neste intervalo de tolerância ocorre na área de maior sobreposição das nuvens de pontos.

Figura 4.11 – Distâncias entre nuvens de pontos ALS e fotogramétrica de fachada.



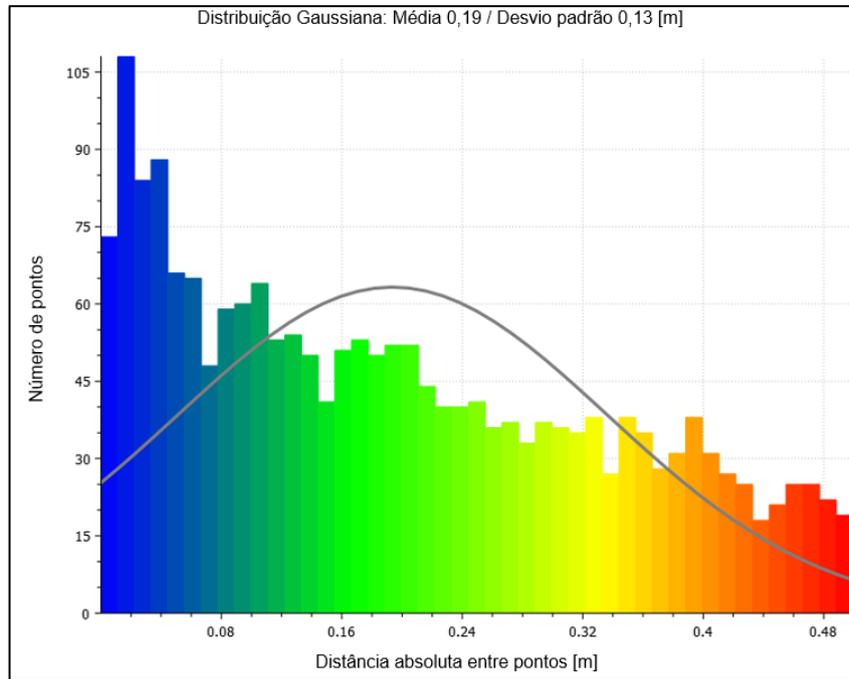
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.12 – Histograma e modelo gaussiano das distâncias entre ALS e Fotogrametria de fachada.



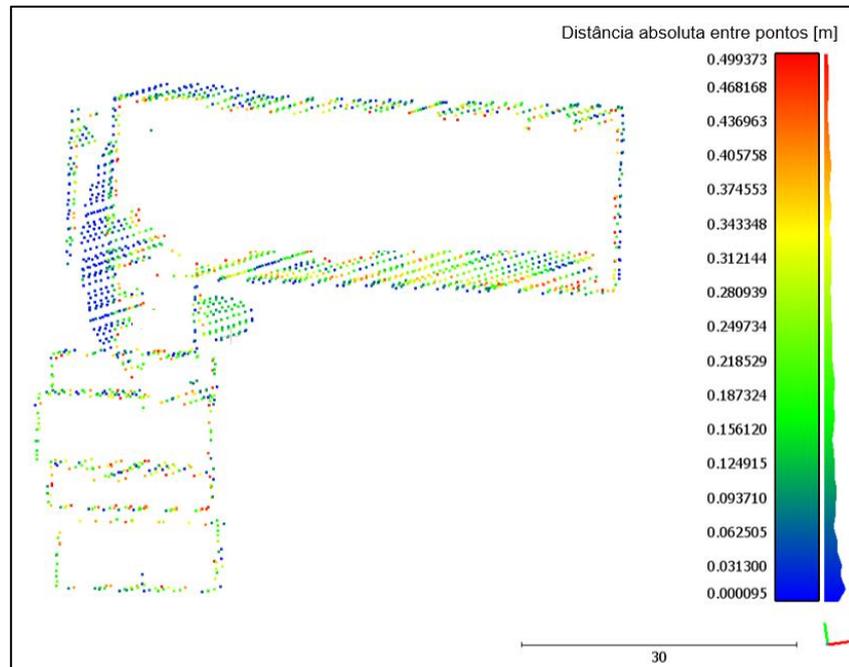
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.13 – Histograma e função gaussiana de probabilidade de distâncias entre pontos ALS e fotogramétricos de fachada no intervalo de tolerância de 50 cm.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.14 – Distribuição das distâncias entre as nuvens de pontos ALS e fotogramétricos no intervalo de tolerância de 50 cm.

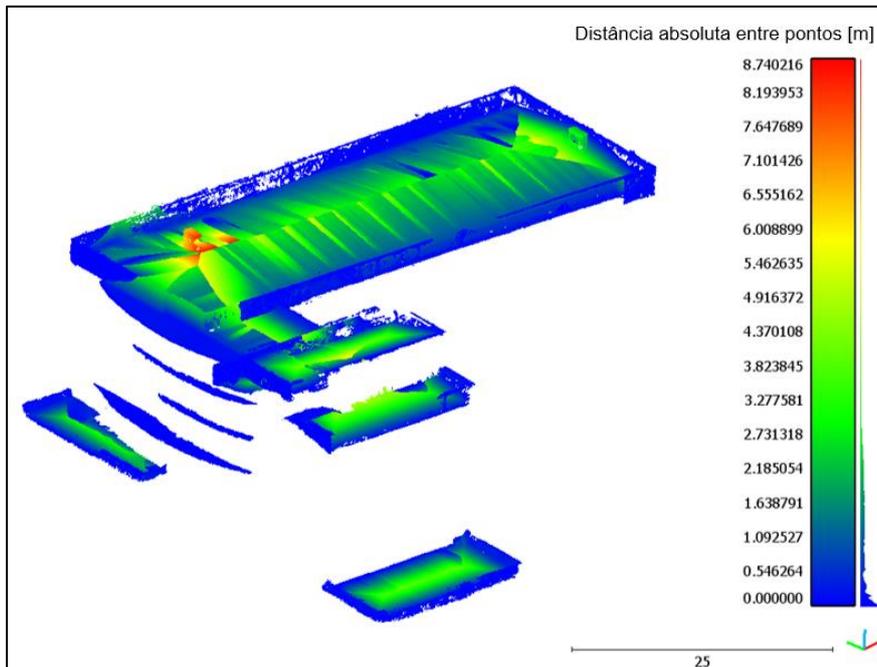


Fonte: Produção do autor.

#### 4.3.1.3 Integração TLS e Fotogrametria de telhado

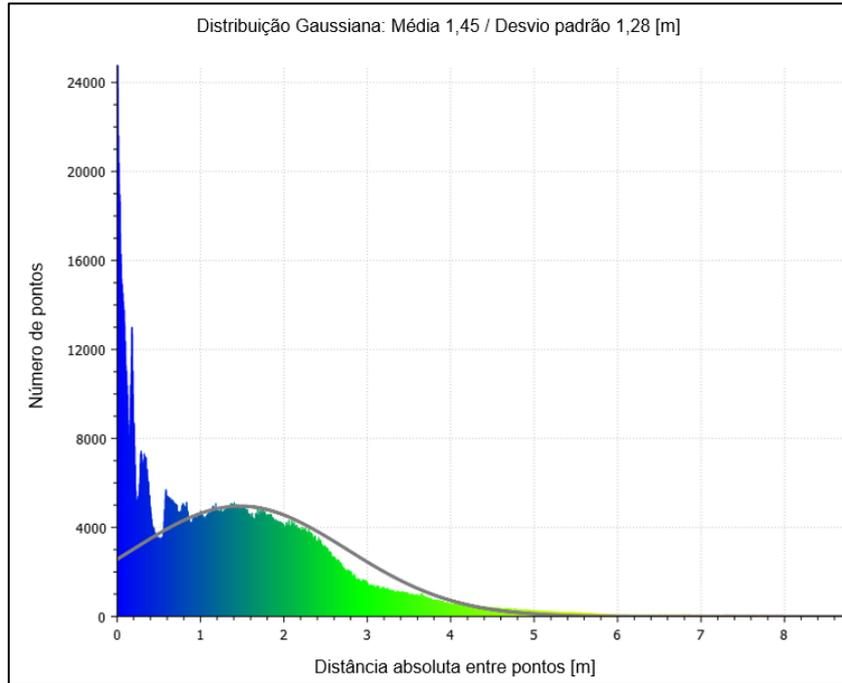
A integração TLS e Fotogrametria de telhado é avaliada a partir do cálculo de distâncias, tomando por base os pontos da nuvem fotogramétrica de telhado (Figura 4.15). O histograma e a função gaussiana de probabilidade das distâncias são apresentados na Figura 4.16. Verifica-se uma distribuição com média e desvio padrão de 1,45 m e 1,28 m, respectivamente. A delimitação de tolerância de 50 cm indica média de 17 cm e desvio padrão de 13 cm das distâncias no intervalo de maior sobreposição dos pontos (Figura 4.17). A distribuição das distâncias neste intervalo de tolerância ocorre na área de maior sobreposição das nuvens de pontos (Figura 4.18).

Figura 4.15 – Distâncias entre nuvens de pontos TLS e fotogramétrica de telhado.



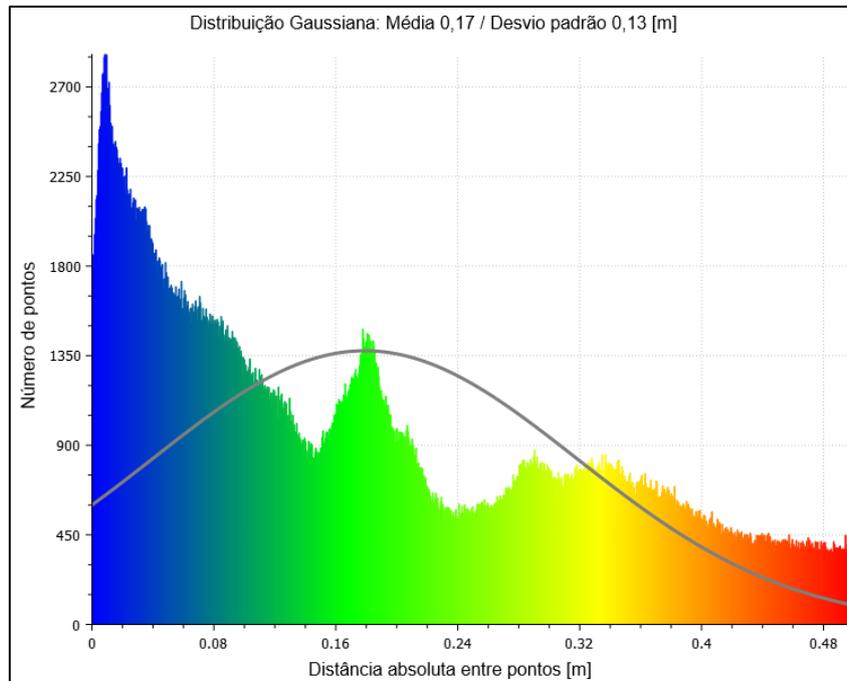
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.16 – Histograma e modelo gaussiano das distâncias entre TLS e Fotogrametria de telhado.



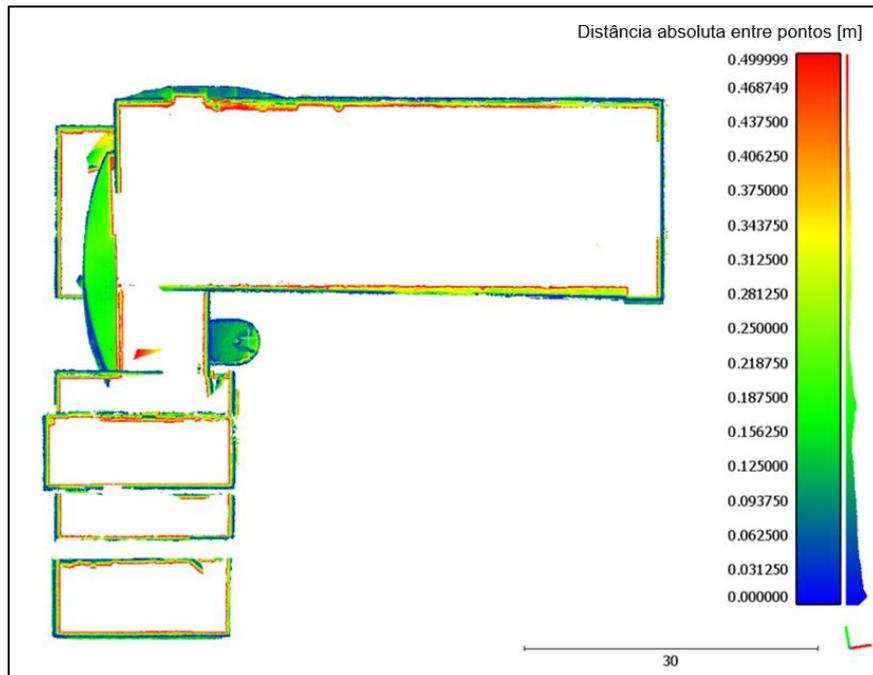
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.17 – Histograma e função gaussiana de probabilidade de distâncias entre pontos TLS e fotogramétricos de telhado no intervalo de tolerância de 50 cm.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.18 – Distribuição das distâncias entre as nuvens de pontos TLS e fotogramétricos de telhado no intervalo de tolerância de 50 cm.

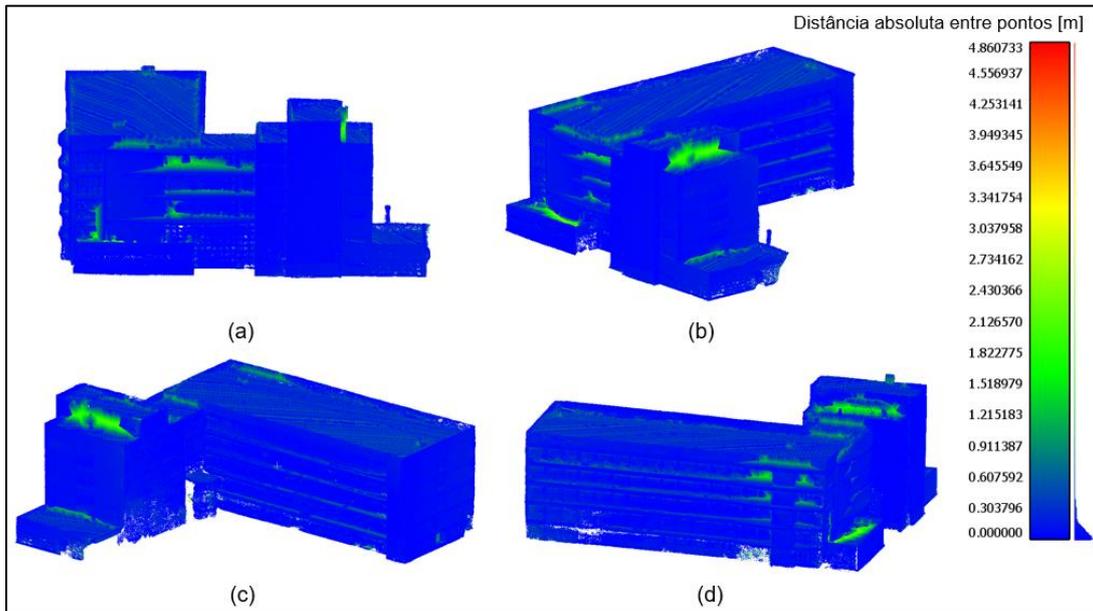


Fonte: Produção do autor.

#### 4.3.1.4 Integração LiDAR e Fotogrametria

O modelo híbrido múltiplo foi criado a partir da integração das nuvens de pontos LiDAR (ALS e TLS) e fotogramétrica. As distâncias das nuvens de pontos primárias são apresentadas na Figura 4.19. A nuvem de pontos tomada como referência é a LiDAR. As distâncias onde os dados LiDAR estão disponíveis são indicadas pela cor azul, variando alguns centímetros. O aumento das distâncias revela a ausência de dados LiDAR, representado pela cor verde. A ausência de dados fotogramétricos não foi representada, visto que não há pontos a serem comparados com pontos LiDAR.

Figura 4.19 – Distâncias entre nuvens de pontos LiDAR e fotogramétrica.

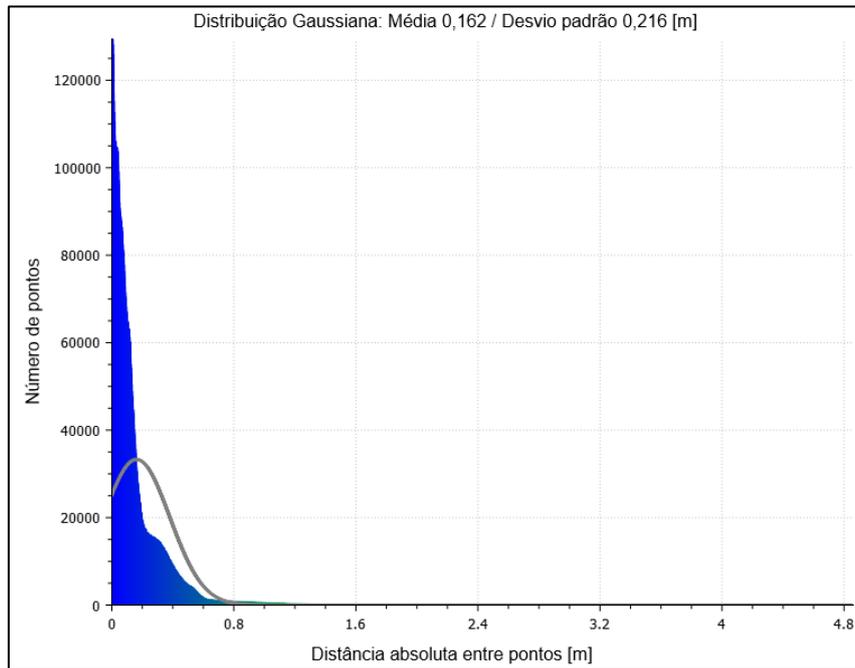


(a) Face sudeste, (b) Face nordeste, (c) Face noroeste, (d) Face sudoeste.

Fonte: Produção do autor.

