



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL:**  
**ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**TALLIS DEYVIDE MAIA RUBENS**

**DIGITALIZAÇÃO DO PATRIMÔNIO CULTURAL BASEADO EM**  
**ESCANEAMENTO DE ALTA RESOLUÇÃO**

**FORTALEZA**

**2023**

TALLIS DEYVIDE MAIA RUBENS

DIGITALIZAÇÃO DO PATRIMÔNIO CULTURAL BASEADO EM ESCANEAMENTO  
DE ALTA RESOLUÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Estruturas e Construção Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Orientador: Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

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

---

- R83d Rubens, Tallis Deyvide Maia.  
Digitalização do patrimônio cultural baseado em escaneamento de alta resolução / Tallis Deyvide Maia  
Rubens. – 2023.  
146 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2023.  
Orientação: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita.
1. Digitalização. 2. Escaneamento a laser. 3. HBIM. I. Título.

CDD 624.1

---

TALLIS DEYVIDE MAIA RUBENS

DIGITALIZAÇÃO DO PATRIMÔNIO CULTURAL BASEADO EM ESCANEAMENTO  
DE ALTA RESOLUÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Estruturas e Construção Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Mylene de Melo Vieira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Fabiana Lopes de Oliveira  
Universidade de São Paulo (USP)



Aos meus pais, Aldemir (in memoriam) e Eliene. Ao meu irmão Tayrisson, e ao meu companheiro, Allan, por todo amor durante esses anos.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me proporcionar vitórias durante este período de estudos e aprendizagens, me dando forças e sabedoria para romper as barreiras que me pareciam intransponíveis e concluir esta etapa.

À minha família pela confiança, dedicação e motivação, e por tudo que cada um significa na minha história. Aos meus avós Adenilza e Edmar, de coração, toda a minha gratidão.

À minha mãe Eliene, que apesar das limitações, com todo carinho e cuidado, me estendeu os braços e estava presente nos momentos em que mais precisei.

Ao meu pai Aldemir (in memoriam), minha base, meu alicerce, minha eterna inspiração.

Ao meu irmão Tayrisson, pela ajuda mútua.

A vocês, meu amor e gratidão em palavras e atos, pelo resto da vida.

Ao meu companheiro, Allan, pela paciência, estímulo e apoio durante os momentos mais difíceis.

Ao meu amigo e chefe, Franzé Carneiro, pelo inestimável apoio e compreensão.

À minha amiga, Thayná Marjorie, pela acolhida e receptividade.

Aos meus professores, alguns em especial que fizeram a diferença.

Ao meu amigo e orientador, Esequiel Mesquita, obrigado por tudo, pela compreensão, carinho e encorajamento. Você inspira todos ao seu redor!

À professora Mylene Vieira pela relevante contribuição às pesquisas desenvolvidas neste período.

À equipe do LAREB pela colaboração e trabalho em todas as pesquisas desenvolvidas no decorrer do mestrado.

Aos amigos e colegas, pela força e pela vibração que foi primordial em relação a esta jornada.

Obrigado por se fazerem presentes, e fazerem parte disso.

Ao Programa Cientista Chefe Cultura, pelo qual decorre a presente dissertação.

À FUNCAP pelo apoio financeiro.

“A cultura de um povo é o seu maior patrimônio. Preservá-la é resgatar a história, perpetuar valores, é permitir que as novas gerações não vivam sob as trevas do anonimato.”

Nildo Lage

## RESUMO

A preservação do patrimônio arquitetônico cultural é uma questão relevante devido aos problemas de deterioração e destruição enfrentados por essas estruturas. A falta de documentação precisa e detalhada, juntamente com as limitações técnicas, por vezes, dificulta a preservação adequada dessas edificações. No entanto, avanços tecnológicos, como o escaneamento a laser e as ferramentas de processamento tridimensional, oferecem soluções promissoras para a aquisição, visualização e disseminação de dados precisos, superando as limitações das abordagens convencionais. O uso de modelos tridimensionais permite uma comunicação eficaz sobre o estado físico das edificações históricas, incluindo deformações, danos e outros aspectos relevantes. Além disso, a metodologia Building Information Modeling (BIM) evoluiu para a aplicação específica em edifícios históricos, conhecida como HBIM, considerando informações geométricas, topológicas, semânticas e gráficas dos componentes da construção, bem como seu valor histórico e artístico. A aplicação dessas tecnologias, como o escaneamento a laser e o HBIM, na preservação de edificações históricas traz benefícios econômicos significativos. Elas fornecem informações precisas para orçamentos adequados, planejamento estratégico de manutenção, simulação de intervenções e colaboração eficiente entre profissionais. Nesse contexto, esta dissertação tem como objetivo principal desenvolver estratégias para a digitalização do patrimônio cultural integrado com tecnologia de alta resolução de nuvem de pontos e HBIM. Os objetivos específicos incluem revisar e analisar as principais estratégias de digitalização do patrimônio histórico, desenvolver abordagens para a aplicação da metodologia HBIM e coleta de dados de nuvem, além de analisar e comparar a precisão dos modelos 3D e 2D. Com a implementação dessas estratégias, espera-se obter uma representação mais completa e precisa das edificações históricas, contribuindo para a preservação adequada do patrimônio cultural. Ademais, a aplicação dessas tecnologias oferece benefícios econômicos e agilidade nos levantamentos, permitindo uma gestão financeira mais eficiente das atividades de manutenção e promovendo a economia de recursos. A digitalização do patrimônio cultural por meio do escaneamento de alta resolução e do HBIM tem o potencial de transformar a maneira como as estruturas históricas são preservadas, documentadas e disponibilizadas para estudo e apreciação.

**Palavras-chave:** digitalização; escaneamento a laser; HBIM.

## ABSTRACT

The preservation of cultural architectural heritage is a relevant concern due to the problems of deterioration and destruction faced by these structures. The lack of accurate and detailed documentation, together with the limitations of traditional techniques, hinders the proper preservation of these buildings. However, technological advances such as laser scanning and three-dimensional processing tools offer promising solutions for the acquisition, visualization and dissemination of accurate data, overcoming the limitations of conventional approaches. The use of three-dimensional models allows effective communication about the physical state of historic buildings, including deformations, damages and other relevant aspects. In addition, the Building Information Modeling (BIM) methodology has evolved to the specific application in historic buildings, known as HBIM, considering geometric, topological, semantic and graphical information of the building components, as well as their historical and artistic value. The application of these technologies, such as laser scanning and HBIM, in the preservation of historic buildings brings significant economic benefits. They provide accurate information for proper budgeting, strategic maintenance planning, simulation of interventions and efficient collaboration between professionals. This dissertation work has as main objective to develop strategies for the digitization of cultural heritage integrated with high resolution point cloud technology and HBIM. To achieve this objective, the specific objectives include reviewing and analyzing the main heritage digitization techniques, developing strategies for the application of HBIM methodology and cloud data collection, as well as analyzing and comparing the accuracy of 3D and 2D models. With the implementation of these strategies, it is expected to obtain a more complete and accurate representation of historic buildings, contributing to the proper preservation of cultural heritage. Furthermore, the application of these technologies offers economic benefits and agility in surveys, allowing a more efficient financial management of maintenance activities and promoting resource savings. The digitization of cultural heritage through high-resolution scanning and HBIM has the potential to transform the way historic structures are preserved, documented and made available for study and appreciation.

**Keywords:** digitization; laser scanning; HBIM.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estágios da geração de um modelo 3D fotogramétrico.....	22
Figura 2 - Nuvem de pontos esparsa gerada na fase de processamento inicial e acima a localização das capturas realizadas pelo VANT.....	24
Figura 3 - Esquema simplificado do funcionamento da digitalização por luz estruturada.....	26
Figura 4 - Digitalização por luz estruturada de uma escultura.....	26
Figura 5 - Esquema simplificado do funcionamento da digitalização por tomografia computadorizada.....	28
Figura 6 - Sistema de TC de raio-x da X-Tek.....	28
Figura 7 - Funcionamento do princípio de triangulação.....	33
Figura 8 - Funcionamento do princípio ToF.....	34
Figura 9 - a) Leica ScanStation P40; RIEGL VZ-400i e c) Leica BLK360.....	35
Figura 10 - Fotografia retirada pelo laser Leica BLK360 da nave da Igreja Nossa Senhora do Rosário.....	35
Figura 11 - Funcionamento do princípio de comparação de fases.....	36
Figura 12 - Laser scanner da linha Faro Focus.....	37
Figura 13 - Nuvem de pontos da Igreja Nossa Senhora do Rosário antes da limpeza.....	41
Figura 14 - Nuvem de pontos da Igreja Nossa Senhora do Rosário após a limpeza.....	41
Figura 15 - Segmentação de nuvem de pontos.....	42
Figura 16 - Nuvem de pontos em malha de um fragmento histórico.....	43
Figura 17 - a) Malha texturizada; b) Modelo matemático (NURBS) e c) Ortofoto.....	45
Figura 18 - Modelo vetorial integrado da nuvem de pontos.....	46
Figura 19 - a) Teatro José de Alencar em 1928; b) Teatro José de Alencar em 2023.....	51
Figura 20 - Configuração do processo de varredura.....	52
Figura 21 - Modelos digitais do teatro.....	52
Figura 22 - Nuvem de pontos do teatro.....	52
Figura 23 - Atualização da documentação da fachada principal.....	53
Figura 24 - Atualização da documentação do foyer.....	54
Figura 25 - Atualização da documentação da fachada metálica.....	55
Figura 26 - Atualização da documentação 3D do teatro.....	55
Figura 27 - Igreja La Anunciación (Sevilha).....	57
Figura 28 - Software LEICA Cyclone REGISTER.....	57
Figura 29 - Digitalização do interior da igreja com o scanner RIEGL VZ400i.....	58
Figura 30 - Desvio da nuvem de pontos entre o BLK360 e o RIEGL VZ400i.....	59
Figura 31 - Distribuição dos pontos de segmentação na cornija com o scanner BLK360 e RIEGL VZ400i.....	61
Figura 32 - Distribuição dos pontos de segmentação na cornija com os scanners BLK360 e RIEGL VZ400i.....	61
Figura 33 - a) Amostra dos modelos texturizados fotogramétricos 3D gerados dos edifícios de alto risco em Beirute; b) Elevação norte do Palácio de Surssock: à direita, parte da ortofoto texturizada; à esquerda, parte da classificação do campo escalar da nuvem de pontos da elevação mostrando a deformação estrutural.....	65
Figura 34 - Tabela com os resultados do processamento de imagens dos edifícios de alto risco.....	66
Figura 35 - a) Ortofotos texturizadas das quatro elevações e vista superior de um dos edifícios de alto risco; b) Modelo 3D extraído e as ortofotos texturizadas de um dos telhados inclinado; c) Foto do escoramento estrutural instalado na elevação externa; d) Foto da instalação do abrigo no telhado inclinado; e) Ortofoto texturizada de uma seção interna; f) Ortofoto	

texturizada da planta interna do teto.....	68
Figura 36 - Diagrama do fluxo de trabalho de digitalização com as etapas da missão de documentação 3D em Beirute.....	69
Figura 37 - Localização da fortaleza de Klodzko.....	71
Figura 38 - Gráfico do número de visitantes da Fortaleza de Kłodzko antes da pandemia de SARS COVID 19 (verde) e após o ano de duração da pandemia (vermelho).....	72
Figura 39 - Estágios da varredura por ano.....	73
Figura 40 - Modelo 3D de fotogrametria.....	73
Figura 41 - Diagrama de fluxo do processo. ....	74
Figura 42 - Interface do usuário. ....	75
Figura 43 - Resultados de uma pesquisa inicial de avaliação do aplicativos com 50 participantes.....	75
Figura 44 - Inserção de informação da plataforma Aioli.....	77
Figura 45 - Interface da plataforma Aioli. ....	78
Figura 46 - Tabela com a visão geral dos métodos propostos. ....	79
Figura 47 - Primeiro método de implementação: os usuário realizam a anotação manual em uma única imagem.....	80
Figura 48 - Implementação do segundo método: projeção do conjunto de imagens para a nuvem de pontos.....	81
Figura 49 - Fachada da Escola de Engenharia em Pisa: 1) Conjunto de imagens existentes; 2) Conjunto classificado pelo DL; 3) Projeção de dados na nuvem de pontos.....	82
Figura 50 – Casa de José de Alencar a) Fachada frontal; b) Fachada lateral. ....	90
Figura 51 – Fluxo de trabalho do HBIM. ....	91
Figura 52 – Configuração do processo de digitalização: a) Configuração do tripé do scanner a laser; b) Localização das varreduras.....	93
Figura 53 – Pré-processamento do escaneamento a laser: a) Registro da digitalização; b) Ajuste planimétrico do link 14; c) Ajuste altimétrico do link 14; d) Ajuste planimétrico do link 16; e) Ajuste altimétrico do link 16. ....	93
Figura 54 Pré-processamento do escaneamento a laser: a) Limpeza da nuvem de pontos; b) Nuvem de pontos limpa; c) Visualização no TruSlicer.....	94
Figura 55 – Modelo 3D da nuvem de pontos pronto para exportação. ....	95
Figura 56 – Modelo 3D da nuvem de pontos para exportação.....	95
Figura 57 – Modelos da casa histórica: a) 2D no AutoCAD; b) Modelo 3D no Revit.....	96
Figura 58 – Modelo 3D renderizado da casa José de Alencar: a) Fachada frontal; b) Fachada lateral. ....	96
Figura 59 – Modelo numérico da casa José de Alencar.....	98
Figura 60 - a) Representação esquemática dos deslocamentos; b) Detalhes da fixação da parede.....	99
Figura 61 – Levantamento 3D da casa José de Alencar: a) Modelo 3D da nuvem de pontos b) Modelo 3D do Revit. ....	100
Figura 62 – Comparação entre os dois modelos 3D: a) Fachada da casa; b) Detalhe interno da casa. ....	101
Figura 63 – Planta baixa da casa (identificação das paredes).....	102
Figura 64 – Mapeamento de danos da casa: a) Fissuras nas paredes; b) Movimentação da parede interna. ....	104
Figura 65 – Detalhes das tensões normais no eixo Z. ....	105
Figura 66 – Detalhes da tensão máxima no eixo Z.....	105
Figura 67 – Comparação entre os resultados da modelagem numérica e os danos.....	106
Figura 68 – Igreja Nossa Senhora do Rosário, Aracati-CE. ....	116
Figura 69 – Imagem do presbitério, altar-mor e retábulo da Igreja.....	117

Figura 70 – Imagem do laser scanner Leica BLK 360.....	119
Figura 71 – Locais de captura no pavimento térreo. ....	120
Figura 72 – Locais de captura no pavimento superior.....	120
Figura 73 – Nuvem de pontos após o registro e alinhamento de todas as cenas. ....	121
Figura 74 – Fachada frontal da igreja.....	122
Figura 75 – Conexões entre os pontos de captura das cenas.....	122
Figura 76 – Nuvem de pontos após a etapa de processamento. ....	123
Figura 77 – Nuvem de pontos após limpeza dos espaços a serem medidos.....	124
Figura 78 – Modelagem 3D da igreja a partir da nuvem de pontos. ....	125
Figura 79 – Modelagem 3D da igreja a partir da nuvem de pontos. ....	125
Figura 80 - a) Planta baixa do térreo; b) Planta baixa do piso superior.....	126
Figura 81 - Elevações: a) Sul; b) Leste; c) Oeste e d) Norte. ....	127
Figura 82 – Corte longitudinal.....	127
Figura 83 – Modelagem 3D da igreja a partir da nuvem de pontos. ....	128
Figura 84 – Identificação das paredes da igreja. ....	129
Figura 85 – Áreas do modelo 3D.....	130



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sistemas de escaneamento a laser e usos.....	31
Tabela 2 – Desvios entre a estação total alinhada com os conjuntos de dados da Leica 910 em metros.....	59
Tabela 3 – Desvios entre as nuvens de pontos segmentadas (TLSiB e TLSiR).....	60
Tabela 4 – Propriedades mecânicas do macro-elemento.....	98
Tabela 5 – Valores médios da diferença de espessura das paredes da casa.....	103
Tabela 6 – Valores da áreas dos cômodos por modelo.....	130
Tabela 7 – Valores médios da diferença das espessuras das paredes da igreja.....	130

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b> .....	18
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b> .....	19
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	19
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	19
<b>1.3</b>	<b>Estrutura da dissertação</b> .....	19
<b>2</b>	<b>DIGITALIZAÇÃO DO PATRIMÔNIO CULTURAL</b> .....	21
<b>2.1</b>	<b>Fundamentos da digitalização do patrimônio cultural</b> .....	21
<b>2.1.1</b>	<b>Definição e escopo da digitalização do patrimônio histórico</b> .....	21
<b>2.1.2</b>	<b>Tecnologias e técnicas utilizadas na digitalização</b> .....	21
<b>2.1.2.1</b>	<i>Fotogrametria</i> .....	21
<b>2.1.2.2</b>	<i>Laser scanning</i> .....	24
<b>2.1.2.3</b>	<i>Digitalização por luz estruturada</i> .....	26
<b>2.1.2.4</b>	<i>Digitalização por tomografia computadorizada</i> .....	27
<b>2.1.3</b>	<b>Desafios e limitações da digitalização do patrimônio histórico</b> .....	28
<b>2.1.3.1</b>	<i>Conservação dos objetos originais</i> .....	28
<b>2.1.3.2</b>	<i>Custos e recursos</i> .....	29
<b>2.1.3.3</b>	<i>Questões éticas e legais</i> .....	29
<b>2.1.3.4</b>	<i>Preservação a longo prazo dos dados digitais</i> .....	29
<b>2.1.3.5</b>	<i>Autenticidade e fidelidade</i> .....	30
<b>2.1.3.6</b>	<i>Acesso e diversidade</i> .....	30
<b>2.1.3.7</b>	<i>Limitações tecnológicas</i> .....	30
<b>2.2</b>	<b>Digitalização por escaneamento a laser</b> .....	31
<b>2.2.1</b>	<b>Princípios do escaneamento a laser</b> .....	31
<b>2.2.1.1</b>	<i>Princípio de triangulação</i> .....	32
<b>2.2.1.2</b>	<i>Princípio ToF (time-of-flight)</i> .....	33
<b>2.2.1.3</b>	<i>Princípio de comparação de fases</i> .....	36
<b>2.2.1.4</b>	<i>Considerações sobre os princípios</i> .....	37
<b>2.2.2</b>	<b>Aquisição de dados</b> .....	38
<b>2.2.2.1</b>	<i>Planejamento</i> .....	38
<b>2.2.2.2</b>	<i>Parâmetros de aquisição de dados</i> .....	39
<b>2.2.2.2.1</b>	<i>Resolução e precisão</i> .....	39
<b>2.2.2.2.2</b>	<i>Intensidade e cor</i> .....	39
<b>2.2.2.2.3</b>	<i>Rede de controle</i> .....	40
<b>2.2.3</b>	<b>Processamento de dados</b> .....	40
<b>2.2.3.1</b>	<i>Limpeza e filtragem</i> .....	40
<b>2.2.3.2</b>	<i>Segmentação, classificação e corte</i> .....	41
<b>2.2.3.3</b>	<i>Geração de malha e modelo</i> .....	43
<b>2.2.3.4</b>	<i>Modelos texturizados e aplicação de imagens</i> .....	44
<b>2.2.3.5</b>	<i>Vetorização</i> .....	45
<b>2.2.4</b>	<b>Produtos finais do processamento</b> .....	47
<b>2.3</b>	<b>Modelagem da informação de edificações existentes</b> .....	47
<b>2.3.1</b>	<b>Modelagem da informação da construção (BIM)</b> .....	47
<b>2.3.2</b>	<b>Modelagem da informação da construção e patrimônio (HBIM)</b> .....	49
<b>2.3.2.1</b>	<i>Fluxo de trabalho do HBIM</i> .....	50
<b>2.4</b>	<b>Estudos de casos</b> .....	50
<b>2.4.1</b>	<b>Digitalização de edificações históricas</b> .....	50

2.4.2	<i>Projetos de controle e preservação do patrimônio histórico</i> .....	63
2.4.3	<i>Interação virtual com o patrimônio histórico</i> .....	71
2.4.4	<i>O patrimônio histórico e as tecnologias de aprendizado de máquina</i> .....	76
2.4.5	<i>Desafios e perspectivas futuras da digitalização do patrimônio</i> .....	83
2.4.5.1	<i>Melhorias na qualidade e velocidade da digitalização</i> .....	83
2.4.5.2	<i>Integração de Tecnologias Emergentes</i> .....	84
3	<b>DIGITALIZAÇÃO BASEADA EM ESCANEAMENTO DE ALTA RESOLUÇÃO E FERRAMENTAS HBIM PARA AVALIAÇÃO DE DANOS NA CASA JOSÉ DE ALENCAR</b> .....	85
3.1	<b>Introdução</b> .....	85
3.2	<b>Estudo de caso: Casa José de Alencar</b> .....	89
3.3	<b>Materiais e métodos</b> .....	90
3.1.1	<i>Planejamento</i> .....	91
3.1.2	<i>Aquisição de dados e processamento</i> .....	92
3.1.3	<i>Montagem da nuvem de pontos e modelagem BIM</i> .....	95
3.1.4	<i>Inspeção visual</i> .....	97
3.1.5	<i>Simulação numérica</i> .....	97
3.1.5.1	<i>Cargas e propriedades mecânicas do modelo</i> .....	98
3.4	<b>Resultados e discussões</b> .....	99
3.4.1	<i>Montagem da nuvem de pontos e modelagem 3D HBIM</i> .....	99
3.4.2	<i>Comparação entre os modelos 3D</i> .....	100
3.4.3	<i>Mapeamento de danos</i> .....	103
3.4.4	<i>Análise numérica</i> .....	105
3.5	<b>Comentários finais</b> .....	107
4	<b>DIGITALIZAÇÃO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO: IGREJA NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO, ARACATI-CE</b> .....	109
4.1	<b>Introdução</b> .....	109
4.2	<b>Estudo de caso – Igreja Nossa Senhora do Rosário</b> .....	115
4.3	<b>Materiais e métodos</b> .....	117
4.3.1	<i>Planejamento</i> .....	118
4.3.2	<i>Aquisição e processamento dos dados</i> .....	118
4.3.3	<i>Modelagem BIM</i> .....	124
4.3.4	<i>Levantamento 2D</i> .....	126
4.4	<b>Resultados e discussões</b> .....	128
4.4.1	<i>Modelagem 3D</i> .....	128
4.4.2	<i>Comparação entre os modelos 2D e 3D</i> .....	128
4.5	<b>Comentários finais</b> .....	131
5.	<b>CONCLUSÃO</b> .....	133
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	135
	<b>PUBLICAÇÕES DECORRENTES DESTA DISSERTAÇÃO</b> .....	146

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, o patrimônio cultural edificado é afetado por problemas como deterioração, ações antropogênicas, especulação imobiliária e crescimento urbano desordenado. A falta de registros precisos e detalhados aliados às limitações das técnicas tradicionais de documentação, dificultam a preservação e o gerenciamento adequado dessas edificações (FONTENELE, 2022). No entanto, avanços tecnológicos, como o escaneamento a laser e as ferramentas de processamento tridimensional, oferecem soluções promissoras para aquisição, visualização e disseminação de dados precisos, superando as limitações das abordagens convencionais. Essas tecnologias permitem uma documentação mais eficiente e detalhada, contribuindo para a preservação do patrimônio histórico-arquitetônico brasileiro (GROETELAARS, 2015). No contexto do patrimônio cultural, as ferramentas digitais avançadas desempenham um papel importante na preservação e manutenção, ao mesmo tempo em que contribuem para um impacto econômico significativo, uma vez que o turismo cultural é responsável por 40% do turismo global (NOONAN; RIZZO, 2017; UNESCO, 2020).

A demanda por representações tridimensionais na área da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) está em crescimento, especialmente na documentação e preservação do patrimônio cultural. Com avanços em ferramentas e métodos, a geração de modelos geométricos de alta qualidade tornou-se mais viável. Esses modelos tridimensionais oferecem vantagens significativas em relação às representações bidimensionais, permitindo uma comunicação eficaz sobre o estado físico de uma edificação, incluindo deformações e danos, através de uma interface intuitiva, rápida e atraente. Dependendo da tecnologia utilizada, esses modelos também podem fornecer informações adicionais além da geometria, como dados históricos, estado de conservação, materiais e técnicas construtivas. Além disso, a visualização interativa em 3D possibilita explorar os modelos sob diferentes ângulos, analisá-los em detalhes e organizá-los com regras semânticas específicas (REMONDINO, 2011).

Buscando uma representação mais completa e precisa das edificações, a metodologia Building Information Modeling (BIM) evoluiu para incluir informações geométricas, topológicas, semânticas e gráficas dos componentes da construção. Embora o BIM tenha sido amplamente adotado nas fases de projeto e construção de novas edificações, há um crescente interesse em utilizar modelos BIM para representar estruturas existentes, a fim de apoiar ações como reformas, restaurações, demolições e a operação e manutenção

(GROETELAARS, 2015). Essa metodologia foi denominada por Murphy, McGovern e Pavia (2009) como Heritage Building Information Modeling (HBIM), modelagem da informação de construções patrimoniais, e foi apresentada como uma abordagem abrangente para mapear o patrimônio cultural (PC). Diferente do BIM tradicional, que se concentra principalmente na documentação precisa da geometria de um objeto, o HBIM aplica a metodologia BIM ao patrimônio construído, levando em consideração também informações relevantes sobre o valor histórico e artístico do edifício.

Em outras palavras, o HBIM vai além da representação visual e busca capturar todos os aspectos do patrimônio cultural em um modelo digital. Isso inclui não apenas a geometria do edifício, mas também dados relacionados à história, arquitetura, materiais utilizados, técnicas construtivas, estado de conservação e qualquer outra informação relevante para preservar e documentar o valor cultural do patrimônio (CROCE et al., 2023).

O objetivo principal do HBIM é fornecer uma base sólida para a gestão e conservação do patrimônio cultural. Ao criar um modelo digital detalhado e informativo, os profissionais envolvidos na preservação e manutenção desses edifícios podem tomar decisões mais informadas e precisas. Além disso, o HBIM pode permitir a análise e simulação de intervenções, tornando mais fácil planejar e executar projetos de restauração e reabilitação (KALLAS; NAPOLITANO, 2023).

O desenvolvimento do HBIM depende da integração de novas tecnologias. A digitalização a laser e a fotogrametria são algumas tecnologias que podem fornecer dados para a criação de modelos 3D precisos de edifícios de CH, possibilitando altos níveis de detalhes geométricos e o entendimento da história dos edifícios, modelando sua quarta dimensão e apoiando estratégias de longo prazo (MAMMOLI; MARIOTTI; QUATTRINI, 2021).

Nesse cenário, a literatura recente apresenta diferentes estudos de caso em que os modelos HBIM as-built são criados a partir de fontes de dados de sensoriamento remoto. Tortosa et al. (2017) fizeram um levantamento com laser scanner terrestre (LST) da fachada de uma igreja histórica e sugeriram um fluxo de trabalho para criar um modelo HBIM, que envolveu a geração de malha a partir das nuvens de pontos 3D brutas, um aprimoramento dessa malha e uma integração em uma plataforma BIM usando o software Revit.

Santagati et al. (2021) analisaram o estado de conservação da catedral de São João, o Teólogo, em Nicósia (Chipre), digitalizando o edifício com LST e fotogrametria, e criando um modelo 3D paramétrico que permite o tratamento das informações de documentação e restauração seguindo a metodologia HBIM. Do mesmo modo, Angulo-Fornos e Castellano-Román (2020) e Mora et al. (2021) empregaram o HBIM para apoiar

ações de conservação preventiva na fachada da Catedral de Sevilha e na fachada da Catedral de São Paulo.

Nesse contexto, a presente dissertação visa apresentar estratégias para digitalização do patrimônio, de forma aplicada, identificando as vantagens e as limitações da digitalização do patrimônio cultural, abordando as principais tecnologias e ferramentas de forma direta, mostrando as metodologias e resultados de estudos de casos recentes.

## **1.1 Justificativa**

A preservação dos edifícios históricos é de extrema importância, considerando os aspectos históricos, sociais, econômicos e ambientais relacionados a essas estruturas. Não obstante, é comum encontrar essas construções em condições precárias de conservação, apresentando diversas anomalias que frequentemente ocorrem simultaneamente ou possuem origens semelhantes. O contínuo processo de deterioração ressalta a necessidade de documentação como uma atividade essencial para registrar a comunicação entre todas as entidades envolvidas nesse processo.

Com o uso do levantamento em 3D é possível apoiar diferentes tipos de análises e novas intervenções de projeto. Esse método pode contribuir para compreender o atual estado de degradação, as técnicas de construção, os materiais e cores utilizados, a acessibilidade, a organização espacial e as características arquitetônicas e urbanas dos edifícios históricos (MATEUS et al., 2019).

Nesse contexto, a aplicação de tecnologias como o escaneamento a laser de alta resolução e o HBIM na preservação de edificações históricas pode trazer benefícios econômicos significativos. Essas tecnologias fornecem informações precisas para a elaboração de orçamentos e agilidade no levantamento arquitetônico, permitindo uma avaliação precisa das condições das estruturas e evitando estimativas imprecisas. Além disso, o uso do HBIM possibilita um planejamento estratégico de manutenção, a simulação de diferentes intervenções e a colaboração eficiente entre profissionais. A tecnologia também permite o monitoramento contínuo do estado de conservação, facilitando a detecção precoce de problemas e reduzindo custos com manutenções corretivas. Em resumo, essas tecnologias contribuem para uma gestão financeira mais eficiente das atividades de manutenção, promovendo economia de recursos e uma preservação adequada do patrimônio histórico. Nessa linha, este trabalho apresenta considerável contribuição científica na busca por metodologias e estratégias que auxiliem no processo de preservação do bem histórico por

meio da sua digitalização e documentação.

## **1.2 Objetivos**

### ***1.2.1 Objetivo geral***

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver estratégias para a digitalização do patrimônio cultural integrado com tecnologia de alta resolução de nuvem de pontos e HBIM aplicado à estudos de caso.

### ***1.2.2 Objetivos específicos***

A realização do objetivo principal passa pela execução dos objetivos específicos, a seguir.

- Revisar e analisar as principais técnicas da digitalização do patrimônio histórico e suas interações com as tecnologias recentes;
- Desenvolver estratégias para aplicação de metodologia HBIM e a coleta de dados de nuvem;
- Analisar e comparar a precisão dos modelos 3D (nuvem de pontos) e 2D.

## **1.3 Estrutura da dissertação**

Esta pesquisa está organizada em 5 capítulos. O primeiro capítulo apresenta a importância da pesquisa, contexto, justificativa e os objetivos. No segundo capítulo é apresentado o estado da arte da digitalização do patrimônio histórico, os principais conceitos, técnicas e tecnologias empregadas, desafios futuros e limitações. Além disso, foram analisados alguns trabalhos com o intuito de contextualizar o tema e apresentar as principais linhas de pesquisa, analisando-os e sugerindo intervenções. Os capítulos 3 e 4 foram escritos em formato de artigo científico, a fim de facilitar a organização e o processo de publicação dos resultados encontrados.

O capítulo 3 apresenta o trabalho desenvolvido na casa histórica de José de Alencar, localizada no município de Fortaleza, capital do Ceará. O objetivo do trabalho foi avaliar os danos existentes na casa utilizando ferramentas integradas de HBIM e procedimentos experimentais.

O capítulo 4 apresenta o trabalho desenvolvido na Igreja Nossa Senhora do Rosário em Aracati-CE. O objetivo do trabalho foi digitalizar a edificação utilizando a tecnologia de varredura a laser terrestre. Ao final, uma comparação dos valores das áreas dos cômodos e da espessura das paredes encontrados nos modelos 3D (nuvem de pontos) e 2D do ano de 2010.

Por fim, o capítulo 5 contém as considerações finais. Nele são feitos comentários sobre a proposta da pesquisa, onde foram identificadas as suas contribuições, desafios, limitações e possíveis melhorias.



## **2 DIGITALIZAÇÃO DO PATRIMÔNIO CULTURAL**

### **2.1 Fundamentos da digitalização do patrimônio cultural**

#### ***2.1.1 Definição e escopo da digitalização do patrimônio histórico***

A digitalização do patrimônio cultural é um campo em rápido crescimento que se concentra na criação de representações digitais precisas e detalhadas de objetos, estruturas e lugares com significado histórico, cultural e artístico. É um processo essencial para preservar, documentar e acessar virtualmente o patrimônio histórico, contribuindo para sua divulgação, pesquisa e conservação (GROETELAARS, 2015; SILVA; GROETELAARS, 2021). É ainda importante destacar que a digitalização do patrimônio modifica as formas de interação e percepção dos usuários.