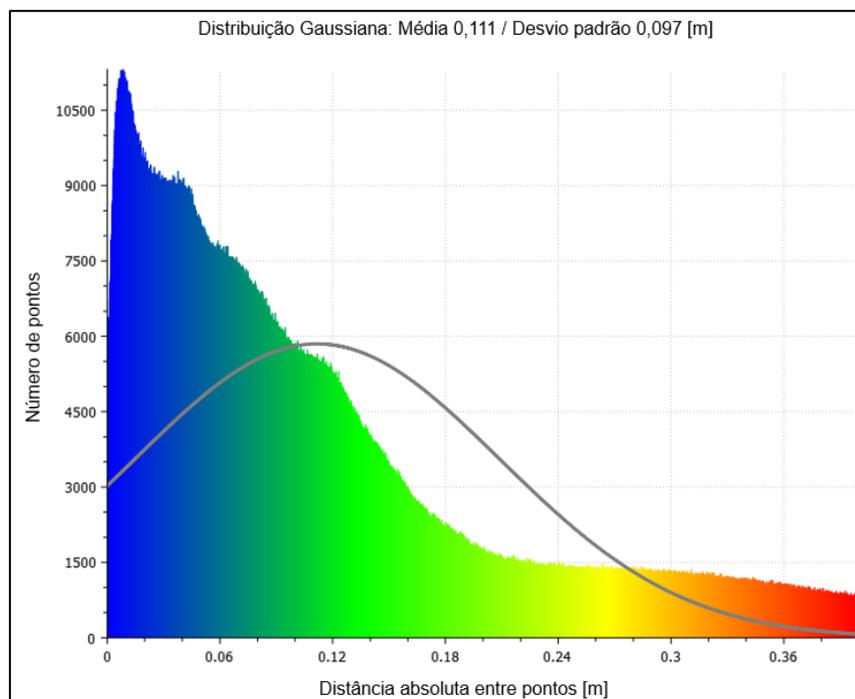
A Figura 4.20 apresenta o histograma com a função gaussiana das distâncias. A média e o desvio padrão das distâncias são de 16,2 cm e 21,6 cm, respectivamente. Considerando estes valores e a análise do histograma, é possível verificar que a maioria dos pontos apresenta distâncias inferiores a 40 cm. Objetivando compreender a precisão de integração em um intervalo menor de agregação de dados, foram separados os valores de 0 a 40 cm e ajustada a função gaussiana correspondente (Figura 4.21). A distância média verificada é de 11,1 cm com desvio padrão de 9,7 cm. Analisando a distribuição espacial dos pontos (Figura 4.22), verifica-se uma diminuição no telhado, visto que é onde a densidade dos dados ALS é menor e conseqüentemente as distâncias são maiores.

Figura 4.20 – Histograma e probabilidade gaussiana das distâncias entre nuvens de pontos LiDAR e fotogramétrica.



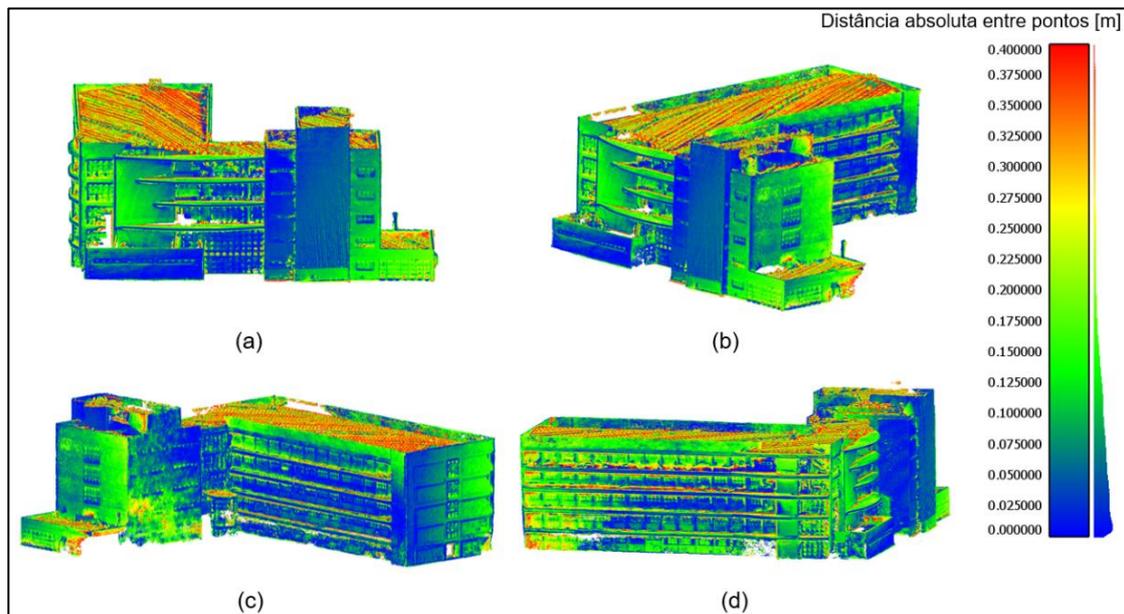
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.21 – Função gaussiana de probabilidade de distâncias entre pontos LiDAR e fotogramétricos em intervalo de maior agregação de dados.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.22 – Distâncias entre nuvens de pontos LiDAR e fotogramétrica em intervalo de maior agregação de dados.

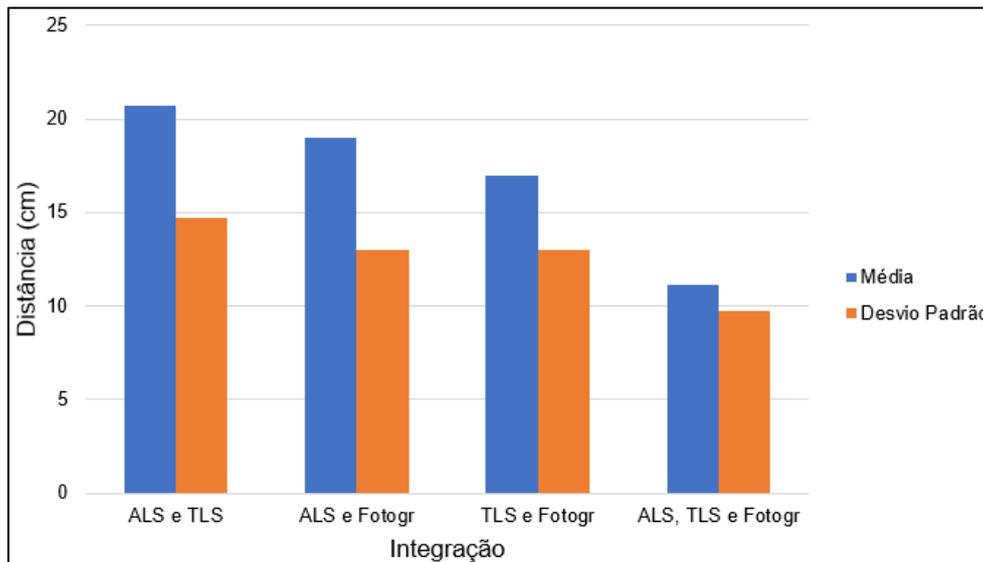


(a) Face sudeste, (b) Face nordeste, (c) Face noroeste, (d) Face sudoeste.

Fonte: Produção do autor.

O gráfico da Figura 4.23 apresenta uma síntese da precisão na integração das nuvens de pontos primárias. A integração múltipla apresenta a maior precisão, aproximadamente de 10 cm. Já as integrações de dados de telhado com dados de fachada (ALS + TLS; ALS + Fotogrametria de fachada; TLS + Fotogrametria de telhado) apresentam as menores precisões, sendo que a melhor dentre elas é a integração TLS e Fotogrametria.

Figura 4.23 – Síntese da precisão de integração das nuvens de pontos primárias.

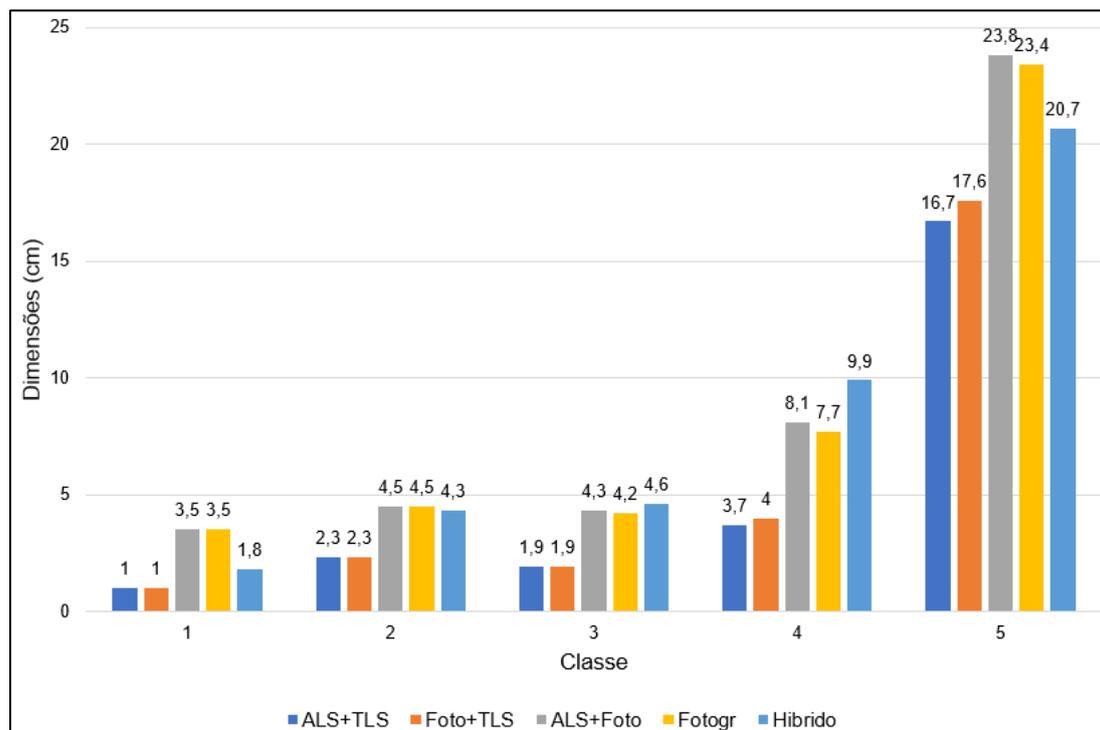


Fonte: Produção do autor.

#### 4.3.2 Acurácia dos modelos de nuvens de pontos

Para verificar a acurácia dos modelos, a Figura 4.24 apresenta os erros absolutos médios por classe. Verifica-se um aumento nos erros, conforme aumentam as dimensões verificadas. A classe 1 é aquela que possui as menores dimensões, verificadas em janelas e pequenas paredes da fachada, já a classe 5 apresenta as maiores dimensões, verificadas nas lajes superiores e dimensões de paredes. Nas classes 1, 2 e 3, por estas possuírem dimensões menores e somente de fachada, os modelos derivados das nuvens primárias de fachada TLS (ALS + TLS e Fotogrametria de telhado + TLS) apresentaram valores de erros similares. Maiores diferenças nos erros são verificadas nas classes 4 e 5, por apresentarem dimensões maiores. Os modelos que obtiveram melhor desempenho foram o ALS + TLS e Fotogrametria + TLS, derivados de dados LiDAR de fachada. Em contrapartida, os modelos com os piores desempenhos em relação à acurácia são aqueles derivados da nuvem fotogramétrica de fachada, exceto nas classes 3 e 4, nas quais o modelo híbrido apresentou os piores desempenhos, devido à integração de todas as nuvens de pontos primárias, o que dificultou a obtenção das dimensões do modelo, justificado pela degradação da resolução espacial da nuvem de pontos fotogramétrica.

Figura 4.24 – Erro absoluto médio por classe apresentado pelos modelos de nuvens de pontos.

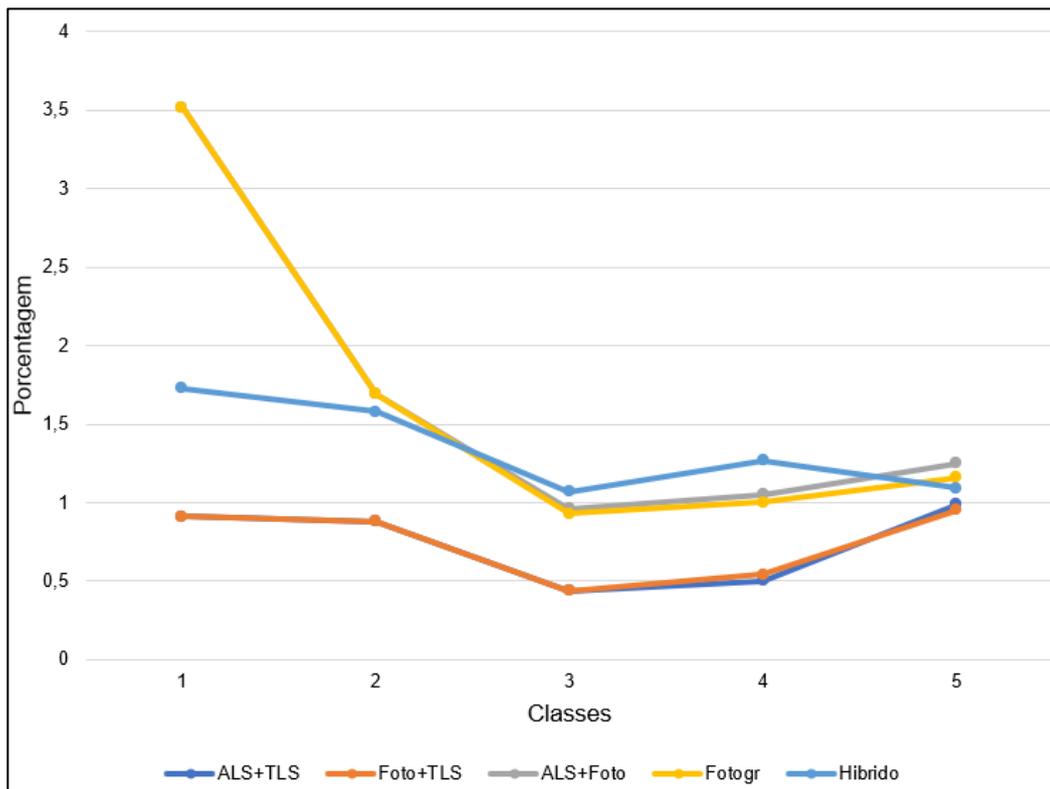


Fonte: Produção do autor.

Os erros percentuais médios apresentados pelos modelos estão presentes no gráfico da Figura 4.25. Devido a similaridades, os resultados podem ser analisados em três grupos: baseados em nuvens primárias de fachadas TLS (ALS + TLS e Fotogrametria de telhado + TLS), fotogramétrica de fachada e telhado e híbrido. Os modelos apresentaram os maiores erros nas classes com menores dimensões (classes 1 e 2). Os elementos de fachada presentes na classe 1, como janelas de banheiro, demandam melhor resolução espacial para serem identificados, distinguidos e mensurados com precisão, o que foi possível utilizando os modelos baseados em nuvens primárias de fachadas TLS. A diferença média dos erros percentuais entre os modelos ALS+TLS e fotogramétrico de fachada e telhado corroboram com esta justificativa, pois a nuvem de pontos TLS apresenta melhor resolução. Verifica-se que os modelos baseados em Fotogrametria apresentam os maiores erros, indicados no gráfico pelas linhas amarela e cinza, sobrepondo-se nas classes 1 e 2. Os modelos baseados em TLS apresentam valores abaixo de 1% em todas as classes,

indicados no gráfico pelas linhas azul escuro e laranja que se sobrepõem nas classes 1, 2 e 3. Por sua vez, o modelo híbrido apresenta erros médios percentuais acima de 1%, indicados pela linha azul clara. Vale destacar mais uma vez que, no gráfico, a linha azul nas classes 1 e 2 e 3 está abaixo da linha laranja. Já a linha cinza nas classes 1 e 2 está abaixo da linha amarela.

Figura 4.25 – Erro médio percentual por classe apresentado pelos modelos de nuvens de pontos.

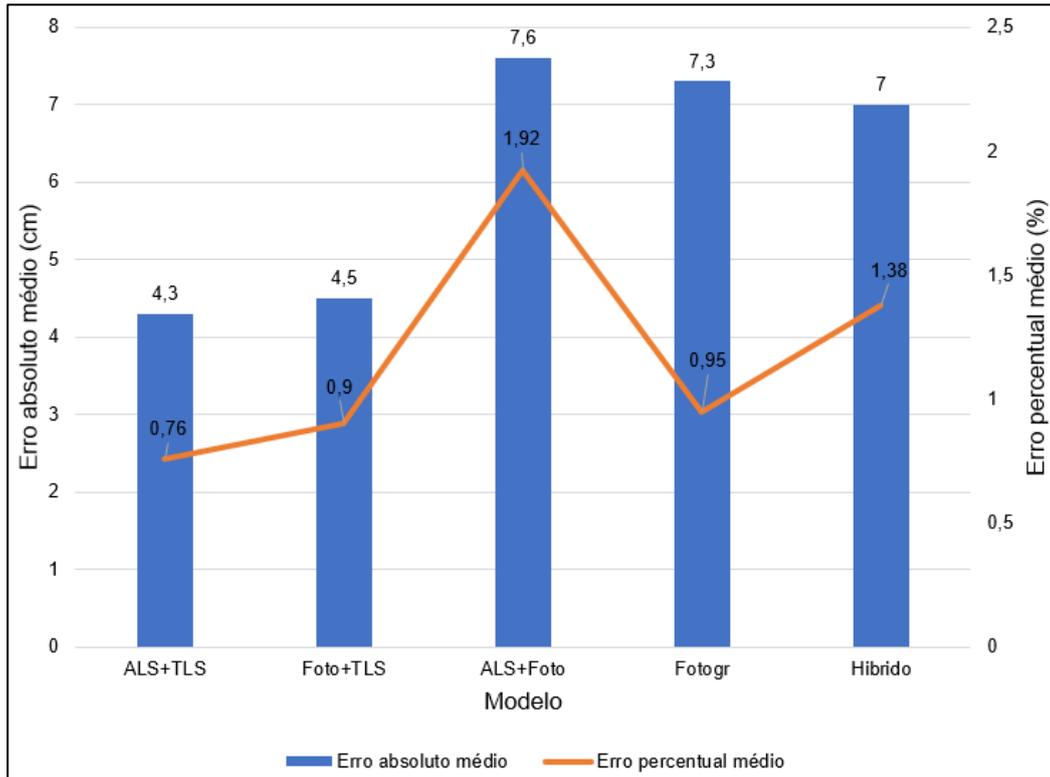


Fonte: Produção do autor.