O escopo da digitalização do patrimônio cultural abrange uma ampla gama de elementos. Isso inclui artefatos arqueológicos, como cerâmicas, ferramentas e ornamentos; obras de arte, como pinturas, esculturas e gravuras; edifícios históricos e monumentos arquitetônicos; sítios arqueológicos, incluindo ruínas e cidades antigas; manuscritos, livros raros e documentos históricos; e até mesmo paisagens culturais, como parques históricos e áreas naturais de valor cultural (REIS, 2019).

O objetivo central da digitalização é capturar os aspectos geométricos desses objetos e locais de maneira digital, preservando sua aparência, estrutura e contexto histórico para as gerações futuras. Isso envolve a aplicação de várias tecnologias e técnicas avançadas, bem como a incorporação de informações contextuais e narrativas para enriquecer a experiência dos usuários (INÊS, 2022).

#### ***2.1.2 Tecnologias e técnicas utilizadas na digitalização***

A digitalização do patrimônio cultural requer a aplicação de uma ampla variedade de tecnologias e técnicas para capturar e representar de forma precisa e abrangente os objetos e locais de interesse histórico.

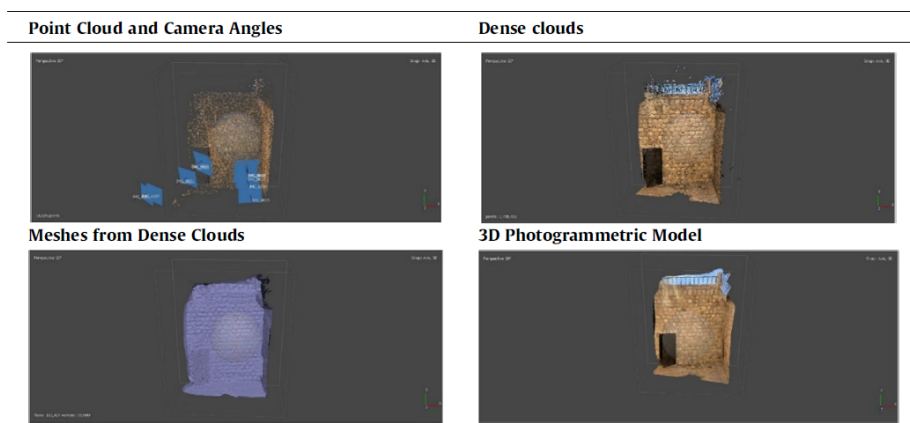
##### ***2.1.2.1 Fotogrametria***

A fotogrametria é uma técnica amplamente utilizada para a obtenção de dados

tridimensionais de objetos físicos e seus arredores, por meio da reconstrução de modelos a partir de imagens bidimensionais (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014). Essa tecnologia que foi inicialmente introduzida pelo arquiteto Albrecht Meydenbauer em 1867, com o propósito de documentar uma igreja na Alemanha (J. ALBRECHT, 2001), tem desempenhado um papel crucial em diversos campos da engenharia (COLOMINA; MOLINA, 2014; OMAR; MAHDJOUBI; KHEDER, 2018; PEPE; FREGONESE; SCAIONI, 2018; BRAUN; BORRMANN, 2019).

A digitalização por fotogrametria é uma técnica que se fundamenta na captura de fotografias usando diversos tipos de câmeras, seja a partir do solo ou de posições elevadas, como aquelas obtidas por meio do VANT (Veículo aéreo não-tripulado) ou UAV (*Unmanned Serial Vehicle*), como os populares drones. Essas fotografias são utilizadas para criar informações detalhadas da área ou objeto de interesse, podendo abranger desde pequenos artefatos e elementos de construção até edifícios, bairros inteiros e até mesmo cidades inteiras, como é possível visualizar nas vistas aéreas em 3D disponibilizadas pelo *Google Maps*. Para obter os dados necessários, as imagens capturadas são processadas através de software especializado, que as converte em um modelo de nuvem de pontos. Esse modelo preserva as medidas e texturas reais, o que contribui para uma representação fiel do objeto ou área digitalizada (MOHAREB; ALSALLOUM; WEBB, 2023). A Figura 1 apresenta os estágios para a geração de um modelo 3D a partir da fotogrametria. A primeira etapa é a aquisição das imagens com uma câmera, em seguida o alinhamento dessas imagens e a criação da nuvem de pontos. A segunda etapa consiste na obtenção da nuvem de pontos densa e o terceiro estágio é a criação da malha a partir da nuvem de pontos. Por fim, o modelo 3D fotogramétrico é gerado com texturas e detalhes (KUTLU; SOYLUK, 2023).

Figura 1 - Estágios da geração de um modelo 3D fotogramétrico.



Fonte: (KUTLU; SOYLUK, 2023)

Na área do patrimônio cultural, a fotogrametria tem se destacado como uma ferramenta eficiente para a reconstrução tridimensional de modelos, com o objetivo de documentação e análise. Por exemplo, pesquisadores como (GALANTUCCI; FATIGUSO; GALANTUCCI, 2018; GALANTUCCI; FATIGUSO, 2019) utilizaram a fotogrametria para criar um modelo tridimensional de um edifício histórico na Itália, a partir do qual foram geradas ortofotos que permitiram a identificação de danos estruturais. Em outro estudo, (BISCARINI et al., 2020) empregaram imagens capturadas por VANT para reconstruir um modelo tridimensional de uma ponte histórica, possibilitando a classificação de diferentes materiais presentes na estrutura. Além disso, a fotogrametria também tem sido aplicada em sítios arqueológicos, como demonstrado por (FORLIN; VALENTE; KÁZMÉR, 2018), que obtiveram ortofotos adicionais de modelos tridimensionais para identificar padrões de rachaduras nas paredes de edifícios causadas por terremotos.

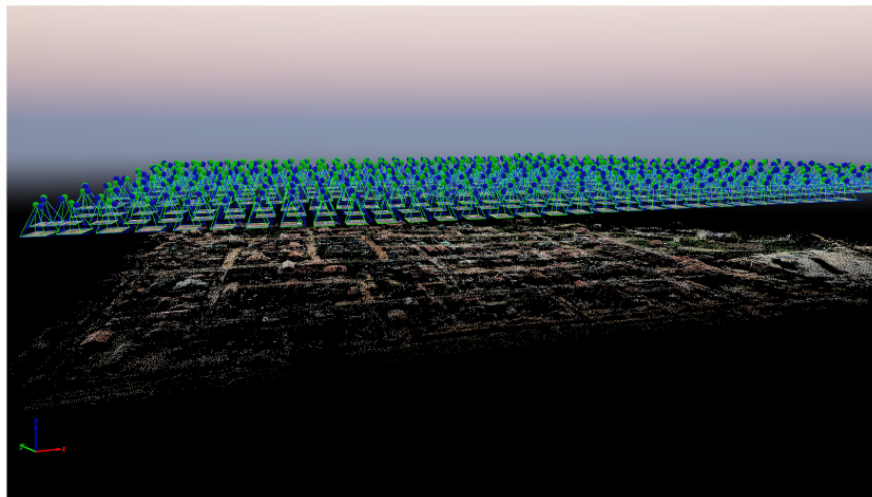
Os modelos tridimensionais obtidos por meio da fotogrametria possuem texturas de superfície de alta resolução espacial, o que os torna ideais para investigar a evolução e mudanças na deterioração estrutural ao longo do tempo. Estudos como o de Iheaturu et al. (2022), que utilizou VANT e fotogrametria para obter nuvens de pontos tridimensionais densas para a criação de mapas digitais para pequenas áreas suburbanas e a realização de análises de desenvolvimento urbano. Além disso, os resultados obtidos podem ajudar planejadores urbanos e autoridades de desenvolvimento a tomar decisões informadas sobre questões de desenvolvimento urbano na área estudada. Galantucci e Fatiguso (2019), por sua vez, propuseram uma metodologia de monitoramento da saúde estrutural em edifícios históricos, focando em mudanças de modelo em áreas estruturais de pequena escala e mudanças geométricas ao longo de perfis de elevação bidimensionais. Apesar dos avanços mencionados, é importante ressaltar a escassez de abordagens de processamento de dados relacionadas ao monitoramento de estruturas históricas em larga escala e acessíveis em vários períodos de inspeção.

No entanto, a fotogrametria continua a evoluir e se tornar um método preferencial nos estudos de documentação, estando em constante desenvolvimento paralelo às inovações tecnológicas, como fotografia, aviões, computadores e digitalização (SELVAGGI, 2017), (DORFFNER; FORKERT, 1998), (SNAVELY; SEITZ; SZELISKI, 2008), (ARIAS et al., 2005), (KERSTEN; MECHELKE; MAZIULL, 2015). Sua praticidade e versatilidade a tornam uma ferramenta essencial em áreas como arquitetura, engenharia, arqueologia e sistemas de informações geográficas (SIG). Através da fotogrametria, é possível obter

informações confiáveis sobre as propriedades de superfícies e objetos sem a necessidade de contato físico, expandindo as possibilidades de pesquisa e análise em diversos campos (KUTLU; SOYLUK, 2023).

A fotogrametria UAV ou VANT é atualmente a mais popular em arquitetura e arqueologia, usada para criar mapas digitais, texturas, modelos 3D, calcular volumes e documentar edifícios históricos, graças à possibilidade de usando instrumentos de baixo custo. Ambas as técnicas baseadas em alcance e baseadas em imagens retornam dados na forma de nuvens de pontos, a partir das quais produtos geoespaciais podem ser gerados. Após um tratamento adequado dos dados é possível extrair produtos geoespaciais, bem como geometrias para a criação de modelos paramétricos aos quais são adicionados valores semânticos (CHEVRIER et al., 2010; GIUFFRIDA et al., 2022). Todavia, aspectos de precisão ainda são pontos críticos dessa técnica.

Figura 2 - Nuvem de pontos esparsa gerada na fase de processamento inicial e acima a localização das capturas realizadas pelo VANT.



Fonte: (IHEATURU et al., 2022)

### 2.1.2.2 Laser scanning

A varredura a laser terrestre, também conhecida como laser scanner terrestre ou terrestrial laser scanning (TLS), é uma técnica ativa que utiliza o laser para medir as coordenadas tridimensionais de pontos em superfícies. Diferentemente dos métodos passivos de coleta de dados, como a fotografia, os scanners a laser emitem e recebem sua própria radiação eletromagnética. O termo "varredura a laser" abrange uma variedade de instrumentos

que operam com diferentes princípios, ambientes e níveis de precisão. Eles podem ser montados em tripés, veículos, aeronaves ou até mesmo sistemas portáteis acoplados a mochilas, permitindo a coleta de dados em movimento (PESCI; TEZA; BONALI, 2011; REMONDINO, 2011; SAINT-PIERRE et al., 2016).

Os dados coletados durante o processo de varredura a laser são convertidos em uma nuvem de pontos, na qual cada ponto representa um detalhe da superfície com coordenadas cartesianas (x, y, z). Esses dados brutos de levantamento frequentemente incluem informações de intensidade da reflexão. É possível adicionar a cor da superfície em cada ponto por meio da análise de imagens capturadas pela câmera embutida ou por fotografias externas durante o processamento dos dados. Além disso, existem scanners de forma de onda completa que, principalmente em aplicações aéreas, fornecem informações adicionais sobre a extensão das reflexões dos pulsos de laser (BOARDMAN; BRYAN, 2018).

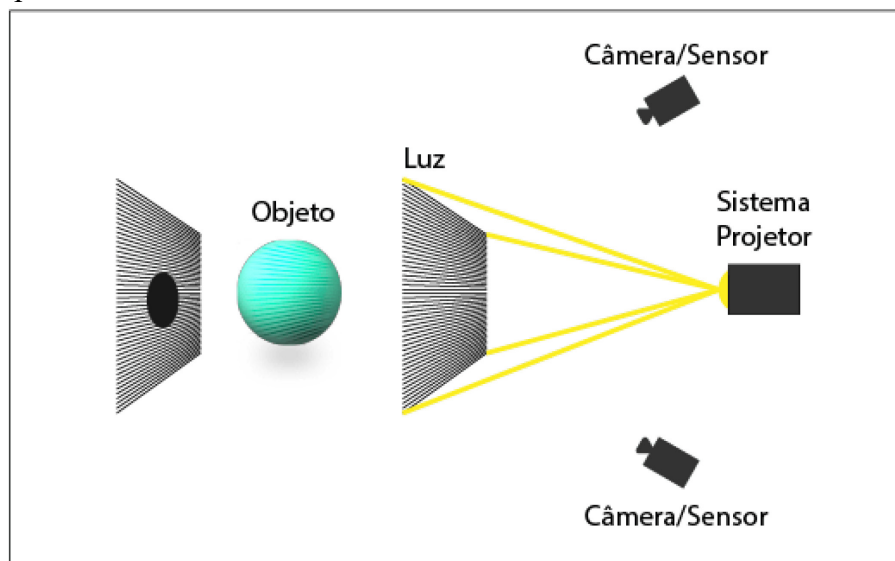
Essa tecnologia é amplamente utilizada na engenharia civil, topografia e em diversos campos. Ela oferece alta precisão, aquisição rápida de dados e a geração de grandes conjuntos de dados. O TLS é aplicado em diferentes domínios, incluindo modelagem 3D, detecção de fissuras, análise de umidade e monitoramento estrutural (LENDA et al., 2016; SÁNCHEZ-APARICIO et al., 2018; MISTRETTA, FAUSTO; SANNA, GIANNINA, STOCHINO, FLAVIO; VACCA, 2019; NOWAK; ORŁOWICZ; RUTKOWSKI, 2020). Com o TLS, é possível capturar detalhes finos e obter geometria precisa, permitindo a criação de modelos digitais tridimensionais altamente precisos.

No contexto de digitalização de patrimônios históricos, o laser scanning desempenha um papel importante. Ele permite a captura rápida e precisa de dados tridimensionais, gerando nuvens de pontos que representam a superfície do objeto ou ambiente escaneado (SHANOER; ABED, 2018). Existem diferentes tipos de laser scanning, como o escaneamento a laser terrestre e o escaneamento a laser móvel. O escaneamento terrestre é realizado por meio de equipamentos estacionários, enquanto o escaneamento móvel ocorre a partir de veículos ou plataformas móveis. Essas abordagens são particularmente úteis para digitalizar estruturas arquitetônicas complexas, grandes áreas externas e locais de difícil acesso (BOARDMAN; BRYAN, 2018). Embora o laser scanning possua diversas vantagens, ele pode apresentar desafios ao lidar com superfícies reflexivas, transparentes ou muito escuras. Para obter resultados mais precisos nessas situações, é necessário realizar ajustes adequados nos parâmetros de escaneamento e utilizar técnicas adicionais, como a aplicação de marcadores de referência (GROETELAARS, 2015).

### 2.1.2.3 Digitalização por luz estruturada

A digitalização por luz estruturada é uma técnica que envolve a projeção de padrões de luz em um objeto e a captura das deformações desses padrões por meio de sensores (Figura 3) (POLO; FELICÍSIMO; DUR, 2022). Essa abordagem permite a reconstrução precisa da geometria tridimensional e da textura do objeto (REMONDINO; EL-HAKIM, 2006). É especialmente útil na digitalização de superfícies curvas e detalhes minuciosos, como esculturas e relevos (Figura 4) (ZHANG, 2018).

Figura 3 - Esquema simplificado do funcionamento da digitalização por luz estruturada.



Fonte: Adaptado de ARC metrologia (2023)

Figura 4 - Digitalização por luz estruturada de uma escultura.



Fonte: (BOARDMAN; BRYAN, 2018)

Existem diferentes métodos de digitalização por luz estruturada, como a projeção de franjas e a projeção de padrões de grades. Esses métodos envolvem o uso de projetores e câmeras que trabalham em conjunto para capturar as deformações dos padrões projetados. A partir dessas deformações, é possível obter dados precisos sobre a forma, textura e relevo do objeto digitalizado (ZHANG, 2018).

A digitalização por luz estruturada é particularmente útil em casos em que a fotogrametria ou o laser scanning podem apresentar limitações. Ela permite capturar detalhes sutis e superfícies complexas com alta precisão. No entanto, assim como outras técnicas, pode encontrar dificuldades em superfícies reflexivas ou com pouca textura. A aplicação de agentes de pulverização fosca ou o uso de técnicas adicionais podem ajudar a superar esses desafios (RAMM et al., 2022).

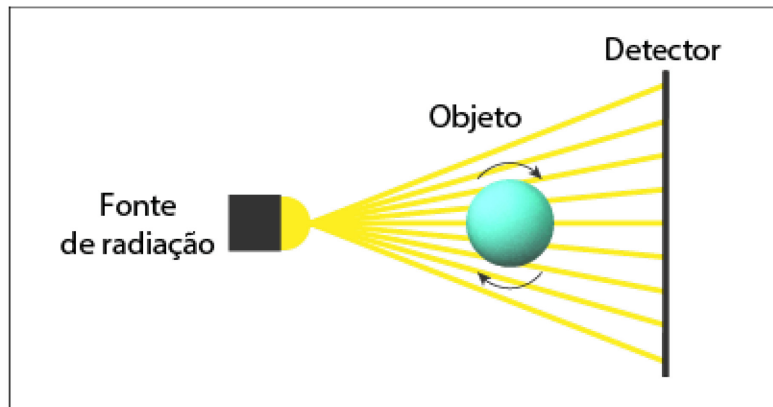
#### *2.1.2.4 Digitalização por tomografia computadorizada*

A digitalização por tomografia computadorizada (CT) é uma técnica avançada que utiliza Raios-X para criar modelos tridimensionais de objetos. Essa técnica é especialmente útil na digitalização de objetos frágeis, como artefatos arqueológicos, manuscritos e documentos históricos, pois permite visualizar o interior do objeto sem danificá-lo (ANASTASOVITIS; ROUMELIOTIS, 2023).

O processo de digitalização por CT envolve a aquisição de uma série de imagens de Raios-X em diferentes ângulos. Essas imagens são então processadas por meio de algoritmos de reconstrução para criar um modelo tridimensional detalhado do objeto (Figura 5). A digitalização por CT é capaz de revelar informações ocultas, como camadas de tinta sobrepostas, estruturas internas e outros detalhes que podem ser difíceis de serem visualizados a olho nu (RAMSEY, 2012).

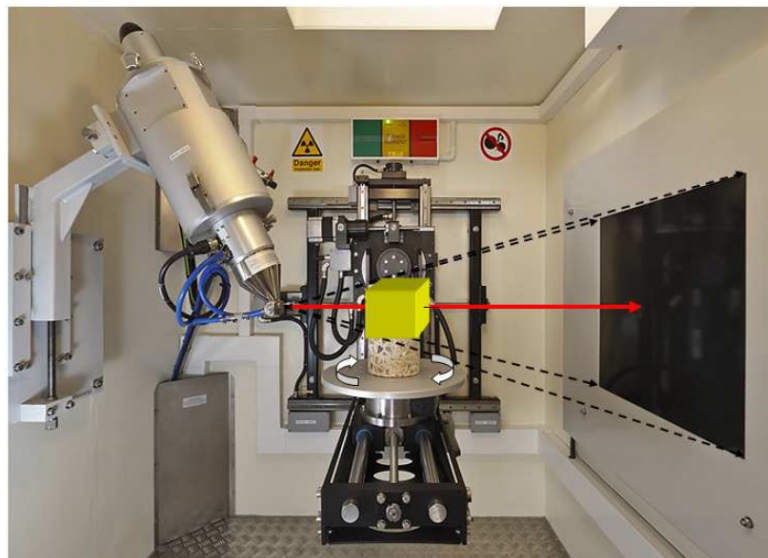
Ainda de acordo com, Anastasovitis e Roumeliotis (2023), a digitalização por CT é especialmente útil na pesquisa, análise e preservação de objetos delicados, fornecendo informações valiosas sobre sua estrutura interna, materiais e técnicas de fabricação. No entanto, a digitalização por CT requer equipamentos especializados e expertise técnica, tornando-a uma abordagem mais restrita em termos de acesso e recursos. Um exemplo é o sistema da empresa X-Tek, apresentado na Figura 6.

Figura 5 - Esquema simplificado do funcionamento da digitalização por tomografia computadorizada.



Fonte: Adaptado de Tetzner (2008)

Figura 6 - Sistema de TC de raio-x da X-Tek.



Fonte: (RAMSEY, 2012)

### ***2.1.3 Desafios e limitações da digitalização do patrimônio histórico***

Embora a digitalização do patrimônio histórico ofereça inúmeras vantagens, também apresenta desafios e limitações significativas que precisam ser considerados. Alguns dos principais desafios incluem:

#### ***2.1.3.1 Conservação dos objetos originais***

A digitalização do patrimônio histórico não substitui a necessidade de conservar e preservar os objetos originais. A exposição contínua às intempéries, ações do homem e outros



elementos ambientais pode danificar irreversivelmente essas estruturas. Portanto, é fundamental adotar práticas de conservação apropriadas e limitar a interferência durante o processo de digitalização. A conservação dos elementos originais é essencial para garantir sua sobrevivência a longo prazo e preservar sua autenticidade e integridade (VOLPATO, 2020).

#### *2.1.3.2 Custos e recursos*

Mesmo com a evolução das tecnologias e as diversas opções de software *open source*, as atividades que englobam a digitalização do patrimônio histórico requerem investimentos consideráveis em equipamentos especializados, tecnologias avançadas e profissionais capacitados (INÊS, 2022). Deve ser considerado também que o processamento e armazenamento dos dados digitais também exigem recursos significativos. A obtenção de financiamento adequado e a formação de parcerias colaborativas entre instituições são essenciais para viabilizar projetos de digitalização. Além disso, a falta de recursos financeiros e técnicos pode resultar em digitalizações de menor qualidade ou na exclusão de certos objetos ou locais (RODRIGUES, 2023).

#### *2.1.3.3 Questões éticas e legais*

Quando se trata de artefatos, edificações, monumentos e objetos históricos protegidos por direitos autorais, direitos de imagem, sensibilidade cultural e tombados por instituições oficiais, a digitalização do patrimônio histórico pode envolver questões éticas e legais complexas. É necessário obter permissões adequadas dos proprietários e respeitar as diretrizes éticas para garantir que os direitos sejam preservados e que a digitalização não cause danos ou apropriação indevida do patrimônio. Além disso, é fundamental considerar questões de privacidade e segurança ao compartilhar dados digitalizados, especialmente em casos envolvendo indivíduos ou comunidades (SONKOLY, GÁBOR; VAHTIKARI, 2018).

#### *2.1.3.4 Preservação a longo prazo dos dados digitais*

Os dados digitais resultantes da digitalização do patrimônio histórico devem ser preservados a longo prazo para garantir sua acessibilidade e utilização contínua. Isso envolve a implementação de estratégias de gerenciamento de dados, armazenamento seguro e migração para formatos atualizados ao longo do tempo. A preservação dos dados digitais é

fundamental para garantir que futuras gerações possam se beneficiar das informações e recursos disponíveis, evitando a obsolescência tecnológica e a perda de dados valiosos (SANTANA QUINTERO et al., 2019; MENDOZA; DE LA HOZ FRANCO; GÓMEZ, 2023).

#### *2.1.3.5 Autenticidade e fidelidade*

A digitalização do patrimônio histórico apresenta o desafio de capturar a autenticidade e fidelidade dos objetos originais. As texturas, cores, materiais e até mesmo as imperfeições são elementos essenciais que carregam significado histórico e artístico. É importante que as tecnologias de digitalização sejam capazes de reproduzir esses aspectos com precisão para garantir a autenticidade da experiência virtual (MURPHY; MCGOVERN; PAVIA, 2009; COTELLA, 2023). Garantir a integridade e autenticidade desses dados ao longo do tempo é essencial para preservar sua confiabilidade e valor histórico. A aplicação de métodos de preservação digital, como a utilização de metadados robustos e estratégias de verificação de integridade, é fundamental para manter a autenticidade dos dados digitalizados.

#### *2.1.3.6 Acesso e diversidade*

O acesso mais amplo e inclusivo a coleções e locais de importância histórica são facilitados através do emprego da digitalização dos ativos históricos. Pessoas que de outra forma não teriam a oportunidade de visitar esses locais ou ter acesso direto a objetos valiosos podem explorá-los virtualmente. Essa abordagem também ajuda a preservar e proteger o patrimônio contra danos causados pelo turismo excessivo, e pela ausência de público em período de pandemia e outros desastres (DE PAOLIS et al., 2022).

#### *2.1.3.7 Limitações tecnológicas*

Embora as tecnologias de digitalização tenham avançado significativamente, algumas limitações ainda estão presentes. A captura de objetos extremamente pequenos, como joias ou moedas antigas, pode ser desafiadora devido à necessidade de altos níveis de detalhes. Além disso, certas superfícies reflexivas ou transparentes podem causar problemas na captura precisa dos dados. O desenvolvimento contínuo de tecnologias e técnicas é necessário para superar essas limitações (VAN GENDEREN, 2011; BOARDMAN; BRYAN, 2018). Embora a digitalização do patrimônio histórico apresente desafios, as vantagens e o potencial dessa

prática são indiscutíveis. Com tecnologias avançadas e abordagens adequadas, a digitalização permite a preservação, a pesquisa e o acesso ampliado ao patrimônio histórico, enriquecendo nossa compreensão e apreciação da história e da cultura. É essencial continuar aprimorando as técnicas e abordagens existentes, além de desenvolver novas soluções para enfrentar os desafios associados à digitalização do patrimônio histórico.

## 2.2 Digitalização por escaneamento a laser

### 2.2.1 Princípios do escaneamento a laser

De acordo com Boardman e Bryan (2018), nos últimos anos, os equipamentos de escaneamento a laser tiveram avanços significativos. Houve um aumento na velocidade de coleta de dados, melhorias na qualidade dos dados, como a redução do elemento de ruído, e o desenvolvimento de métodos que permitem o levantamento rápido de áreas mais desafiadoras usando sistemas portáteis e montados em mochilas. A maioria dos scanners a laser opera com base em um dos três princípios de medição: triangulação, pulso (*time-of-flight*; ToF) ou comparação de fase. A Tabela 1 apresenta um resumo dos diferentes tipos, incluindo a precisão típica do sistema e os intervalos de operação. Nas seções a seguir, cada tipo será descrito em detalhes.

Tabela 1 - Sistemas de escaneamento a laser e usos.

Sistema de varredura	Objetivos e alvos	Precisão (mm)	Distância (m)	
<b>Triangulação</b>	Estágio de rotação	Objetos pequenos levados ao scanner (Produção de réplicas)	0.05	0.1 - 1
	Tipo braço montado	Objetos pequenos em laboratório ou campo (Produção de réplicas)	0.05	0.1 - 3
	Tripé	Objetos pequenos em campo (Produção de réplicas)	0.1 - 1	0.1 - 2.5
	Portátil de curta distância	Objetos pequenos em laboratório (Produção de réplicas)	0.03 - 1	0.2 - 0.3
	Móvel (Portátil)	Locais amplos e inadequados (interiores de edifícios, cavernas)	0.03 - 30	0.3 - 20
<b>Princípio ToF</b>	Terrestre	Exterior e interior de edificações (Desenhos, análises e modelos 3D)	1 - 6	0.5 - 1000

Tabela 1 - Sistemas de escaneamento a laser e usos.

		(Continua)		
<b>Sistema de varredura</b>	<b>Objetivos e alvos</b>	<b>Precisão (mm)</b>	<b>Distância (m)</b>	
Móvel (Veicular)	Paisagens de ruas, rodovias e ferrovias. (Desenhos, análises e modelos 3D)	10 - 50	10 - 200	
VANT	Telhados de edifícios, sítios arqueológicos (Mapeamentos e modelos 3D)	20 - 200	10 - 120	
Aéreo	Prospecção e mapeamento de grandes locais	50 - 300	100 - 3500	
<b>Comparação de fases</b>	Terrestre	Exterior e interior de edificações (Desenhos, análises e modelos 3D)	2 - 10	1 - 300

Fonte: Adaptado de (BOARDMAN; BRYAN, 2018)

### 2.2.1.1 Princípio de triangulação

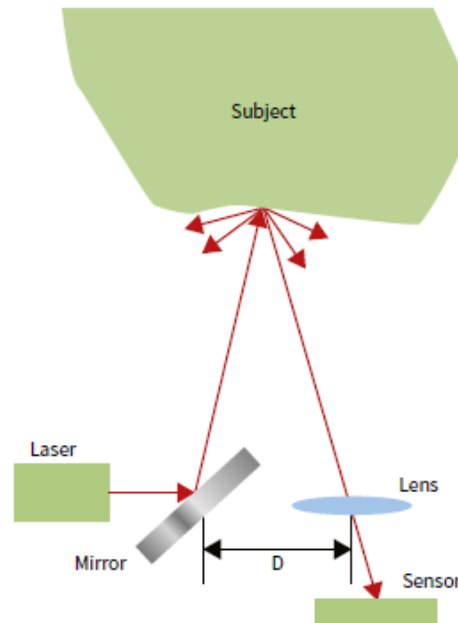
Os scanners a laser baseados no princípio de triangulação estão disponíveis em diversas formas. Existem scanners estáticos, por vezes, utilizados em laboratórios, que são usados para escanear objetos colocados em uma plataforma giratória, garantindo que todos os lados sejam cobertos. Há também scanners acoplados a braços articulados, que fornecem o referenciamento posicional. Esses scanners podem ser estáticos ou levados até o objeto. Além disso, existem scanners montados em tripés, que são usados em campo para escanear objetos e volumes maiores. Para trabalhos de curta distância, temos os scanners portáteis. E para uso em campo, abrangendo áreas extensas, existem os scanners portáteis e montados em mochilas (SELVAGGI, 2017).

Alguns desses scanners operam com luz branca em vez de lasers, projetando a luz em um padrão estruturado de faixas ou grades. Embora não sejam estritamente scanners a laser, eles operam em bases semelhantes. Os scanners de luz estruturada oferecem vantagens como segurança e cobertura de área mais rápida. No entanto, eles requerem um ambiente controlado de operação, uma vez que a luz ambiente pode afetar a qualidade da medição.

As coordenadas 3D são calculadas por meio da triangulação da posição de um ponto ou faixa de luz laser. O sistema de triangulação funciona com base na deflexão do laser pelo objeto por meio de um espelho rotativo, com cada reflexão focalizada no sensor pela lente. A localização do ponto no sensor, a separação conhecida ( $D$ ) entre a lente e o espelho, juntamente com o ângulo registrado do espelho, combinam-se para fornecer uma coordenada 3D com base na trigonometria básica. Como o instrumento projeta um ponto ou faixa curta, o espelho é necessário para distribuir sistematicamente a luz laser sobre o objeto (Figura 7)

(VAN GENDEREN, 2011).

Figura 7 - Funcionamento do princípio de triangulação.



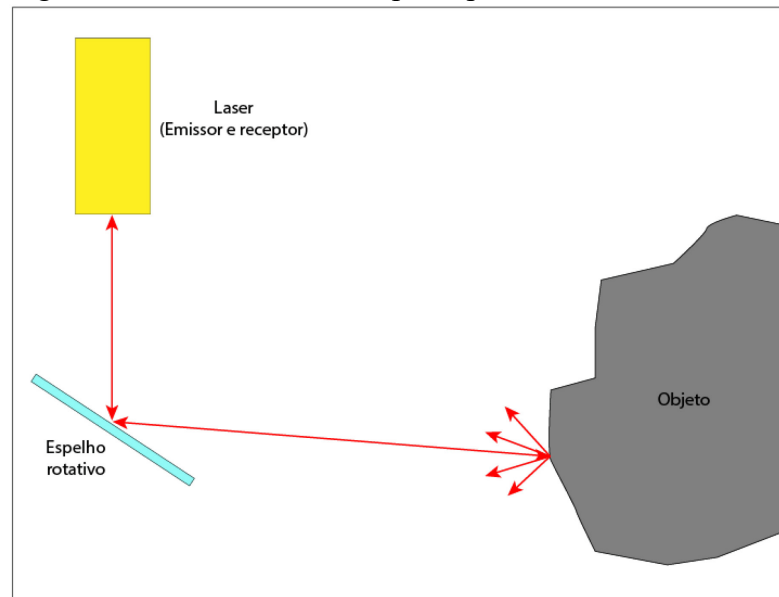
Fonte: (BOARDMAN; BRYAN, 2018)

### 2.2.1.2 Princípio ToF (time-of-flight)

Os scanners de pulso utilizam uma tecnologia direta: um pulso de luz laser é emitido e o tempo que leva para retornar é medido. O alcance é calculado usando uma fórmula simples que leva em consideração a velocidade da luz (Figura 8). No entanto, isso requer um mecanismo de temporização sofisticado e um sistema preciso de rotação do espelho e do instrumento, o que permite, na maioria dos casos, uma visão de 360° ao redor de um eixo vertical e entre 0° e 300° em relação a um eixo horizontal. Essa cobertura quase esférica é a principal vantagem dos scanners de pulso e comparação de fase em comparação com o tipo de triangulação. Isso significa que uma única posição de escaneamento pode cobrir a maioria ou a totalidade do interior de um ambiente. Anteriormente, o tempo necessário para receber o pulso anterior antes de emitir o próximo resultava em taxas de medição mais lentas em comparação com os scanners de comparação de fase. No entanto, com os avanços tecnológicos, agora é possível alcançar taxas de até 1 milhão de pontos por segundo, como é o caso do Leica ScanStation P40 ou até 680.000 pontos por segundo e uma varredura completa com imagens esféricas em 20 segundos (Figura 9a) (BOARDMAN; BRYAN, 2018;

MOYANO et al., 2022).

Figura 8 - Funcionamento do princípio ToF.

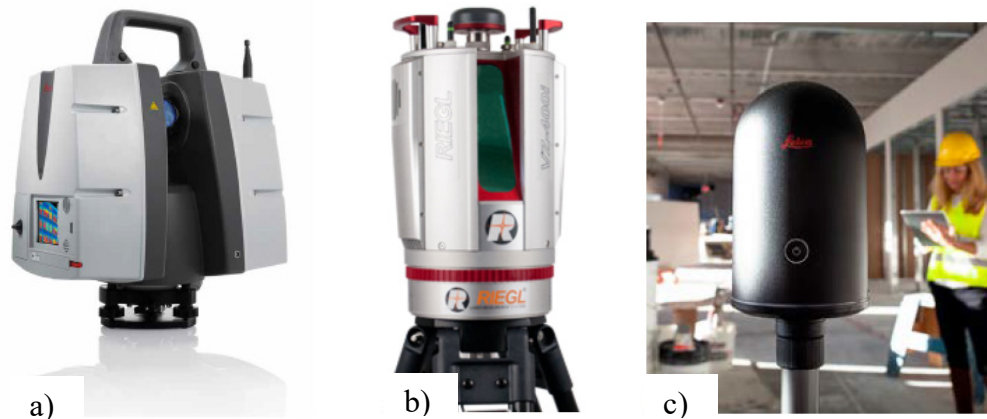


Fonte: Adaptado de English Heritage (2011)

Os scanners de pulso emitem uma quantidade maior de energia em um único pulso em comparação com os scanners de comparação de fase (próxima seção), o que lhes permite operar em distâncias muito maiores, geralmente até 1 km, mas em alguns casos, até 6 km, como o RIEGL VZ-6000 (Figura 9b). Este último é um instrumento projetado, por exemplo, para aplicações geomorfológicas e monitoramento de geleiras, e é menos provável que seja usado em projetos de patrimônio cultural. No entanto, o monitoramento de paisagens pode ser crucial, por exemplo, para monumentos antigos situados em terrenos instáveis ou suscetíveis a inundações. A maior energia do pulso também significa que esse tipo de scanner opera de forma mais eficaz do que os scanners de fase em condições de forte luz solar.

Os scanners de pulso alcançam altas precisões, geralmente de 2 a 6 mm, mesmo em distâncias maiores, com menos ruído do que outros tipos. Isso é geralmente suficiente para a maioria das aplicações de patrimônio cultural, e podem ser alcançadas precisões de 1 mm em distâncias mais próximas, como o Leica BLK360 (Figura 9c) (GROETELAARS, 2015).

Figura 9 - a) Leica ScanStation P40; RIEGL VZ-400i e c) Leica BLK360.



Fonte: (BOARDMAN; BRYAN, 2018)

Uma interessante evolução nos scanners de pulso e comparação de fase é a integração de câmeras aprimoradas, tanto em termos de resolução quanto de qualidade de imagem. Geralmente, uma câmera de baixa resolução com um campo de visão estreito é utilizada para capturar uma série de fotografias sobre a mesma área coberta pelo escaneamento a laser (Figura 10).

Figura 10 - Fotografia retirada pelo laser Leica BLK360 da nave da Igreja Nossa Senhora do Rosário.



Fonte: Elaborado pelo autor

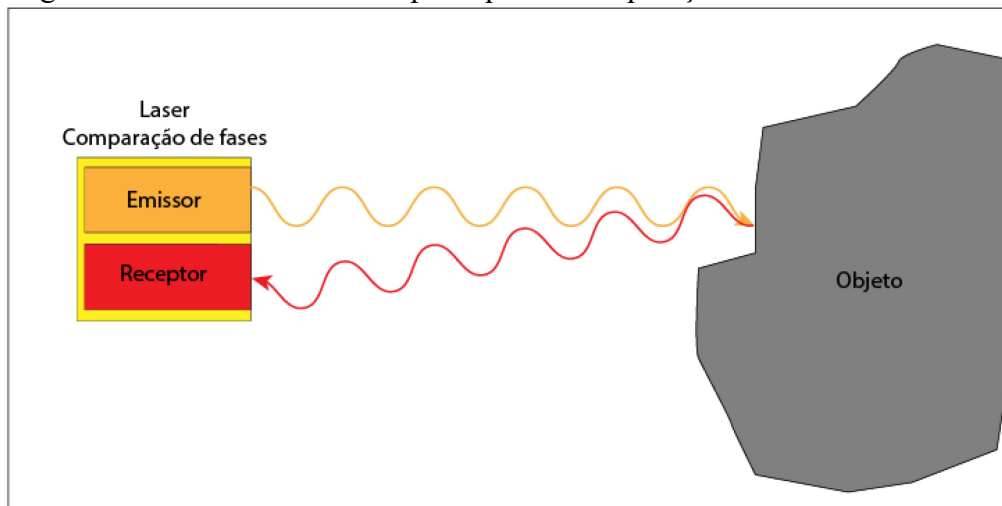
Essas fotografias são então combinadas com precisão em um mosaico contínuo, que pode ser sobreposto aos dados do escaneamento. Esse processo de mosaico difere dos panoramas convencionais, pois utiliza a orientação conhecida de cada fotografia em vez de detecção de características. É importante ressaltar que é fundamental que a câmera seja calibrada com precisão pelo fabricante para garantir um registro perfeito entre os dois

conjuntos de dados.

### 2.2.1.3 Princípio de comparação de fases

Nos últimos anos, os scanners de comparação de fase, também conhecidos como scanners de onda contínua, têm sido amplamente utilizados na digitalização do patrimônio histórico devido às suas precisões semelhantes aos sistemas de pulso. Ao contrário dos scanners de pulso, os scanners de comparação de fase medem a distância até o alvo com base nas diferenças de fase entre os sinais emitidos e retornados, em vez de calcular diretamente o tempo de voo (ToF) (Figura 11). Esses sistemas têm taxas de captura de dados significativamente mais altas, superando um milhão de pontos por segundo, devido à emissão contínua de ondas. No entanto, avanços tecnológicos nos scanners de pulso permitiram que eles alcançassem especificações mais avançadas, resultando em taxas de captura de dados comparáveis aos scanners de comparação de fase. Essas nuvens de pontos de alta densidade geradas pelos scanners de comparação de fase fornecem escaneamentos extremamente detalhados para o estudo do patrimônio cultural. No entanto, essa alta densidade de pontos pode resultar em excesso de informações ao digitalizar áreas com menos detalhes arquitetônicos complexos, como paredes simples. Além disso, o processamento computacional de um grande volume de pontos pode ser desafiador (VAN GENDEREN, 2011).

Figura 11 - Funcionamento do princípio de comparação de fases.



Fonte: Adaptado de Groetelaars (2015)

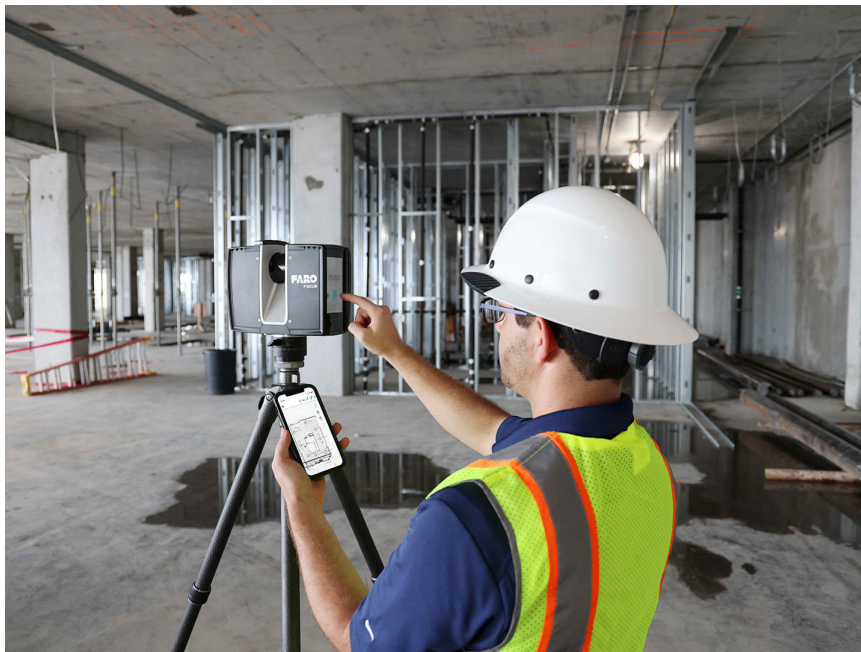
Avanços tecnológicos também permitiram que os scanners de comparação de fase



ampliassem o alcance operacional. No passado, a natureza da tecnologia e a ambiguidade no número de ondas de luz recebidas durante a medição eram limitações significativas. No entanto, esses desafios foram superados, especialmente para as distâncias necessárias na maioria dos projetos de digitalização do patrimônio histórico. Agora, os scanners de comparação de fase são comparáveis aos scanners de pulso em termos de resolução de problemas relacionados ao alcance e ruído em distâncias maiores.

Outra vantagem dos scanners de comparação de fase é a inclusão de câmeras e processamento de imagens de alto alcance dinâmico (HDR). Por exemplo, a linha de scanners FARO Focus, que pesa cerca de 5 kg (excluindo o tripé), é conhecida pela facilidade de uso, flexibilidade de posicionamento e capacidade de operar independentemente de fontes de alimentação externas e laptops.

Figura 12 - Laser scanner da linha Faro Focus.



Fonte: (FARO, 2023)

#### 2.2.1.4 Considerações sobre os princípios

A digitalização a laser scanning é amplamente utilizada na documentação e preservação do patrimônio histórico, empregando três métodos principais: triangulação, *Time-of-Flight* (ToF) e comparação de fases. Cada princípio possui características distintas, limitações e finalidades específicas.

Embora eficaz para capturar detalhes complexos, a triangulação pode ser afetada

pela distância, ângulo e movimento do objeto. Além disso, a velocidade de aquisição de dados pode ser limitada pelo uso de espelhos rotativos. Os scanners de pulso são eficazes em distâncias maiores, alcançando altas taxas de medição e alta precisão. No entanto, a utilização de pulsos de alta energia pode ser limitada em ambientes com forte luz solar, e a digitalização de áreas extensas pode não ser ideal. Os scanners de comparação de fases têm altas taxas de captura de dados, produzindo nuvens de pontos densas e detalhadas. Embora tenham melhorado em alcance operacional e redução de ruído, o processamento de grandes volumes de pontos pode ser desafiador. A inclusão de câmeras e processamento de imagens HDR nos scanners de comparação de fases permite uma documentação mais completa e visualmente rica (REMONDINO; EL-HAKIM, 2006).

Em resumo, a triangulação é adequada para detalhes complexos, ToF é eficaz em distâncias maiores e comparação de fases produz nuvens de pontos densas. Cada princípio possui suas limitações, como a precisão afetada por fatores externos, velocidade de aquisição de dados e processamento computacional. A escolha do princípio de digitalização depende das necessidades específicas de cada projeto de preservação do patrimônio histórico.

## ***2.2.2 Aquisição de dados***

### *2.2.2.1 Planejamento*

A digitalização a laser scanning é uma técnica essencial na documentação do patrimônio histórico, e seu planejamento adequado desempenha um papel fundamental no sucesso do levantamento. O planejamento envolve decisões sobre a cobertura completa do assunto, a escolha das localizações do scanner, a consideração de obstáculos como vegetação e a posição do sol. Também é necessário lidar com desafios, como edificações altas que podem causar sombras e dificultar a cobertura adequada. Nesses casos, soluções como o uso de tripés extensíveis podem ser consideradas (CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2018). A sobreposição entre as varreduras é importante para o registro nuvem-a-nuvem e a precisão do levantamento. A variação de ângulo também afeta a resolução das imagens, especialmente se forem produzidos produtos baseados em imagens, como ortoimagens. A cobertura em áreas de difícil acesso, como espaços estreitos ou internos, requer um planejamento meticuloso, e sombras causadas por estruturas podem afetar a cobertura em projetos aéreos. Fotografias da área são recomendadas durante a etapa de planejamento para identificar limitações espaciais e possíveis problemas. O planejamento

cuidadoso garante a eficiência e a qualidade dos levantamentos de digitalização a laser (FRAUNHOFER IFF MAGDEBURG, 2018).

#### *2.2.2.2 Parâmetros de aquisição de dados*

##### *2.2.2.2.1 Resolução e precisão*

A resolução é um fator crucial que determina a quantidade de detalhes visíveis no objeto digitalizado. É fundamental escolher a resolução adequada com base nas características do objeto e nos requisitos do projeto. Por exemplo, uma edificação moderna pode não requerer alta resolução, enquanto detalhes esculpidos em uma catedral demandam uma resolução mais alta para capturar a complexidade do trabalho. A melhor resolução para um scanner é determinada pela menor diferença angular entre os feixes sucessivos. Essa resolução é medida em dois eixos para scanners estáticos acoplados a tripés: rotação do prisma (eixo horizontal) e rotação do instrumento (eixo vertical). Os diferentes scanners possuem resoluções angulares específicas, que variam de acordo com o modelo. Além disso, é importante considerar a distância do objeto em relação ao scanner, pois a resolução varia linearmente para distâncias menores e maiores (ENGLISH HERITAGE, 2011; GROETELAARS, 2015).

A precisão do instrumento é outro fator relevante a ser considerado. É necessário escolher uma resolução que esteja alinhada com a precisão do scanner. Por exemplo, se o scanner tem uma precisão de 3 mm, não faz sentido selecionar uma resolução melhor do que isso. As declarações de precisão geralmente são separadas em precisão de alcance e precisão angular, sendo a primeira dependente do sistema de registro ToF e a última dependente da qualidade da engenharia do prisma e dos sistemas de rotação do instrumento (BOARDMAN; BRYAN, 2018; CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2018).

##### *2.2.2.2.2 Intensidade e cor*

A coleta de dados de intensidade e cor também é essencial para a interpretação da nuvem de pontos. A intensidade varia de acordo com as propriedades refletivas do material, o ângulo de incidência e a distância para o objeto. A combinação dessas informações fornece um mapa de textura com diferentes níveis de intensidade. A coleta de dados de cor verdadeira também é importante, pois proporciona uma representação realista do objeto e facilita a

interpretação. Esses dados de intensidade e cor são coletados automaticamente durante o processo de varredura (GROETELAARS, 2015; BOARDMAN; BRYAN, 2018).

#### 2.2.2.2.3 Rede de controle

A definição de uma rede de controle é crucial para referenciar todos os outros dados métricos coletados. Embora a georreferenciação completa possa não ser necessária em todos os casos, é importante ter uma referência local para combinar as varreduras, principalmente para áreas internas e externas de um edifício. A rede de controle pode ser estabelecida através de pontos de controle coordenados, geralmente com uma precisão de 5-10 mm. Também é possível usar métodos GNSS para controle de áreas maiores, embora com uma precisão menor nas medições de altura. A coleta de dados de intensidade e cor, juntamente com a criação de uma rede de controle precisa, desempenham um papel fundamental na interpretação e no contexto do patrimônio cultural (ENGLISH HERITAGE, 2011; BOARDMAN; BRYAN, 2018).

### 2.2.3 *Processamento de dados*

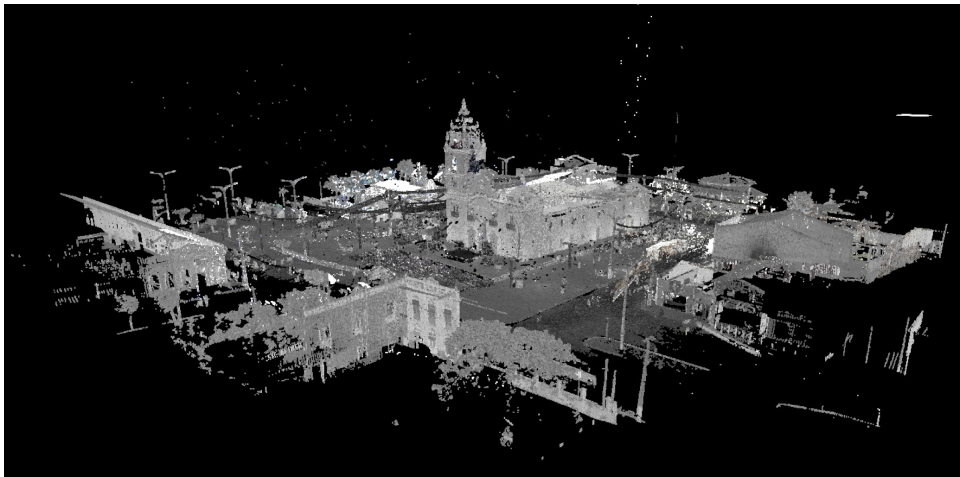
As nuvens de pontos brutas, resultado do processo de aquisição, sem nenhum tipo de processamento podem ser aos usuários finais como um produto final da varredura por laser scanner. Porém, normalmente, esses dados de digitalização precisam ser processados para resultarem em produtos capazes de serem analisados de forma mais efetiva. As etapas de processamento que devem ser percorridas para gerarem produtos entregáveis, incluem: limpeza, filtragem, segmentação, classificação, seccionamento, criação de malhas, renderização (textura), rastreamento de detalhes CAD ou BIM (vetorização), saída baseada em imagens, animação e visualização.

#### 2.2.3.1 *Limpeza e filtragem*

Para obter um resultado útil a partir das informações coletadas por meio de varreduras, é necessário realizar o registro dessas varreduras, normalmente utilizando medidas adicionais de controle de pesquisa (ENGLISH HERITAGE, 2011). Posteriormente, a etapa de limpeza e filtragem dos dados consiste em eliminar informações irrelevantes das varreduras, como edifícios próximos, pessoas, vegetação, obstruções, dados obtidos através de janelas,

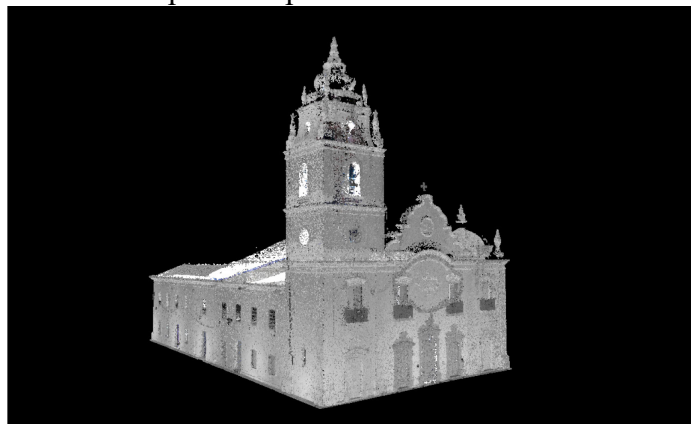
entre outros. Essa etapa tem como objetivo reduzir o tamanho do conjunto de dados e tornar o processo de registro mais eficiente. No entanto, alguns desses dados podem ser úteis para o registro, desde que sejam estáticos, especialmente quando não há uma boa sobreposição ou poucos pontos de controle. Nesses casos, esses dados podem ser removidos após o registro. Durante o pré-processamento ou a limpeza dos dados, é possível filtrar o ruído causado por sinais de retorno ruins utilizando um software de processamento. As Figuras 13 e 14 apresentam, respectivamente, as nuvens de pontos sem e com o tratamento de limpeza.

Figura 13 - Nuvem de pontos da Igreja Nossa Senhora do Rosário antes da limpeza.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 14 - Nuvem de pontos da Igreja Nossa Senhora do Rosário após a limpeza.

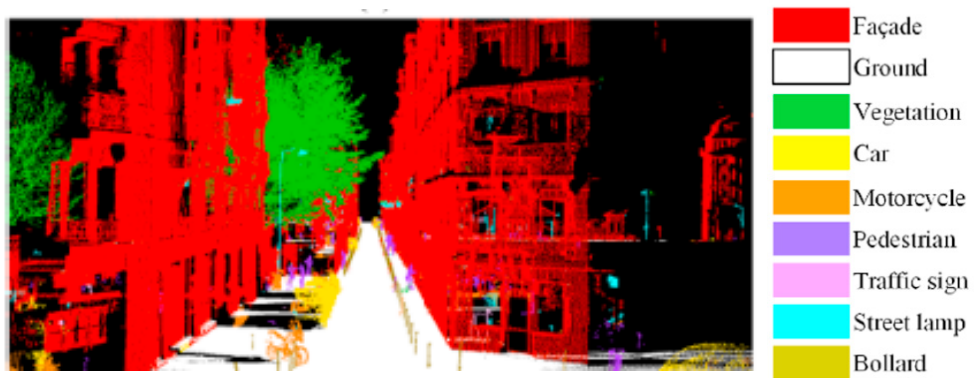


Fonte: Elaborado pelo autor

### 2.2.3.2 Segmentação, classificação e corte

A segmentação e classificação dos dados de nuvem de pontos são etapas cruciais no processo de análise e interpretação dessas informações. Segundo (LI; WU; GE, 2019), a segmentação refere-se ao agrupamento dos pontos em regiões homogêneas com propriedades semelhantes, enquanto a classificação envolve a rotulagem dessas regiões. Em outras palavras, a segmentação define os grupos de pontos e a classificação atribui rótulos a esses grupos. A Figura 15 apresenta o resultado da segmentação de uma nuvem de pontos de uma rua, onde as fachadas dos prédios foram coloridas em vermelho, a vegetação em verde e os carros em amarelo.

Figura 15 - Segmentação de nuvem de pontos.



Fonte: (LI; WU; GE, 2019)

Uma forma comum de classificação é baseada na distância do scanner ou na variação de altura de um DATUM. Essa abordagem permite dividir os dados em intervalos definidos pelo usuário, facilitando a visualização e análise. Por exemplo, é possível definir intervalos de distância para identificar diferentes tipos de objetos, como edifícios, árvores e veículos. Esses objetos se destacam na paisagem, possuindo características distintas, como alturas elevadas e lados íngremes (BOARDMAN; BRYAN, 2018).

Além disso, a segmentação e classificação podem ser aplicadas para identificar características específicas da paisagem, como paredes, esquadrias, pisos e coberturas. Os critérios de agregação, como mudanças de cores, planos, inclinações ou materiais, podem ser utilizados nesse processo. A segmentação pode ser realizada de forma interativa, onde trechos específicos da nuvem de pontos são selecionados, ou de maneira automatizada, utilizando programas avançados que realizam a classificação com base nos dados da nuvem de pontos ou malhas poligonais (GROETELAARS, 2015).

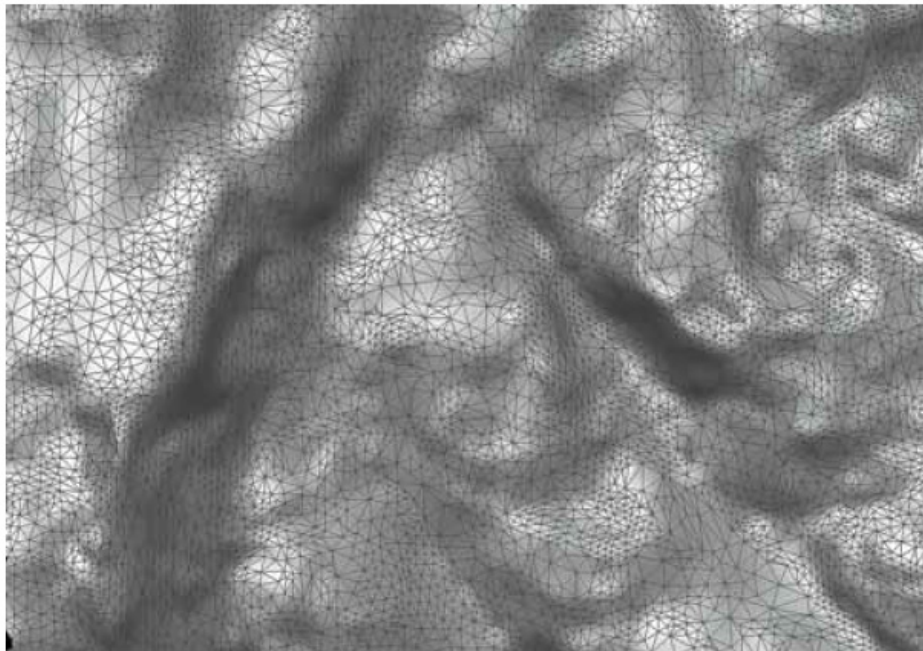
Essas etapas de segmentação e classificação fornecem informações valiosas para a análise da superfície do solo, identificação de objetos artificiais e geração de modelos digitais

de terreno (DTM), contribuindo para diversas aplicações nas áreas de arquitetura, conservação e planejamento urbano (JIA et al., 2022). A etapa de secção ou corte, pode auxiliar o processo de segmentação e classificação, pois ela envolve a extração de cortes transversais da nuvem de pontos para visualizar e analisar partes ou camadas específicas do objeto digitalizado.

### 2.2.3.3 Geração de malha e modelo

A modelagem geométrica ou de superfície é um processo essencial para transformar os dados coletados da nuvem de pontos em informações úteis. Conforme o guia English Heritage (2011), a produção de um modelo de superfície envolve a conversão da nuvem de pontos em uma malha triangular, conhecida como Rede Irregular Triangular (TIN). Essa malha é criada com triângulos de tamanhos variados, permitindo representar a superfície com alta precisão, levando em consideração a densidade de pontos disponíveis na nuvem (Figura 16).

Figura 16 - Nuvem de pontos em malha de um fragmento histórico.



Fonte: (ENGLISH HERITAGE, 2011)

No entanto, em algumas situações, pode ocorrer a ausência de dados completos em objetos altamente reflexivos, resultando em lacunas no modelo. Para lidar com esse problema, é possível realizar a edição e preenchimento dessas lacunas utilizando parâmetros definidos no software de processamento. Além disso, existem software, como *MeshLab* ou

*CloudCompare*, que podem ser utilizados para refinamento do modelo.

No contexto de varreduras terrestres ou aéreas, a produção da malha é geralmente o primeiro estágio em uma série de processamentos, que inclui a criação de modelos de solo. Por meio da classificação dos pontos, é possível remover ou ignorar os pontos acima do solo, resultando em um Modelo Digital de Terreno (DTM). Por outro lado, a superfície que preserva esses objetos é chamada de Modelo Digital de Superfície (DSM). Geralmente, o DTM é representado por uma TIN, permitindo uma representação precisa do solo e incorporando mudanças abruptas de inclinação (BOARDMAN; BRYAN, 2018).

A modelagem geométrica ou de superfície é uma etapa fundamental para obter informações úteis a partir dos dados da nuvem de pontos, possibilitando uma análise detalhada da geometria e estrutura dos objetos escaneados. Esses modelos são amplamente utilizados em diversas áreas, como arquitetura, engenharia e conservação do patrimônio.

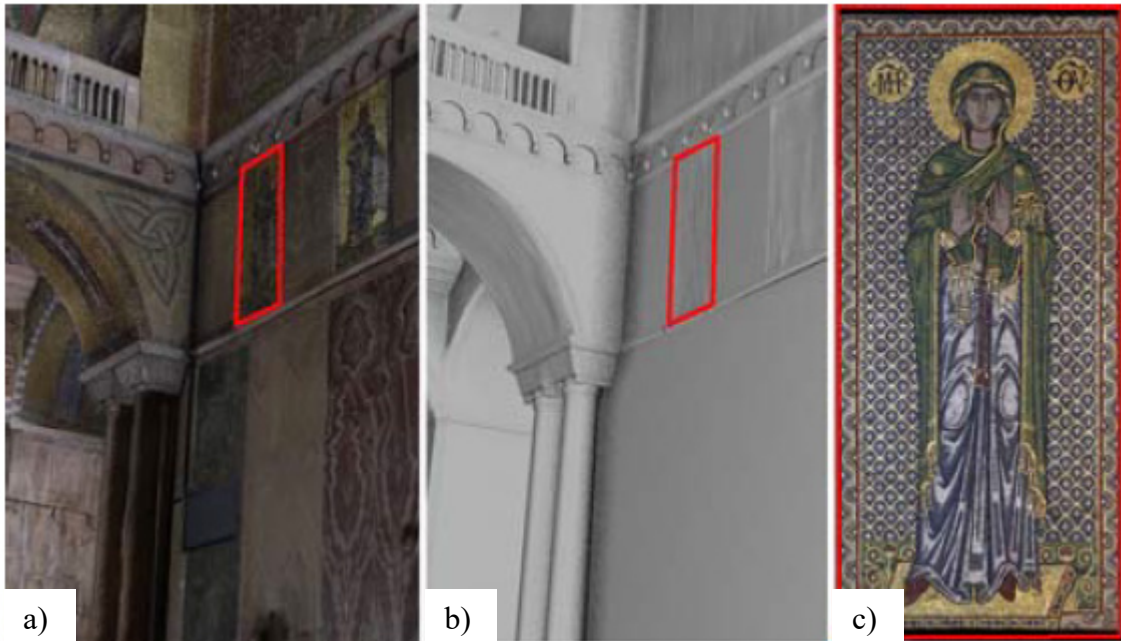
#### *2.2.3.4 Modelos texturizados e aplicação de imagens*

A utilização de texturas em modelos tridimensionais é uma prática comum para enfatizar a aparência e aumentar a fidelidade dos objetos renderizados. Os softwares de CAD oferecem uma variedade de materiais predefinidos, como tijolos, alvenaria, blocos de concreto, mármore e madeira, que podem ser aplicados às superfícies dos modelos. No entanto, essas texturas simples tendem a apresentar padrões repetitivos e não alcançam um alto nível de realismo. Em contrapartida, o uso de texturas fotográficas proporciona uma representação mais fiel do objeto modelado (RECHICHI; FIORILLO, 2019).

Para obter uma texturização mais realista, é possível aplicar diretamente a fotografia do objeto na superfície do modelo, conforme visto no trabalho de Fregonese et al. (2017). Essa abordagem não apenas aprimora a estética, mas também oferece um registro visual preciso do estado da superfície durante a captura dos dados (Figura 17). Muitos scanners possuem uma câmera integrada de resolução relativamente baixa, mas capturam várias imagens que são mescladas para criar uma fotografia panorâmica abrangendo toda a área de varredura. Essa imagem panorâmica é automaticamente associada à nuvem de pontos e desempenha um papel fundamental na interpretação dos dados.



Figura 17 - a) Malha texturizada; b) Modelo matemático (NURBS) e c) Ortofoto.



Fonte: (FREGONESE et al., 2017)

É essencial salientar que, embora a renderização de imagens traga benefícios estéticos, ela pode ocultar a topografia da superfície, dificultando a interpretação dos dados. Além disso, as imagens podem ser utilizadas na geração de ortoimagens, que são representações bidimensionais de paisagens topográficas ou fachadas de edifícios. Essas ortoimagens são ajustadas para eliminar a perspectiva e correspondem a um mapa de imagem.

Ademais, as imagens desempenham um papel significativo na criação de cenas estáticas ou animadas a partir dos modelos tridimensionais. Os filmes gerados a partir dessas cenas são eficazes para apresentar grandes volumes de dados a um público não especializado, proporcionando uma experiência visual envolvente. As texturas de imagem são amplamente utilizadas para aprimorar visualmente os modelos, seja para melhorar detalhes geométricos de baixa resolução ou para reduzir o tamanho dos arquivos, minimizando o número de triângulos na malha (BOARDMAN; BRYAN, 2018).

#### 2.2.3.5 Vetorização

Este processo envolve a conversão dos dados da nuvem de pontos em formatos baseados em vetores, como CAD ou BIM (Modelagem de Informação da Construção), para possibilitar medições precisas, anotações ou atividades relacionadas ao design.