Os erros absolutos e percentuais gerais, os quais englobam todas as medidas das classes, são apresentados na Figura 4.26. As barras que compõem o gráfico representam os erros absolutos médios, e os erros percentuais médios são representados pela linha. Os modelos baseados em nuvens primárias de fachadas TLS (ALS + TLS e Fotogrametria de telhado + TLS) apresentam os menores erros absolutos e percentuais. Os modelos baseados em nuvens primárias de Fotogrametria de fachada (ALS + Fotogrametria de fachada e Fotogrametria de fachada e telhado) apresentam os maiores erros absolutos médios, acima de 7 cm. O modelo híbrido apresenta acurácia similar à obtida

pelos modelos baseados em nuvem de pontos fotogramétrica. Esta característica é justificada pela degradação da resolução espacial após a integração de dados, dificultando a identificação precisa dos elementos geométricos do edifício, principalmente suas dimensões.

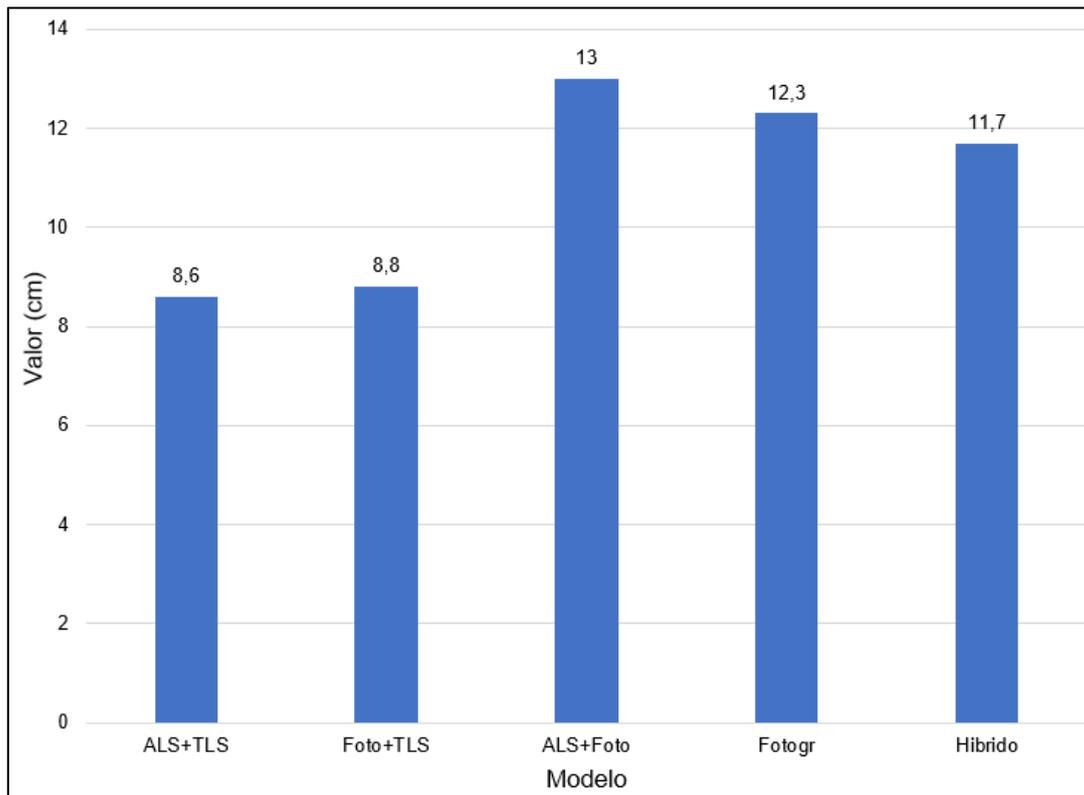
Figura 4.26 – Erro médio absoluto e percentual geral apresentado pelos modelos de nuvens de pontos.



Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.27 apresenta o valor de RMSE, indicando a acurácia de dimensionamento dos modelos. Os melhores índices são apresentados pelos modelos ALS + TLS e ALS + Fotogrametria, com valores em torno de 8 cm. Os demais modelos apresentaram RMSE acima de 10 cm.

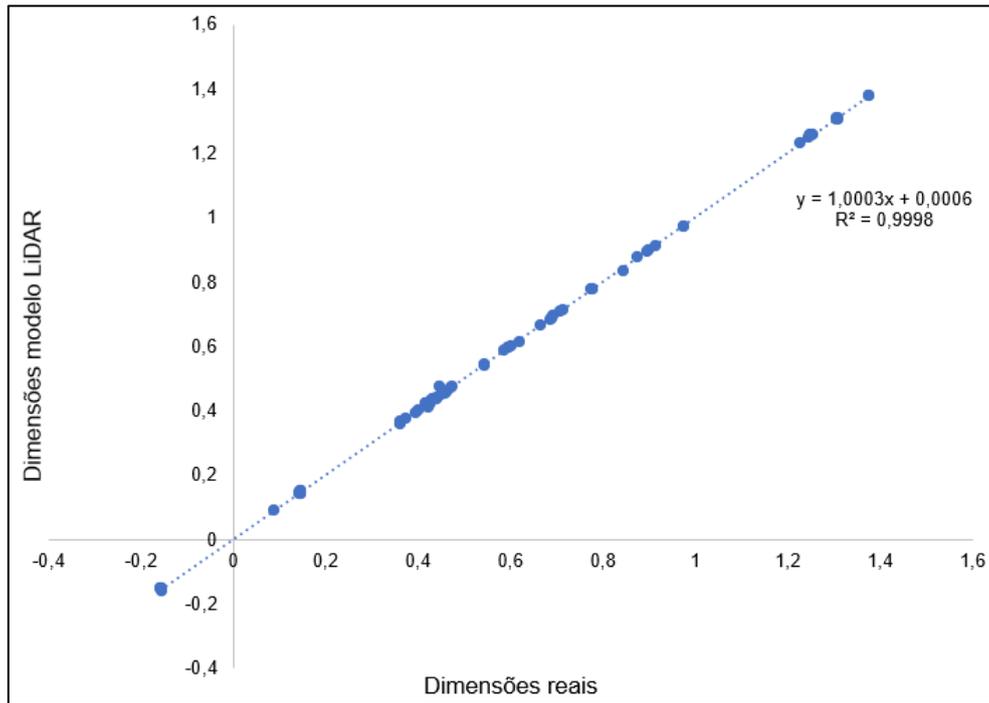
Figura 4.27 – RMSE apresentada pelos modelos de nuvens de pontos.



Fonte: Produção do autor.

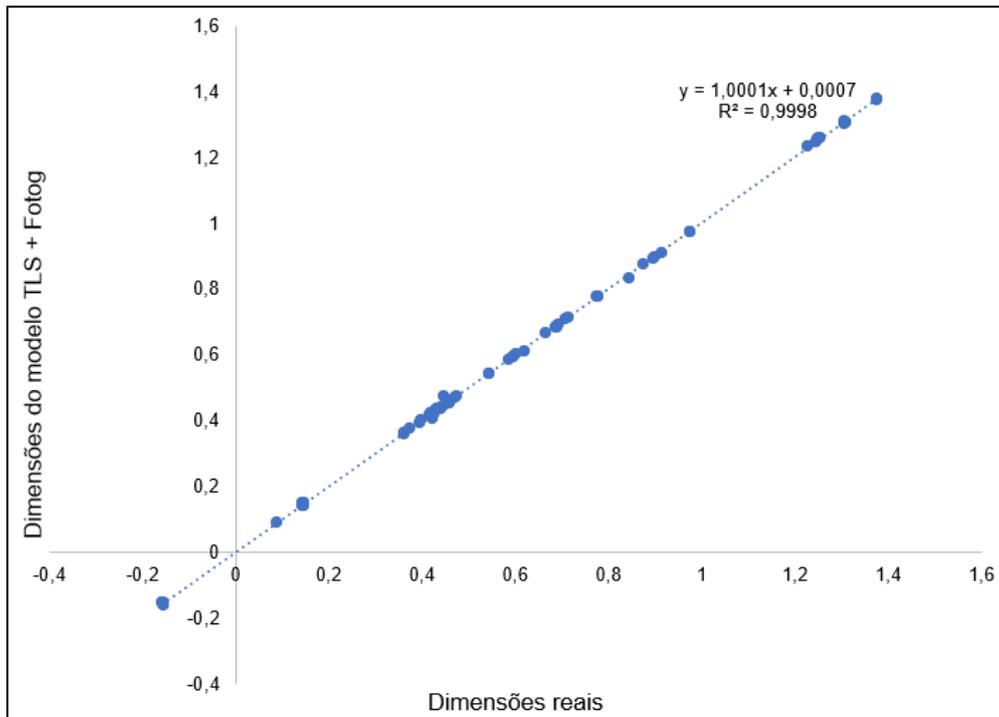
Após a obtenção dos erros dos modelos, foi realizada a análise de concordância das dimensões. Primeiramente, foi realizada uma análise estatística descritiva das dimensões e verificado que as amostras não possuem distribuição normal. Devido a isto, foi realizada a normalização dos dados por meio de uma transformação logarítmica. As Figuras 4.28, 4.29, 4.30, 4.31 e 4.32 apresentam o relacionamento das dimensões dos modelos com as dimensões EDM do edifício por meio de gráficos das regressões lineares em escala logarítmica, contendo o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e a equação de regressão correspondente. Foi encontrado um nível perceptível de concordância entre as dimensões analisadas. Em todas as relações, o  $R^2$  se apresentou muito próximo a 1, evidenciando elevada correlação entre as dimensões dos modelos e do edifício. Verificou-se também que os resíduos das regressões são normalmente distribuídos, com variância constante. As análises estatísticas detalhadas podem ser consultadas no Apêndice B.

Figura 4.28 – Regressão linear do modelo ALS + TLS.



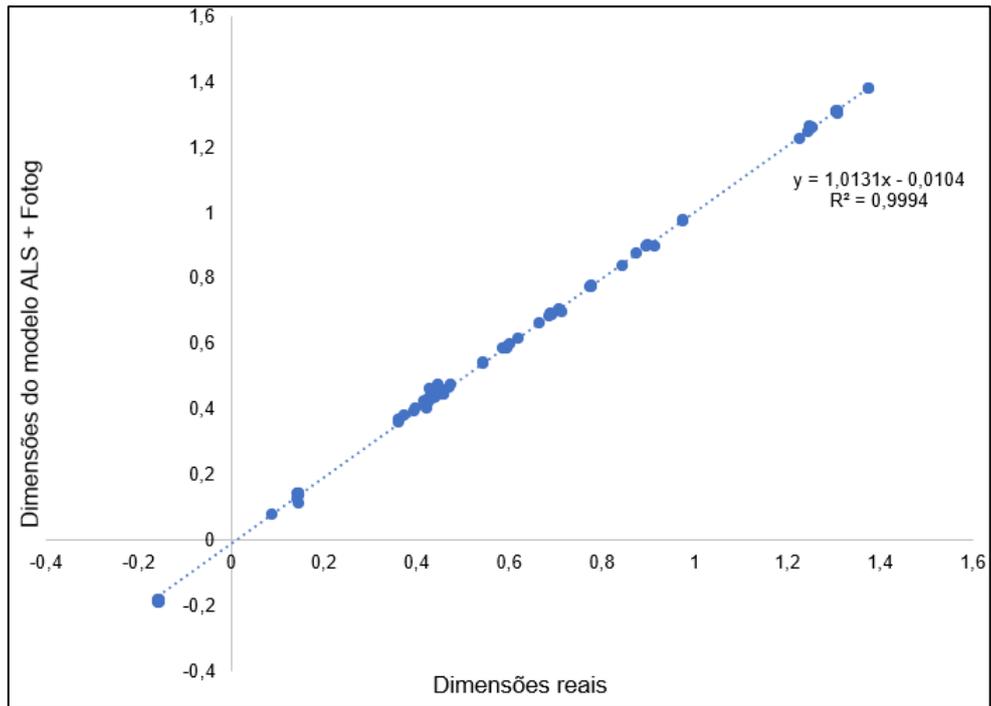
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.29 – Regressão linear do modelo TLS + Fotogrametria.



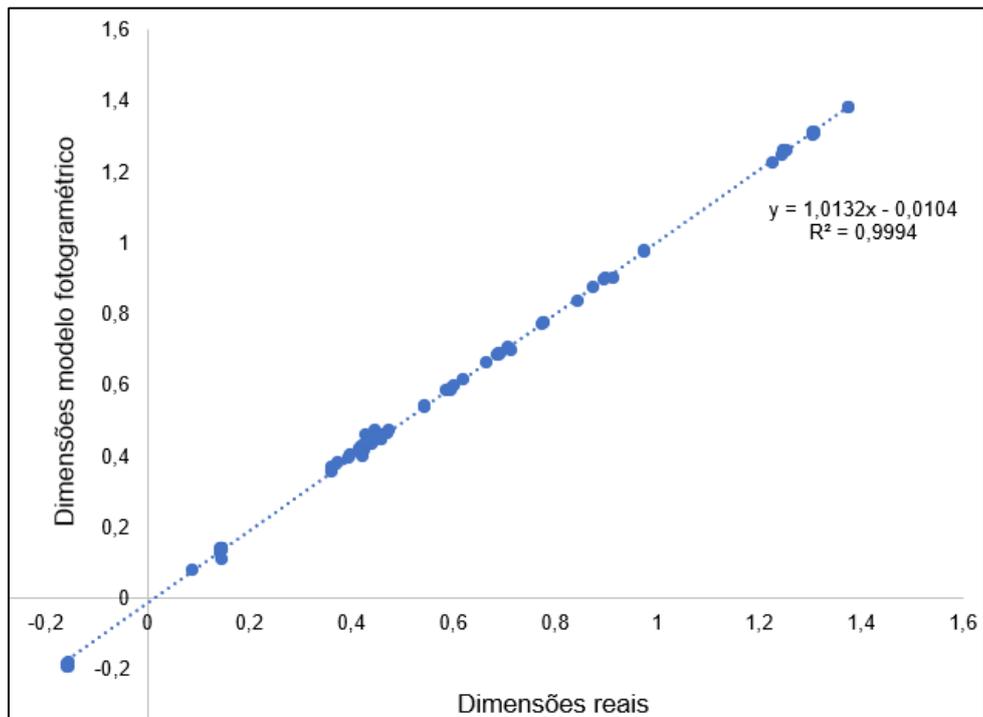
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.30 – Regressão linear do modelo ALS + Fotogrametria.



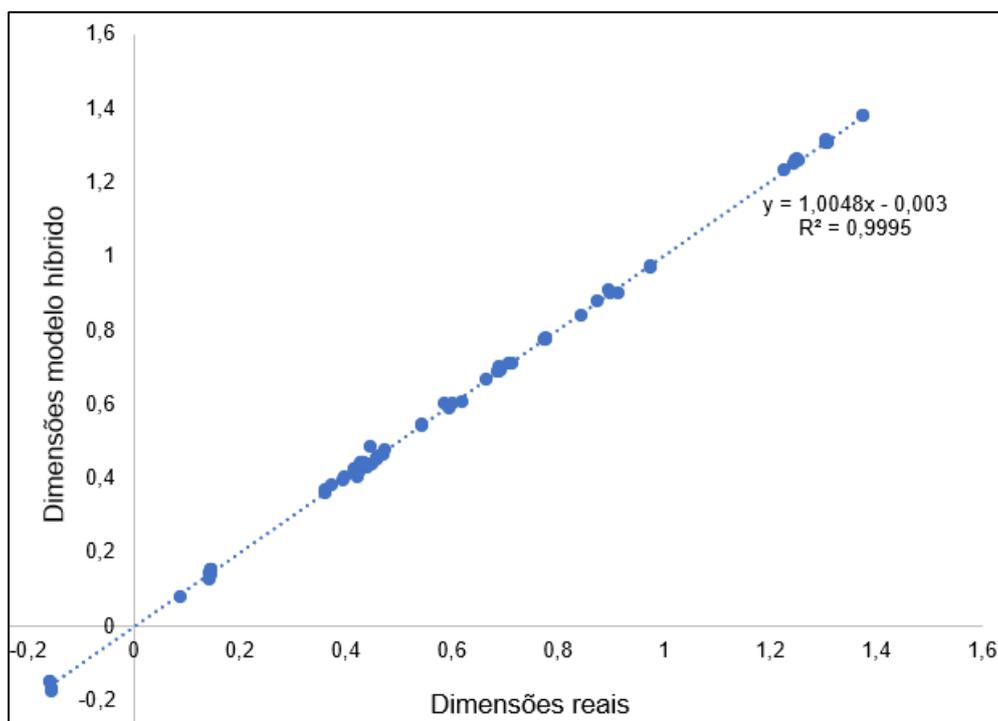
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.31 – Regressão linear do modelo fotogramétrico.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.32 – Regressão linear do modelo híbrido.

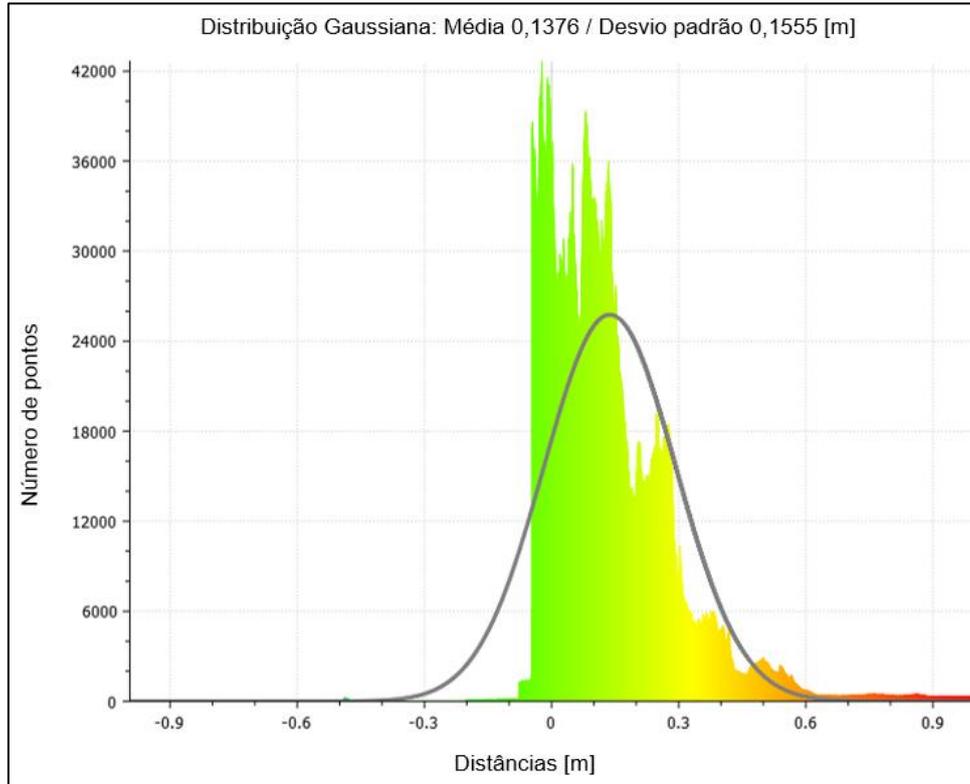


Fonte: Produção do autor.

### 4.3.3 Precisão dos modelos *as-is* BIM

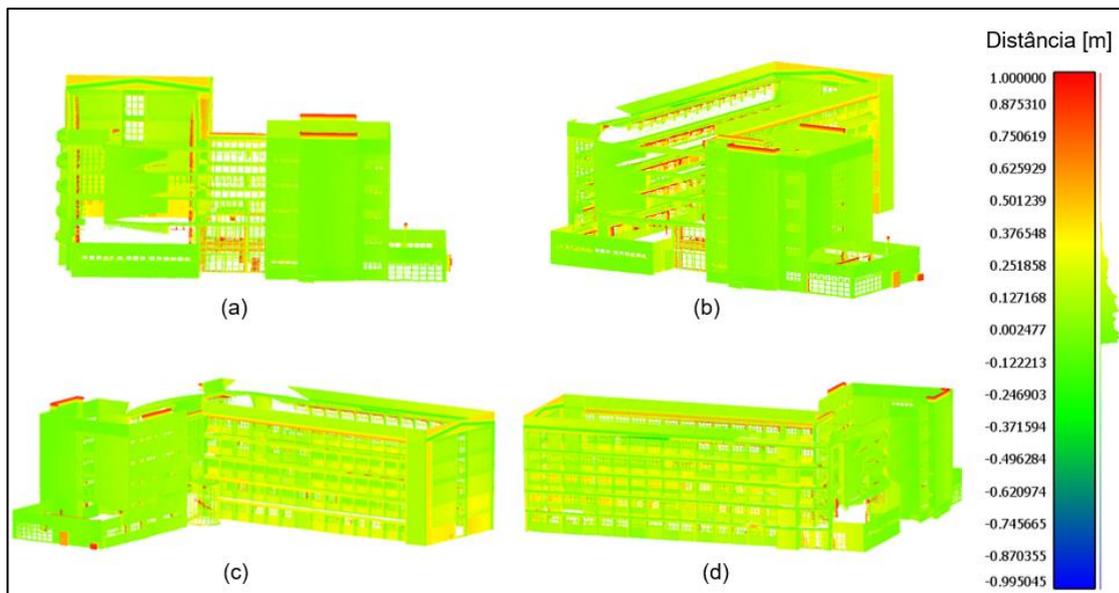
A precisão dos modelos *as-is* BIM foi obtida por meio do cálculo das distâncias em relação aos modelos de nuvens de pontos que os geraram. Foram analisadas as distâncias em um intervalo de 1 m, apresentando o histograma de distribuição com média e desvio padrão e a distribuição espacial dos deslocamentos. O modelo BIM realizado a partir do modelo de nuvem de pontos ALS + TLS apresenta 13,76 cm de distância média e desvio padrão de 15,55 cm (Figura 4.33). As maiores distâncias verificadas estão localizadas nas platibandas e nas estruturas internas que não foram modeladas, regiões em que o feixe laser adentrou o edifício atravessando os vidros das janelas (Figura 4.34).

Figura 4.33 – Histograma e função gaussiana das distâncias do modelo BIM ALS+TLS.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.34 – Distribuição das distâncias do modelo BIM ALS+TLS.

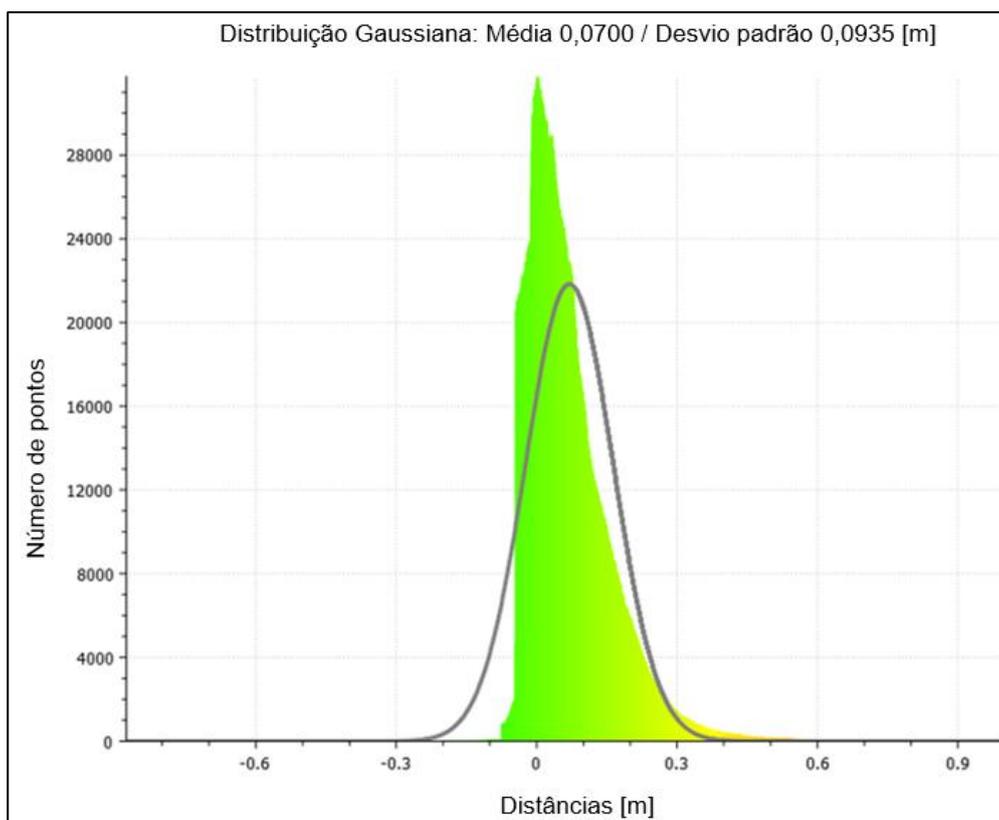


(a) Face sudeste, (b) Face nordeste, (c) Face noroeste, (d) Face sudoeste.

Fonte: Produção do autor.

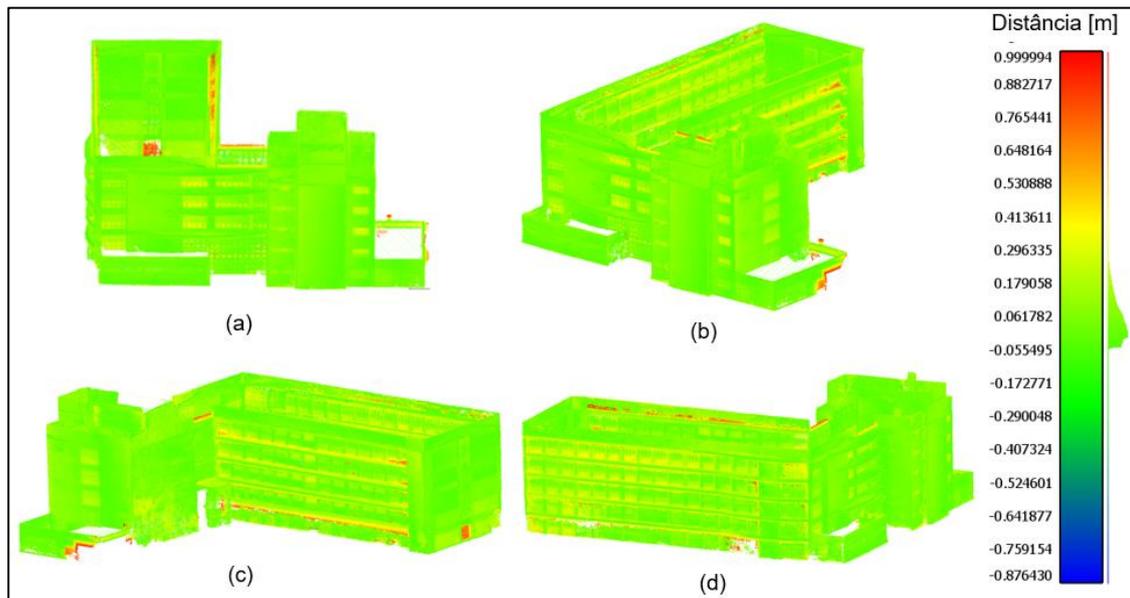
O modelo BIM ALS + Fotogrametria apresenta distância média de 7 cm para a nuvem de pontos, com desvio padrão de 9,35 cm (Figura 4.35). As maiores distâncias são verificadas próximas às áreas de carência de dados na fachada. No caso do telhado, as distâncias foram superiores a 1 m devido à baixa densidade da nuvem de pontos ALS (Figura 4.36).

Figura 4.35 – Histograma e função gaussiana das distâncias do modelo BIM ALS + Fotogrametria.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.36 – Distribuição das distâncias do modelo BIM ALS + Fotogrametria.

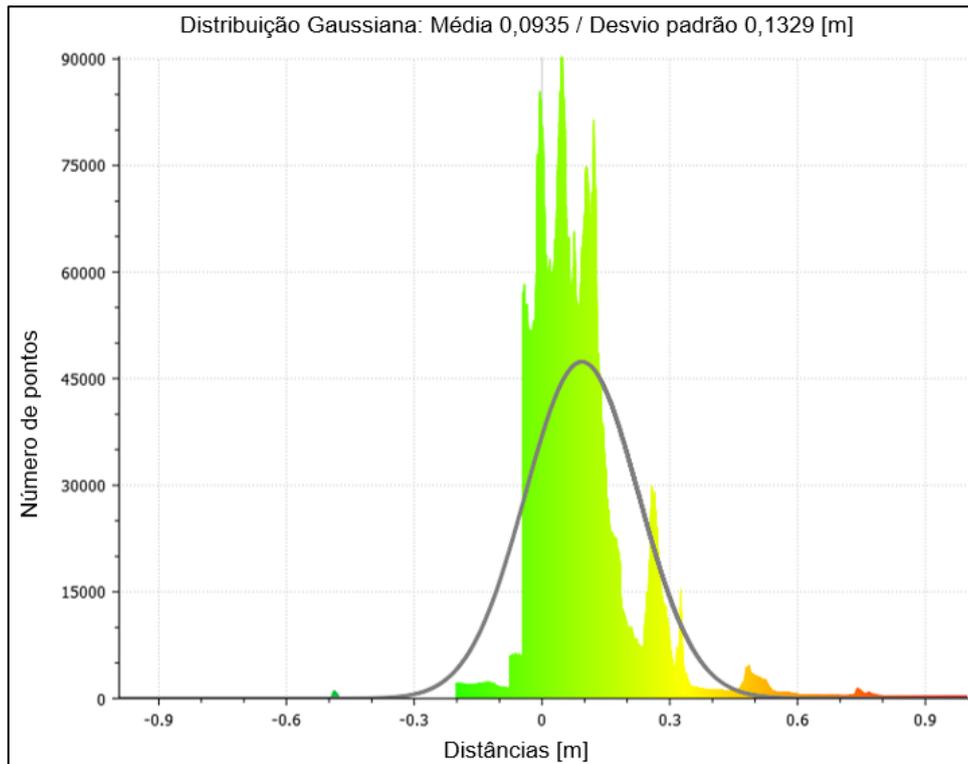


(a) Face sudeste, (b) Face nordeste, (c) Face noroeste, (d) Face sudoeste.

Fonte: Produção do autor.

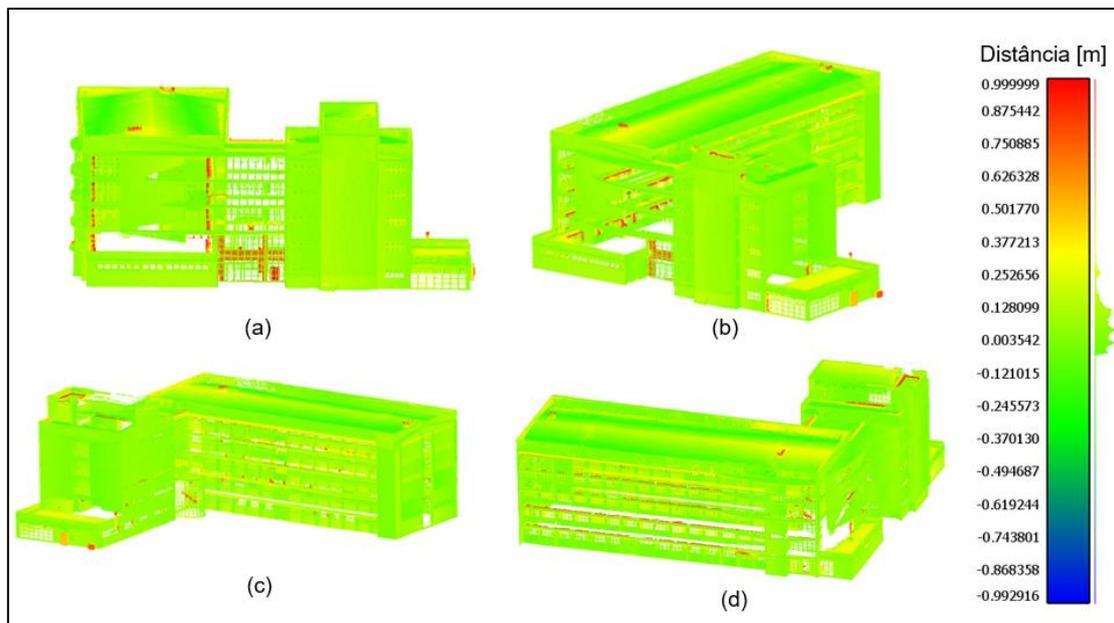
A Figura 4.37 apresenta o histograma de probabilidade das distâncias do modelo BIM TLS + Fotogrametria. Com média de 9,35 cm e desvio padrão de 13,29 cm, as maiores distâncias são verificadas na fachada (Figura 4.38), sobretudo em áreas próximas àquelas que sofreram por carência de dados.

Figura 4.37 – Histograma e função gaussiana das distâncias do modelo BIM TLS + Fotogrametria.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.38 – Distribuição das distâncias do modelo BIM TLS + Fotogrametria.

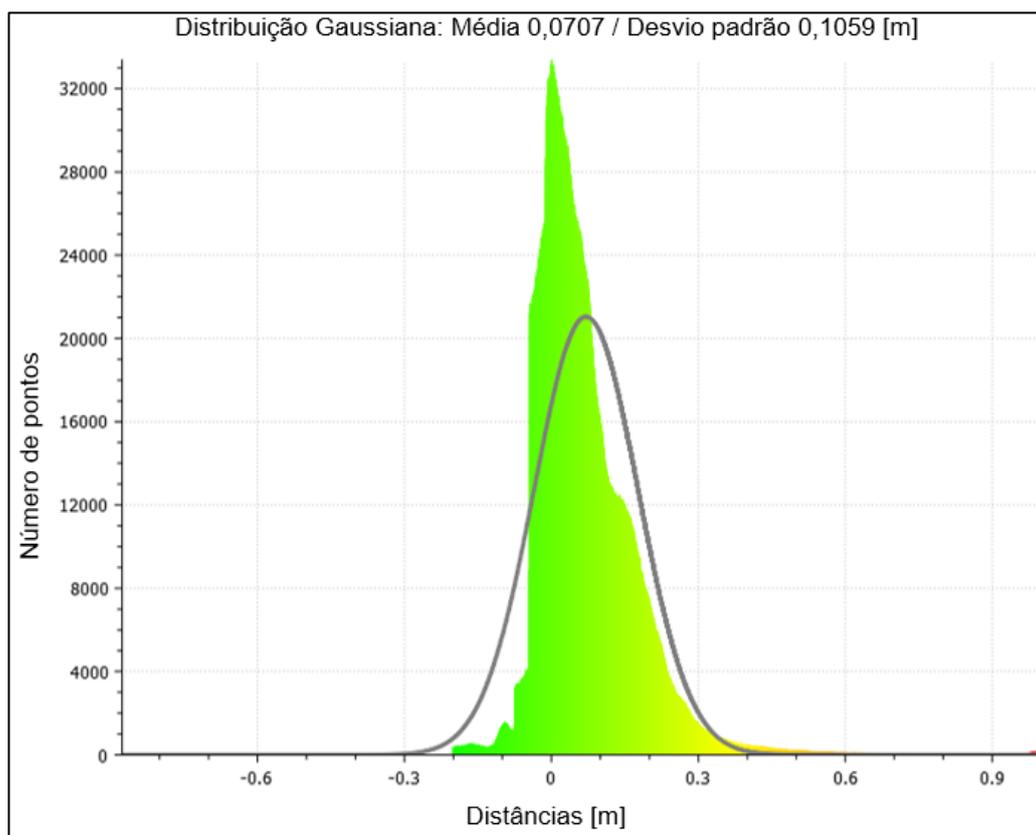


(a) Face sudeste, (b) Face nordeste, (c) Face noroeste, (d) Face sudoeste.