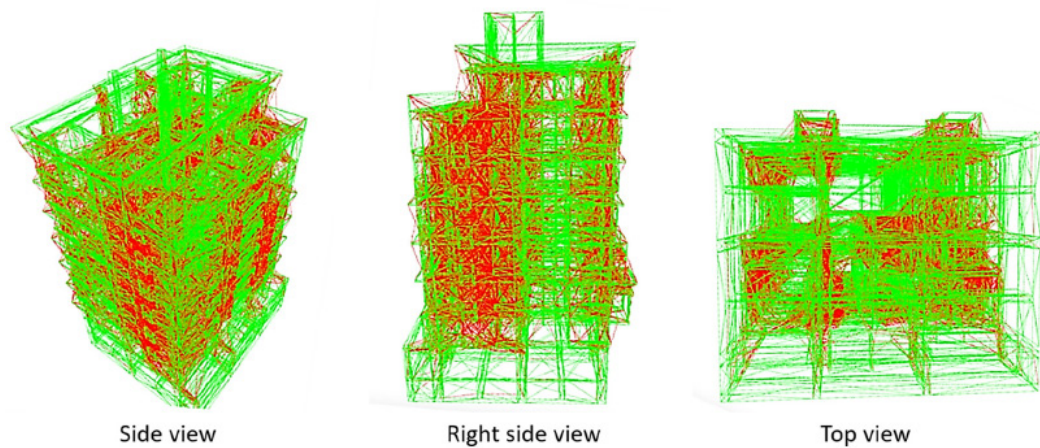
A vetorização de dados de nuvem de pontos é um passo essencial no

processamento das informações capturadas pelos scanners 3D. Ao converter a nuvem de pontos em modelos vetoriais, é possível obter uma representação digital precisa do objeto escaneado, permitindo medições exatas e uma maior flexibilidade para análise e manipulação dos dados. Os modelos vetoriais também são amplamente utilizados em atividades de projeto e construção, pois podem ser facilmente integrados em softwares CAD e BIM, proporcionando uma base sólida para o planejamento e execução de projetos (BOARDMAN; BRYAN, 2018).

Ao realizar a vetorização, é comum utilizar técnicas de processamento de imagens e algoritmos de reconhecimento de formas para identificar e extrair características específicas dos pontos, como bordas, contornos e superfícies. Essas características são então convertidas em elementos vetoriais, como linhas, polígonos e curvas, que podem ser facilmente manipulados e analisados em programas CAD e BIM.

Um exemplo prático da vetorização de detalhes CAD ou BIM é a digitalização e conversão de um edifício existente em um modelo 3D preciso e detalhado. A partir dos dados de nuvem de pontos capturados pelo scanner a laser, os elementos arquitetônicos, como paredes, janelas, portas e outros detalhes estruturais, são vetorizados e representados como elementos vetoriais em um modelo CAD ou BIM, conforme proposto no trabalho de Chuang e Sung (2021) (Figura 18). Isso permite que arquitetos e engenheiros realizem medições precisas, modificações de projeto e análises de interferência, facilitando o processo de reforma, restauração ou ampliação de edifícios existentes.

Figura 18 – Modelo vetorial integrado da nuvem de pontos.



Fonte: (CHUANG; SUNG, 2021)

### **2.2.4 Produtos finais do processamento**

Os formatos de compartilhamento de dados foram criados para tornar mais fácil a transferência de informações entre diferentes softwares. Ao contrário dos formatos proprietários, esses formatos têm como objetivo fornecer uma forma padronizada de compartilhar dados. Um exemplo conhecido é o formato DXF, usado pela Autodesk no software AutoCAD. Mesmo que criado como um formato proprietário, DXF se tornou um padrão universal baseado em texto para usuários de CAD.

No contexto de dados de varredura a laser, muitos pacotes de software permitem que arquivos de texto simples sejam exportados e importados, contendo informações como coordenada x, y, z, intensidade e cor (RGB). Entretanto, existem atualmente formatos mais avançados projetados especificamente para dados de nuvem de pontos. Dois desses formatos amplamente usados são o LAS e o E57. LAS, desenvolvido pela *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS), é especialmente adequado para dados de lidar aéreo, mas também pode ser usado para varreduras terrestres. O formato E57 é mais flexível e abrangente, permitindo a inclusão de dados de imagem, informações de grid e diferentes sistemas de coordenadas, e foi desenvolvido pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM).

Além dos formatos de nuvem de pontos, existem outros formatos de compartilhamento disponíveis para produtos derivados, como malhas triangulares, modelos 3D, animações e imagens. Alguns exemplos desses formatos incluem OBJ, STL, PLY, MOV, AVI, WMV, MP4, WRL, X3D, TIF e JPG.

É importante considerar a inclusão de relatórios e metadados em formatos como PDF e texto ao entregar produtos. Isso porque estes podem fornecer informações adicionais e facilitar a compreensão dos dados, o que é essencial para garantir a correta interpretação e utilização dos mesmos.

## **2.3 Modelagem da informação de edificações existentes**

### **2.3.1 Modelagem da informação da construção (BIM)**

O *Building Information Modeling* ou modelagem da informação da construção (BIM) é um processo avançado de planejamento, projeto, construção, operação e manutenção de instalações que utiliza modelos de informações padronizados e legíveis por máquina. Ele

envolve a criação e o compartilhamento de uma representação digital das características físicas e funcionais de um ativo construído, fornecendo uma base confiável para a tomada de decisões em todo o ciclo de vida da construção (NATIONAL INSTITUTE OF BUILDING SCIENCES, 2008; EASTMAN, 2011).

A metodologia BIM é baseada em sistemas de modelagem paramétrica que utilizam objetos definidos por regras e relacionamentos para simular o comportamento dos elementos de construção. Cada objeto no modelo é associado a informações geométricas e alfanuméricas não redundantes, criando uma estrutura de dados robusta para facilitar a colaboração entre as partes interessadas (RADANOVIC; KHOSHELHAM; FRASER, 2020). Um modelo BIM vai além da simples criação de desenhos 2D ou modelos 3D, pois contém informações adicionais sobre o projeto, como dados sobre materiais, propriedades físicas, especificações técnicas, custos e prazos. Essas informações são integradas ao modelo e podem ser acessadas e atualizadas por diferentes profissionais ao longo do ciclo de vida da construção (EASTMAN, 2011).

A abordagem BIM busca evitar a produção de informações em excesso e define um conjunto específico de usos do modelo em cada estágio do trabalho, estabelecendo sua extensão e nível de detalhamento necessário (NATIONAL INSTITUTE OF BUILDING SCIENCES, 2008; SUCCAR, 2009). Dessa forma, o BIM contribui para a melhoria da qualidade, eficiência e sustentabilidade dos projetos e construções, reduzindo erros, retrabalho e facilitando a detecção de interferências entre sistemas e componentes antes da construção física (EASTMAN, 2011).

A tecnologia BIM também tem impacto em diferentes setores relacionados à construção, como imobiliário, arquitetura, engenharia, manufatura, operações e manutenção de instalações. Além disso, com a crescente demanda pela conservação, preservação, documentação e gerenciamento do ciclo de vida de patrimônios históricos (VOLK; STENGEL; SCHULTMANN, 2014; BRUNO; FINO; FATIGUSO, 2018; JOSÉ LÓPEZ et al., 2018), trabalhos recentes visaram a aplicação da metodologia HBIM, descrita por Murphy, McGovern e Pavia (2009), como um processo de criação de objetos paramétricos interativos que representam elementos arquitetônicos, os quais são construídos a partir de dados históricos. Esses elementos, inclusive os detalhes ocultos por trás da superfície digitalizada, são cuidadosamente mapeados com precisão em uma nuvem de pontos ou em um levantamento baseado em imagens.

Em suma, o BIM é uma metodologia abrangente que vai além da simples modelagem 3D, envolvendo a integração de informações e a colaboração entre as partes

interessadas. Ela proporciona uma base sólida para a gestão eficiente do ciclo de vida de uma construção, contribuindo para a tomada de decisões embasadas em fatos e melhorando a qualidade e a produtividade do setor de construção (EASTMAN, 2011; VOLK; STENGEL; SCHULTMANN, 2014).

### ***2.3.2 Modelagem da informação da construção e patrimônio (HBIM)***

A aplicação do BIM na preservação e gestão do patrimônio arquitetônico, com especial enfoque no patrimônio cultural, é uma área em crescimento. O patrimônio mundial é categorizado em três tipos: patrimônio natural, patrimônio cultural e patrimônio subaquático. O patrimônio cultural é subdividido em patrimônio cultural tangível e patrimônio cultural intangível, ambos representando valores universais que devem ser preservados para as gerações futuras (MURPHY; MCGOVERN; PAVIA, 2009).

No entanto, muitos edifícios históricos enfrentam a falta de documentação e informações técnicas adequadas, o que pode resultar em gestão de projetos ineficiente, desperdício de tempo e custos elevados em processos de manutenção e atualização. Diante dessa realidade, a utilização de modelos digitais tridimensionais (3D) estruturados torna-se uma necessidade urgente no processo de aprimoramento do patrimônio arquitetônico (GOMES; TOMÉ, 2023). Desse contexto, surgiu a metodologia HBIM, *Heritage Building Information Modeling*, ou Modelagem da Informação da Construção e Patrimônio.

Segundo, López et al. (2018), as tecnologias de escaneamento 3D e fotogrametria têm um papel crucial na obtenção de dados espaciais de edifícios existentes, viabilizando intervenções rápidas mesmo em condições perigosas. Os scanners a laser, em especial, permitem uma reprodução precisa da geometria tridimensional em um curto período de tempo, capturando milhões de pontos com coordenadas geométricas (X, Y, Z). Adicionalmente, é possível incorporar informações de cor por meio de câmeras devidamente calibradas, tanto internamente quanto externamente.

Os dados obtidos por meio dos escaneamentos são processados e integrados a plataformas BIM, que têm sido adotadas pela comunidade científica e pelo setor de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) como uma abordagem inovadora para o design, documentação e gestão digital de ativos existentes, especialmente de monumentos históricos (G, 2009). No entanto, as atuais plataformas de BIM apresentam limitações quando se trata da reconstrução virtual e detalhada do patrimônio cultural e histórico, como a falta de bibliotecas paramétricas históricas e ferramentas para lidar com formas complexas e irregulares obtidas a

partir das nuvens de pontos. Portanto, é necessário o desenvolvimento de bibliotecas específicas de HBIM, que funcionem como extensões para as plataformas de BIM existentes, a fim de simplificar e agilizar os processos de design, reabilitação, reconstrução, gestão e manutenção do patrimônio arquitetônico (MURPHY; MCGOVERN; PAVIA, 2013).

### *2.3.2.1 Fluxo de trabalho do HBIM*

Um processo comum de implementação do HBIM envolve várias etapas, começando com uma fase inicial de definição de propósito e determinação do Nível de Desenvolvimento (LOD). Em seguida, há a fase de aquisição de dados, na qual são coletadas informações espaciais e semânticas. Posteriormente, os dados passam por uma fase de processamento e, por fim, é realizada a fase de desenvolvimento dos modelos.

Durante a aquisição de dados para o HBIM, são obtidas informações históricas e existentes relacionadas à estrutura do patrimônio. Isso inclui documentos originais de projeto e construção, registros históricos, fotografias, relatórios de manutenção e renovação, referências bibliográficas e informações sobre eventos históricos relevantes para a estrutura. Para capturar os dados da condição atual (*as-built*) do patrimônio construído, como sua geometria, detalhes estruturais, materiais, defeitos e deterioração, são realizados levantamentos de campo utilizando técnicas de varredura a laser, fotogrametria, entre outras. Em seguida, todos os dados geométricos e descritivos obtidos são processados para desenvolver um modelo digital 3D altamente detalhado e preciso, que representa a condição atual da estrutura. Por fim, os dados sobre a estrutura, como fotografias históricas, relatórios históricos, registros de manutenção e renovação, materiais e informações sobre deterioração, são integrados ao modelo 3D, enriquecendo-o com informações inteligentes sobre a construção (MURPHY; MCGOVERN; PAVIA, 2013; DORE; MURPHY, 2017).

## **2.4 Estudos de casos**

### *2.4.1 Digitalização de edificações históricas*

Vieira et al. (2023) desenvolveu um trabalho cujo objetivo foi criar um modelo 3D BIM do teatro José de Alencar (Figura 19), patrimônio histórico do Ceará, Brasil, usando dados de levantamento digital integrado com laser scanner e fotogrametria.

Figura 19 – a) Teatro José de Alencar em 1928; b) Teatro José de Alencar em 2023.



Fonte: (VIEIRA et al., 2023)

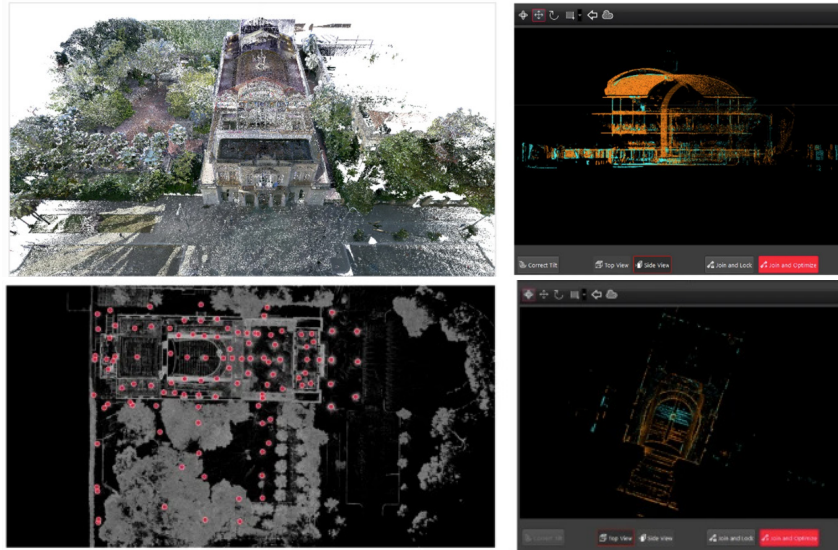
O trabalho envolveu três etapas principais: o levantamento de documentos históricos, fotos e desenhos existentes; a realização do levantamento digital com scanner a laser e UAV fotogramétrico; e o desenvolvimento do modelo 3D BIM no software Revit.

- Levantamento dos documentos históricos, fotos e desenhos existentes do teatro, obtidos dos arquivos do IPHAN-Ce. Esses documentos foram usados para entender a história, o uso, o estilo arquitetônico, as intervenções e os danos do teatro ao longo do tempo, além de servir de referência para o levantamento digital e o desenvolvimento do modelo 3D BIM;
- Realização do levantamento digital com scanner a laser e UAV fotogramétrico, para obter os dados geométricos do teatro. Foram usados dois scanners a laser, um Leica BLK360 e um Leica RTC360, que realizaram 239 capturas no total. Também foi usado um drone *quadcopter* UAV, um *Phantom* 4 ProV1, que realizou oito voos curtos com gravação contínua de vídeo em 4k. Além disso, foram usadas câmeras digitais para obter imagens de alta resolução dos detalhes do teatro;
  - Desenvolvimento do modelo 3D BIM no software Revit, baseado nos dados do levantamento digital. O modelo foi criado usando a técnica Scan-to-BIM, que permite modelar objetos inteligentes e paramétricos a partir das nuvens de pontos. Foram criadas famílias específicas para os elementos do teatro, como portas, colunas, guarda-corpos, adornos, escadas, postes de iluminação e janelas.

A Figura 20 mostra a configuração do processo de varredura, as posições das estações, os ajustes planialtimétricos e a nuvem de pontos. Já a Figura 21 apresenta os modelos 2D e 3D no Revit e a nuvem de pontos do teatro após tratamento inicial (Figura 22).

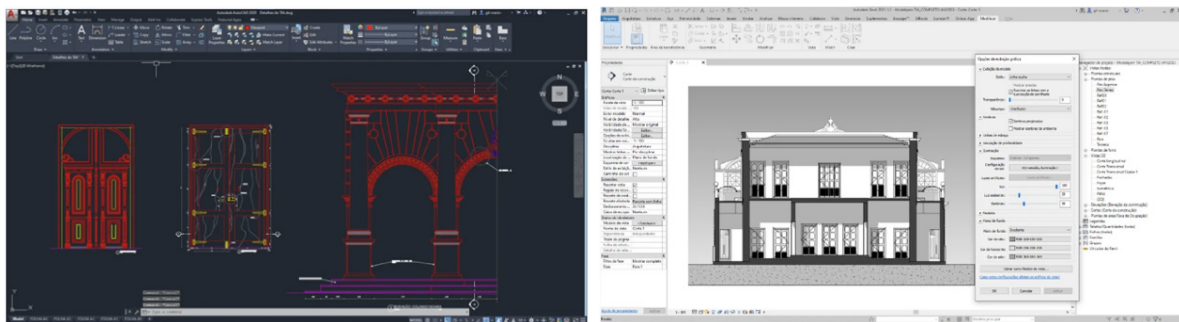


Figura 20 - Configuração do processo de varredura.



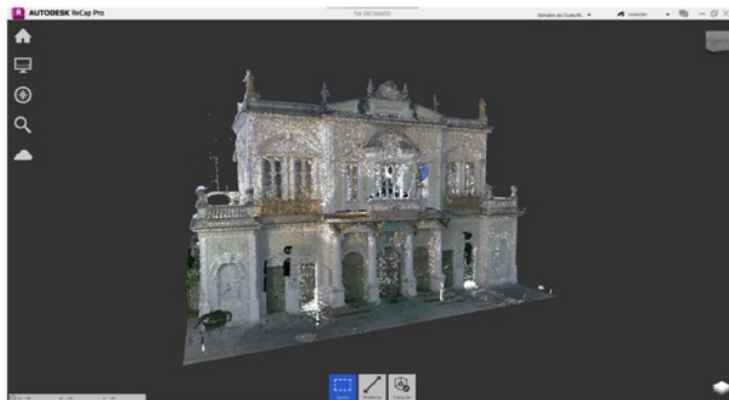
Fonte: (VIEIRA et al., 2023)

Figura 21 - Modelos digitais do teatro.



Fonte: (VIEIRA et al., 2023)

Figura 22 - Nuvem de pontos do teatro.



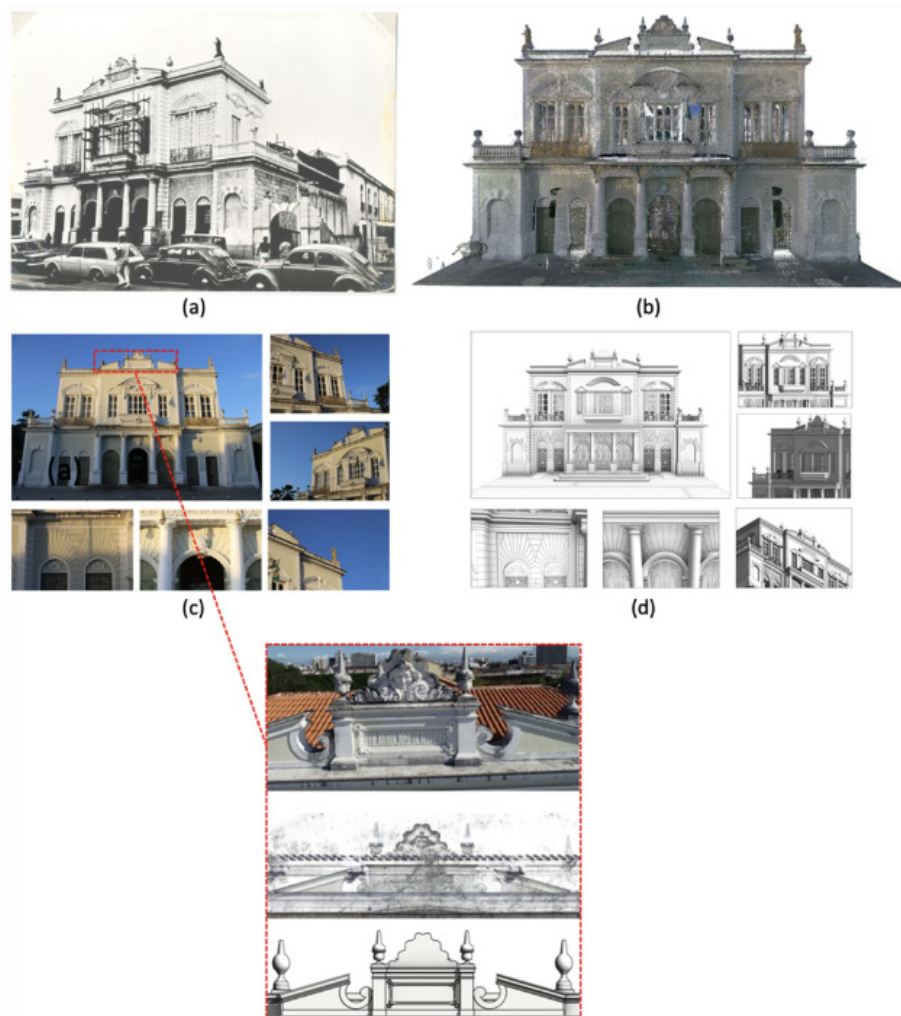
Fonte: (VIEIRA et al., 2023)



Como produtos finais do trabalho, os autores atualizaram as documentações da fachada principal, do *foyer*, da fachada metálica e apresentaram um modelo 3D do teatro renderizado.

Os autores compararam as diferentes formas de documentação da fachada principal do teatro (Figura 23), que é a parte construída em alvenaria e que antecede o bloco de ferro. Eles usaram uma foto antiga em preto e branco, uma foto atual em cores, uma nuvem de pontos do levantamento digital e um modelo 3D BIM. Foi destacado o nível de detalhes e a precisão dos adornos da fachada, que podem ser observados nas fotos e nos modelos. Os autores ressaltaram a importância da atualização da documentação da fachada para capturar o patrimônio ao longo do tempo e para fornecer informações completas e atualizadas para futuros projetos de manutenção e restauração.

Figura 23 - Atualização da documentação da fachada principal.



Fonte: (VIEIRA et al., 2023)

Na atualização da documentação do *foyer* (Figura 23), que é a parte interna do bloco de alvenaria e que serve como sala de recepção e lounge, os autores mostraram e compararam as diferentes formas de documentação. Foram utilizados um desenho em AutoCAD 2D, uma nuvem de pontos do levantamento digital e um modelo 3D BIM. Destacou-se o nível de detalhes e a precisão dos elementos arquitetônicos e decorativos do *foyer*, como as paredes, os pisos, as colunas, os arcos, as portas e as janelas.

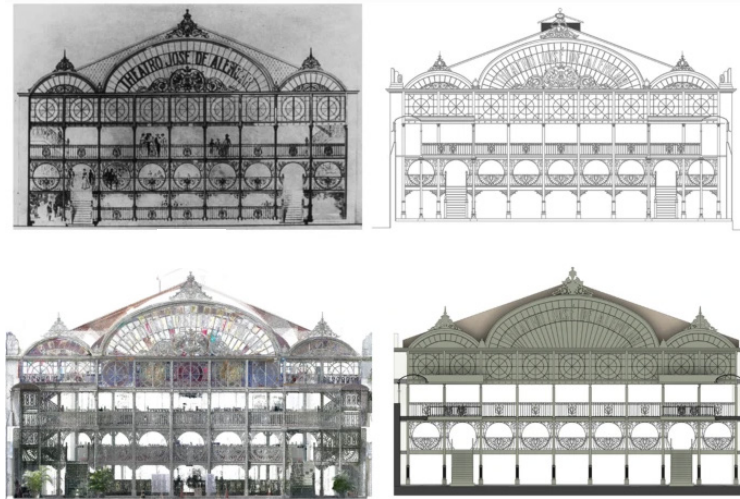
Figura 24 - Atualização da documentação do foyer.



Fonte: (VIEIRA et al., 2023)

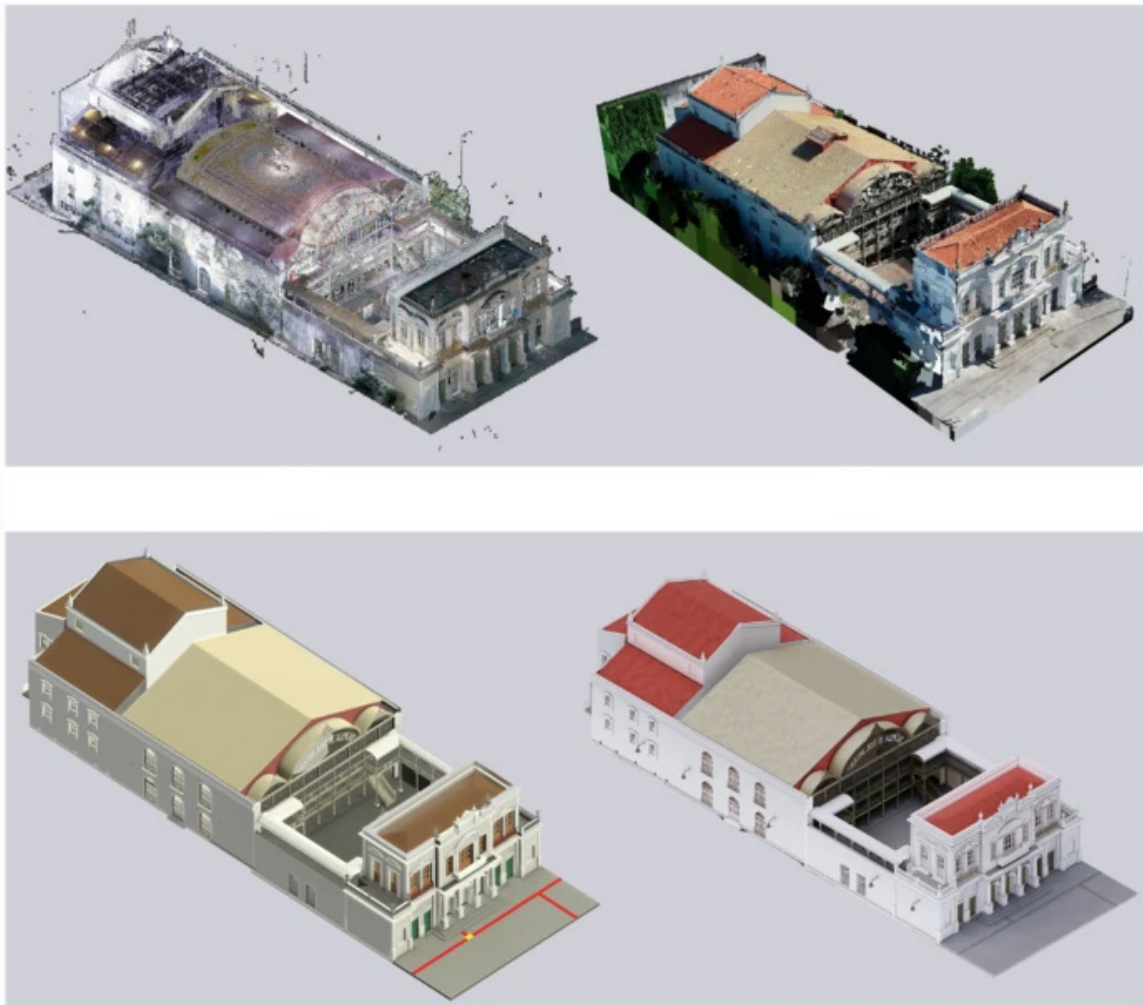
A fachada metálica, que tem elementos de estilo *art nouveau*, também foram atualizadas (Figura 25). Eles usaram uma ilustração antiga do catálogo da empresa inglesa MacFarlane & Co., que fabricou e exportou a estrutura metálica do teatro, um desenho em AutoCAD 2D, uma nuvem de pontos do levantamento digital e um modelo 3D BIM para destacar o nível de detalhes e precisão dos elementos estruturais e decorativos da fachada, bem como as colunas, os arcos, as janelas e os adornos. Por fim, os autores apresentaram as diferentes formas de documentação 3D do teatro José de Alencar. São exibidos: a nuvem de pontos 3D obtida pelo laser scanner, a nuvem de pontos 3D obtida pela fotogrametria, um modelo 3D BIM no software Revit e um modelo 3D BIM renderizado (Figura 26).

Figura 25 - Atualização da documentação da fachada metálica.



Fonte: (VIEIRA et al., 2023)

Figura 26 - Atualização da documentação 3D do teatro.



Fonte: (VIEIRA et al., 2023)

Os autores concluíram que o uso de fotos antigas e ilustrações originais da estrutura do teatro enriqueceram o trabalho, possibilitando a criação de um registro arquitetônico ao longo do tempo, mostrando a evolução da documentação. Um levantamento digital integrado com laser scanner e fotogrametria foi realizado para obter informações geométricas e construir um modelo 3D do teatro, garantindo alta precisão dos elementos do teatro. Documentos como fotos antigas, ilustrações, desenhos em AutoCAD 2D, modelos 3D de levantamento digital e modelos 3D BIM foram aplicadas no estudo, resultando na atualização da documentação arquitetônica do edifício histórico. A implementação do levantamento digital e da metodologia BIM permitiu uma documentação mais detalhada e informativa, criando uma base de dados dinâmica e intercambiável para inserção de novas informações ao longo do ciclo de vida do edifício. Por fim, os autores destacaram que a atualização da documentação foi fundamental para preservar o patrimônio histórico e cultural, além de fornecer uma dados confiáveis que podem ser utilizados em atividades futuras de intervenção.

O trabalho de Vieira et al. (2023) é relevante para a área de digitalização do patrimônio histórico e laser scanner, pois apresenta uma aplicação prática e bem-sucedida de uma abordagem integrada para a documentação de um edifício histórico complexo e significativo. Destacam-se positivamente como pontos fortes a descrição detalhada da metodologia utilizada, a comparação entre as diferentes formas de documentação ao longo do tempo, e a discussão dos benefícios e desafios da aplicação da tecnologia digital e da metodologia BIM para a documentação do patrimônio histórico. O artigo tem como pontos fracos a ausência de uma avaliação quantitativa da precisão e da qualidade dos dados obtidos. Em suma, esse trabalho tem considerável valor científico e é fonte confiável e atualizada de conhecimento na área do patrimônio histórico.

Na mesma linha, Moyano et al. (2022a), avaliou a precisão e a aplicabilidade de scanners a laser terrestre dos tipos *Personal Laser Scanning* (PLS) e *Terrestrial Laser Scanning* (TLS) na modelagem de informações em construções HBIM de patrimônios arquitetônicos. O estudo compreende a igreja La Anunciación em Sevilha (Figura 27), edificação construída entre os anos de 1565 e 1579, possuindo uma rica decoração artística. Os autores descreveram os critérios utilizados para escolher os níveis de precisão (LOA) necessários para a modelagem BIM a partir da nuvem de pontos coletada. Isso permitiu ter uma compreensão clara das metas do estudo e dos desafios envolvidos.

Para a realização do estudo foram utilizados os modelos: PLS Leica BLK360 e TLS RIEGL VZ400i, bem como os equipamentos auxiliares para registrar as coordenadas dos

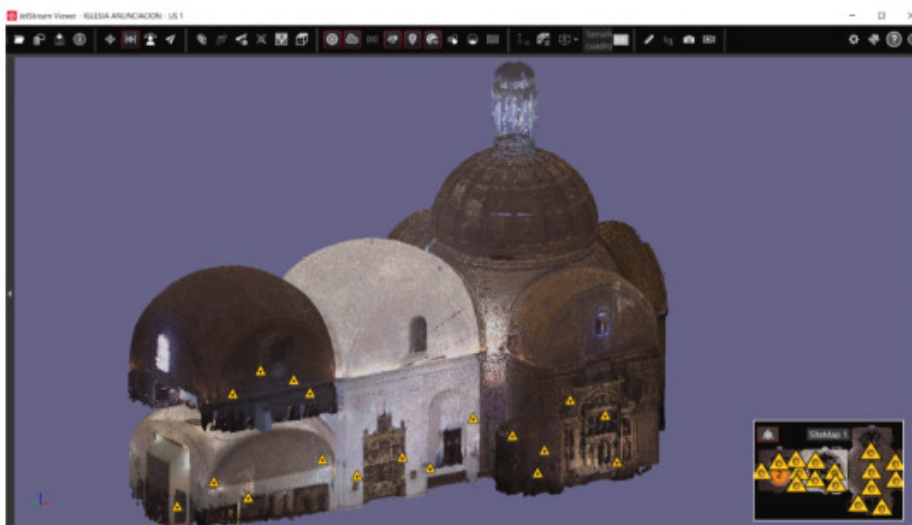
pontos de controle no terreno: a estação total Leica Flexline TS02 e o medidor a laser Leica DISTO S910. Foram empregados softwares de pós-processamento de nuvem de pontos para lidar com os dados obtidos a partir dos registros realizados com os scanners a laser terrestre. O software LEICA Cyclone REGISTER 360 (Figura 28) foi usado para processar os dados do scanner BLK360, enquanto o SisCAN PRO tratou os dados do scanner RIEGL VZ400i.