Fonte: Produção do autor.

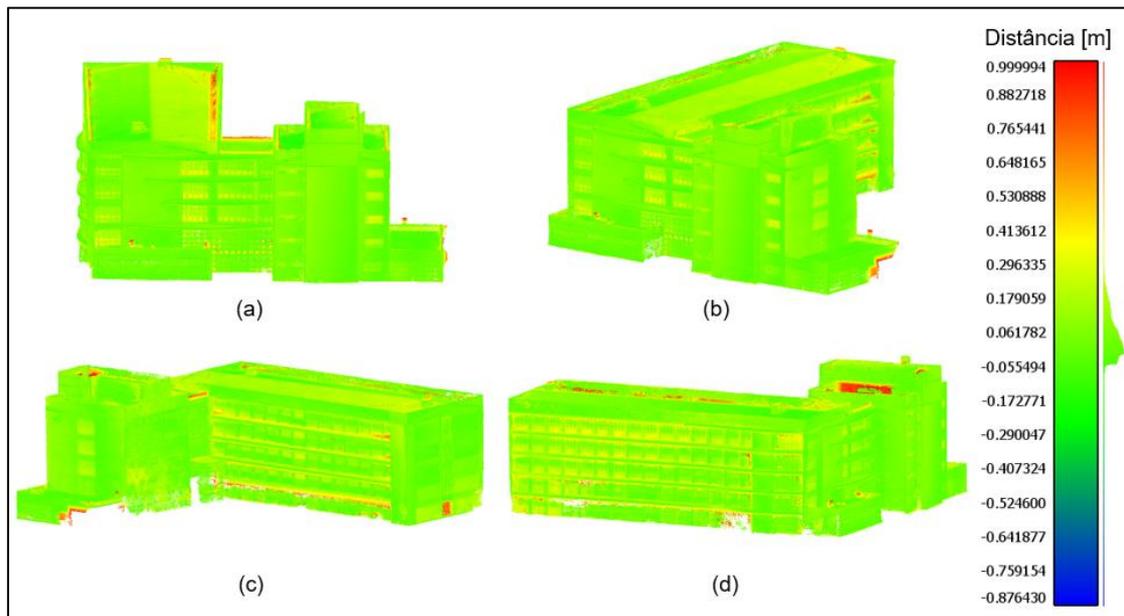
O modelo BIM com dados fotogramétricos apresenta média e desvio padrão de distâncias de 7,07 cm e 10,59 cm, respectivamente (Figura 4.39). As maiores distâncias são verificadas nas platibandas, na caixa d'água e nas áreas inferiores da fachada, sobretudo entre o pavimento térreo e o primeiro andar, devido à carência de dados (Figura 4.40).

Figura 4.39 – Histograma e função gaussiana das distâncias do modelo BIM fotogramétrico.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.40 – Distribuição das distâncias do modelo BIM fotogramétrico.

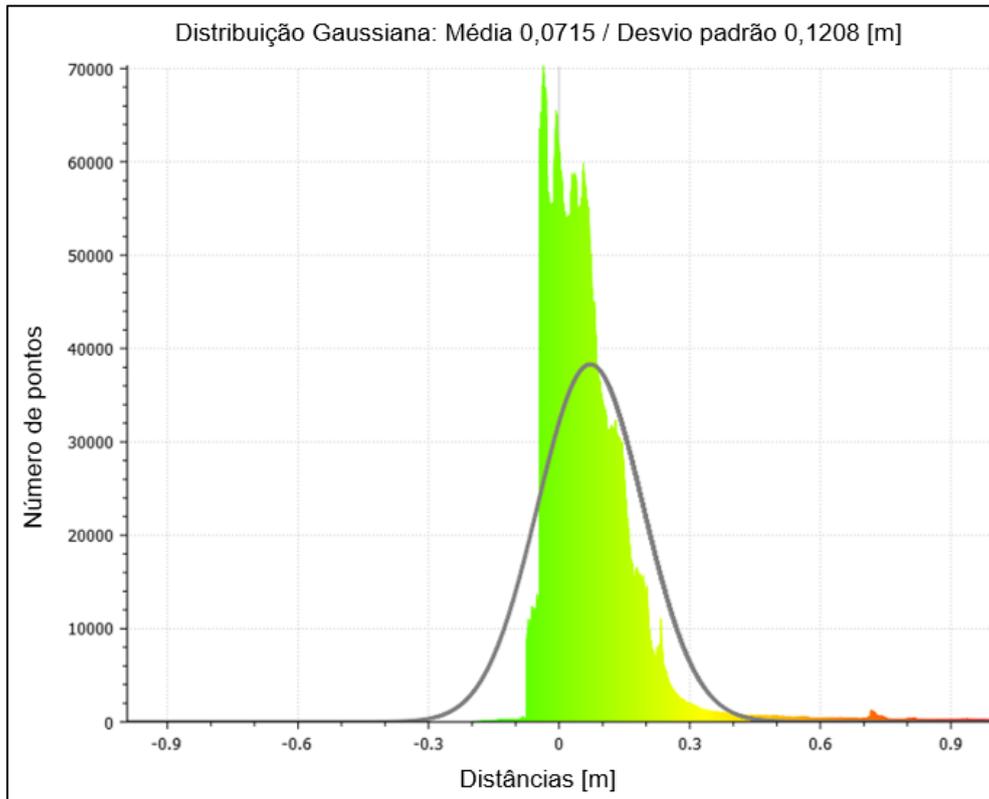


(a) Face sudeste, (b) Face nordeste, (c) Face noroeste, (d) Face sudoeste.

Fonte: Produção do autor.

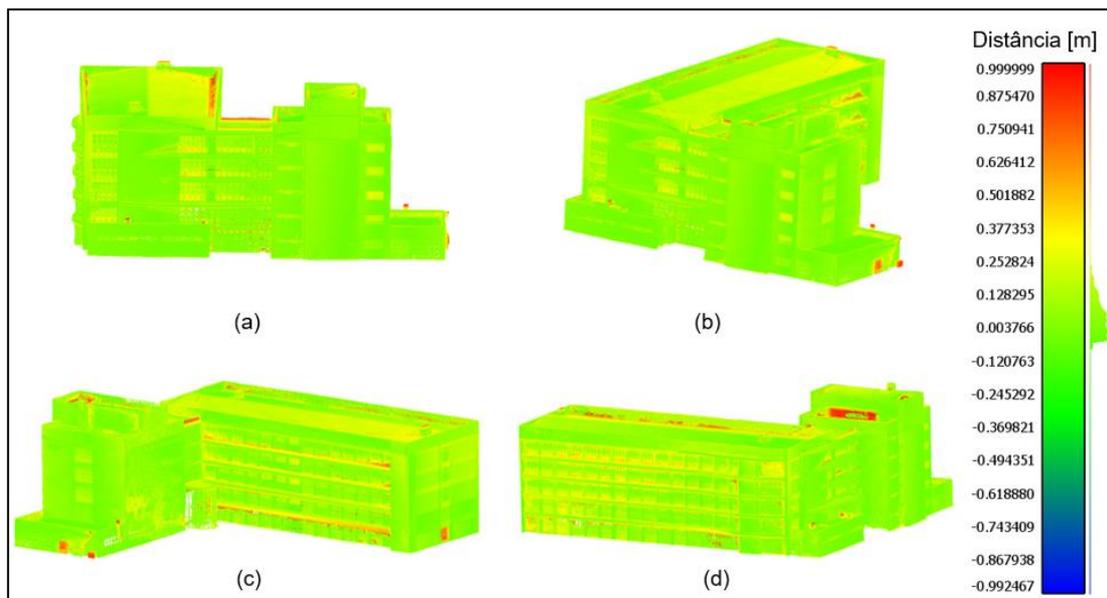
O modelo BIM híbrido, resultado da integração das nuvens de pontos, apresenta média de desvios de 7,15 cm e desvio padrão de 12,08 cm (Figura 4.41). Por meio da Figura 4.42, observa-se que as maiores distâncias são distribuídas pela fachada e telhado.

Figura 4.41 – Histograma e função gaussiana das distâncias do modelo BIM híbrido.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.42 – Distribuição das distâncias do modelo BIM híbrido.

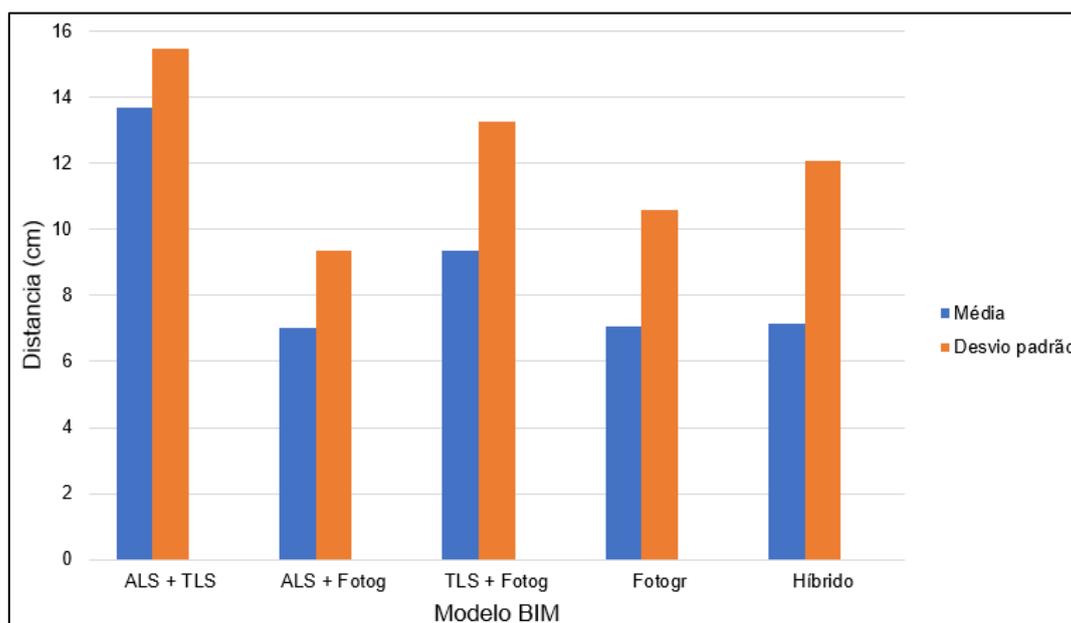


(a) Face sudeste, (b) Face nordeste, (c) Face noroeste, (d) Face sudoeste.

Fonte: Produção do autor.

A média das distâncias verificadas nos modelos BIM variaram entre 7 cm e 13,76 cm, com desvio padrão entre 9,35 cm e 15,55 cm (Figura 4.43). O modelo ALS + TLS apresenta a maior média e desvio padrão, devido à elevada carência de dados da fachada, baixa densidade da nuvem de pontos ALS e representação de pontos do ambiente interno do edifício. Os modelos ALS + Fotogrametria, fotogramétrico e híbrido apresentam médias semelhantes, mas com desvios padrão diferentes, devido à carência de dados e à resolução da nuvem fotogramétrica. Além disso, o modelo BIM híbrido, devido às múltiplas integrações, apresenta um significativo aumento no número de pontos, elevando o desvio padrão.

Figura 4.43 – Média e desvio padrão das distâncias dos modelos BIM em relação aos modelos de nuvens de pontos.



Fonte: Produção do autor.

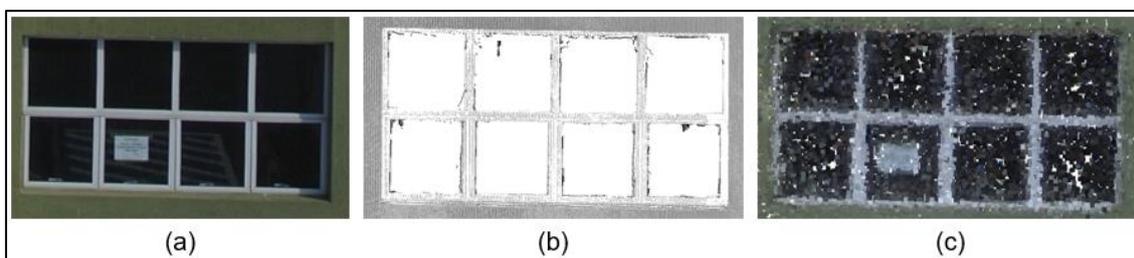
A avaliação da acurácia e precisão dos resultados foi avaliada de diversas formas. A utilização de formas diferenciadas de análise é justificada pela necessidade de se compreender as limitações e fragilidades de cada modelagem, o que será discutido com mais profundidade a seguir.

#### 4.4 Discussão

O trabalho avaliou a utilização de nuvens de pontos tridimensionais para a modelagem de edifícios em LoD3. Cinco modelos de edificações foram realizados com nuvens de pontos 3D, obtidas com a combinação de integrações de dados pontuais ALS, TLS e fotogramétrico. Cada modelo de nuvem de pontos gerou um modelo *as-is* BIM do edifício.

As nuvens de pontos primárias apresentam diferentes densidades, sendo peculiar de cada tecnologia. A nuvem de pontos TLS possui a maior densidade de pontos, com resolução milimétrica, sendo possível identificar com alta precisão pequenos elementos, como janelas e detalhes em paredes. As nuvens de pontos fotogramétricas possuem densidades, neste estudo, superiores a 1.000 pontos por m<sup>2</sup>, conferindo-lhe resoluções centimétricas. A Figura 4.44 apresenta uma comparação, realizada neste estudo, de uma janela do edifício, modelado com dados pontuais, individuais, TLS e fotogramétricos. Observa-se maior nível de detalhe na representação por TLS, devido à sua melhor resolução espacial.

Figura 4.44 – Comparação de uma janela representada por TLS e Fotogrametria.



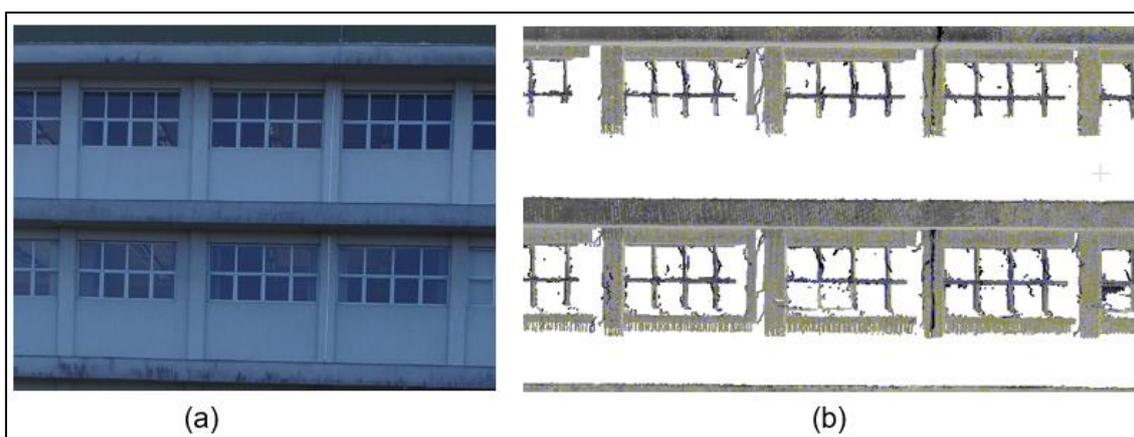
(a) Fotografia da janela, (b) Representação por TLS, (c) Representação por Fotogrametria.

Fonte: Produção do autor.

Por meio das metodologias adotadas em campo, foi possível obter dados de alta precisão do edifício. A escolha do posicionamento do TLS em múltiplas estações, em torno do edifício, minimizou a ocorrência de oclusões que poderiam ser provocadas pelas árvores e construções próximas. Devido ao desnível do terreno, o TLS ficou a menos de 4 m de distância da parede na

face sudoeste, levando a uma carência de dados nos últimos pavimentos do edifício, pela obstrução do feixe laser (Figura 4.45). Imagens obtidas de recobrimento convencional, próximas da vertical, com o uso de ARP, mostraram-se eficazes para representar adequadamente importantes detalhes da edificação, tais como: desníveis, lajes e telhados. Por sua vez, os voos manuais foram capazes de obter fotografias de fachada próximas às paredes, minimizando oclusões e/ou sombreamento de áreas ao longo dos pavimentos do edifício. Apesar disso, para melhorar a aerotriangulação automática e melhorar os resultados fotogramétricos, o recobrimento aéreo poderia ter sido referenciado mediante a utilização de pontos de apoio ou ainda por buscas de coordenadas na própria nuvem de pontos ALS.

Figura 4.45 – Oclusão do feixe laser em pavimentos elevados.



(a) Fotografia da fachada, (b) Representação por TLS.

Fonte: Produção do autor.

A integração de diferentes nuvens de pontos primárias melhorou a geração de modelos 3D, capazes de representar importantes detalhes da geometria do edifício. Dados de fachada e de telhado foram complementados, como nos modelos ALS + TLS, ALS + Fotogrametria de fachada, TLS + Fotogrametria de telhado. O modelo somente com dados fotogramétricos foi gerado diretamente no Agisoft PhotoScan, mostrando-se um *software* de alto poder de processamento. O modelo híbrido múltiplo foi gerado pela integração de todas as nuvens primárias. Todo o processo de integração foi realizado no *software* CloudCompare, sendo eficaz nas tarefas realizadas.

Como esperado, foram identificadas carências de dados nos modelos. Devido à baixa densidade, dados ALS não representaram detalhes do telhado. Em contrapartida, dados TLS e fotogramétricos de fachada apresentaram carência devido a desníveis, oclusões e árvores próximas. Como os modelos *as-is* BIM foram gerados a partir dos modelos de nuvens de pontos, estes também apresentaram carências parciais e/ou totais. Apenas o modelo híbrido múltiplo foi capaz de representar o edifício em LoD3, com todos seus detalhes de fachada e telhado.