Figura 27 - Igreja La Anunciación (Sevilha).



Fonte: (MOYANO et al., 2022)

Figura 28 - Software LEICA Cyclone REGISTER.



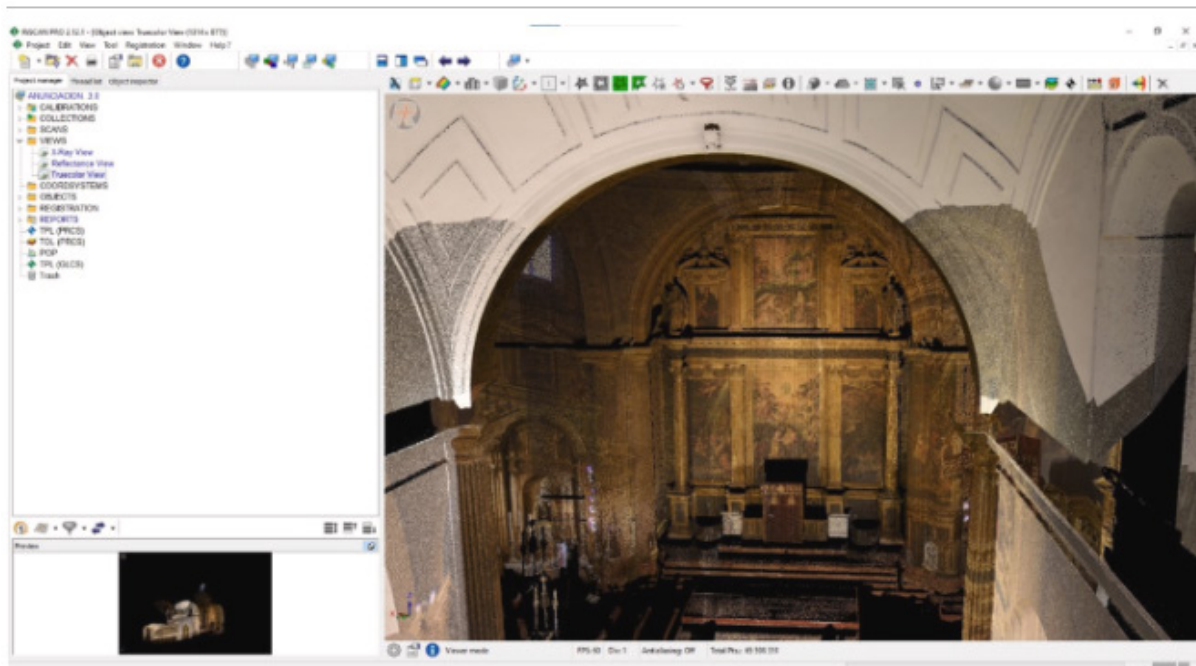
Fonte: (MOYANO et al., 2022a)

O LEICA Cyclone REGISTER 360 utilizou um algoritmo de correspondência de nuvem a nuvem para registrar automaticamente as sobreposições. Ele também emprega o



Sistema Visual Inercial (VIS) RTC360 para posicionar os dados automaticamente em coordenadas. Os dados finais foram publicados em um arquivo de projeto do tipo *Leica Geosystems Universal* (LGS) para compatibilidade com outros softwares. O SisCAN PRO, outro software utilizando na etapa de pós-processamento, foi responsável por organizar, salvar e tratar os dados adquiridos pelo scanner RIEGL VZ400i durante uma sessão de digitalização (Figura 29). Ele possui uma estrutura de projeto para armazenar as pesquisas de varredura, detalhes capturados, fotografias, dados GNSS e coordenadas de pontos de controle e refletores. O software utilizou matrizes de transformação para obter múltiplos dados das varreduras em um sistema de coordenadas definido e gerou um modelo 3D, permitindo sua edição, visualização e exportação em diferentes formatos, como .las, .obj, .pts e .stl.

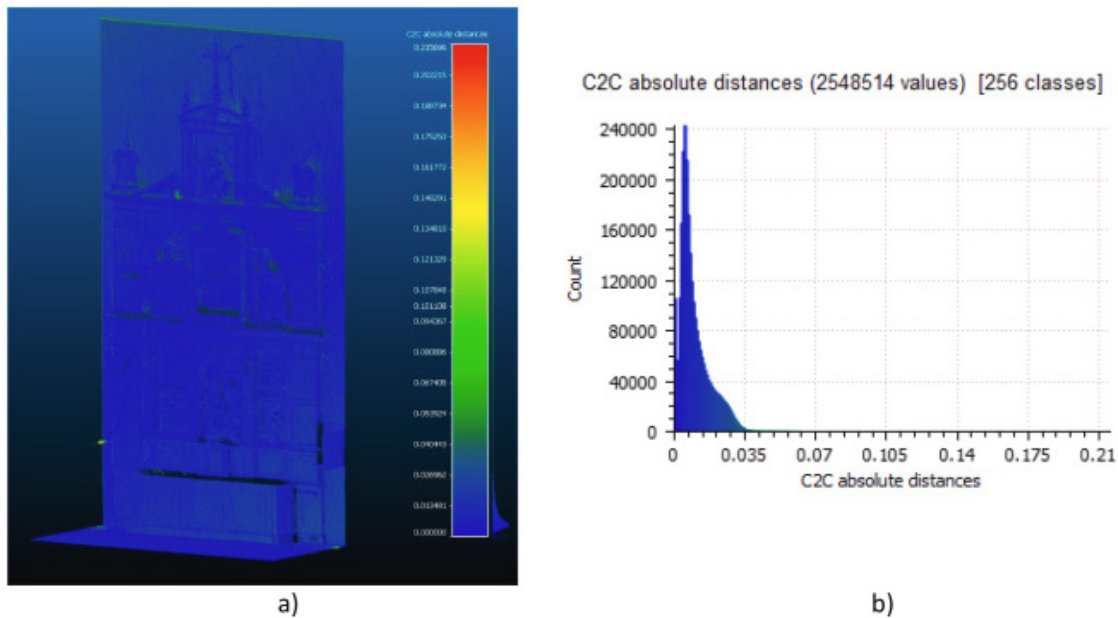
Figura 29 - Digitalização do interior da igreja com o scanner RIEGL VZ400i.



Fonte: (MOYANO et al., 2022a)

A Figura 30 mostra a imagem dos desvios entre as nuvens de pontos do scanner BLK360 e do scanner RIEGL VZ400i, bem como um gráfico de histograma que ilustra os desvios entre os pontos.

Figura 30 - Desvio da nuvem de pontos entre o BLK360 e o RIEGL VZ400i.



Fonte: (MOYANO et al., 2022)

A Tabela 2 apresenta uma tabela com os diferentes desvios entre os pontos e suas coordenadas de referência (x, y, z), mostrando a distância média e o desvio padrão expressos em unidades métricas.

Tabela 2 - Desvios entre a estação total alinhada com os conjuntos de dados da Leica 910 em metros.

Pontos	Distância média (m)	Desvio padrão (m)
d (x)	0.0234	0.0245
d (y)	0.0476	0.0573
d (z)	0.0246	0.0320

Fonte: (MOYANO et al., 2022)

A metodologia adotada consistiu em realizar a comparação entre as nuvens de pontos utilizando algoritmos específicos, sendo o software CloudCompare empregado nesse processo. A comparação foi feita em duas escalas distintas, uma menor que envolveu a segmentação do retábulo da igreja, e uma maior, que contemplou uma seção longitudinal da nave central da igreja.

Para garantir a captura de todos os alvos de varredura na nuvem de pontos final, foram estabelecidos critérios de qualidade. O procedimento envolveu o alinhamento manual dos conjuntos de pontos e a utilização de um algoritmo de ponto mais próximo para recalcular os parâmetros de transformação. Durante essa etapa, foram identificados pontos atípicos na

nuvem de pontos gerada pelo scanner BLK360, concentrados nas bordas e limites das esculturas, bem como nas lacunas entre as obras de arte e a área circundante.

Adicionalmente, os autores tiveram como propósito estabelecer diferenças em comprimentos maiores além do retábulo, e para isso, uma seção longitudinal da igreja foi analisada, abrangendo um intervalo de 5 a 45 metros que representava o ambiente da nave central. A precisão dos scanners foi comparada quantitativamente, e a redução do tamanho do arquivo facilitou o alinhamento entre as nuvens de pontos.

Os algoritmos de comparação nuvem-a-nuvem, tais como o *Iterative Closest Point* (ICP), foram utilizados para realizar a comparação entre os conjuntos de dados. Esses algoritmos são amplamente empregados em diversas áreas, como detecção de mudanças em deslizamentos de terra, inspeção de estruturas de pontes, túneis e edifícios históricos.

Por fim, diversos experimentos foram conduzidos para eliminar pontos atípicos e ruídos, resultando na obtenção de quatro níveis de avaliação. Os resultados finais foram apresentados na Tabela 3, que contemplou os resultados obtidos ao longo do estudo.

Tabela 3 - Desvios entre as nuvens de pontos segmentadas (TLSiB e TLSiR).

<b>Experimento</b>	<b>Desvio padrão (m)</b>	<b>Distância mínima (m)</b>	<b>Distância máxima (m)</b>	<b>Distância média (m)</b>	<b>Erro padrão Estimado (m)</b>
Avaliação 4	0.0973	0	1.0988	0.0161	0.1831

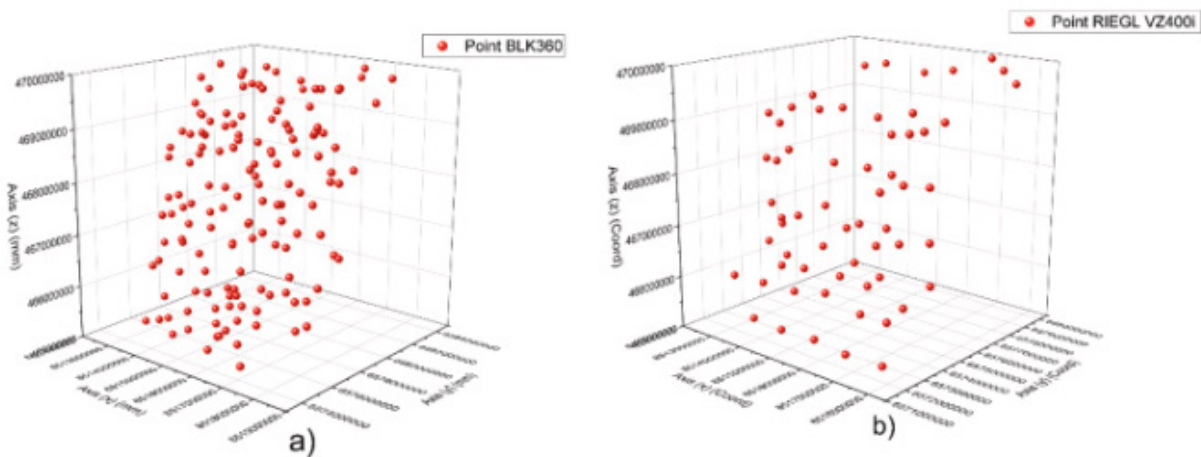
Fonte: (MOYANO et al., 2022)

A densidade de pontos é um parâmetro importante para conhecer a área da superfície que foi registrada e foi um parâmetro abordado pelos autores. Para verificar a resolução espacial e a proximidade dos pontos, os autores utilizaram a distância euclidiana em 3D. A análise foi realizada em uma amostra da moldura do retábulo localizada na nave da epístola da igreja. Para estudar a distribuição da densidade de pontos, foram comparadas duas superfícies: a superfície curva da cornija do terceiro corpo e a superfície plana do quadro de uma pintura ao lado do retábulo.

A distribuição da densidade de pontos foi examinada para cada uma das superfícies. Os resultados mostraram que, no caso do scanner RIEGL VZ400i, obteve-se uma média de 1 ponto para cada 41 mm<sup>2</sup> na superfície curva e 1 ponto para cada 79 mm<sup>2</sup> na superfície plana. Já para o scanner BLK360, a média foi de 1 ponto para cada 17 mm<sup>2</sup> na superfície curva e 1 ponto para cada 24 mm<sup>2</sup> na superfície plana (Figura 31).



Figura 31 - Distribuição dos pontos de segmentação na cornija com o scanner BLK360 e RIEGL VZ400i.

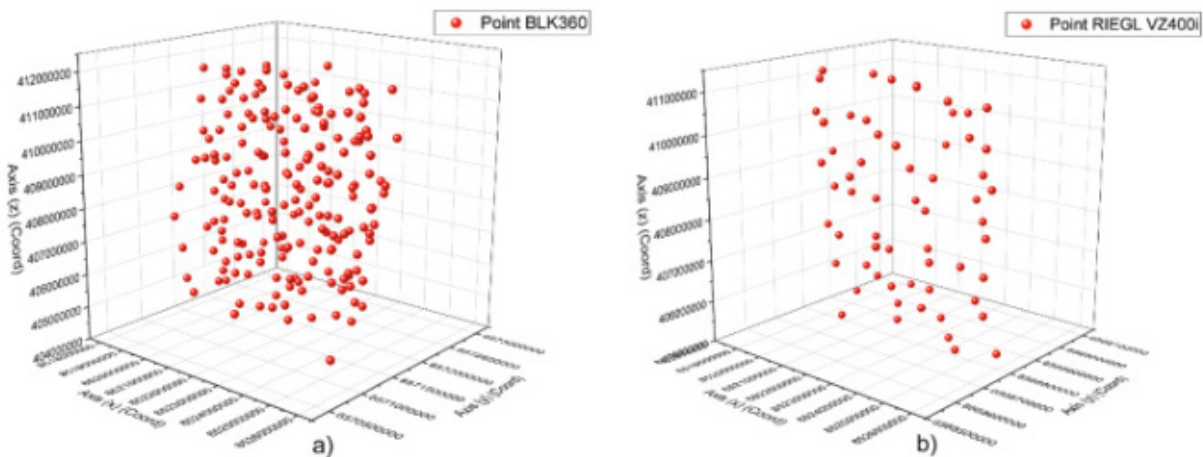


Fonte: (MOYANO et al., 2022)

Um segundo conjunto de pontos foi utilizado para selecionar um elemento plano, mais especificamente, uma parte de uma das pinturas do retábulo. Para isso, foi realizada uma segmentação da subamostra da mesma maneira que no caso anterior, alinhando os conjuntos de pontos do scanner BLK360 e do scanner RIEGL VZ400i.

Foram obtidas duas amostras diferentes: uma do scanner RIEGL VZ400i, com 62 pontos, o que equivale a 1 ponto a cada 79 mm<sup>2</sup>; e outra do scanner BLK360, com 198 pontos, o que equivale a 1 ponto a cada 24 mm<sup>2</sup>. A distribuição desses pontos pode ser visualizada nas Figura 32.

Figura 32 - Distribuição dos pontos de segmentação na cornija com os scanners BLK360 e RIEGL VZ400i.



Fonte: (MOYANO et al., 2022)

A análise realizada neste estudo também permitiu examinar a densidade de pontos em uma superfície plana específica de uma pintura do retábulo. Os resultados revelaram diferenças na densidade de pontos entre dois scanners, indicando que o BLK360 capturou uma quantidade maior de pontos em comparação com o RIEGL VZ400i. Segundo os autores, essas informações são fundamentais para compreender a quantidade de detalhes capturados e a precisão da representação tridimensional. O estudo demonstrou que diferentes scanners podem apresentar variações na densidade de pontos, o que deve ser considerado ao realizar análises e modelagens 3D de objetos arquitetônicos complexos.

Nesse sentido, o estudo testou duas capturas de conjuntos de pontos globais denominados  $TLSG_{IB}$  e  $TLSG_{IV}$ . Ambos os conjuntos foram sobrepostos no mesmo sistema de coordenadas, utilizando as referências do scanner RIEGL VZ400i, que possui um sistema de georreferenciamento em tempo real. O processo de digitalização foi iniciado fora do edifício, na frente da igreja, e terminou no mesmo ponto de partida, visando geoposicionar a nuvem de pontos recebida pelo receptor GGSS do scanner. Essa configuração visava atingir níveis de precisão adequados, como uma tentativa de lidar com os desafios associados à digitalização e também de obter medições de deformação de edifícios existentes.

Por fim, os autores destacaram a importância de avançar o conhecimento sobre as técnicas de captura de nuvens de pontos  $TLS_{iB}$  e  $TLS_{iR}$ , fornecendo informações sobre a distância e o desvio de orientação entre elas. Isso se deve ao fato de que a avaliação da qualidade dos modelos BIM com o uso de nuvens de pontos está se tornando uma prática comum, por meio da análise de padrões de desvios geométricos. Além disso, a análise do desvio de orientação em configurações de câmera para fotogrametria em espaços interiores também é relevante dentro desse contexto de pesquisa.

Os autores concluíram que dispositivos mais acessíveis e fáceis de usar, como o PLS, possuem precisão suficiente para serem utilizados em engenharia reversa e digitalização de patrimônio arquitetônico.

Os resultados do estudo indicam que as diferenças observadas entre os scanners PLS e TLS não são estatisticamente significativas, sendo da ordem de milímetros. Essas diferenças são consideradas aceitáveis para a realização de digitalização em um procedimento de BIM (*Scan-to-BIM*). Considerando que os níveis de precisão exigidos para edifícios históricos podem variar entre 0 e 5 cm, a diferença de 16 mm entre os dois equipamentos indica que seu uso é perfeitamente aceitável nesse contexto. A distribuição da nuvem de pontos, um resultado importante da digitalização, também foi analisada. Os resultados revelaram que a nuvem de pontos obtida pelo scanner RIEGL VZ400i é mais uniforme e

coplanar em comparação com o scanner BLK360. É importante ressaltar que a interpretação dos resultados e análises obtidos deve considerar fatores como o número de pontos de referência utilizados, a qualidade dos equipamentos empregados e as condições ambientais durante cada registro. Além disso, foi constatado que o scanner RIEGL VZ400i é mais adequado para medições de comprimentos maiores, enquanto o scanner BLK360 possui limitações nesse aspecto. Em espaços menores, ambos os scanners apresentam características semelhantes para análise de formas planas, mas o scanner RIEGL VZ400i demonstrou melhor desempenho na digitalização de formas curvas ou complexas.

O trabalho de Moyano et al. (2022a) apresenta uma pesquisa interessante e relevante sobre a avaliação de dois scanners usados na digitalização do patrimônio histórico para modelagem em BIM. O estudo tem algumas limitações e pontos a melhorar. Por exemplo, os autores poderiam ter explicado melhor o motivo da escolha dos equipamentos e dos pontos de controle, bem como os critérios de segmentação e filtragem das nuvens de pontos. Além de ter mostrado mais exemplos visuais dos resultados, como imagens das nuvens de pontos, gráficos das diferenças e modelos BIM gerados. Por fim, os autores poderiam ter comparado os seus resultados com outros estudos semelhantes na literatura, e ter feito uma análise mais profunda das fontes de erro e incerteza nos dados.

#### ***2.4.2 Projetos de controle e preservação do patrimônio histórico***

O trabalho de Kallas e Napolitano (2023) apresenta um caso de estudo sobre o papel da modelagem 3D baseada em imagens na recuperação de edifícios históricos danificados pela explosão de 2020 no porto de Beirute, uma das maiores da história não causadas por uma reação nuclear. A explosão devastou os bairros históricos de Beirute, que datam do século 19 e apresentam uma arquitetura característica da era otomana e do mandato francês. Os edifícios de alvenaria sofreram vários danos estruturais devido à onda de choque da explosão, que gerou uma enorme pressão e deformação fora do plano nas paredes. O objetivo do estudo foi fornecer um fluxo de trabalho eficiente para acelerar o processo de avaliação dos edifícios históricos danificados pela aplicação da tecnologia digital em áreas pós-desastre, através do caso de estudo sobre a explosão de Beirute. Segundo os autores, o trabalho é original por ser a primeira vez que Beirute e seus edifícios históricos foram massivamente digitalizados. Os autores descrevem como e por que a fotogrametria foi implementada, enfatizando os benefícios oportunos para a recuperação de desastres e a melhoria da tomada de decisão em um caso de emergência semelhante.

O cenário pós-explosão em Beirute, encontra-se especificamente nos bairros históricos de Gemmayzeh e Mar Mikhael, onde a maioria dos edifícios danificados estão localizados. Eles descrevem as características arquitetônicas e estruturais dos edifícios da era otomana e do mandato francês, bem como os tipos de danos que eles sofreram quando expostos às ondas de choque. Durante os trabalhos foi formado um grupo de iniciativa voluntária *Beirut Built Heritage Rescue* (BBHR2020), que visava identificar, avaliar e preservar o patrimônio construído afetado nos bairros enfraquecidos pela explosão de Beirute. Eles explicam como a missão de documentação digital foi formada pelo autor sob a iniciativa BBHR2020 e quais eram seus objetivos.

Kallas e Napolitano (2023) dividiu o trabalho em duas partes: a digitalização dos edifícios com alto risco de colapso iminente e a digitalização dos edifícios moderadamente danificados. Eles se concentraram em discutir os resultados da primeira parte, que envolveu 40 edifícios altamente arriscados e que apresentou desafios complexos devido ao seu estado estrutural crítico pós-explosão. A equipe trabalhou em estreita colaboração com a Diretoria Geral de Antiguidades para definir prioridades e enfrentar os desafios de risco e técnicos presentes durante as atividades de digitalização.

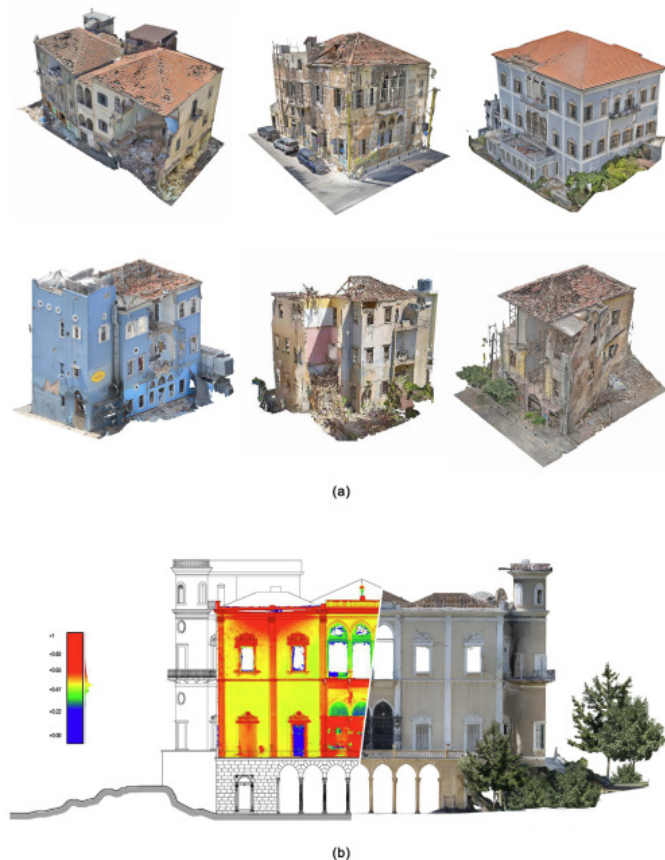
Os autores descrevem que a etapa de documentação foi realizada usando a tecnologia de fotogrametria, que segundo eles, é rápida, precisa e de baixo custo, e que é uma tecnologia mais acessível para produzir modelos de nuvens de pontos 3D. O processo de aquisição de dados foi realizado seguindo as regras fotogramétricas 3×3 adotadas e atualizadas pelo *CIPA Heritage Documentation*. Eles especificam que a fotogrametria aérea foi realizada usando um drone DJI Phantom 4 Pro, enquanto a fotogrametria terrestre foi feita usando uma câmera DSLR Nikon D800. A coleta de dados no interior das edificações foi realizada usando a mesma câmera DSLR do nível do chão, bem como anexada em um poste telescópico de 5 metros. Eles afirmam que usaram a fotogrametria inteligente para minimizar extremamente o processo de filtragem de dados após a missão de aquisição de dados e para diminuir o tempo de processamento dos dados, uma vez que o autor estava usando seu próprio equipamento para a missão devido às limitações de ferramentas. A fotogrametria inteligente consiste em definir as melhores localizações da câmera para maximizar a qualidade e resolução do modelo 3D, reduzindo o número de imagens necessárias para o processamento.

Os autores definiram a Resolução de Amostragem do Solo (GSD) no início de cada missão, e a partir da GSD, definiram suas localizações da câmera: quão longe ela deveria estar do edifício, e quanto a estação da câmera deveria se mover verticalmente e horizontalmente, tanto para o drone quanto para o DLSR com base nos tamanhos dos sensores

das câmeras e nas resoluções das imagens. Eles relatam que, quando as circunstâncias permitiam, alvos codificados eram usados na superfície das elevações e eram posteriormente medidos usando uma estação total para escalar e georreferenciar seus modelos 3D. Quando eles não podiam se aproximar do edifício devido ao alto risco de colapso, pontos naturais claros ao redor dos edifícios eram registrados e medidos usando a estação total em vez disso. Eles informam que o número e a precisão dos pontos de controle no solo foram realizados seguindo as recomendações da Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ASPRS). Todos os dados adquiridos foram processados usando o software *Agisoft Metashape Professional Edition* (versão 1.6.2). Os autores usaram scripts *Python* no *Agisoft Metashape* para processar cada modelo em pedaços em vez de uma entidade, para reduzir o tempo de processamento e evitar travamentos do sistema do computador.

A Figura 33 apresenta os modelos fotogramétricos 3D completos de cada um dos 40 edifícios altamente arriscados gerados como resultado da missão.

Figura 33 - a) Amostra dos modelos texturizados fotogramétricos 3D gerados dos edifícios de alto risco em Beirute; b) Elevação norte do Palácio de Sursock: à direita, parte da ortofoto texturizada; à esquerda, parte da classificação do campo escalar da nuvem de pontos da elevação mostrando a deformação estrutural.



Fonte: (KALLAS; NAPOLITANO, 2023)

Como produto da digitalização, também foi fornecida uma tabela com os resultados do processamento de imagens usando o software Agisoft Metashape Professional Edition, mostrando os valores de GSD, RE, número de pontos 3D, número de faces de malha, tamanho e contagem de textura e tempo de processamento para cada edifício (Figura 34). Os autores destacam que a resolução do GSD variou de 0,3 a 2,4 mm/pixel em todos os modelos, com um valor médio de 1,69 mm/pixel, e que o erro de reprojeção variou de 0,5 a 0,6 pixels em todos os modelos, com um valor médio de 0,57 pixels. Eles explicam que com levantamentos fotogramétricos, eles são capazes de gerar três tipos diferentes de saídas em comparação com a varredura a laser, onde apenas nuvens de pontos 3D são geradas. Com a modelagem baseada em imagens, eles podem produzir uma nuvem de pontos 3D, um modelo malhado e um modelo malhado texturizado do objeto que estão documentando, maximizando assim as possibilidades de manipulação de dados posteriormente.

Figura 34 - Tabela com os resultados do processamento de imagens dos edifícios de alto risco.

Bldg No.	Drone Photos No.	DSLR Photos No.	GSD	RE	3D Points No.	Mesh Faces No.	Texture Size × Count	Texel Density	Processing Time
1	470	400	2.4 mm/pix	0.6 pix	136.6 M	22.2 M	4096 × 4	17.36 pix/cm <sup>2</sup>	10.2 hrs
2	350	230	1.6 mm/pix	0.6 pix	123.6 M	20.1 M	4096 × 4	38.83 pix/cm <sup>2</sup>	7 hrs
3	560	300	2.4 mm/pix	0.5 pix	128.4 M	20.7 M	4096 × 4	17.33 pix/cm <sup>2</sup>	9.8 hrs
4	380	300	1.2 mm/pix	0.6 pix	224.5 M	36.2 M	4096 × 4	69.44 pix/cm <sup>2</sup>	8.1 hrs
5	400	260	1.3 mm/pix	0.6 pix	200 M	32.2 M	4096 × 4	59.17 pix/cm <sup>2</sup>	7.7 hrs
6	330	200	1 mm/pix	0.5 pix	170.1 M	27.4 M	4096 × 4	100.01 pix/cm <sup>2</sup>	6.2 hrs
7	370	210	1 mm/pix	0.6 pix	135.3 M	21.8 M	4096 × 4	100.22 pix/cm <sup>2</sup>	6.8 hrs
8	300	200	2.4 mm/pix	0.6 pix	128.4 M	20.7 M	4096 × 4	17.25 pix/cm <sup>2</sup>	6 hrs
9	470	300	1.8 mm/pix	0.6 pix	138.3 M	22.3 M	4096 × 4	30.86 pix/cm <sup>2</sup>	9 hrs
10	380	250	1.5 mm/pix	0.6 pix	100.6 M	13 M	4096 × 4	44.44 pix/cm <sup>2</sup>	7.5 hrs
11	310	150	1.8 mm/pix	0.6 pix	122.1 M	19.7 M	4096 × 4	30.57 pix/cm <sup>2</sup>	5.4 hrs
12	560	250	1.5 mm/pix	0.5 pix	123.9 M	20 M	4096 × 4	44.41 pix/cm <sup>2</sup>	9.5 hrs
13	300	200	2 mm/pix	0.6 pix	130.1 M	21 M	4096 × 4	25.00 pix/cm <sup>2</sup>	5.8 hrs
14	300	210	2 mm/pix	0.6 pix	190.8 M	24.2 M	4096 × 4	25.17 pix/cm <sup>2</sup>	6 hrs
15	320	220	1.8 mm/pix	0.6 pix	202 M	32.3 M	4096 × 4	30.38 pix/cm <sup>2</sup>	6.6 hrs
16	400	300	1.5 mm/pix	0.6 pix	264.3 M	42.2 M	4096 × 4	44.24 pix/cm <sup>2</sup>	8.9 hrs
17	300	250	2 mm/pix	0.5 pix	90.3 M	14.2 M	4096 × 4	25.11 pix/cm <sup>2</sup>	6.7 hrs
18	550	300	1.8 mm/pix	0.6 pix	270 M	35.5 M	4096 × 4	30.36 pix/cm <sup>2</sup>	9.8 hrs
19	570	310	1 mm/pix	0.5 pix	265.2 M	35.1 M	4096 × 4	100.11 pix/cm <sup>2</sup>	10.7 hrs
20	300	250	1.9 mm/pix	0.6 pix	126.9 M	16.8 M	4096 × 4	27.70 pix/cm <sup>2</sup>	6.4 hrs
21	320	230	1.6 mm/pix	0.6 pix	136.7 M	18.1 M	4096 × 4	39.06 pix/cm <sup>2</sup>	6.6 hrs
22	330	260	2 mm/pix	0.6 pix	146.5 M	19.4 M	4096 × 4	25.12 pix/cm <sup>2</sup>	7.1 hrs
23	300	280	1.9 mm/pix	0.5 pix	151.7 M	20.1 M	4096 × 4	27.42 pix/cm <sup>2</sup>	6.8 hrs
24	290	260	2 mm/pix	0.6 pix	101.1 M	13.4 M	4096 × 4	25.10 pix/cm <sup>2</sup>	6.6 hrs
25	310	280	2 mm/pix	0.6 pix	124.4 M	16.5 M	4096 × 4	24.92 pix/cm <sup>2</sup>	6.9 hrs
26	300	260	1.8 mm/pix	0.6 pix	128.9 M	17.1 M	4096 × 4	30.26 pix/cm <sup>2</sup>	6.5 hrs
27	250	210	2 mm/pix	0.6 pix	113.8 M	15.1 M	4096 × 4	25.23 pix/cm <sup>2</sup>	5.5 hrs
28	360	240	1.5 mm/pix	0.6 pix	165.8 M	22 M	4096 × 4	44.29 pix/cm <sup>2</sup>	7 hrs
29	400	310	1.3 mm/pix	0.5 pix	330 M	45 M	4096 × 4	59.61 pix/cm <sup>2</sup>	8.5 hrs
30	420	250	1.8 mm/pix	0.6 pix	160.2 M	25.3 M	4096 × 4	30.96 pix/cm <sup>2</sup>	7.9 hrs
31	380	220	2 mm/pix	0.6 pix	139.3 M	22 M	4096 × 4	24.80 pix/cm <sup>2</sup>	7 hrs
32	370	200	1.8 mm/pix	0.5 pix	125.4 M	19.8 M	4096 × 4	30.08 pix/cm <sup>2</sup>	6.8 hrs
33	320	250	1.6 mm/pix	0.6 pix	170.9 M	27 M	4096 × 4	39.06 pix/cm <sup>2</sup>	7 hrs
34	350	300	2 mm/pix	0.6 pix	190.3 M	30 M	4096 × 4	25.41 pix/cm <sup>2</sup>	7.6 hrs
35	400	210	1.1 mm/pix	0.5 pix	116.1 M	18.3 M	4096 × 4	82.44 pix/cm <sup>2</sup>	7.2 hrs
36	320	300	1.9 mm/pix	0.6 pix	111.6 M	17.6 M	4096 × 4	27.18 pix/cm <sup>2</sup>	7 hrs
37	250	260	1.3 mm/pix	0.6 pix	155.3 M	24.6 M	4096 × 4	59.12 pix/cm <sup>2</sup>	7.2 hrs
38	420	280	2 mm/pix	0.6 pix	182.4 M	28.9 M	4096 × 4	25.16 pix/cm <sup>2</sup>	8.2 hrs
39	320	180	1.4 mm/pix	0.6 pix	153.3 M	24.3 M	4096 × 4	51.03 pix/cm <sup>2</sup>	7.1 hrs
40	310	225	2.2 mm/pix	0.5 pix	164.6 M	26.1 M	4096 × 4	20.66 pix/cm <sup>2</sup>	7.8 hrs
Total	14,640	9695	N/A	N/A	6,339.7 M	948.2 M	N/A	N/A	319.8 hrs

Fonte: (KALLAS; NAPOLITANO, 2023)

Os modelos 3D georreferenciados e escalados foram utilizados para auxiliar os engenheiros e especialistas no processo de escoramento de emergência dos edifícios. Além disso, esses modelos foram empregados para obter informações rápidas e precisas de dimensões, seções, elevações e para visualizar de forma clara as áreas danificadas e sua geometria (Figura 35a). O escoramento foi projetado e implementado com sucesso em edifícios altamente arriscados, com a supervisão próxima de voluntários especialistas (Figura 35c). Os autores extraíram modelos dos telhados dos edifícios a partir dos principais modelos 3D e isolaram essas partes para facilitar a inspeção (Figura 35b). Foram gerados planos, elevações e seções desses modelos, que foram compartilhados com especialistas em telhados para avaliação e fornecimento de informações de medição aos fabricantes, que cortaram as folhas de lona e metal de acordo com essas medidas. O escoramento foi então implementado com sucesso para os edifícios altamente arriscados. (Figura 35d).