Uma das etapas da integração é o registro de dados. Neste trabalho, foi adotado o método ICP, amplamente utilizado e disponível no CloudCompare. Para avaliar a integração de dados, foram utilizados os valores de desvios entre as nuvens de pontos primárias. A precisão da integração de dados aéreos e de fachada variou entre 10 cm e 15 cm. Já a precisão da integração múltipla entre todas as nuvens foi de 9,7 cm. Conforme destaca Cheng L. et al. (2018), no arquivamento digital em pequena escala de patrimônios culturais, a precisão do registro deve estar dentro da faixa de centímetros e, preferencialmente, milímetros. Portanto, a acurácia dos registros alcançados neste trabalho é compatível com o esperado em documentação de edifícios.

Como esperado, os modelos de nuvens de pontos derivados do TLS apresentaram as maiores acurácias. Estes resultados corroboram a alta precisão dos dados LiDAR para a reconstrução de edifícios, como abordado por Kedzierski e Fryskowska (2015), Cheng X. et al. (2018), Wen et al. (2019). Considerando apenas as classes 1, 2 e 3, a acurácia dos modelos derivados do TLS é compatível com os resultados de 0,5 a 3 cm alcançados por Sepasgozar et al. (2014) e Kim et al. (2020). Já os modelos derivados de Fotogrametria de fachada, inclusive o híbrido múltiplo, apresentam acurácia compatíveis com a literatura, como, por exemplo, em Klein et al. (2012), Jeong et al. (2020) e Kim et al. (2020), que alcançaram acurácias superiores a 3,5 cm.

Uma tolerância máxima de precisão é definida no início do processo de modelagem BIM, e sua verificação é iterativa, região por região do modelo, durante a execução. A discussão desta tolerância é limitada na literatura, pois

envolve processos contínuos e iterativos de desenvolvimento de modelagens BIM. Alguns trabalhos avaliam a precisão de modelos BIM criados em processos semiautomáticos ou totalmente automáticos, obtendo precisões inferiores a 4 cm, como em Stojanovic et al. (2017), Bonduel et al. (2017), Xue et al. (2019), Moyano et al. (2020). A maioria das análises são pontuais, em pequenas estruturas modeladas para avaliar a precisão de algoritmos automáticos de modelagem.

Apesar de este trabalho ter sido realizado utilizando algoritmos disponibilizados em *softwares* e também com intensa utilização de recursos manuais, sua aplicação é inovadora por promover a integração de diversas nuvens de pontos de diferentes plataformas de aquisição para a construção de modelos *as-is* BIM.



## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho realizou 10 diferentes modelagens, sendo cinco de nuvens de pontos e as outras cinco *as-is* BIM. Foram utilizadas quatro nuvens de pontos primárias, as quais foram integradas para a reconstrução tridimensional de um edifício de cinco pavimentos. Os modelos de nuvens de pontos foram utilizados como base para a modelagem *as-is* BIM, realizada em nível de detalhamento LoD3, representando a fachada e telhado do edifício.

Foram utilizados dois tipos de dados, sendo eles: LiDAR e fotogramétrico. Os dados LiDAR foram obtidos por meio de plataforma aérea e terrestre. Para adquirir dados fotogramétricos, foi utilizada uma ARP operada em voos manuais e automáticos. Para o processamento dos dados, foram utilizadas técnicas de filtragem, segmentação, registro e integração de dados. As nuvens de pontos primárias foram integradas, gerando cinco diferentes modelos de nuvens de pontos do edifício. A partir dos modelos de nuvens de pontos, foram criados os modelos *as-is* BIM correspondentes. A avaliação dos resultados foi realizada por meio do cálculo de distâncias e comparação com as dimensões obtida a campo.

As limitações no entorno do edifício, como árvores e desníveis do terreno, impactaram a qualidade dos dados. Somam-se a isso, as características da fachada do edifício, que obstruíram em algumas áreas o feixe laser do TLS, sendo elas: a altura e quantidade de pavimentos, recuos e desníveis de telhado ou platibandas, lajes avançadas curvas, além de outros recursos ornamentais nas fachadas. Por estas razões, o planejamento adequado das atividades de campo para verificar o entorno e as características do edifício são determinantes para a adoção da tecnologia de obtenção de dados. Para superar as limitações de uma única tecnologia, é encorajado o uso de integração de dados.

As metodologias adotadas em campo mostraram-se eficazes. A distribuição de alvos artificiais garantiu o registro e geração de uma nuvem de pontos TLS de elevada acurácia. A obtenção de fotografias verticais e oblíquas de fachada

permitiu a criação de nuvens de pontos fotogramétricas capazes de modelar detalhes arquitetônicos do edifício. Identificar e verificar preliminarmente os elementos do edifício na nuvem de pontos otimizou e simplificou a obtenção de suas dimensões em campo. Também, a realização de diversas medidas minimizou a inconsistência de dados.

O processo de integração de dados provenientes de diferentes plataformas mostrou-se altamente dependente do método de registro. A utilização do método ICP associado com ferramentas semiautomáticas alcançou resultados compatíveis com a literatura, mesmo no registro de dados com baixa sobreposição.

Os resultados demonstram que há correspondência entre as medidas EDM do edifício e aquelas obtidas nos modelos de nuvens de pontos. Há concordância estatística entre os valores das medidas e um baixo erro absoluto, compatível com a literatura. As modelagens *as-is* BIM foram capazes de representar os detalhes da fachada e telhado, representando adequadamente portas, janelas, vidraças, pilastras, vigas, recuos e detalhes arquitetônicos do edifício. O destaque é para o modelo *as-is* BIM híbrido múltiplo, pois este não apresentou carências, possibilitando a completa modelagem do exterior do edifício em LoD3. Assim, os resultados demonstram de forma efetiva que a integração de dados é uma técnica eficaz para a documentação, inventário e preservação de edifícios por meio da modelagem *as-is* BIM.

Conclusivamente, convém responder a hipótese deste trabalho, no sentido de que é possível modelar tridimensionalmente um edifício realizando a integração de pontos ALS, TLS em associação com dados fotogramétricos em LoD3 sem carência de dados.

Recomenda-se para trabalhos futuros:

- Revisão dos métodos de registros de nuvens de pontos disponíveis na literatura, como as variantes do ICP, métodos baseados em *deep learning*, em contorno de construções e contexto de horizonte.

- Inclusão de apoio terrestre para os trabalhos fotogramétricos e TLS.
- Avaliação dos modelos *as-is* BIM por meio de comparação com as dimensões EDM do edifício.
- Avaliar a obtenção dos dados TLS para edifícios com diferentes alturas, a fim de se compreender o limiar de aplicação desta tecnologia devido à obstrução do feixe laser.
- Obtenção de dados LiDAR por meio de ARP para a reconstrução tridimensional de edifícios em LoD3.
- Integrar nuvens de pontos de ambientes internos e externos para geração de modelos *as-is* BIM em LoD4.
- Avaliação da qualidade de métodos manuais, semiautomáticos e automáticos de construção de modelos *as-is* BIM de edifícios.
- Avaliação de métodos automáticos de última geração para a construção de modelos *as-is* BIM, como os desenvolvidos em *deep learning*.
- Desenvolvimento de rotinas automatizadas para a integração de dados, desde o pré-processamento até o registro de dados.

Estas proposições podem colaborar com os desafios da modelagem tridimensional de edifícios em níveis cada vez mais detalhados, encorajando as empresas do ramo da construção civil a adotarem as tecnologias baseadas em Sensoriamento Remoto para a atualização dos modelos BIM.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAH, C. K. A. F.; BAHARUDDIN, N. Z. S.; ARIFF, M. F. M.; MAJID, Z.; LAU, C. L.; YUSOFF, A. R.; IDRIS, K. M.; ASPURI, A. Integration of point clouds dataset from different sensors. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 42, p. 9-15, 2017.

AGISOFT. **Agisoft photoscan user manual**: professional edition, version 1.2. [S.l.]: Agisoft LLC, 2016. 103 p.

AGISOFT. **PhotoScan professional** (Version 1.4.3) (Software). Disponível em: <<https://www.agisoft.com/downloads/installer/>>. Acesso em: dez. 2020.

AHMAD FUAD, N.; YUSOFF, A. R.; ISMAIL, Z.; MAJID, Z. Comparing the performance of point cloud registration methods for landslide monitoring using mobile laser scanning data. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 42, 2018.

AL KHALIL, O. Structure from Motion (SfM) photogrammetry as alternative to laser scanning for 3D modelling of historical monuments. **Open Science Journal**, v.5, 2020.

ANIL, E. B.; TANG, P.; AKINCI, B.; HUBER, D. Deviation analysis method for the assessment of the quality of the as-is Building Information Models generated from point cloud data. **Automation in Construction**, v. 35, p. 507-516, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING - ASPRS. **LAS specification** – version 1.4 –R13, July, 2013. Disponível em: [www.asprs.org](http://www.asprs.org). Acesso em: dez. 2020.

AUTODESK. **Revit** (v. 2021) (Software). Disponível em: <<https://www.autodesk.com.br/products/revit/>>. Acesso em: dez. 2020.

AXELSSON, P. DEM generation from laser scanner data using adaptative TIN models. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 33, n. B4/1, p. 110-117, 2000.

BALTSAVIAS, E. P. Airbone laser scanning: basic relations and formulas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2/3, p. 199-214, 1999.

BASSIER, M.; VAN GENECHTEN, B.; VERGAUWEN, M. Classification of sensor independent point cloud data of building objects using random forests. **Journal of Building Engineering**, v. 21, 468-477, 2019.

- BERALDIN, J.; BLAIS, F.; LOHR, U. Laser scanning technology. In: VOSSSELMAN, G. (Ed.). **Airborne and terrestrial laser scanning**. [S.l.]: Whittles Publishing, 2010. p. 1 – 42.
- BESL, P. J.; MCKAY, N. D. A method of registration of 3-D shapes. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 14, n. 2, p. 239-256, 1992.
- BOLAND, J.; AGER, T.; EDWARDS, E.; FREY, E.; JONES, P.; JUNGQUIET, R.; LAREAU, A.; LEBARRON, J.; KING, C.; KOMAZAKI, K. Cameras and sensing systems. **Manual of Photogrammetry**, v. 8, p. 581–676, 2004.
- BONDUEL, M.; BASSIER, M.; VERGAUWEN, M.; PAUWELS, P.; KLEIN, R. Scan-to-BIM output validation: towards a standardized geometric quality assessment of building information models based on point clouds. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, p. 45–52, 2017.
- BOTELHO, M. F. **Modelagem tridimensional de edificações usando dados do sistema laser scanner e imagem orbital de alta resolução espacial**. 2007. 144 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- CAMPBELL, D.; PETERSSON, L. An adaptive data representation for robust point-set registration and merging. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION (ICCV), 2015, Santiago. **Proceedings...** 2015. p. 4292-4300.
- CAPOLUPO, A.; MALTESE, A.; SAPONARO, M.; CONSTATINO, D. Integration of terrestrial laser scanning and UAV-SFM technique to generate a detailed 3D texture model of a heritage Building. In: EARTH RESOURCES AND ENVIRONMENTAL SENSING/GIS APPLICATIONS, 11., 2020. **Proceedings...** 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1117/12.2574034>.
- CARNEVALI, L.; LANFRANCHI, F.; RUSSO, M. Built information modeling for the 3D reconstruction of modern railway stations. **Heritage**, v. 2, p. 2298-2310, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/heritage2030141>.
- CARRILHO, A. C.; SANTOS, R. C.; PESSOA, G. G.; GALO, M. Extração automática de contornos de edificações a partir de dados LiDAR aerotransportado. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 71, n. 3, p. 832-855, 2019.
- CARVALHO, R.; KENNEDY, D.; NIYAZI, Y.; LEACH, C.; KONLECHNER, T. Structure-from-motion photogrammetry analysis of historical aerial photography: determining beach volumetric change over decadal scales. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 45. 2020.

CHENG, L.; CHEN, S.; LIU, X.; XU, H.; WU, Y.; LI, M.; CHEN, Y. Registration of laser scanning point clouds: a review. **Sensors**. v. 18, n. 5, 1641, 2018.

CHENG, X.; CHENG, X.; LI, Q.; MA, L. Automatic registration of terrestrial and airborne point clouds using building outline features. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 11, n. 2, p. 628-638, 2018. DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2788054.

CHEOK, G.; FRANASZEK, M. **Evaluation of an acceptance sampling method for 2D/3D building plans**, National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg, MD: Building and Fire Research Laboratory, 2009.

CLOUDCOMPARE. **CloudCompare** (v. 2.11.3) (GPL Software). Disponível em: <<http://www.cloudcompare.org>>. Acesso em: dez. 2020.

CLOUDCOMPARE. **CloudCompare version 2.6.1**: user manual. Disponível em: <<http://www.cloudcompare.org/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>>. Acesso em: jan. 2021.

COELHO FILHO, L.; BRITO, J. N. **Fotogrametria digital**. Rio de Janeiro:UFRJ, 2007.196 p.

COGIMA, C. K.; NASCIMENTO, R. V. C.; PAIVA, P. V. V.; CARVALHO, M. A. G.; DEZEN-KEMPTER, E. Scan-to-HBIM aplicado à igreja da Pampulha de Oscar Niemeyer. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v.15, n.1, p.117-134, jan.2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.116/gtp.v14i1.152828>.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R. **Sistema LASER scanner**: conceitos e princípios de funcionamento. Curitiba: UFPR, 2004. 97p.

DEZEN-KEMPTER, E.; SOIBELMAN, L.; CHEN, M.; MÜLLER, A.V. Escaneamento 3D a laser, fotogrametria e modelagem da informação da construção para gestão e operação de edificações históricas. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 113-124, jul./dez. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v10i2.102710>.

DELL. **Dell G7 configuração e especificações**. Disponível em: <<https://www.dell.com/support/manuals/pt-br/g-series-15-7588-laptop/g7-7588-setupandspecs/especifica%C3%A7%C3%B5es?guid=guid-e1ba77b3-c94d-4553-bf74-13efa6c5a6a6&lang=pt-br>>. Acessado em: jane. 2021.

DJI. **Phantom 3 standard**. Disponível em: <<https://www.dji.com/br/phantom-3-standard/info>>. Acesso em: dez. 2020.

DRONEDEPLOY. **DroneDeploy**. Disponível em: <<https://www.dronedeploy.com/>>. Acesso em: dez. 2020.

EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. **BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 2011.

ESPARTEL, L. **Topografia**. Porto Alegre: Globo, 1973. 655 p.

FAN L.; SMETHURST J. A.; ATKINSON P. M.; POWRIE W. Error in target-based georeferencing and registration in terrestrial laser scanning. **Computers and Geosciences**, v. 83, p. 54-64, 2015.

FARO. **FARO laser scanner focus3D: user manual**. FARO Technologies Inc., 2010.

FARO. **Faro® Scene** (v. 7.0). Disponível em: <<https://www.faro.com/pt-br/produtos/3d-design/faro-scene>>. Acesso em: 12 dez. 2020.

FASSI, F.; ACHILLE, C.; FREGONESE, L. Surveying and modelling the main spire of Milan cathedral using multiple data sources. **Photogrammetric Record**, v. 26, n. 136, p. 462-487, 2011.

FONSTAD, M.A.; DIETRICH, J.T.; COURVILLE, B.C.; JENSEN, J.L.; CARBONNEAU, P.E. Topographic structure from mMotion: a new development in photogrammetric measurement. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38. p. 421-430, 2013.

GHILANI, C. D.; WOLF, P. R. **Adjustment computations: spatial data analysis**. 4.ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 611 p.

GIONGO, M.; KOEHLER, H.S.; MACHADO, S. A.; KIRCHNER, F.F.; MACHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.30, p.231-244, 2010. DOI: 10.4336/2010.pfb.30.63.231.

GLOBAL ECOSYSTEM DYNAMICS INVESTIGATION – GEDI. **Applications overview**. GEDI, 2021. Disponível em: <<https://gedi.umd.edu/applications/application-overview/#>>. Acesso em: 02 fev. 2021.

GOOGLE. **Google Maps**. Disponível em: <<https://www.google.com/maps/place>>. Acesso em: 19 ago. 2020.

GOOGLE EARTH. **Google Earth-Mapas**. Disponível em: <<http://mapas.google.com>>. Acesso em: 19 ago. 2020.

GROETELAARS, N. J.; AMORIM, A. L. Técnicas de restituição fotogramétricas digitais aplicadas à arquitetura: um estudo de caso. In: COBRAC - CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, 6., 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UFSC, 2004. CD-ROM. p. 1-12.

GRÖGER, G.; KOLBE, T. H.; CZERWINSKI, A.; NAGEL, C. **Opengis city geography markup language (CityGML) implementation specification**. [S.l.]: Open Geospatial Consortium, 2008.

GREEN, S.; BEVAN, A.; SHAPLAND, M. A comparative assessment of structure from motion methods for archaeological research. **Journal of Archaeological Science**, v. 46, p.173-181, 2014.

GERNARL SERVICE ADMINISTRATION - GSA. **3D-4D building information modeling**. Disponível em: <<http://www.gsa.gov/bim>>. Acesso em: 12 dez. 2020.

HICHRI, N.; STEFANI, C.; DE LUCA, L.; VERON, P. Review of the “as-built BIM” approaches. In THE INTERNATIONAL ARCHIVES OF THE PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES, 3., 2013, Trento, Italy. **Proceedings...2013**. p. 107–112.

HITZ, C. B.; EWING, J. J.; HECHT, J. **Introduction to laser technology**, New Jersey: John Wiley & Sons, 2012.

HUANG, H.; MICHELINI, M.; SCHMITZ, M.; ROTH, L.; MAYER, H. Lod3 building reconstruction from multi-source images. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 43, 2020. doi:<http://dx.doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-427-2020>.

IGLHAUT, J.; CABO, C.; PULITI, S.; PIERMATTEI, L.; O'CONNOR, J.; ROSETTE, J. Structure from motion photogrammetry in forestry: a review. **Current Forestry Reports**, v. 5, p. 155–168, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00094-3>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Mapas**. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/geociencias/todos-os-produtos-geociencias.html>>. Acesso em: ago. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo brasileiro de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

INTEL. **Processador Intel® Core™ i7-8750H**. Disponível em: <https://www.intel.com.br/content/www/br/pt/products/processors/core/i7-processors/i7-8750h.html>. Acesso em: jan. 2021.