A documentação 3D e a digitalização contribuíram para acelerar a geração de análises estruturais preliminares, permitindo a implementação rápida de intervenções de emergência. Os autores processaram as nuvens de pontos 3D utilizando o software *CloudCompare* (versão v2.11.2) para determinar e medir automaticamente o desvio das paredes em relação aos planos de elevação de cada edifício. Foram aplicadas classificações de campos escalares nas elevações dos edifícios, permitindo o estudo e análise do comportamento físico após a explosão. Cada ponto na nuvem de pontos 3D foi classificado e atribuído uma cor que variava do azul ao vermelho, de acordo com seu desvio em relação aos planos de elevação. Essas descobertas foram cruzadas com evidências de rachaduras ou deslocamentos observados nas fotos coletadas pelo drone (Figura 33b), servindo como confirmação das deformações identificadas.

Engenheiros e especialistas em patrimônio receberam a documentação 3D para analisar a forma exata, localização e limites das deformações, a fim de orientar suas análises e intervenções. A digitalização 3D também acelerou o processo de elaboração dos arquivos de restauração, que são necessários para obter financiamento e iniciar as obras de restauração e consolidação dos edifícios históricos danificados (Figura 35a). Os modelos precisos fornecidos permitiram a geração de ortofotos de alta resolução e mensuráveis para as quatro elevações e vista superior de cada edifício digitalizado. Isso possibilitou um mapeamento mais preciso das deteriorações nas elevações texturizadas. Além disso, seções verticais e horizontais foram geradas automaticamente a partir dos modelos 3D, facilitando a produção rápida de planos e seções escalados e texturizados do espaço interior. Os planos extraídos



mostraram os escombros demolidos na superfície dos pisos, refletindo a condição pós-explosão.

Essa abordagem permitiu aos arquitetos estudar e medir a geometria de cada elemento arquitetônico caído e danificado, facilitando o redesenho desses elementos, seguindo as mesmas proporções e detalhes, para que as substituições possam ser fabricadas com base na configuração original (Figura 35e). Também foram gerados planos texturizados e escalados dos tetos altamente decorados para avaliação e mapeamento preciso (Figura 35f). Arquitetos e especialistas em patrimônio utilizaram esses documentos para acelerar a produção de arquivos de restauração, evitando as longas horas de levantamento físico no local. Além disso, permitiu que eles acessassem e avaliassem remotamente áreas que eram inacessíveis fisicamente devido ao ambiente inseguro antes da completa consolidação dos edifícios.

Figura 35 - a) Ortofotos texturizadas das quatro elevações e vista superior de um dos edifícios de alto risco; b) Modelo 3D extraído e as ortofotos texturizadas de um dos telhados inclinado; c) Foto do escoramento estrutural instalado na elevação externa; d) Foto da instalação do abrigo no telhado inclinado; e) Ortofoto texturizada de uma seção interna; f) Ortofoto texturizada da planta interna do teto.

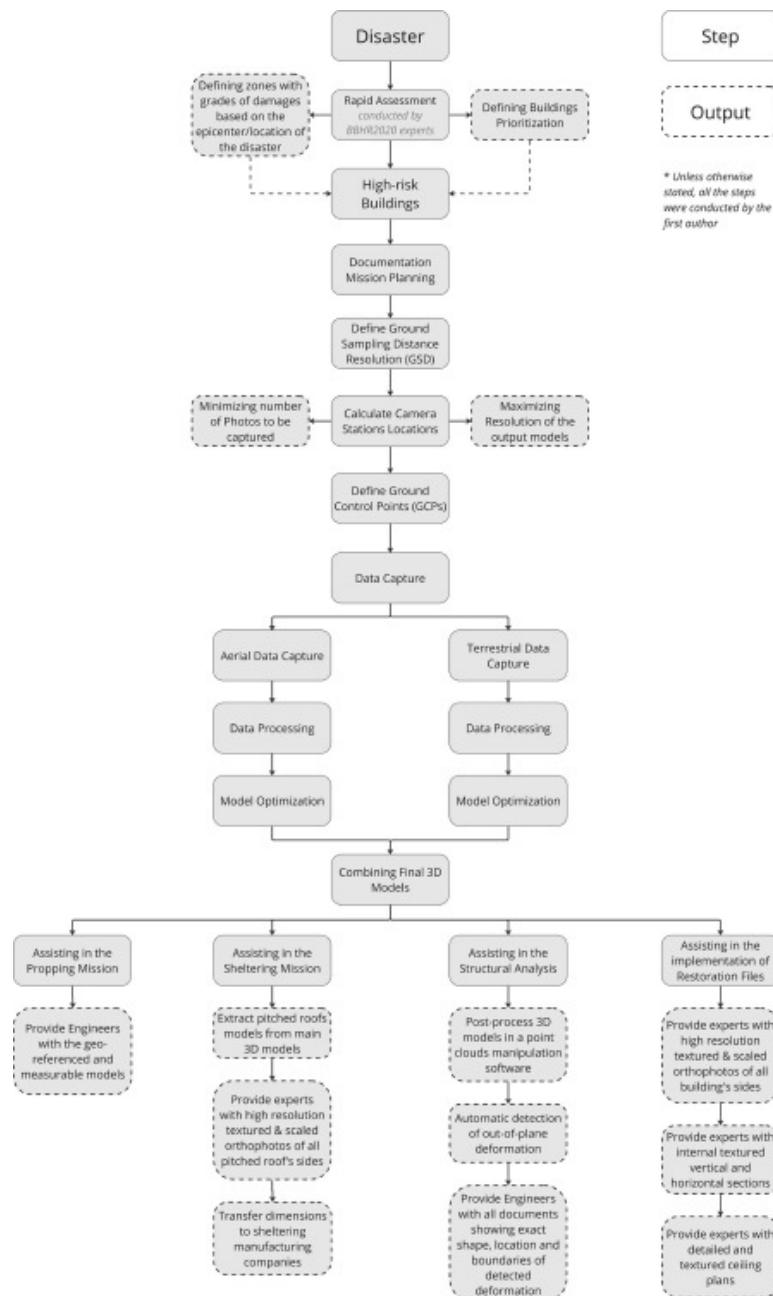


Fonte: (KALLAS; NAPOLITANO, 2023)



Os autores criaram um diagrama de fluxo de trabalho que resume e visualiza as várias etapas e processos que foram empregados ao longo das atividades (Figura 36), podendo ser usado em futuros esforços de planejamento pós-desastre para facilitar a avaliação remota dos edifícios históricos danificados e acelerar a implementação de intervenções de emergência.

Figura 36 - Diagrama do fluxo de trabalho de digitalização com as etapas da missão de documentação 3D em Beirute.



Fonte: (KALLAS; NAPOLITANO, 2023)

Os autores afirmam que as tecnologias digitais podem ser úteis para preservar e proteger o patrimônio cultural de forma mais eficiente. Em particular, a documentação em 3D pode substituir métodos tradicionais demorados de levantamento e mapeamento, especialmente em situações perigosas após desastres. A documentação em 3D também pode ajudar a fazer uma avaliação preliminar da estrutura dos edifícios de forma imediata, permitindo intervenções de emergência rápidas para evitar mais danos. No entanto, uma das limitações encontradas durante o trabalho foi a falta de varreduras anteriores dos edifícios para comparação com os modelos 3D gerados após as explosões. Os autores argumentam que a comparação teria proporcionado uma avaliação mais abrangente dos danos estruturais e uma compreensão mais profunda do impacto das explosões. Nesse sentido, os autores sugerem a criação de um banco de dados abrangente de documentação 3D pré-desastre para edifícios históricos, a fim de se preparar melhor para futuros desastres.

Outro desafio enfrentado foi o acesso limitado a ferramentas avançadas devido a restrições orçamentárias. Os autores sugerem investir em uma melhor infraestrutura de hardware para projetos futuros, o que resultaria em um processamento mais rápido e um fluxo de trabalho mais eficiente. Eles concluem que a missão de documentação digital de Beirute após a explosão demonstra como a tecnologia pode ser usada para preservar fisicamente estruturas danificadas, em vez de apenas preservar digitalmente. Eles esperam que a digitalização do patrimônio cultural se torne mais comum no futuro, servindo como uma ferramenta valiosa para monitorar a saúde estrutural e estabelecer planos de gestão de risco para o patrimônio.

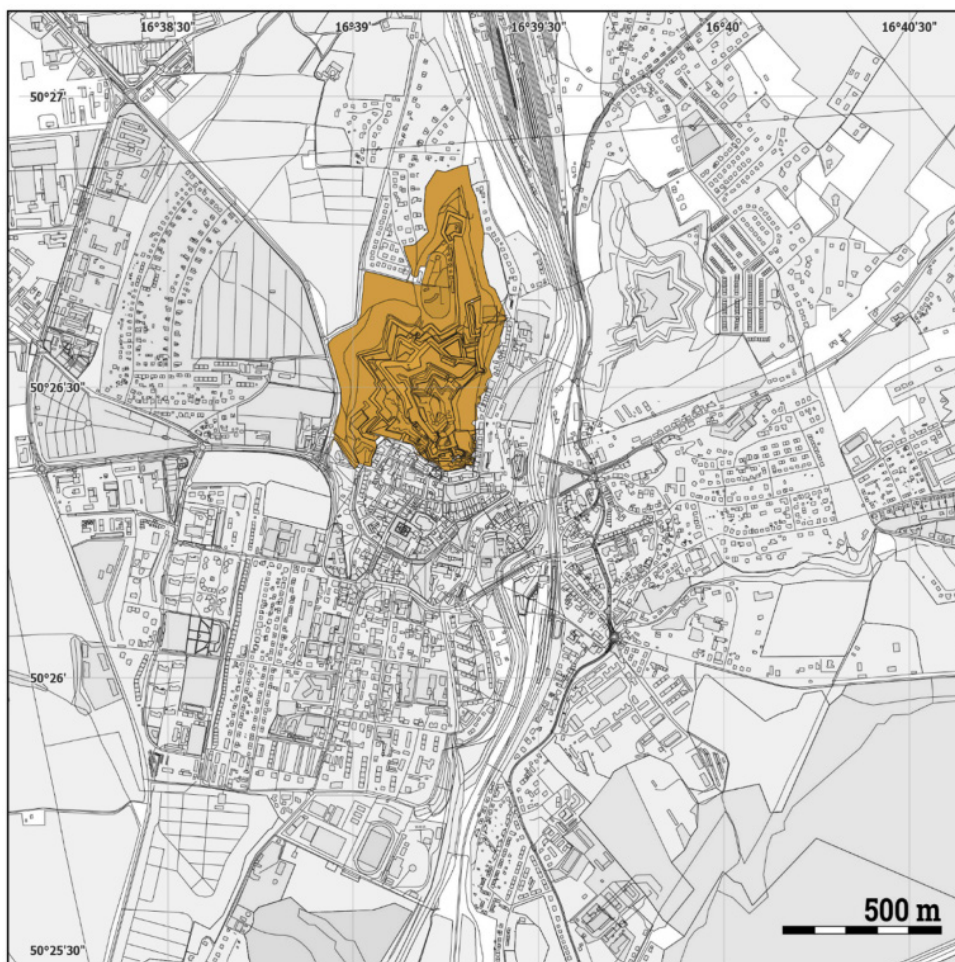
O trabalho de Kallas e Napolitano (2023) é relevante e oportuno, pois aborda um tema de grande importância para a preservação do patrimônio cultural em situações de desastre. Eles mostram como a tecnologia de modelagem baseada em imagens 3D pode desempenhar um papel importante no processo de recuperação de áreas pós-desastre, fornecendo modelos precisos e rápidos que podem auxiliar na análise estrutural, intervenção de emergência, elaboração de arquivos de restauração e registro para a posteridade. E também propõem um diagrama de fluxo de trabalho abrangente que pode ser aplicado e adotado em casos semelhantes de perigo no futuro. No entanto, o estudo também apresenta algumas limitações e pontos fracos que poderiam ser melhorados. Por exemplo, os autores não discutem em profundidade as questões éticas e legais envolvidas na documentação digital do patrimônio cultural, como o consentimento dos proprietários, a proteção dos dados, o acesso público e a propriedade intelectual. Eles também não fornecem uma avaliação quantitativa ou qualitativa da qualidade e precisão dos modelos 3D gerados, nem comparam seu método com

outras técnicas ou ferramentas disponíveis para documentação digital. Além disso, eles não apresentam uma discussão crítica sobre os desafios e limitações da aplicação da tecnologia 3D em contextos complexos e dinâmicos, como áreas pós-desastre, onde fatores como segurança, infraestrutura, comunicação, coordenação e participação podem afetar o sucesso da missão.

### ***2.4.3 Interação virtual com o patrimônio histórico***

A documentação e a interação digital com o patrimônio cultural em tempos de pandemia e pós-pandemia foram objetos de estudo de Franczuk et al. (2022). Os autores destacam o impacto negativo da pandemia COVID-19 no setor de turismo cultural e a necessidade de aplicar uma nova abordagem baseada no mundo virtual.

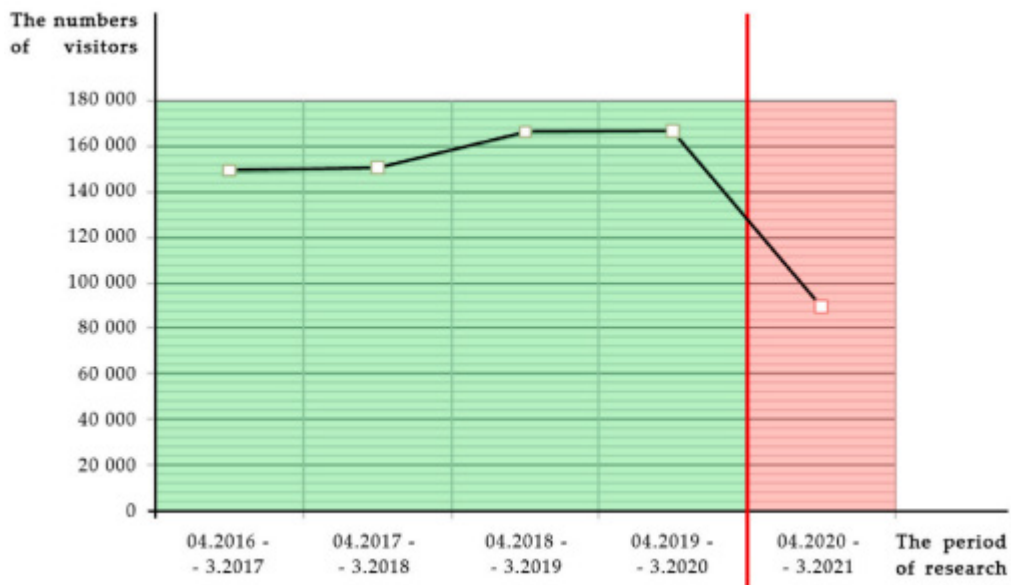
Figura 37 - Localização da fortaleza de Klodzko.



Fonte: (FRANCZUK et al., 2022)

A Fortaleza de Kłodzko foi o local de estudo escolhido para o projeto, pelo fato de ser um complexo militar valioso e bem preservado da Baixa Silésia. Eles fornecem informações históricas e arquitetônicas sobre a fortaleza, bem como dados sobre o número de visitantes antes e depois da pandemia (Figura 38).

Figura 38 - Gráfico do número de visitantes da Fortaleza de Kłodzko antes da pandemia de SARS COVID 19 (verde) e após o ano de duração da pandemia (vermelho).

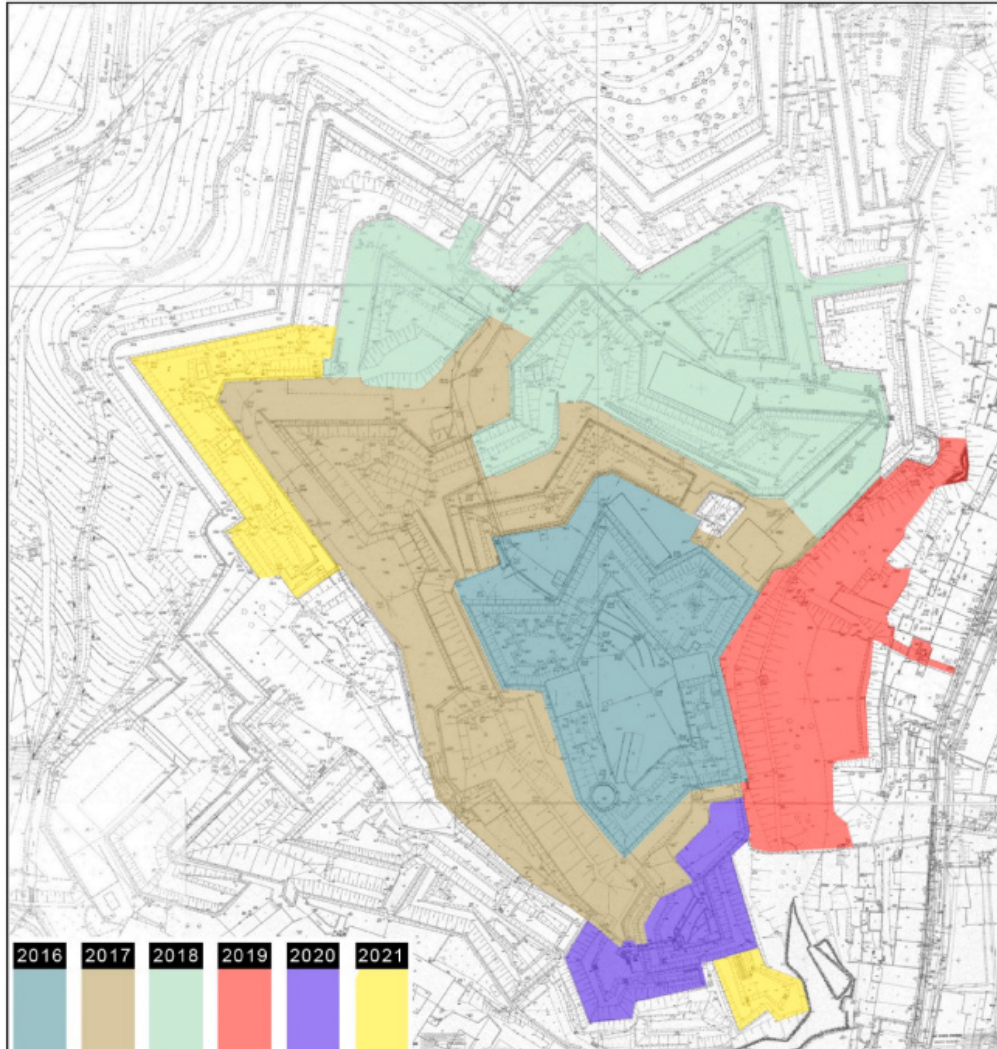


Fonte: (FRANCZUK et al., 2022)

As ferramentas utilizadas para a documentação digital da fortaleza consistiram na no laser scanner terrestre (LST) para visualizar o mundo real em forma de nuvem de pontos. Os autores relatam os detalhes técnicos e operacionais do processo de varredura, que foi realizado em etapas desde 2016 até 2021 (Figura 39), cobrindo cerca de 80% da fundação da fortaleza. Eles também mencionam o uso de fotogrametria como um método complementar para obter modelos 3D coloridos de partes selecionadas da fortaleza (Figura 40).

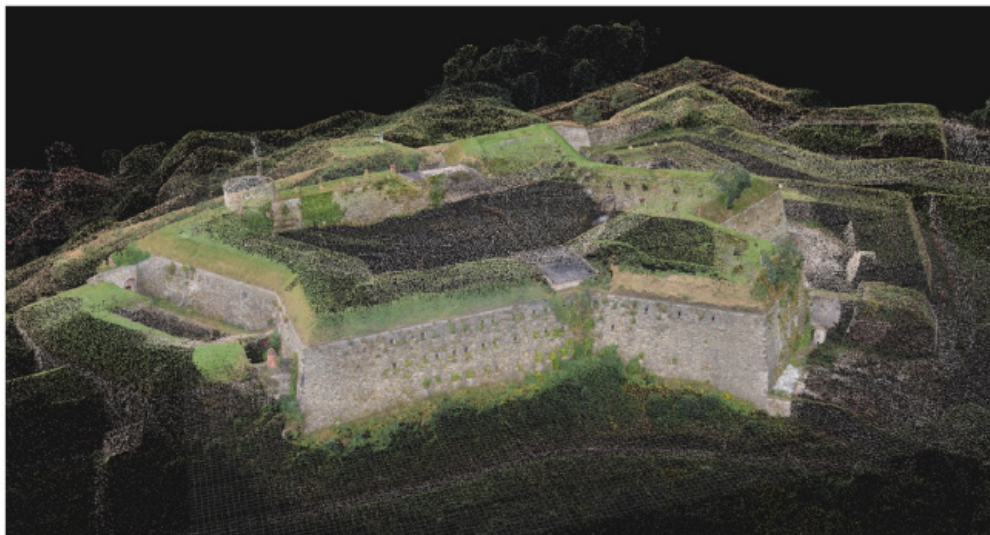


Figura 39 - Estágios da varredura por ano.



Fonte: (FRANCZUK et al., 2022)

Figura 40 - Modelo 3D de fotogrametria.

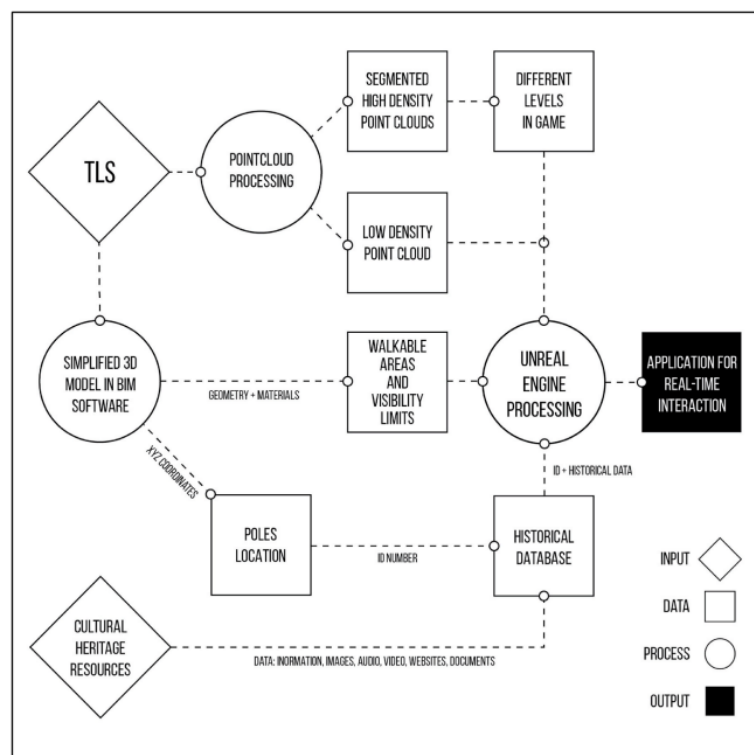


Fonte: (FRANCZUK et al., 2022)

O processo de criação da aplicação envolveu várias etapas, incluindo a exportação, redução, segmentação e limpeza da nuvem de pontos obtida por LST. Foi criado um modelo 3D simplificado no software Archicad para delimitar as áreas visíveis e transitáveis. Esse modelo foi exportado para a Unreal Engine usando o Datasmith Exporter, e os recursos históricos foram vinculados aos objetos paramétricos no espaço virtual por meio de um script (Figura 41).

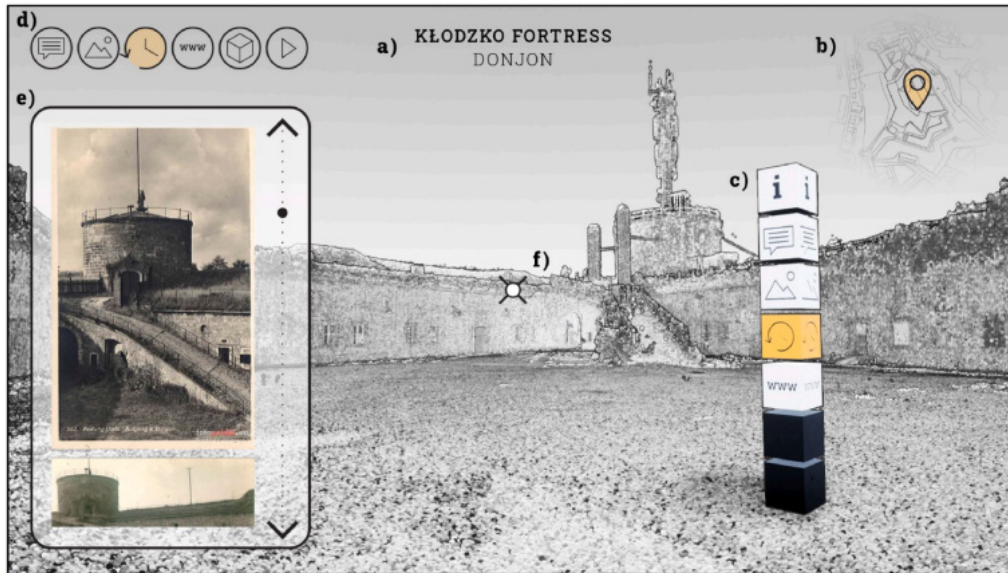
A aplicação resultante permite ao usuário explorar livremente o espaço tridimensional utilizando controles padrão de jogos de computador, e oferece acesso a diferentes tipos de informações sobre a fortaleza por meio de pontos de aprendizagem interativos (PoLEs) exibidos na tela. A interface do usuário foi simplificada ao mínimo, com foco na comunicação visual (Figura 42). Os autores conduziram uma avaliação preliminar da experiência do usuário por meio de uma pesquisa online realizada com profissionais e pessoas sem vínculos com a conservação e questões patrimoniais (Figura 43). As avaliações dos participantes foram semelhantes e indicaram uma recepção positiva da ideia da aplicação. Alguns participantes forneceram comentários e sugestões, como adicionar cores à nuvem de pontos para aumentar a atratividade visual e melhorar a interatividade por meio de efeitos sonoros, música de fundo ou narração para guiar o usuário durante o passeio.

Figura 41 - Diagrama de fluxo do processo.



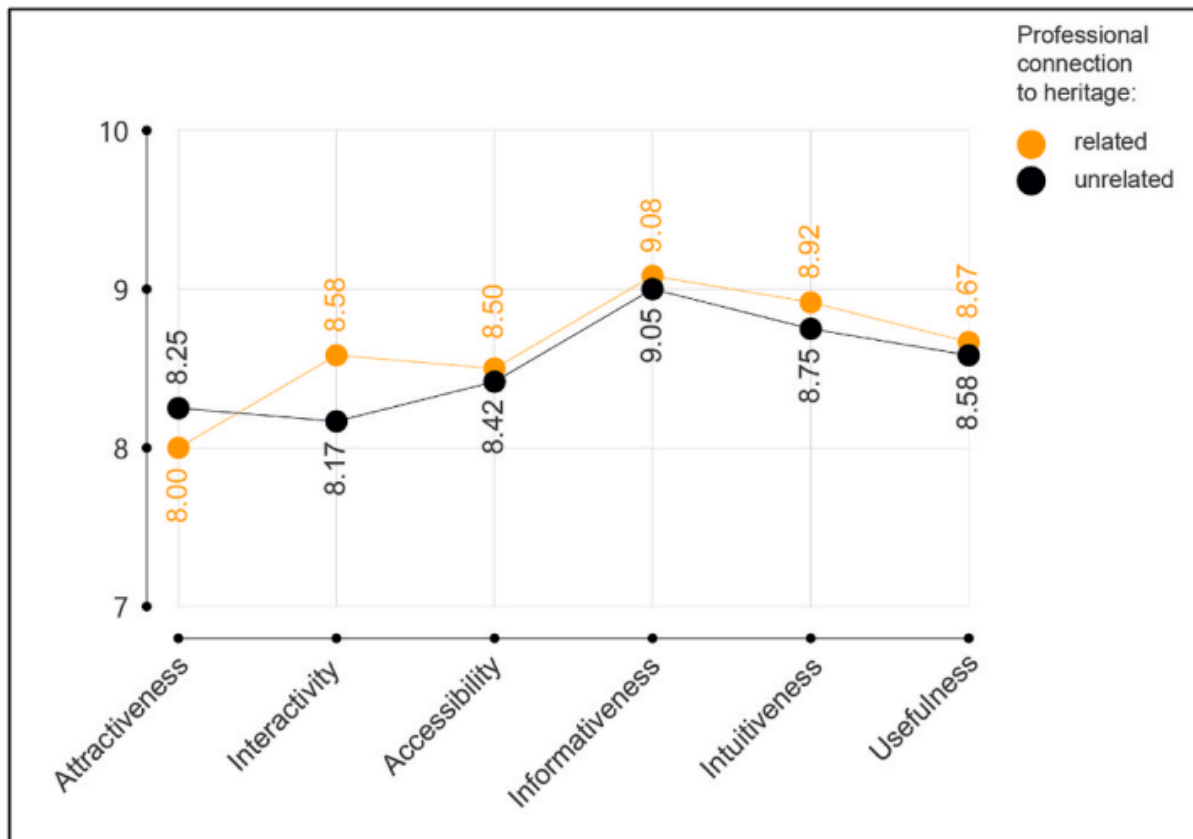
Fonte: (FRANCZUK et al., 2022)

Figura 42 - Interface do usuário.



Fonte: (FRANCZUK et al., 2022)

Figura 43 - Resultados de uma pesquisa inicial de avaliação do aplicativos com 50 participantes.



Fonte: (FRANCZUK et al., 2022)

Os autores concluem que o objetivo final da aplicação, ainda em desenvolvimento, é estar disponível na forma de um site e um aplicativo móvel e ser acessível ao público em geral. Eles também afirmam que o desenvolvimento futuro seria usá-lo como um complemento para um passeio no mundo pós-pandêmico.