ISENBURG, M. **Efficient LiDAR processing software** (version 170511, academic). Disponível em: <<http://rapidlasso.com/LAStools>>. Acesso em: dez. 2020.

JAUD, M.; PASSOT, S.; ALLEMAND, P.; DANTEC, N. L., GRANDJEAN, P.; DELACOURT, C. Suggestions to limit geometric distortions in the reconstruction of linear coastal landforms by SfM photogrammetry with

PhotoScan® and MicMac® for UAV surveys with restricted GCPs pattern. **Drones**, v. 3, n. 2, 2019.

JEONG, G.Y.; NGUYEN, T.N.; TRAN, D.K.; HOANG, T.B.H. Applying unmanned aerial vehicle photogrammetry for measuring dimension of structural elements in traditional timber building. **Measurement**, v.153, 2020.

KAZHDAN, M.; BOLITHO, M.; HOPPE, H. Poisson surface reconstruction. In: EUROGRAPHICS SYMPOSIUM ON GEOMETRY PROCESSING, 2006. **Proceedings...** 2006. p.61-70.

KEDZIERSKI, M.; FRYSKOWSKA, A. Terrestrial and aerial laser scanning data integration using wavelet analysis for the purpose of 3D building modeling. **Sensors**, v. 14, p. 12070-12092, 2014. DOI:10.3390/s140712070.

KEDZIERSKI, M.; FRYSKOWSKA, A. Methods of laser scanning point clouds integration in precise 3D building modelling. **Measurement**, v. 74, p. 221–232, 2015.

KENNEDY, P. **A guide to econometrics**. Massachusetts: Blackwell Publishing, 2008.

KIM, S.; KIM, S.; LEE, D.E. 3D point cloud and BIM-based reconstruction for evaluation of project by as-planned and as-built. **Remote Sensing**, v. 12, p. 1457, 2020.

KLEIN, L.; LI, N.; BECERIK-GERBER, B. Imaged-based verification of as-built documentation of operational buildings. **Automation in Construction**, v. 21, p. 161-171, 2012. DOI: 10.1016/j.autcon.2011.05.023.

KNORR, D.; KHOO, C. S. H.; AUGUSTIN, M. A. Food for an urban planet: challenges and research opportunities. **Frontiers in Nutrition**, v. 4, n. 73, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fnut.2017.00073>.

KOLBE, T. H.; GRÖGER, G.; PLÜMER, L. CityGML: Interoperable access to 3D city models. In: ZLATANOVA, S.; VAN OOSTEROM, P. J. M.; FENDEL, E. M. (Ed). **Geo-information for disaster management**. [S.l.]: Springer, 2005. p. 883–899.

KRESSE, W.; FADAIE, K. **ISO standards for geographic information**. [S.l.]: Springer Science, 2004.

LI, M.; LIANGLIANG, N.; SMITH, N.; WONKA, P. Reconstructing building mass models from UAV images. **Computers & Graphics**, v. 54, p. 84-93, 2016.

LI, W.; WANG, C.; WEN, C.; ZHANG, Z.; LIN, C.; LI, J. Pairwise registration of TLS point clouds by deep multi-scale local features. **Neurocomputing**, v. 386, p. 232-243, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.12.074>.

LIANG, X.; HYYPPÄ, J. Automatic stem mapping by merging several terrestrial laser scans at the feature and decision levels. **Sensors**, v. 13, n. 2, 2013.

LIANG, F.; YANG, B.; DONG, Z.; HUANG, R.; ZANG, Y.; PAN, Y. A novel skyline context descriptor for rapid localization of terrestrial laser scans to airborne laser scanning point clouds. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 165, p. 120-132, 2020.

LIU, J.; LIANG, X.; HYYPPÄ, J.; YU, X.; LEHTOMÄKI, M.; PYÖRÄLÄ, J.; ZHU, L.; WANG, Y.; CHEN, R. Automated matching of multiple terrestrial laser scans for stem mapping without the use of artificial references. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 56. p. 13-23, 2017.

LOWE, D.G. Object recognition from local scale-invariant features. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION, 2., 1999. **Proceedings..** IEEE, 1999. p. 1150-1157.

LU, Q.; LEE, S. Image-based technologies for constructing as-is building information models for existing buildings. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 31, n. 4, 2017.

LUHMANN, T.; ROBSON, S.; KYLE, S.; HARLEY, I.A. **Close range photogrammetry: principles, techniques and applications.** [S.l.]: Whittles, 2006.

MAIEZZA, P. As-built reliability in architectural hbim modeling. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 42, p. 461-466, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-461-2019>.

MARQUARDT, D. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. **Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics**, v. 11, n. 2, p. 431-441, 1963.

MARTÍNEZ-CARRICONDO, P.; CARVAJAL-RAMÍREZ, F.; YERO-PANEQUE, L.; AGÜERA-VEJA, F. Combination of nadiral and oblique UAV photogrammetry and HBIM for the virtual reconstruction of cultural heritage. case study of Cortijo del Fraile in Níjar, Almería (Spain). **Building Research & Information**, v. 48 n. 2, p. 140-159, 2020.

MICHELETTI, N.; CHANDLER, J.H.; LANE, S.N. Structure from motion (SFM) photogrammetry. In: CLARKE, L.E.; NIELD, J.M. (Ed.). **Geomorphological techniques.** London: British Society for Geomorphology, 2015. ISSN: 2047-0371.

MOHAMMED, H. M. **Fusion of terrestrial and airborne laser data of 3D modeling applications.** 2015. 134 p. Dissertação (Master of Science) – University of Calgary, Calgary, Alberta, 2015.

MONICO, J. F. G.; PÓZ, A. P. D.; GALO, M.; SANTOS, M. C.; OLIVEIRA, L. C. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. **BOLETIM DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS** (IMPRESSO), v. 15, p. 469-483, 2009.

MOYANO, J.; ODRIOZOLA, C. P.; NIETO-JULIÁN, J. E.; VARGAS, J. M.; BARRERA, J. A.; LEÓN, J. Bringing BIM to archaeological heritage: interdisciplinary method/strategy and accuracy applied to a megalithic monument of the Copper Age. **Journal of Cultural Heritage**, v. 45. p. 303-314, 2020.

MURPHY, M.; MCGOVERN, E.; PAVÍA, S. Historic building information modelling (HBIM). **Structural Survey**, v. 27, p. 311–327, 2009.

MYRONENKO, A.; SONG, X. Point set registration: coherent point drift. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 32, n. 12, p. 2262-2275, 2010.

OPTECH. **Pegasus HD500: summary specification sheet**. Disponível em: <<https://www.geo3d.hr/sites/default/files/2018-06/Pegasus-HD-SpecSheet-141126-WEB.pdf>>. Acesso em: dez. 2020.

PAVAN, N. L.; SANTOS, D. R. Um método automático para registro de dados laser scanning terrestre usando superfícies planas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, n. 3, p. 572-589, 2015.

PEREIRA, N. S. **Cloud Partitioning Iterative Closest Point (CP-ICP): um estudo comparativo para registro de nuvens de pontos 3d**. 2016. 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Teleinformática) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

PILLMORE, C.L. **Application of high-order stereoscopic plotting instruments to photogeologic studies**. Washington: U.S. Department of the Interior, Geological Survey, 1964.

POCOBELLI, D. P.; BOEHM, J.; BRYAN, P.; STILL, J.; GRAU-BOVÉ, J. Bim for heritage science: a review. **Heritage Science**, v. 6 n. 30, 2018.

POMERLEAU, F.; COLAS, F.; SIEGWART, R. A review of point cloud registration algorithms for mobile robotics. **Foundations and Trends Robotics**, v. 4, p. 1–104, 2015.

QUINTANA, B.; PRIETO, S.; ADÁN, A.; BOSCHÉ, F. Door detection in 3D coloured point clouds of indoor environments. **Automation in Construction**, v. 85, p. 146-166, 2018.

RAMÍREZ-OROZCO, M. Nonviolent resistance in the struggle for housing in urban areas of Brazil: the direct action of the roofless workers' movement. In: MOULY, C.; HERNÁNDEZ DELGADO, E. (Ed.). **Civil resistance and violent conflict in Latin America**. Cham: Palgrave Macmillan, 2019. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-05033-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05033-7_8).

ROCHA, C; PIORNO, J; FREIRE,R; MEDINA, I,A; Uma discussão histórica sobre Fotogrametria. In: COBRAC -CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, 6., 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UFSC, 2004. CD-ROM. p. 1-12.

RODRIGUES, C. H. M. **Extração de fachadas de edifícios em imagens obtidas com UAV**. 2016. 54 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geográfica) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016. Disponível em: < [https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/27331/1/ulfc121222\\_tm\\_Carolina\\_Rodrigues.pdf](https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/27331/1/ulfc121222_tm_Carolina_Rodrigues.pdf)>. Acesso em: 20 dez. 2020.

RUIZ, P.R.S.; ALMEIDA, C.M.; SCHIMALSKI, M.B.; LIESENBERG, V.; MITISHITA, E. Avaliação da performance dos métodos ICP, CPD e SVR para registros de nuvens de pontos relativas a telhados extraídas de dados LiDAR. **Revista Brasileira de Cartografia**, 2021. Aceito para publicação.

SANTOS, R. C.; GALO, M.; TACHIBANA, V. M. Classification of Lidar data over building roofs using k-means and principal componente analysis. **Bulletin of Geodetic Sciences**, v. 24, n. 1, p. 69-84, 2018.

SATO, L. Y. **Tecnologia LiDAR para quantificação dos impactos de incêndios na estrutura florestal no sudoeste da Amazônia**. 2017. 98 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

SCHWIND, M. **Comparing and characterizing three-dimensional point clouds derived by structure from motion photogrammetry**. 2016. 129 p. Dissertação (Master of Science in Geospatial Surveying Engineering) - A&M University, Corpus Christi, Texas, 2016.

SEPASGOZAR, S.M.; LIM, S.; SHIROWZHAN, S. Implementation of rapid as-built building information modelling using mobile LiDAR. In CONSTRUCTION RESEARCH CONGRESS 2014@ SCONSTRUCTION IN A GLOBAL NETWORK, **2014. Proceedings...** ASCE, 2014. p. 209-218.

SHAN, J.; TOTH, C. K. **Topographic laser ranging and scanning: principles and processing**. [S.l.]: CRC Press, 2008.

SORIA-MEDINA, A.; MARTINEZ, J.; ARIAS, P.; ARMESTO, J.; BUFFARA-ANTUNES, A. Z. Three-dimensional modeling of the romanesque church of Santa Maria de Castrelos (Vigo – Spain) using terrestrial laser scanner. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 40, p. 601-604, 2013.

SPACE LASERS. **ICESat-2**, 2021. Disponível em: < <https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/space-lasers>>. Acesso em: 02 fev. 2021.

STAIGER, R. Terrestrial laser scanning technology, systems and applications. In: FIG REGIONAL CONFERENCE, 2., 2003, Marrakech, Marrocos. **Proceedings...** 2003.

STOJANOVIC, V.; RICHTER, R.; TRAPP, M.; DÖLLNER, J. Comparative visualization of BIM geometry and corresponding point clouds. **International Journal of Sustainable Development and Planning**, v. 13. n. 12, 2017.

SZELISKI, R. **Computer vision: algorithms and applications**. [S.l.]: Springer Science, 2010.

TANG, P.; ANIL, E.; AKINCI, B.; HUBER, D. Efficient and effective quality assessment of as-is building information models and 3D laser-scanned data. In: CONGRESS ON COMPUTING IN CIVIL ENGINEERING, 2011. **Proceedings...** 2011. p 486-493. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/41182\(416\)60](https://doi.org/10.1061/41182(416)60).

TEO, T. A.; HUANG, S. H. Surface-based registration of airborne and terrestrial mobile LiDAR point clouds. **Remote Sensing**, v. 6, p. 12686-12707, 2014.

TOMMASELLI, A. M. G. Um estudo sobre as técnicas de varredura a laser e fotogrametria para levantamentos 3D a curta distância. **GEODÉSIA Online - Revista da Comissão Brasileira de Geodésia**, v. 4, 2003.

TOPICO: Acurácia, precisão e exatidão. Galileu, 2021. Disponível em: < [http://www.galileu.esalq.usp.br/mostra\\_topico.php?cod=84](http://www.galileu.esalq.usp.br/mostra_topico.php?cod=84)>. Acesso em: 02 fev. 2021.

TRAN, H.; KHOSHELHAM, K. Building change detection through comparison of a lidar scan with a building information model. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science**, v. 42, p. 889–893, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-889-2019>.

UNITED NATIONS. **World urbanization prospects**. New York, 2018. Disponível em: <<https://population.un.org/wup/>>. Acesso em: 20 dez. 2020.

USMANI, A.; ELSHAFFEY, A.; GHEISARI, M. CHAI, S.; AMINUDIN, E.; TAN, C. A scan to as-built building information modeling workflow: a case study in Malaysia. **Journal of Engineering Design and Technology**, v. 18, p. 923-940, 2019.

WANG, C.; CHO, Y. K.; KIM, C. Automatic BIM component extraction from point clouds of existing buildings for sustainability applications. **Automation in Construction**, v. 56, p. 1-13, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.04.001>.

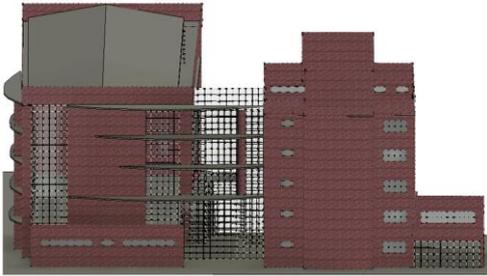
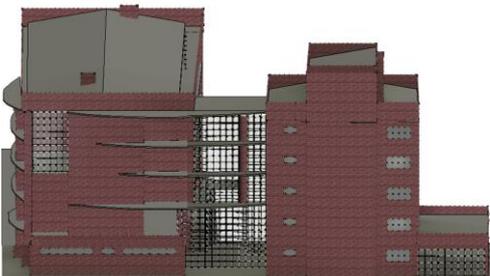
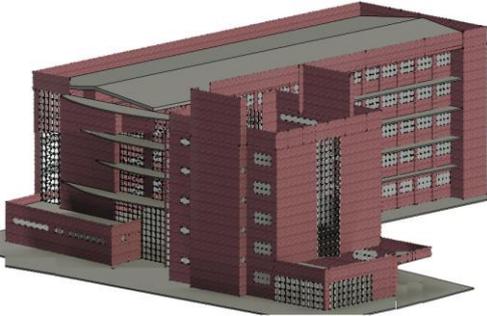
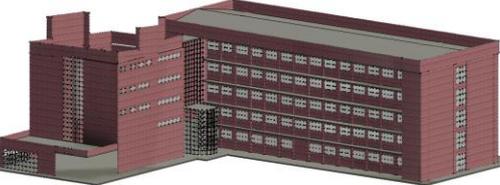
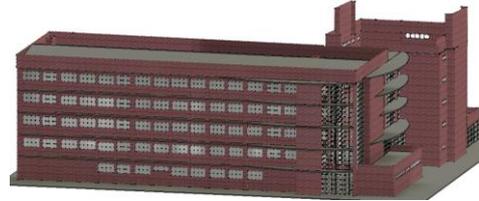
- WEHR, A.; LOHR, U. Airbone laser scanning – an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 54, p. 68-82, 1999.
- WEIDNER, U.; FÖRSTNER, W. Towards automatic building extraction from high resolution digital elevation models. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 50, n. 4, 1995.
- WEN, X.; XIE, H.; LIU, H.; YAN, L. Accurate reconstruction of the LoD3 building model by integrating multi-source point clouds and oblique remote sensing imagery. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 8, n. 135, 2019.
- WESTOBY M.J.; BRASINGTON J.; GLASSER N.F.; HAMBREY M.J.; REYNOLDS J.M. 'Structure-from-motion' photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300-314, 2012.
- XIONG, X.; ADAN, A.; AKINCI, B.; HUBER, D. Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data. **Automation in Construction**, v. 31, p. 325-337, 2013.
- XUE, F.; WEISHENG, L.; CHEN, K.; ZETKULIC, A. From semantic segmentation to semantic registration: derivative-free optimization-based approach for automatic generation of semantically rich as-built building information models from 3D point clouds. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 33, n. 4, 2019.
- YANAGA, S. S. **Fotogrametria digital à curta distância na documentação do patrimônio arquitetônico**: estudo de caso. 2006. 111 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2006.
- YANG, B.; ZANG, Y.; DONG, Z.; HUANG, R. An automated method to register airborne and terrestrial laser scanning point clouds. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 109, p. 62-76, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.08.006>.
- ZAR, J.H. **Biostatistical analysis**. 4. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999.
- ZHAO, F.; YANG, X.; SCHULL, M.; ROMAN-COLON, M.; YAO, T.; WANG, Z.; ZHANG, Q.; JUPP, D.L.B.; LOVELL, J.L.; CULVENOR, D.S.; NEWNHAM, G.J.; RICHARDSON, A.D.; NI-MEISTER, W.; SCHAFF, C.L.; WOODCOCK, C.E.; STRAHLER, A.H. Measuring effective leaf area index, foliage profile, and stand height in New England forest stands using a full-waveform ground-based lidar. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 2954-2964, 2011.
- ZHU, H.; GUO, B.; ZOU, K.; LI, K.V.; MIHAYLOVA, L.; LEUNG, H. A review of point set registration: from pairwise registration to groupwise registration. **Sensors**, v. 19, p. 1191-1211, 2019.



## APÊNDICE A – MODELOS AS-IS BIM

Este apêndice apresenta os modelos *as-is* BIM ALS + Fotogrametria de fachada e TLS + Fotogrametria de telhado.

Figura A.1 – Modelos *as-is* BIM ALS + Fotogrametria de fachada e TLS + Fotogrametria de telhado.

	ALS + Fotogrametria de fachada	TLS + Fotogrametria de telhado
Sudeste		
Nordeste		
Noroeste		
Sudoeste		



## APÊNDICE B - RESULTADOS DAS ANÁLISES DE REGRESSÃO LINEAR

Este apêndice apresenta os resultados das análises de regressão linear realizadas entre as dimensões dos modelos de nuvens de pontos e as dimensões EDM do edifício.

### B.1 Modelo de Nuvem de Pontos ALS + TLS

Figura B.1 – Análise de regressão referente às dimensões do modelo de nuvem de pontos ALS + TLS.

RESUMO DOS RESULTADOS								
<i>Estatística de regressão</i>								
R múltiplo	0.9999164							
R-Quadrado	0.99983282							
R-quadrado ajustado	0.99983064							
Erro padrão	0.00507474							
Observações	79							
ANOVA								
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>de significação</i>			
Regressão	1	11.85910741	11.85911	460493.744	3.551E-147			
Resíduo	77	0.001982983	2.58E-05					
Total	78	11.86109039						
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Interseção	0.0006432	0.001034577	0.621705	0.535972389	-0.0014169	0.002703307	-0.001416904	0.002703307
Real	1.00025993	0.001474012	678.5969	3.5506E-147	0.9973248	1.003195064	0.997324798	1.003195064

### B.2 Modelo de Nuvem de Pontos AL + Fotogrametria

Figura B.2 – Análise de regressão referente às dimensões do modelo de nuvem de pontos ALS + Fotogrametria.

RESUMO DOS RESULTADOS								
<i>Estadística de regressão</i>								
R múltiplo	0.9996852							
R-Quadrado	0.9993705							
R-quadrado aju	0.9993623							
Erro padrão	0.0099759							
Observações	79							
ANOVA								
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>			
Regressão	1	12.1656638	12.165664	122244.1	5.23E-125			
Resíduo	77	0.00766299	9.952E-05					
Total	78	12.1733268						
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Interseção	-0.010362	0.00203377	-5.09502	2.42E-06	-0.014411873	-0.006312354	-0.014411873	-0.006312354
Real	1.0131057	0.00289762	349.6343	5.2E-125	1.007335851	1.01887563	1.007335851	1.01887563

### B.3 Modelo de Nuvem de Pontos TLS + Fotogrametria

Figura B.3 – Análise de regressão referente às dimensões do modelo de nuvem de pontos TLS + Fotogrametria.

RESUMO DOS RESULTADOS								
<i>Estadística de regressão</i>								
R múltiplo	0.999915							
R-Quadrado	0.999831							
R-quadrado ajus	0.999828							
Erro padrão	0.005107							
Observações	79							
ANOVA								
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>			
Regressão	1	11.8546991	11.854699	454457.6	5.9005E-147			
Resíduo	77	0.002008574	2.609E-05					
Total	78	11.85670767						
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Interseção	0.000704	0.001041231	0.6758065	0.501188	-0.00136969	0.002777027	-0.00136969	0.002777027
Real	1.000074	0.001483493	674.13467	5.9E-147	0.997119992	1.003028015	0.997119992	1.003028015

## B.4 Modelo de Nuvem de Pontos Fotogramétrica

Figura B.4 – Análise de regressão referente às dimensões do modelo de nuvem de pontos fotogramétrica.

RESUMO DOS RESULTADOS								
<i>Estatística de regressão</i>								
R múltiplo	0.999694							
R-Quadrado	0.999389							
R-quadrado ajustado	0.999381							
Erro padrão	0.00983							
Observações	79							
<i>ANOVA</i>								
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>			
Regressão	1	12.16810086	12.168101	125928.38	1.6685E-125			
Resíduo	77	0.007440291	9.663E-05					
Total	78	12.17554115						
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Interseção	-0.01036	0.002004002	-5.167538	1.816E-06	-0.014346234	-0.006365278	-0.01434623	-0.006365278
Real	1.013207	0.0028552	354.86389	1.67E-125	1.00752178	1.018892638	1.00752178	1.018892638

## B.5 Modelo de Nuvem de Híbrida Múltipla

Figura B.5 – Análise de regressão referente às dimensões do modelo de nuvem de pontos híbrida múltipla.

RESUMO DOS RESULTADOS								
<i>Estatística de regressão</i>								
R múltiplo	0.9997742							
R-Quadrado	0.9995485							
R-quadrado ajustado	0.9995426							
Erro padrão	0.0083789							
Observações	79							
<i>ANOVA</i>								
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>			
Regressão	1	11.967378	11.967378	170461.1	1.4526E-130			
Resíduo	77	0.0054059	7.021E-05					
Total	78	11.972783						
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Interseção	-0.002972	0.0017082	-1.740022	0.0858504	-0.006373719	0.000429151	-0.00637372	0.000429151
Real	1.0048156	0.0024337	412.86935	1.45E-130	0.999969404	1.009661784	0.9999694	1.009661784



# ANEXO A – RELATÓRIO DE CALIBRAÇÃO DA TRENA LASER DIGITAL

Este anexo apresenta os certificados de calibração realizados na Trena Laser Digital.



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



## LABORATÓRIO DE INTEGRAÇÃO E TESTES

Metrologia em Acústica e Vibração, Alta Frequência e Telecomunicações, Dimensional, Eletricidade e Magnetismo, Força e Torque, Massa, Pressão (Vácuo), Temperatura e Umidade, e Tempo e Frequência. Metrology in Acoustic and Vibrations, High Frequency and Telecommunications, Dimensional, Electricity and Magnetism, Force and Torque, Mass, Pressure (Vacuum), Temperature and Humidity, and Time and Frequency.

### CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO CALIBRATION CERTIFICATE

<b>NÚMERO:</b> NUMBER:	<b>LIT11-LIT16-RC-10000</b>			<b>FOLHA:</b> SHEET:	<b>1 / 4</b>
<b>OBJETO:</b> SPECIMEN:	<b>TRENA LASER DIGITAL</b>				
<b>FABRICANTE:</b> MANUFACTURER:	<b>LEICA</b>				
<b>MODELO:</b> MODEL:	<b>100 mts</b>				
<b>Nº DE SÉRIE:</b> SERIAL NUMBER:	<b>NÃO CONSTA</b>				
<b>PATRIMÔNIO:</b> ASSET:	<b>49116</b>				
<b>IDENTIFICAÇÃO:</b> IDENTIFICATION:	<b>NÃO CONSTA</b>				
<b>CLIENTE:</b> CUSTOMER:	<b>INPE/LIT – MANUTENÇÃO, OPERAÇÃO E SEGURANÇA PREDIAL</b>  <b>AVENIDA DOS ASTRONAUTAS, 1758 – JARDIM DA GRANJA</b> <b>CEP 12227-010 – SÃO JOSÉ DOS CAMPOS – SP</b> <b>TEL.: (12) 3208-7369</b>				
<b>DATA DA CALIBRAÇÃO:</b> CALIBRATION DATE:	<b>23/09/2020</b>				
<b>REGISTRO INTERNO:</b> INTERNAL REGISTER:	<b>OS 0032.20.LIT11</b>	<b>2971.20.PRO</b>	<b>T05-089</b>		
<b>ASSINATURAS AUTORIZADAS:</b> AUTHORIZED SIGNATURES:				<b>DATA DE EMISSÃO:</b> ISSUE DATE:	
	Assinado de forma digital por Angela A. T. Silva Dados: 2020.09.29 17:24:03 -03'00'		Digitally signed by Ricardo Suterio Date: 2020.09.30 13:43:18 -03'00'	<b>29/09/2020</b>	
<b>Signatário Autorizado</b>		<b>Gerente Técnico da Área de Metrologia</b>			

Este documento atende aos requisitos da ABNT NBR ISO/IEC 17025. As medidas realizadas estão rastreáveis a padrões nacionais ou internacionais de medidas e referem-se exclusivamente ao objeto caracterizado neste documento e nas condições especificadas, não sendo extensivas a quaisquer itens, mesmo que similares. A reprodução deste documento só poderá ser feita de forma integral.

This document complies with the requirements of ABNT NBR ISO / IEC 17025. The results are traceable to the international and/or national standards of measurements, and refer exclusively to the object described in this document, and cannot be extended to any other object, even though similar. This document can be reproduced only in its full version.

Av. dos Astronautas, 1758 - Caixa Postal 515 - CEP: 12227-010 - São José dos Campos - SP - Tel.: (12) 3208-6318 - E-mail: metrologia@lit.inpe.br



NÚMERO:

NUMBER:

LIT11-LIT16-RC-10000

FOLHA:

SHEET:

2 / 4

**CARACTERÍSTICAS DO OBJETO:**

SPECIMEN CHARACTERISTICS:

Faixa de Medição:	(0 a 100) m
Valor de divisão:	0,001 m
Documento de Referência:	Leica DISTO classic User Manual

**INSTALAÇÕES E CONDIÇÕES AMBIENTAIS:**

FACILITIES AND ENVIRONMENT CONDITIONS:

Local de realização da calibração:	Laboratório de Metrologia Mecânica do INPE/LIT.
Temperatura Ambiente:	(20 ± 1) °C
Umidade Relativa:	(50 ± 10) %ur

**PROCEDIMENTO:**

PROCEDURE:

**Calibração de Trena.**

Calibração por comparação a coleção de barras do sistema de medição de coordenadas Brunson do INPE/LIT. O método utilizado se baseia nos procedimentos de calibrações dimensionais do Laboratório de Metrologia Mecânica.

Foram realizadas 05 séries de medições em cada ponto de calibração, sendo informado o valor médio.

Os resultados apresentados somente se aplicam à faixa de calibração e não são indicativos da estabilidade ao longo do tempo do instrumento sob calibração.

A incerteza expandida da calibração relatada é declarada como a incerteza padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência ( $k$ ) e grau de liberdade efetivo ( $\nu_{\text{eff}}$ ), que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de 95,45%.



Figura 1 – Calibração da trena – ponto 1



Figura 2 – Calibração da trena – ponto 4

**PADRÕES E EQUIPAMENTOS:**

EQUIPMENT AND STANDARDS:

EQUIPAMENTO	MARCA	MODELO	Nº SÉRIE	CERTIFICADO	VALIDADE	RASTREABILIDADE
Coleção de barras de Sistema de medição de coordenadas	Brunson	803-M	51024; 51151; 51153; 51154.	MD-034/17	ma/2021	DCTA/IFI RBC (CAL001)



NÚMERO:

NUMBER:

LIT11-LIT16-RC-10000

FOLHA:

SHEET:

4 / 4

RESULTADOS:

RESULTS:

Valores da calibração

Valor de Referência	Valor Indicado Médio	Erro de Indicação	Incerteza Expandida da Calibração	Fator de Abrangência	Graus de liberdade efetivo
$V_r$	$V_m$	$V_m - V_r$	$U$	$k$	$\nu$
mm	mm	mm	mm		
500,0	500,0	0,0	1,3	2,00	infinito
1000,0	1000,0	0,0	1,3	2,00	infinito
1500,0	1499,0	-1,0	1,3	2,00	infinito
2000,0	2000,0	0,0	1,3	2,00	infinito

Notas:

1. O valor de referência ( $V_r$ ) equivale ao valor convencional (VC), de acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia.
2. O valor indicado médio ( $V_m$ ) equivale à média aritmética das diversas medições, para o mesmo valor de comprimento de referência.

REALIZAÇÃO:

REALIZATION:

Marcelo Rezende do Nascimento  
Rodrigo Motta de Oliveira

CONTROLE DE VERSÃO:

VERSION CONTROL:

Versão 01: Primeira versão deste documento.





*LABORATÓRIO DE INTEGRAÇÃO E TESTES*

Metrologia em: Acústica e Vibrações, Alta Frequência e Telecomunicações, Dimensional, Eletricidade e Magnetismo, Força e Torque, Massa, Pressão (Vácuo), Temperatura e Umidade, e Tempo e Frequência. Metrology in: Acoustic and Vibrations, High Frequency and Telecommunications, Dimensional, Electricity and Magnetism, Force and Torque, Mass, Pressure (Vacuum), Temperature and Humidity, and Time and Frequency.

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO**  
CALIBRATION CERTIFICATE

<b>NÚMERO:</b> NUMBER:	<b>LIT11-LIT16-RC-10001</b>			<b>FOLHA:</b> SHEET:	<b>1 / 4</b>
<b>OBJETO:</b> SPECIMEN:	<b>TRENA LASER DIGITAL</b>				
<b>FABRICANTE:</b> MANUFACTURER:	<b>LEICA</b>				
<b>MODELO:</b> MODEL:	<b>100 mts</b>				
<b>Nº DE SÉRIE:</b> SERIAL NUMBER:	<b>NÃO CONSTA</b>				
<b>PATRIMÔNIO:</b> ASSET:	<b>49116</b>				
<b>IDENTIFICAÇÃO:</b> IDENTIFICATION:	<b>NÃO CONSTA</b>				
<b>CLIENTE:</b> CUSTOMER:	<b>INPE/LIT – MANUTENÇÃO, OPERAÇÃO E SEGURANÇA PREDIAL</b>  <b>AVENIDA DOS ASTRONAUTAS, 1758 – JARDIM DA GRANJA</b> <b>CEP 12227-010 – SÃO JOSÉ DOS CAMPOS – SP</b> <b>TEL.: (12) 3208-7369</b>				
<b>DATA DA CALIBRAÇÃO:</b> CALIBRATION DATE:	<b>01/10/2020</b>				
<b>REGISTRO INTERNO:</b> INTERNAL REGISTER:	<b>OS 0032.20.LIT11</b>	<b>2971.20.PRO</b>	<b>T05-089</b>		
<b>ASSINATURAS AUTORIZADAS:</b> AUTHORIZED SIGNATURES:				<b>DATA DE EMISSÃO:</b> ISSUE DATE:	
	Assinado de forma digital por Angela A. T. Silva Dados: 2020.10.01 16:56:08 -03'00'			Digitally signed by Ricardo Suterio Date: 2020.10.01 17:02:09 -03'00'	<b>01/10/2020</b>
<b>Signatário Autorizado</b>	<b>Gerente Técnico da Área de Metrologia</b>				

Este documento atende aos requisitos da ABNT NBR ISO/IEC 17025. As medidas realizadas estão rastreáveis a padrões nacionais e/ou internacionais de medidas e referem-se exclusivamente ao objeto caracterizado neste documento e nas condições especificadas, não sendo extensivos a quaisquer lotes, mesmo que similares. A reprodução deste documento só poderá ser feita de forma integral.

This document complies with the requirements of ABNT NBR ISO / IEC 17025. The results are traceable to the international and/or national standards of measurements, and refer exclusively to the object described in this document, and cannot be extended to any other object, even though similar. This document can be reproduced only in its full version.



NÚMERO:  
NUMBER:

LIT11-LIT16-RC-10001

FOLHA:  
SHEET:

2 / 4

#### CARACTERÍSTICAS DO OBJETO:

##### SPECIMEN CHARACTERISTICS:

Faixa de Medição: (0 a 100) m  
Valor de divisão: 0,001 m  
Documento de Referência: Leica DISTO classic User Manual

#### INSTALAÇÕES E CONDIÇÕES AMBIENTAIS:

##### FACILITIES AND ENVIRONMENT CONDITIONS:

Local de realização da calibração: Corredor central do Subsolo do INPE/LIT.  
Temperatura Ambiente:  $(23 \pm 1) ^\circ\text{C}$   
Umidade Relativa:  $(50 \pm 10) \%ur$

#### PROCEDIMENTO:

##### PROCEDURE:

##### Calibração de Trena.

Calibração por comparação a distâncias definidas através de trena convencional (padrão) do LIT/INPE. O método utilizado se baseia nos procedimentos de calibrações dimensionais do Laboratório de Metrologia Mecânica.

Foram realizadas 05 séries de medições em cada ponto de calibração, sendo informado o valor médio. Nas 3 primeiras séries foi analisada a repetibilidade da trena digital. O setup foi remontado alterando-se o ponto zero (referência) e foram realizadas mais 2 séries para analisar a reprodutibilidade da trena digital.

Os resultados apresentados somente se aplicam à faixa de calibração e não são indicativos da estabilidade ao longo do tempo do instrumento sob calibração.

A incerteza expandida da calibração relatada é declarada como a incerteza padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência ( $k$ ) e grau de liberdade efetivo ( $\nu_{eff}$ ), que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de 95,45%.



Figura 1 – Vista localizada da calibração da trena digital



Figura 2 – Vista geral da calibração da trena digital

EQUIPAMENTOS:  
EQUIPMENT:

EQUIPAMENTO	MARCA	MODELO	Nº SÉRIE	CERTIFICADO	VALIDADE	RASTREABILIDADE
Trena convencional	Starrett	V1-8	67820	LIT11-LIT11-RC-10027	out/2022	INPE/LIT DCT/IFI



NÚMERO:

NUMBER:

LIT11-LIT16-RC-10001

FOLHA:

SHEET:

4 / 4

RESULTADOS:

RESULTS:

Valores da calibração

Valor de Referência	Valor Indicado Médio	Erro de Indicação	Erro de reprodutibilidade	Incerteza Expandida da Calibração	Fator de Abrangência	Graus de liberdade efetivo
$V_r$	$V_m$	$V_m - V_r$	$V_m - V_r$	$U$	$k$	$\nu$
mm	mm	mm	mm	mm		
10004,3	9999,0	-5,3	-5,3	1,3	2,00	infinito
20009,2	19996,6	-12,2	-12,6	1,4	2,01	260,458
40016,5	40001,0	-15,5	-15,5	2,0	2,16	17,188
50020,8	50002,2	-18,1	-18,6	1,5	2,04	67,277

Notas:

1. O valor de referência ( $V_r$ ) equivale ao valor convencional (VC), de acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia.
2. O valor indicado médio ( $V_m$ ) equivale à média aritmética das diversas medições, para o mesmo valor de comprimento de referência.
3. Erro de indicação: Calculado em relação as 3 primeiras séries de medições.
4. Erro de reprodutibilidade: Calculado em relação as 5 séries de medições.

REALIZAÇÃO:

REALIZATION:

Marcelo Rezende do Nascimento

Rodrigo Motta de Oliveira

CONTROLE DE VERSÃO:

VERSION CONTROL:

Versão 01: Primeira versão deste documento.