Segundo Franczuk et al. (2022), o projeto demonstrou relevância e oportunidade ao abordar a preservação do patrimônio cultural durante desastres. Os resultados alcançados foram bem-sucedidos, com a criação de uma ferramenta digital segura e acessível, acelerando a preparação do modelo e permitindo sua expansão através de uma base de dados histórica. Apesar disso, foram identificadas limitações, como a possibilidade de aprimorar a qualidade visual com fotogrametria colorida e aumentar a interatividade por meio de efeitos sonoros, música ou narração. Recomenda-se que o projeto sirva como um modelo para iniciativas futuras de documentação e interação digital com o patrimônio cultural, incentivando colaborações e conscientização pública sobre a importância desse patrimônio.

O trabalho desenvolvido por Franczuk et al. (2022) é de alta qualidade e apresenta uma solução original e inovadora para a documentação e interação digital com o patrimônio cultural em situações de desastre, como foi a pandemia do COVID 19. O uso direto de nuvens de pontos é destacado como uma abordagem eficiente, evitando processos complexos e demorados de modelagem 3D. O estudo de caso da Fortaleza de Kłodzko, na Polônia, ilustra como essa solução foi aplicada, combinando tecnologias como LST, fotogrametria, Archicad, Unreal Engine e FileMaker Pro. O trabalho não se limita a descrever o projeto, mas também considera suas limitações, desafios e possibilidades de melhoria e expansão. Em síntese, o trabalho contribui significativamente para o avanço do conhecimento e prática na área de documentação e interação digital com o patrimônio cultural em situações de desastre. Sua abordagem inovadora e relevante destaca a importância desse tema, especialmente em contexto de pandemias.

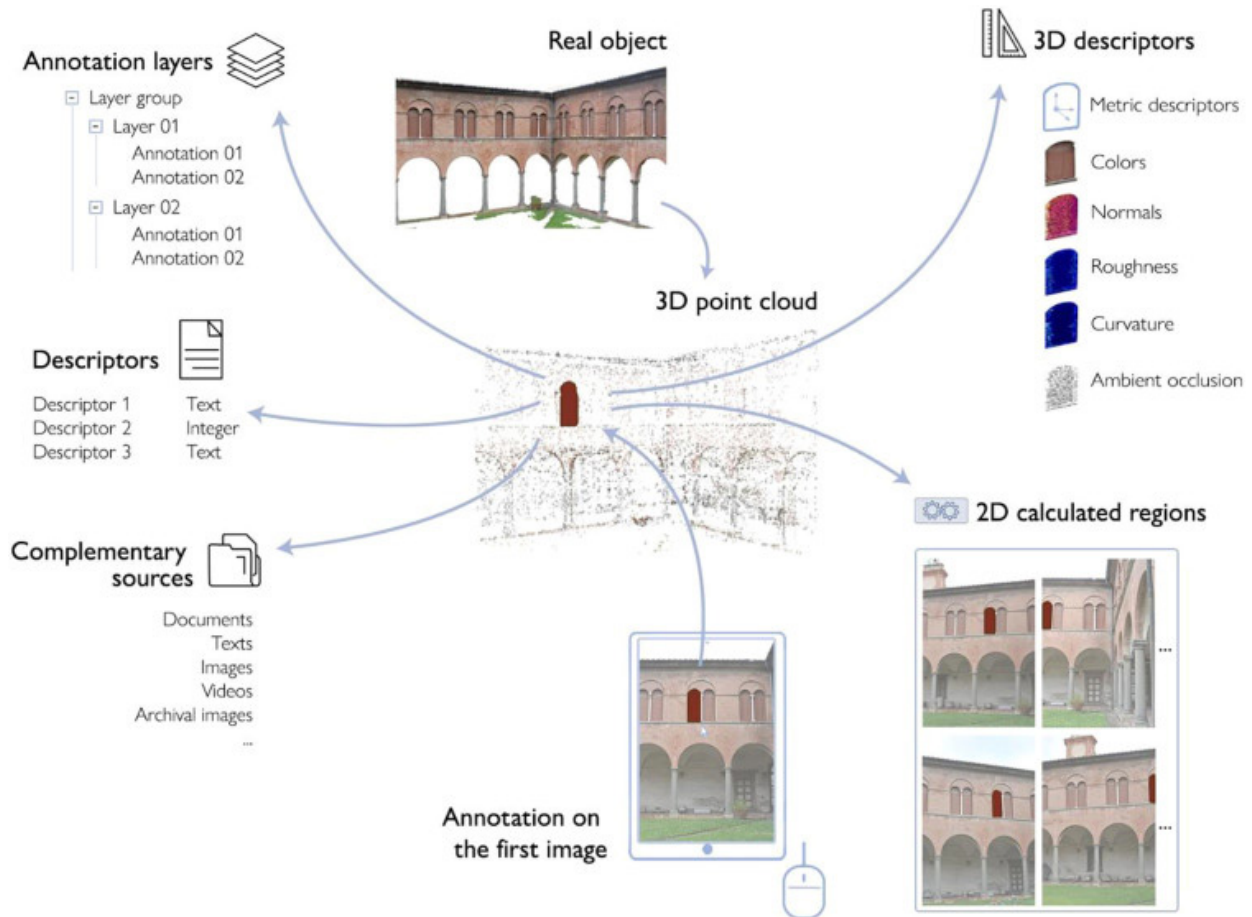
#### ***2.4.4 O patrimônio histórico e as tecnologias de aprendizado de máquina***

Em um estudo utilizando Machine Learning (aprendizado de máquina) e Deep Learning (Aprendizado profundo), Croce et al. (2023) propõem uma abordagem para facilitar a marcação de elementos digitais de patrimônio cultural, combinando métodos de anotação em 2D/3D com técnicas de classificação automatizada. A plataforma Aioli, uma ferramenta de anotação de código aberto baseada na web, é utilizada como base para essas abordagens de classificação. O objetivo é fornecer aos especialistas em patrimônio cultural ferramentas



automatizadas para a marcação híbrida de objetos arquitetônicos, permitindo a identificação de componentes de construção, padrões de deterioração, mapeamento de mudanças, materiais, entre outros, facilitando o compartilhamento e acesso a informações em 2D/3D pela web.

Figura 44 - Inserção de informação da plataforma Aioli.

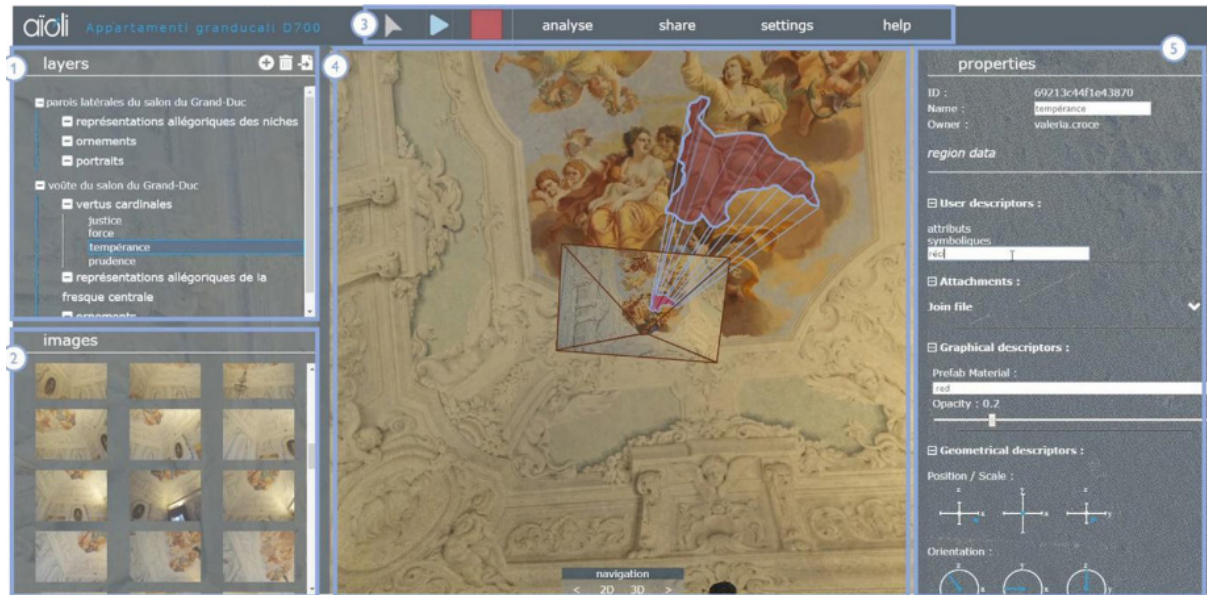


Fonte: (CROCE et al., 2023)

O trabalho de Croce et al. (2023) visa também atender às necessidades de profissionais envolvidos em atividades de restauração e conservação, oferecendo um conjunto de ferramentas automatizadas para a marcação, com os seguintes benefícios: preservação dos dados ao transitar entre diferentes tipos de representação; propagação de informações analiticamente relevantes por meio de modelos digitais e/ou imagens, e compartilhamento de dados relacionados ao patrimônio na web por meio de uma abordagem de código aberto.

Os autores apresentam três formas de anotar ativos do patrimônio digital com inteligência artificial na plataforma Aioli. Cada forma usa um algoritmo diferente para classificar imagens ou nuvens de pontos 3D e transferir as anotações entre eles (Figura 45).

Figura 45 - Interface da plataforma Aioli.



Fonte: (CROCE et al., 2023)

Croce et al. (2023) desenvolveram três ferramentas de anotação automática para serem implementadas na plataforma Aioli. Essas ferramentas combinam o método de anotação híbrida do Aioli com algoritmos de classificação baseados em inteligência artificial (IA) e estão divididas em duas fases principais. Na primeira fase, é realizada a anotação de um conjunto de dados de amostra (conjunto de treinamento) e, com base nessa anotação, é construído um modelo preditivo de aprendizado de máquina (AM) ou aprendizado profundo (AP). Esse modelo é capaz de classificar corretamente todo o conjunto de dados, identificando classes de elementos arquitetônicos, materiais, deterioração ou outras condições em partes não anotadas anteriormente. Os fluxos de trabalho já apresentados anteriormente são utilizados nessa fase, aproveitando o AM supervisionado com RF (Random Forest) e as redes neurais convolucionais para AP.

Na segunda fase, os dados classificados resultantes do primeiro processo, tanto em formato 2D (imagens) quanto em formato 3D (nuvens de pontos), são utilizados para propagar a informação para diferentes tipos de representações. Isso significa que, se algoritmos de classificação forem aplicados às imagens, a anotação em 2D é usada para enriquecer semanticamente a representação em 3D, e vice-versa, se a nuvem de pontos for classificada, a anotação é propagada do 3D para o conjunto de imagens. Essas etapas do fluxo de trabalho são realizadas utilizando o método de transferência de informações híbridas do Aioli, que reconstrói as relações projetivas entre as imagens e as nuvens de pontos fotogramétricas.

As ferramentas desenvolvidas para implementação na plataforma possuem características distintas de acordo com o tipo de dados a serem anotados e o nível de intervenção do usuário necessário. O usuário final tem a liberdade de escolher entre os três métodos gerais disponíveis, levando em consideração as necessidades específicas de documentação de cada caso e optando pelo meio que for mais fácil de ser anotado em cada situação.

Os três métodos de implementação do Aïoli são descritos na tabela apresentada na Figura 46. Cada método se diferencia pelo grau de intervenção do usuário, pelo tipo de algoritmo de AM/AP aplicado aos dados 2D ou 3D e pelo fluxo de projeção associado. O primeiro método envolve anotação manual em um conjunto reduzido de imagens, com transferência da anotação para a nuvem de pontos por meio de projeção 2D-3D. O segundo método utiliza um conjunto de imagens anotadas para classificar todo o conjunto de imagens, com as anotações resultantes sendo transferidas de volta para o formato 3D por projeção. No terceiro método, a anotação manual não é necessária, sendo utilizada uma rede neural convolucional pré-treinada (DeepLabv3+) para realizar a segmentação semântica das imagens, com posterior projeção dos resultados para o formato 3D. Todos os métodos são baseados em scripts desenvolvidos em MATLAB, utilizando as ferramentas do Statistics & Machine Learning Toolbox e Deep Learning Toolbox da MathWorks. A segmentação semântica do segundo método é realizada com o auxílio da ferramenta *Ilastik*.

Figura 46 - Tabela com a visão geral dos métodos propostos.

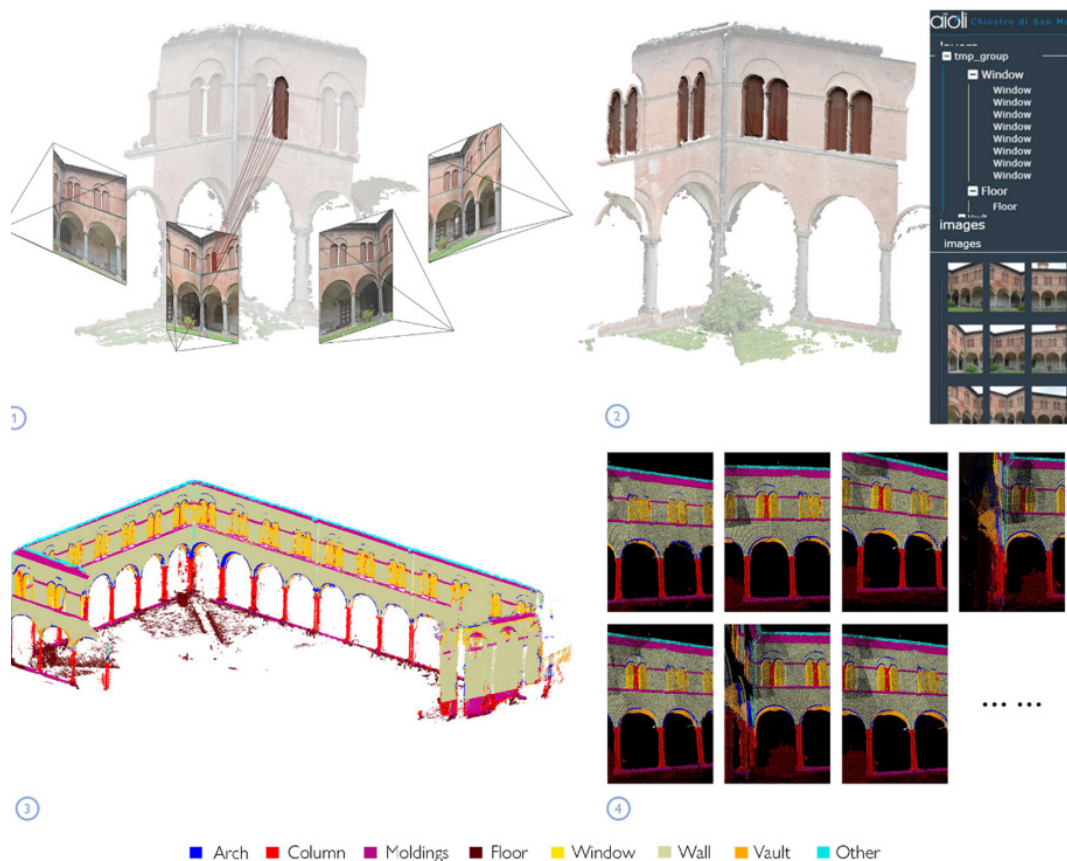
	User intervention	ML/DL method	Projection flow
1 <sup>st</sup> method	Manual annotation only <b>on one or few images</b>	Point cloud semantic segmentation problem – <b>Random Forest</b>	<b>2D</b> (portion of manually annotated images) – <b>3D</b> (portion) – <b>3D</b> (classified whole point cloud)
2 <sup>nd</sup> method	Manual annotation only <b>on one or few images</b>	Image semantic segmentation problem – <b>Random Forest</b>	<b>2D</b> (portion of manually annotated images) – <b>3D</b> (classified whole point cloud) – <b>3D</b> (whole point cloud)
3 <sup>rd</sup> method	Manual annotation is not demanded: <b>pre-trained models on existing labeled datasets</b>	Image semantic segmentation problem – <b>CNNs (DeepLab v3+ and ResNet-18)</b>	<b>2D</b> (existing dataset of labeled images) – <b>2D</b> (classified images) – <b>3D</b> (whole point cloud)

Fonte: (CROCE et al., 2023)

A metodologia proposta por Croce et al. (2023) foi aplicada em três estudos de caso relacionados à cidade de Pisa, na Itália, que envolvem a utilização de técnicas fotogramétricas e levantamentos topográficos tradicionais. Esses estudos abrangem a análise do claustro do Museu Nacional de San Matteo, uma seção das muralhas da cidade e a fachada da Escola de Engenharia em Pisa.

Os autores dividiram os resultados conforme os três métodos propostos. O primeiro método utilizou a plataforma Aïoli para realizar a anotação manual em apenas algumas imagens. A abordagem semiautomática de anotação 2D/3D é resumida na Figura 47 com referência à anotação de componentes arquitetônicos recorrentes no modelo fotogramétrico do Claustro de San Matteo; cada componente arquitetônico é identificado por um índice de classe com cor associada. A partir da anotação de partes da imagem e transferindo essa informação para o 3D, explorando as relações projetivas entre imagens e modelos fotogramétricos, o usuário pode definir um conjunto de treinamento híbrido 2D/3D de dados anotados. O conjunto de treinamento identificado em 3D é explorado para classificar toda a nuvem de pontos, por meio do algoritmo Random Forest; em uma etapa final, as anotações propagadas na nuvem de pontos 3D são exploradas para anotar automaticamente as imagens, projetando de volta a informação de segmentação semântica.

Figura 47 - Primeiro método de implementação: os usuário realizam a anotação manual em uma única imagem.

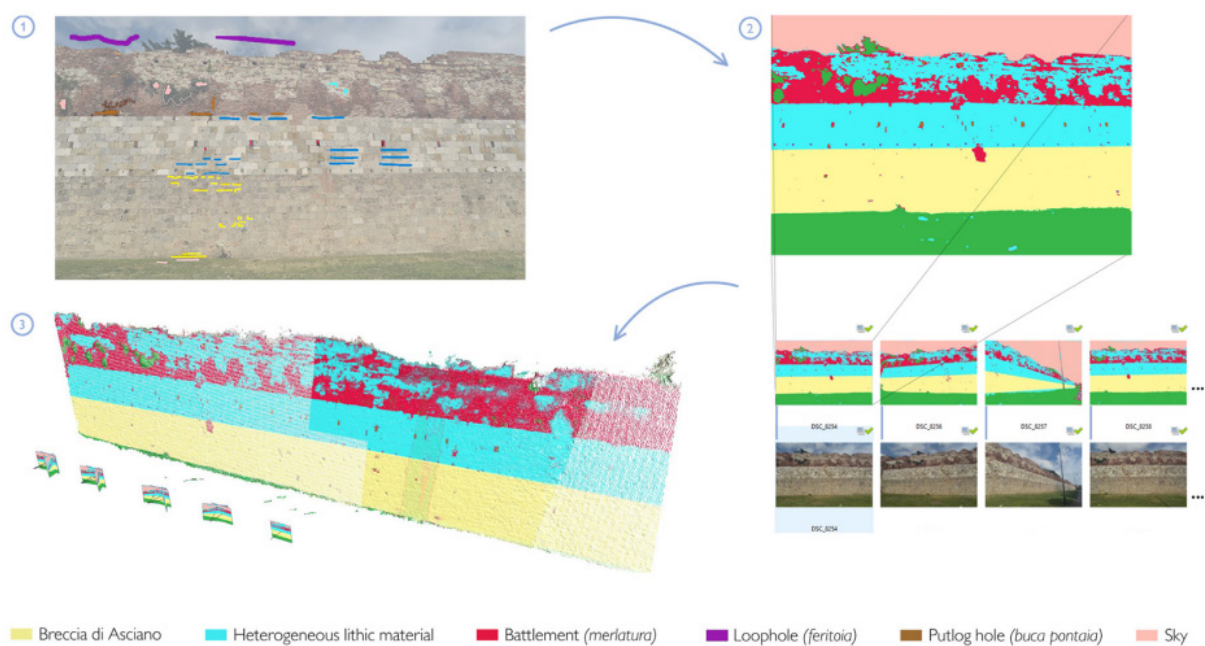


Fonte: (CROCE et al., 2023)



O segundo método de enriquecimento semântico de dados do patrimônio digital baseia-se no processamento fotogramétrico. Começando com a anotação manual de uma ou algumas imagens representativas do conjunto de dados, o usuário categoriza as classes nas quais os dados devem ser divididos. Utilizando esse conjunto de dados amostrais e identificando características comuns nas imagens, o algoritmo de aprendizado de máquina supervisionado, RF, pode ser treinado. Nesse método, assim como no primeiro, o usuário realiza a anotação manual de parte da imagem e os dados são classificados por um procedimento de aprendizado de máquina supervisionado. No entanto, nesse caso, o classificador é treinado com informações 2D (imagens) em vez de dados 3D (nuvens de pontos). O resultado é um conjunto completo de imagens classificadas. Utilizando os métodos de transferência de anotação desenvolvidos no Aioli, as informações de classificação podem ser propagadas do conjunto de imagens para a nuvem de pontos. O fluxo de projeção dessa informação é ilustrado na Figura 48, utilizando como exemplo o estudo de caso das muralhas de Pisa. Nesse estudo, a abordagem foi adaptada para identificar padrões de materiais e detectar diferentes camadas de construção em um trecho das muralhas medievais urbanas, utilizando um conjunto de imagens adquiridas no local.

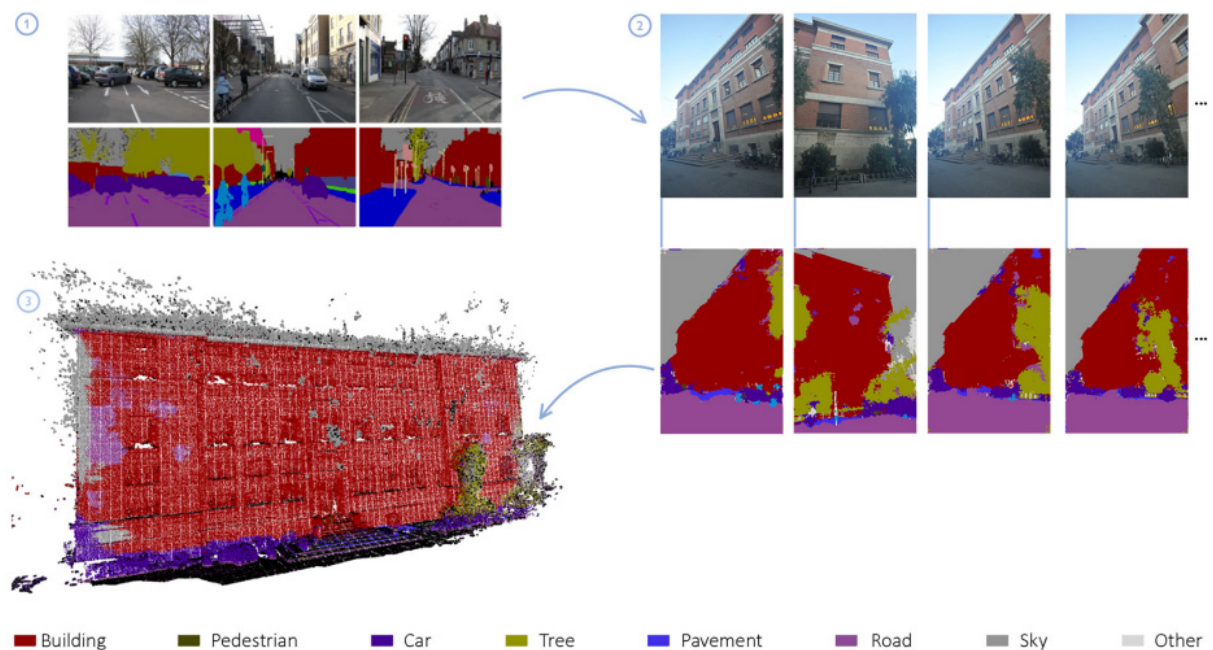
Figura 48 - Implementação do segundo método: projeção do conjunto de imagens para a nuvem de pontos.



Fonte: (CROCE et al., 2023)

O último método foi projetado para classificar imagens de patrimônio digital usando redes neurais convolucionais (RNCs) pré-treinadas em conjuntos de dados existentes e rotulados. O método não requer anotação manual do usuário, mas usa aprendizado por transferência para adaptar um modelo pré-treinado a novas imagens. O método foi exemplificado com um caso de estudo da fachada da Escola de Engenharia de Pisa, usando o conjunto de dados CamVid para treinar uma rede (Figura 49). O conjunto de dados CamVid consiste em uma coleção de imagens de vistas em nível de rua obtidas enquanto dirige e cada imagem tem sua própria imagem rotulada por pixel para 32 classes semânticas, incluindo edifícios, céu e vegetação. Para acelerar a fase de treinamento, as 32 classes originais são reduzidas a oito classes. A segmentação semântica resultante é transferida para a nuvem de pontos do mesmo objeto usando o método híbrido de Aïoli.

Figura 49 - Fachada da Escola de Engenharia em Pisa: 1) Conjunto de imagens existentes; 2) Conjunto classificado pelo DL; 3) Projeção de dados na nuvem de pontos.



Fonte: (CROCE et al., 2023)

Croce et al. (2023) destacam que as ferramentas propostas têm o potencial de melhorar a coleta, colaboração, rastreabilidade e interoperabilidade de dados digitais no campo do patrimônio cultural. Essas ferramentas foram implementadas utilizando MATLAB, a linguagem de programação subjacente à plataforma Aïoli, e esboçam uma barra de ferramentas dedicada e amigável para anotação semiautomática, integrada à interface do

usuário do Aioli. Os autores apontam possíveis direções para pesquisas futuras, como o desenvolvimento de métodos e ferramentas que auxiliem o usuário na anotação manual 2D/3D, a reconstrução de geometrias do modelo e/ou recursos adicionais de anotação semiautomática.

O trabalho de Croce et al. (2023) apresenta uma metodologia inovadora para o enriquecimento semântico de dados de patrimônio digital, combinando métodos híbridos de anotação 2D/3D com abordagens de aprendizado de máquina e aprendizado profundo. No entanto, o estudo também apresenta algumas limitações e desafios. Em primeiro lugar, os métodos propostos ainda não foram totalmente implementados na plataforma Aioli e requerem o uso de ferramentas externas como MATLAB e Ilastik. Isso implica em questões de interface e ergonomia para o uso dessas novas funcionalidades. Em segundo lugar, os métodos propostos ainda não foram avaliados em termos de qualidade e tempo computacional. Por último, os métodos propostos ainda não abordaram o problema do alinhamento entre imagens e nuvens de pontos obtidas por varredura a laser, o que poderia ampliar o escopo de aplicação dos métodos.

## ***2.4.5 Desafios e perspectivas futuras da digitalização do patrimônio***

### *2.4.5.1 Melhorias na qualidade e velocidade da digitalização*

A digitalização do patrimônio histórico tem avançado significativamente nas últimas décadas, proporcionando uma forma eficiente de preservação e acesso a bens culturais e históricos. No entanto, ainda existem desafios a serem superados para melhorar a qualidade e a velocidade do processo de digitalização.

Um dos principais desafios é a obtenção de dados de alta qualidade. Para alcançar isso, é necessário investir em tecnologias avançadas de captura, como scanners 3D de alta resolução, câmeras de alta qualidade e técnicas de imagem avançadas. Além disso, a calibração precisa e a validação dos dados coletados são cruciais para garantir a precisão e a fidelidade das digitalizações.

A velocidade da digitalização também é uma área de melhoria. Os métodos tradicionais de digitalização podem ser demorados e trabalhosos, especialmente para objetos complexos ou grandes áreas. Para acelerar o processo, é necessário desenvolver algoritmos e técnicas mais eficientes, além de explorar abordagens automatizadas e semiautomatizadas,

como aprendizado de máquina e inteligência artificial, para auxiliar na segmentação e reconstrução de modelos 3D.

#### *2.4.5.2 Integração de Tecnologias Emergentes*

A integração de tecnologias emergentes desempenha um papel crucial no avanço da digitalização do patrimônio histórico. Essas tecnologias oferecem novas possibilidades e abordagens para aquisição, análise e visualização de dados, proporcionando uma compreensão mais rica e imersiva do patrimônio cultural.

Um exemplo é a realidade aumentada (RA) e a realidade virtual (RV), que permitem a criação de experiências interativas e imersivas para os usuários, recriando ambientes históricos e permitindo interações com objetos digitalizados. Além disso, a aplicação de técnicas de renderização avançadas, como renderização baseada em física e iluminação global, contribui para a criação de representações visuais mais realistas e detalhadas.

Outra tecnologia emergente é a digitalização por meio de drones. Os drones oferecem uma maneira eficiente e flexível de capturar imagens e vídeos aéreos de locais históricos e de difícil acesso. Com a melhoria contínua dos drones e sensores embarcados, é possível obter dados de alta resolução e precisão, ampliando as possibilidades de documentação e análise do patrimônio.



### **3 DIGITALIZAÇÃO BASEADA EM ESCANEAMENTO DE ALTA RESOLUÇÃO E FERRAMENTAS HBIM PARA AVALIAÇÃO DE DANOS NA CASA JOSÉ DE ALENCAR**

#### **RESUMO**

Os edifícios históricos são de grande importância para a percepção humana da cultura de uma comunidade. As ferramentas HBIM (Heritage Building Information Modeling) oferecem a possibilidade de um conjunto de dados aprimorado de informações relacionadas principalmente à restauração e à preservação de edifícios históricos. Este trabalho tem como objetivo avaliar os danos à casa histórica empregando ferramentas HBIM integradas e procedimentos experimentais. A casa histórica foi avaliada por meio de inspeção visual, modelagem 3D com REVIT e modelagem 3D baseada em dados de nuvem de pontos. A comparação entre as duas técnicas de modelagem 3D mostrou um nível de dano que consiste em uma diferença entre os níveis dos telhados. Além disso, a inspeção visual detectou rachaduras nas paredes, o que está de acordo com os danos observados na comparação do modelo 3D. Os resultados indicam que as ferramentas HBIM contribuem significativamente para a avaliação de danos em construções históricas.

#### **3.1 Introdução**

A existência de construções patrimoniais (CP) na sociedade contemporânea de grande relevância devido à sua contribuição para os aspectos culturais de uma comunidade. A CP é a representação física de parte da história do desenvolvimento humano. Os edifícios históricos fornecem evidências de sociedades passadas e refletem seu estilo de vida, organização social e avanços (MESQUITA et al., 2015). A sua preservação é uma atividade essencial para a manutenção da história e das culturas antigas nos tempos modernos. Quando a manutenção é adotada regularmente no início da construção, é possível reduzir entre 40 e 70% dos custos totais da intervenção (MORA et al., 2021). Além disso, intervenções mais drásticas também podem ser evitadas quando a manutenção e o monitoramento contínuos são realizados (MOYANO et al., 2021). Como parte da valorização desses edifícios históricos, é necessário o desenvolvimento de técnicas para apoiar a manutenção, como a documentação (BIAGINI et al., 2016; ACIERNO et al., 2017).

Enquanto a manutenção do patrimônio deve envolver uma compreensão completa

dos edifícios no que diz respeito aos processos construtivos (materiais, importância histórica, tecnologias compatíveis e toda a documentação possível das características do edifício), a documentação pode ser uma atividade complexa, pois pode envolver, além de documentos escritos, a interpretação de componentes geométricos do objeto cultural avaliado (OSELLO; LUCIBELLO; MORGAGNI,; GODINHO et al., 2020). Nesse sentido, a documentação histórica desempenha um papel essencial nas medidas de manutenção, sendo também importante incluir as novas tecnologias disponíveis. O escaneamento digital, por exemplo, pode contribuir para a documentação do HC ao permitir a coleta de pequenos detalhes em uma perspectiva 3D, alterando a perspectiva dos registros e até mesmo contribuindo para salvar a originalidade de um monumento. Outra vantagem das tecnologias digitais é que uma gama considerável de ferramentas, incluindo smartphones, câmeras digitais, scanners manuais e drones, pode ser integrada ao processo de captura de dados. No entanto, a observação das características da CP é necessária para decidir sobre a estratégia de coleta de dados. Uma coluna com uma quantidade considerável de detalhes artísticos, por exemplo, exige uma densidade mais detalhada e considerável da nuvem de pontos do que uma única parede. Entretanto, as ferramentas digitais também apresentam limitações e problemas que devem ser abordados em desenvolvimentos futuros, como a quantidade de dados. Um modelo digital pode facilmente atingir 50 Gb de extensão, e isso é uma limitação para a digitalização do patrimônio cultural.

A documentação do patrimônio coleta e arquiva sistematicamente elementos tangíveis e intangíveis de estruturas e ambientes históricos (DORE; MURPHY, 2017). A documentação fornece informações precisas para a correta conservação, monitoramento e manutenção dos edifícios (GILES, 2012). As técnicas para a aquisição de documentação de construção moderna podem incluir CAD (Computer Aided Design) 2D/3D. Além disso, a modelagem 3D foi aprimorada com ferramentas de modelagem paramétricas e baseadas em recursos com um nível de inteligência nos elementos do modelo. O recente desenvolvimento do conceito de BIM (Building Information Modeling) incorpora os principais desenvolvimentos em modelagem 3D, incluindo modelagem paramétrica e baseada em recursos combinada com um banco de dados 3D dinâmico para armazenar informações relacionadas a edifícios (DORE; MURPHY, 2017).

Além da modelagem 3D, as ferramentas BIM criam um ambiente cooperativo no qual as propriedades materiais e estruturais, o histórico de manutenção, as intervenções e outras informações relevantes da construção histórica podem ser disponibilizadas em uma representação tridimensional (3D). Se o modelo 3D for implementado continuamente, ele

também pode ser valioso para o gerenciamento ao longo do tempo, com evolução dos custos e para a avaliação do ciclo de vida, e ainda mais para a gestão de um gêmeo digital (CHAREF; ALAKA; EMMITT, 2018; MACHETE et al., 2021). A aplicação dessas novas ferramentas tecnológicas na reabilitação, restauração, documentação e manutenção de edifícios culturais é muito vantajosa porque os dados de gerenciamento, planejamento e sustentabilidade podem ser integrados, e todos os dados podem estar disponíveis no mesmo local (GIUDICE; OSELLO, 2013; LÓPEZ et al., 2018; REBEC; DEANOVI; OOSTWEGEL, 2022).

Nos últimos anos, vários estudos foram desenvolvidos utilizando a plataforma BIM, atraindo a atenção da comunidade científica para aplicação no projeto de restauração e no gerenciamento das instalações (BRUNO; FINO; FATIGUSO, 2018). Nesse contexto, Wang et al. (2022) desenvolveram uma ferramenta de gerenciamento baseada em BIM com um modelo multidimensional para resolver inconsistências na integração das informações de um sistema de monitoramento de saúde estrutural. As estruturas de madeira do Feiyun Pavillon em Shanxi, China, foram usadas para demonstrar o funcionamento da integração. No mesmo cenário, Hull e Ewart (2020) consideram que a modelagem, a formulação do banco de dados e o gerenciamento das informações das estruturas podem oferecer vários benefícios se implementados nas atividades de operação e manutenção de uma construção. Entretanto, os autores destacam que é necessária uma literatura específica para casos práticos em edifícios históricos. Nessa linha, também são necessários relatos sobre as técnicas e estratégias de campo para aquisição de dados (RADANOVIC; KHOSHELHAM; FRASER, 2020). De acordo com Quattrini et al. (2015), dados detalhados coletados com tecnologias geomáticas avançadas podem reproduzir com precisão todas as singularidades e especificidades dos objetos comumente usados para coletar as características geométricas do patrimônio arquitetônico. No caso de edifícios históricos, o procedimento de reconstrução virtual do patrimônio histórico-cultural não é fácil, pois o objeto a ser modelado consiste em componentes cujas características e morfologias heterogêneas, complexas e irregulares não são representadas nas bibliotecas de software BIM (LÓPEZ et al., 2018).

Introduzido por Murphy, McGovern e Pavia (2009), HBIM (Heritage Building Information Modeling) é um modelo complexo composto por uma biblioteca de objetos paramétricos com ferramentas capazes de mapear objetos inteligentes para dados de levantamento (DORE; MURPHY, 2012). A proposta de integração de dados de scanners a laser, imagens e HBIM, envolvendo engenharia reversa, em que objetos paramétricos interativos que representam os elementos arquitetônicos são mapeados por meio de escaneamento a laser ou levantamento fotogramétrico. Os autores observam que o HBIM

busca a documentação de modelagem de elementos arquitetônicos de acordo com tipologias artísticas, históricas e construtivas. Além disso, a biblioteca HBIM começa com a modelagem 3D de objetos paramétricos, empregando integração de nuvem de pontos, fotogrametria, documentação histórica e o software Graphisoft Archicad, de acordo com Murphy, McGovern e Pavia, (2011) e Murphy, McGovern e Pavia (2013). O desenvolvimento do HBIM se concentra principalmente na metodologia BIM para as características do edifício histórico e no aumento da precisão geométrica do enriquecimento de dados do modelo (SANTONI et al., 2021). Martinelli, Calcerano e Gigliarelli (2022) relatam uma estratégia para o HBIM que visa apoiar o planejamento e as atividades de manutenção e conservação de edifícios históricos. O fluxograma é dividido em cinco etapas: planejamento do modelo, coleta de dados, levantamento geométrico, detalhamento da estrutura e modelagem HBIM. Segundo os autores, a proposta é flexível e recursiva, pois se adapta às informações disponíveis ao longo do desenvolvimento do trabalho.

O escaneamento digital é o primeiro passo para a criação de modelos inteligentes para edifícios históricos (COGIMA et al., 2020). As técnicas digitais de levantamento disponíveis para adquirir os dados necessários para gerar modelos de informações de construção as-built precisos podem incluir o scanner a laser terrestre (SLT) e a fotogrametria. Volk, Stengel e Schultmann (2014) e Tang et al. (2010) consideram como principais etapas da digitalização: o levantamento de dados espaciais e de documentação, o processamento e a geração das nuvens de pontos e a modelagem BIM criada a partir das nuvens de pontos. As técnicas de fotogrametria usam imagens tiradas de diferentes pontos de vista para registrar a geometria 3D de um edifício, tornando-se muito populares, especialmente para o registro e, principalmente, para aplicações de patrimônio cultural (DORE; MURPHY, 2017) As técnicas de SLT e fotogrametria exigem várias etapas de pré-processamento para criar modelos CAD 3D e BIM.

Por exemplo, Sun e Cao (2015) estudaram vários fluxos de trabalho de processamento de dados para três aplicações diferentes com base em técnicas de aquisição de dados de baixo custo. Inicialmente, foi realizada a BIM as-built para um edifício histórico com base em uma nuvem de pontos registrada de acordo com os pontos de controle do solo. Em seguida, a análise estrutural foi aplicada a uma ponte danificada usando o software de análise de elementos finitos. Por fim, foi usada a extração paramétrica automatizada de recursos da nuvem de pontos capturada para modelagem e fabricação reversas. Os autores observaram que todas as técnicas apresentam alta eficiência na documentação do patrimônio arquitetônico.

Atualmente, as abordagens relatadas na literatura estão desenvolvendo estudos para automatizar os processos de segmentação, classificação e modelagem de nuvens de pontos, resultando em superfícies tridimensionais mais precisas dos elementos de construção (ROMERO-JARÉN; ARRANZ, 2021; POUX et al., 2022) e para apoiar uma abordagem de interpretação de danos e avaliação estrutural baseada em uma máquina que aplica tecnologias da Web Semântica (HAMDAN et al., 2021), respectivamente. Trabalhos envolvendo a captura de dados em larga escala de fachadas usando SLT (CHEN et al., 2022) também estão sendo monitorados, como a comparação da precisão entre scanners de baixo custo e fáceis de usar e equipamentos a laser de última geração, na aquisição de nuvens de pontos de edifícios. Moyano et al. (2022) explorou um modelo paramétrico 3D como base para uma metodologia HBIM para criar um modelo de elementos finitos (MEF). Foram investigados os problemas de interoperabilidade e as dificuldades no processo Scan-to-HBIM (URSINI et al., 2022).

Por fim, na mesma linha de pesquisa deste trabalho, Moyano et al. (2021) realizaram uma análise comparativa entre o modelo paramétrico e a geometria real de um pórtico de uma CP datada do século XVIII. A coleta de dados foi realizada usando a técnica TLS, e o elemento estrutural foi modelado usando o software Revit. Os desvios estruturais da estrutura foram medidos com o Dynamo®, e as ferramentas CloudCompare foram usadas para validar os resultados. Os resultados mostraram que os desvios unitários construtivos mais desfavoráveis estavam entre 0,5 mm e 11,7 mm, consolidando a técnica como adequada para revisar os registros visuais e analisar os desvios estruturais.

Assim, este trabalho realizou o mapeamento de danos de uma casa histórica integrando ferramentas HBIM de modelagem 3D com dados de nuvem de pontos e o software Revit Autodesk. Um procedimento experimental de inspeção visual e uma análise numérica usando o método de elementos finitos apoiaram os resultados deste trabalho.

### **3.2 Estudo de caso: Casa José de Alencar**

Localizada no bairro de Messejana, na cidade de Fortaleza, Estado do Ceará, no Brasil, a casa de José de Alencar, construída no século XIX, é atualmente um centro cultural pertencente à Universidade Federal do Ceará, localizado no Sítio do Alagadiço Novo. Em 1964, a casa foi tombada pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) como patrimônio histórico. Além da casa, o sítio possui as ruínas de um antigo engenho que funcionava no local.

A casa tem uma simbologia importante, pois foi a residência do maior romancista

brasileiro, o escritor José de Alencar, nascido em 1829 e símbolo da literatura e da política brasileira. Os livros "Iracema" e "O Guarani" são algumas obras famosas de José de Alencar. No cenário brasileiro, o escritor se destacou principalmente por seus romances com temas mais nacionalistas e patrióticos, saindo do modelo europeu de escrita, que até então era muito utilizado, principalmente por seus escritos regionais. O expressivo escritor recebeu como homenagem um teatro e uma praça na cidade de Fortaleza com seu nome e, na cidade do Rio de Janeiro, foi feita uma estátua em sua homenagem no bairro do Flamengo.

As paredes do prédio histórico são compostas basicamente de tijolos cerâmicos maciços unidos por uma camada de argamassa à base de cal, areia e argila. A estrutura da cobertura é composta por madeiramento de carnaúba (*Copernicia prunifera*) e telhas de cerâmica. A casa, com uma área total de 88,29 m<sup>2</sup>, é dividida em três cômodos e uma varanda, representando muito bem a tipologia de construção da época.

A casa apresenta uma arquitetura campestre simples, preservada em seu ambiente original, uma atmosfera doméstica e rural que, como patrimônio histórico, pode ser reconhecida por seu valor simbólico, artístico, paisagístico e cultural, mostrando ricamente os aspectos culturais e naturais do Ceará. A Figura 50 mostra duas fachadas da Casa José de Alencar.

Figura 50 – Casa de José de Alencar a) Fachada frontal; b) Fachada lateral.



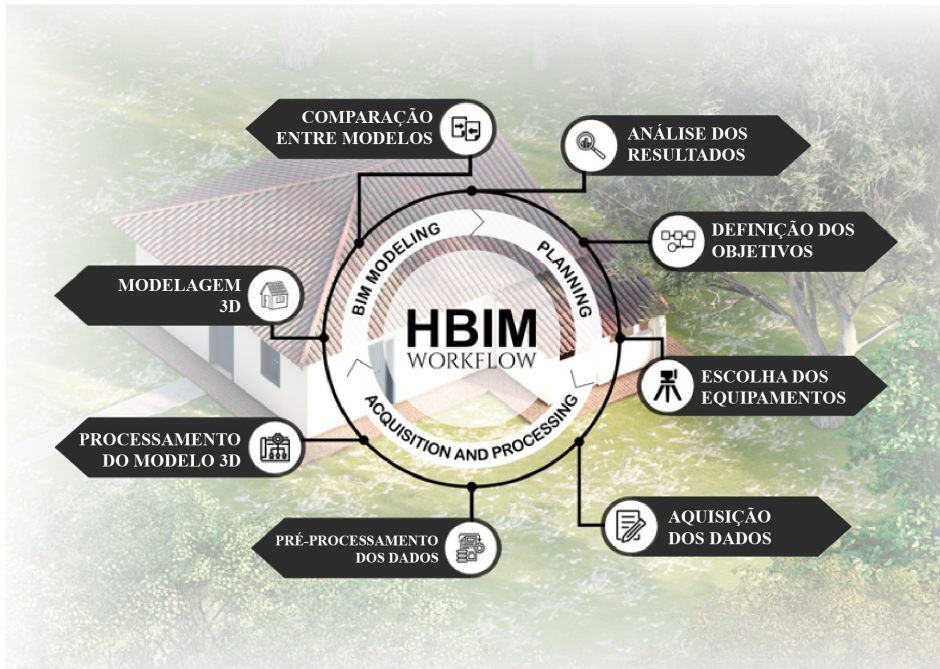
Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.3 Materiais e métodos

A implementação do HBIM consiste em várias etapas, de acordo com a documentação e as informações existentes sobre o edifício histórico, a tecnologia usada e o

nível de dados obtidos necessários. Esse fluxo de trabalho HBIM envolve três etapas principais: planejamento, aquisição e processamento e modelagem BIM. A Figura 51 apresenta o fluxo de trabalho processual do HBIM deste trabalho.

Figura 51 – Fluxo de trabalho do HBIM.



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.1.1 Planejamento

O planejamento é a primeira ação para iniciar a implementação do projeto HBIM. Esse estágio envolveu duas outras etapas deste trabalho: a definição do objetivo e a escolha do equipamento. Uma etapa que pode ser incluída no planejamento e anteceder os objetivos e a escolha dos equipamentos é a pesquisa histórica e arquivística, que pode fornecer dados históricos sobre a evolução do edifício, como reformas, mudança de proprietários e finalidades de uso, influências arquitetônicas, entre outros. Essa fase também pode retornar informações sobre requisitos regulatórios, restrições e necessidades específicas que o edifício possa apresentar (BRUNO; RONCELLA; AREA, 2020).

A definição do objetivo consistiu em estabelecer a meta do projeto HBIM e precisamente a compreensão das necessidades do projeto. Assim, o objetivo principal era criar um modelo digital 3D da casa José de Alencar utilizando uma tecnologia baseada em escaneamento a laser 3D. A tipologia arquitetônica da casa e o modelo 3D desejado definiram

a escolha do equipamento. Para o processo de digitalização, foi utilizado um laser scanner Leica BLK360, devido à alta precisão no levantamento do edifício histórico estudado. O planejamento também pode incluir o nível de precisão e alcance, as formas de armazenamento e aquisição de dados e a definição de cenas e alvos.

### ***3.1.2 Aquisição de dados e processamento***

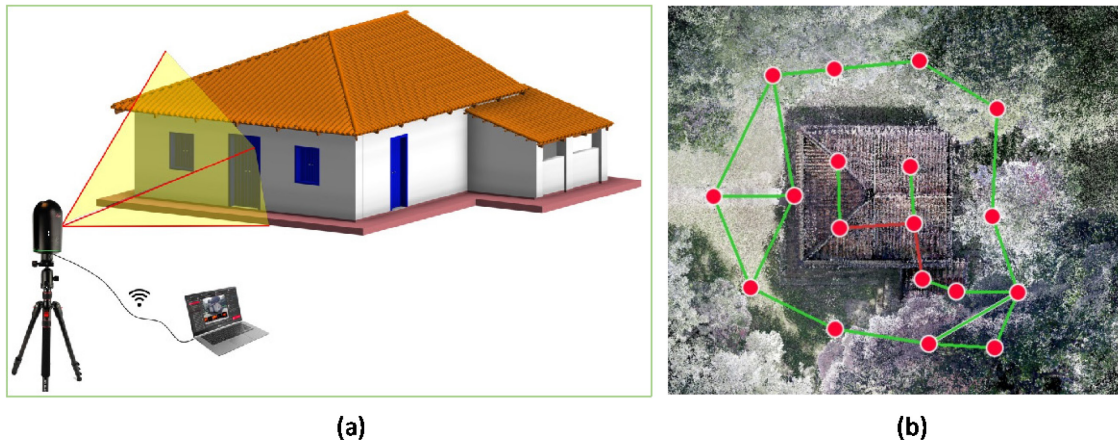
A fase de aquisição e processamento envolve três etapas principais: aquisição de dados, pré-processamento e processamento do modelo 3D. A aquisição de dados faz parte do trabalho de campo, que pode incluir esboços, medições diretas, uma aproximação do objeto e um levantamento do ponto de controle. Inicialmente, a aquisição de dados foi planejada para verificar detalhes do edifício, como a presença de portas e janelas e elementos estruturais e arquitetônicos exclusivos com necessidade de detalhamento especial. Assim, devido à simplicidade arquitetônica da construção e à não identificação de detalhes especiais, o processo de digitalização foi planejado em outras etapas.

Para escanear corretamente com um Leica BLK360, em uma casa com muitos cômodos, é necessário escanear dentro de cada cômodo, porta e corredor, entre outros espaços da construção. Além disso, para garantir que o scanner a laser tenha a linha de visão de todos os elementos a serem capturados. Isso significa planejar um local melhor para configurar o tripé do equipamento. Das 18 cenas (estações), 4 foram registradas dentro da casa e 14 foram registradas fora do prédio. As imagens devem ser tiradas com uma boa sobreposição entre elas, de acordo com a sequência para vincular todas as imagens em uma única nuvem de pontos durante o processamento. A Figura 52a apresenta a configuração do tripé para o laser scanner, e a Figura. 52b mostra a localização das estações (pontos em vermelho) e as cenas vinculadas (linhas verdes).

A fase de pré-processamento consistiu em três etapas principais: registro da digitalização, ajuste das imagens vinculadas nos níveis planimétrico e altimétrico, e limpeza da nuvem de pontos de acordo com as necessidades do projeto. O Cyclone REGISTER 360® foi usado para registrar a digitalização (Figura 53a). Cada estação e link são ajustados nos níveis planimétrico (Figuras 53b e 53d) e altimétrico (Figuras 53c e 53e). Cada imagem, de acordo com a vinculação e a sequência das cenas, é ajustada para garantir a precisão da modelagem. As fotos são sobrepostas em cada ponto até atingirem a posição correta em cada imagem, como na montagem de um jogo de quebra-cabeça, em que muitas peças precisam ser unidas para gerar um único objeto.

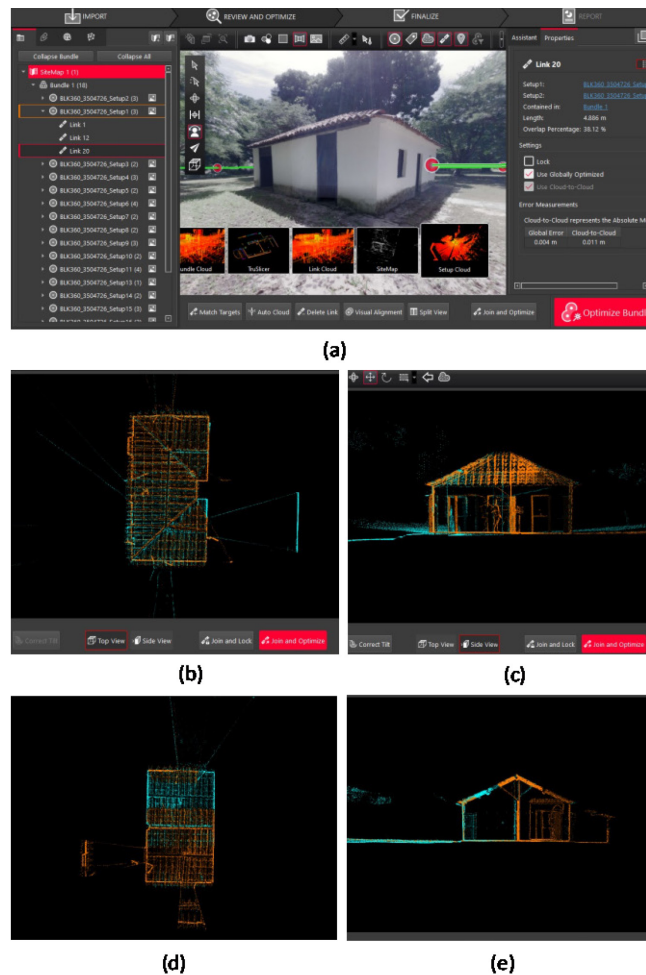


Figura 52 – Configuração do processo de digitalização: a) Configuração do tripé do scanner a laser; b) Localização das varreduras.



Fonte: Elaborado pelo autor

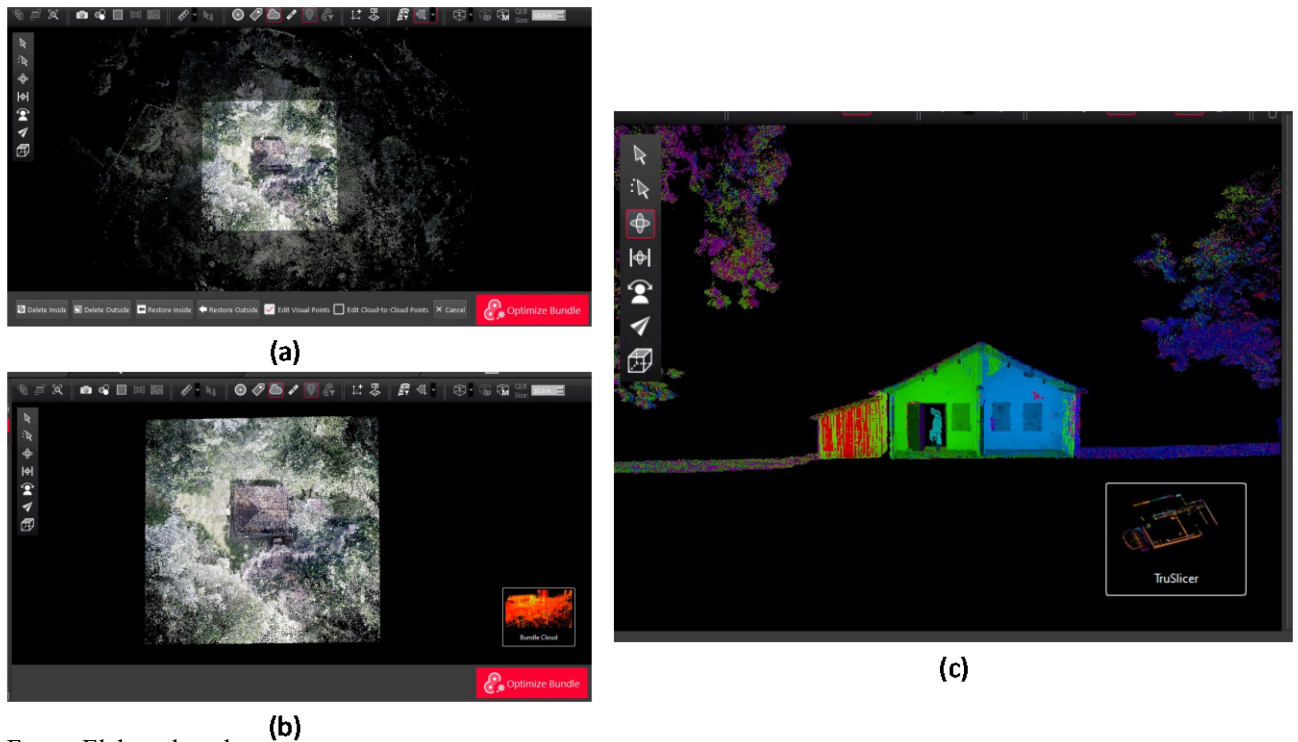
Figura 53 – Pré-processamento do escaneamento a laser: a) Registro da digitalização; b) Ajuste planimétrico do link 14; c) Ajuste altimétrico do link 14; d) Ajuste planimétrico do link 16; e) Ajuste altimétrico do link 16.



Fonte: Elaborado pelo autor

O pré-processamento geralmente consome metade do tempo de aquisição no local devido a tantas etapas de tratamento de dados. A nuvem de pontos também é limpa, selecionando pontos a serem excluídos. Nos dados da casa, pontos externos de imagens de árvores (Figura 54a) foram selecionados e descartados da nuvem de pontos. Devido à característica de patrimônio histórico, foi definido não limpar a parte das árvores ao redor do edifício (Figura 54b). O pré-processamento também pode envolver a redução de ruídos e a otimização das nuvens. O processamento de revisão envolveu o uso da função TruSlicer, em que cada cor (Figura 54c) representa os pontos de uma cena.

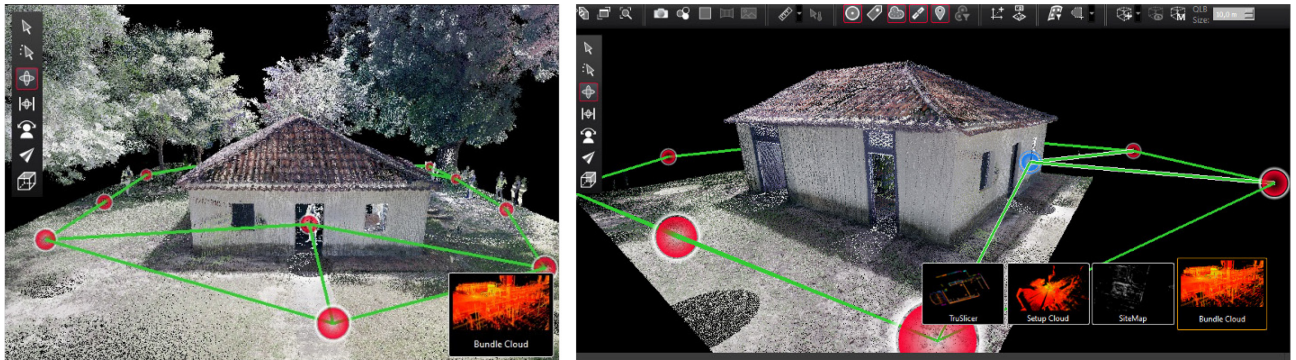
Figura 54 Pré-processamento do escaneamento a laser: a) Limpeza da nuvem de pontos; b) Nuvem de pontos limpa; c) Visualização no TruSlicer.



Fonte: Elaborado pelo autor

O processamento do modelo 3D é a última etapa da geração final da nuvem de pontos 3D, armazenando e exportando arquivos. Neste trabalho, os arquivos foram exportados como LGS, que podem ser visualizados em aplicativos como TruView ou JetStream Viewer, e arquivos rcv/rcs que permitem a transferência de dados para softwares como AutoCAD e Revit Autodesk. A Figura 55 mostra o modelo 3D pronto para exportação, com a revisão dos links e a limpeza da nuvem.

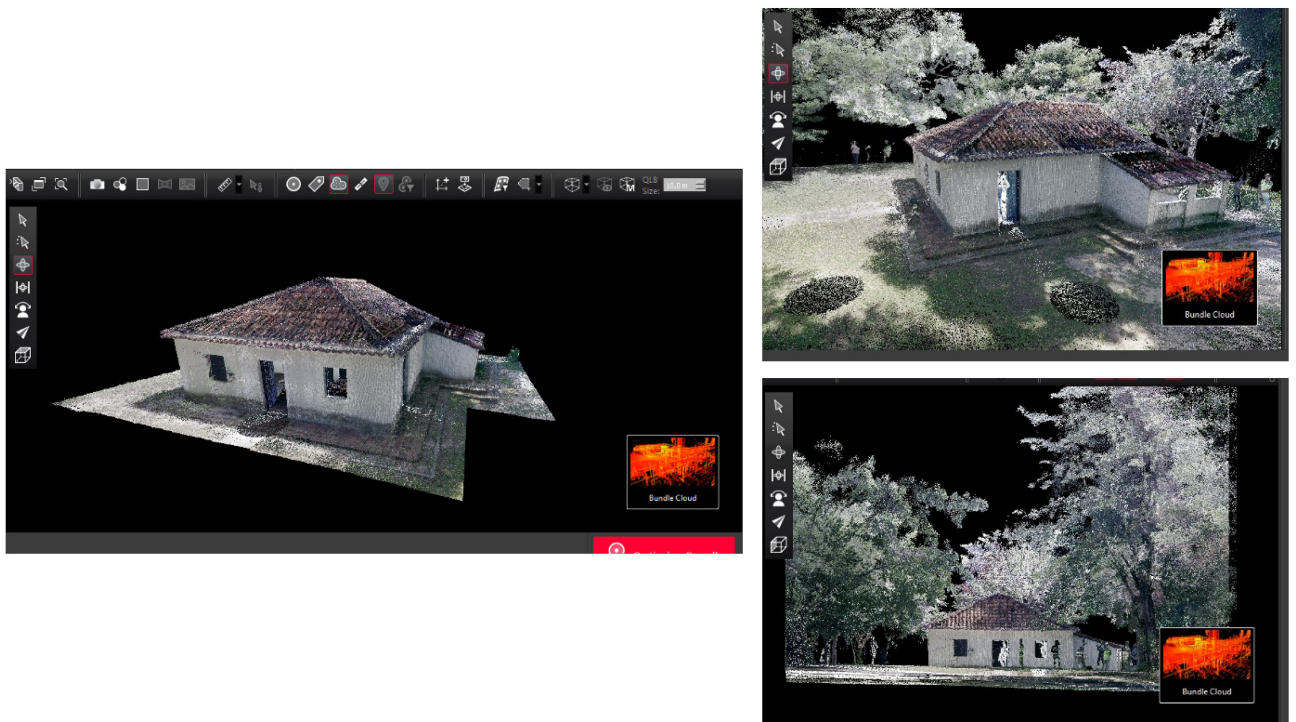
Figura 55 – Modelo 3D da nuvem de pontos pronto para exportação.



Fonte: Elaborado pelo autor

O controle de qualidade também é verificado nesse estágio, incluindo a verificação da precisão. A qualidade geral da digitalização medida é um erro de agrupamento de 0,010 m, uma sobreposição de 31%, uma intensidade de 53% e 0,010 m de nuvem a nuvem, considerando 18 cenas e 22 conexões. A Figura 56 apresenta a alta qualidade da nuvem de pontos gerada na casa José de Alencar.

Figura 56 – Modelo 3D da nuvem de pontos para exportação.



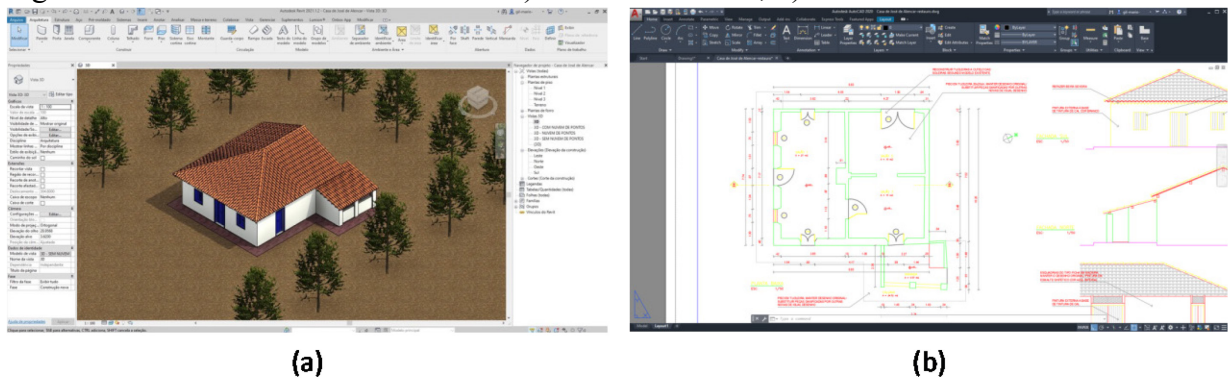
Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.1.3 Montagem da nuvem de pontos e modelagem BIM



O modelo 3D da casa José de Alencar foi desenvolvido com o uso do software Revit Autodesk (Figura 57a), com base na arquitetura existente disponível no AutoCAD 2D fornecido pelo Instituto Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), conforme apresentado na Figura 46b. A modelagem desenvolvida a partir da planta baixa, da seção, da fachada e da planta do telhado (AutoCAD 2D) utilizou ferramentas como paredes, piso, telhado, vidros inclinados, portas e janelas. A nuvem de pontos foi montada no software Revit. O arquivo da nuvem de pontos foi convertido na extensão .rcp para integrar a nuvem de pontos com o Revit usando o Recap Pro Autodesk. A sobreposição dos modelos 3D (nuvem de pontos e Revit) gerou a medição geométrica da casa. A Figura 58 apresenta o modelo 3D renderizado das fachadas frontal e lateral da casa. Além das etapas pertencentes ao fluxo de trabalho do HBIM, técnicas de inspeção visual e análise numérica estrutural da casa foram incluídas neste trabalho para contribuir com a análise e os resultados.

Figura 57 – Modelos da casa histórica: a) 2D no AutoCAD; b) Modelo 3D no Revit.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 58 – Modelo 3D renderizado da casa José de Alencar: a) Fachada frontal; b) Fachada lateral.



Fonte: Elaborado pelo autor

### ***3.1.4 Inspeção visual***

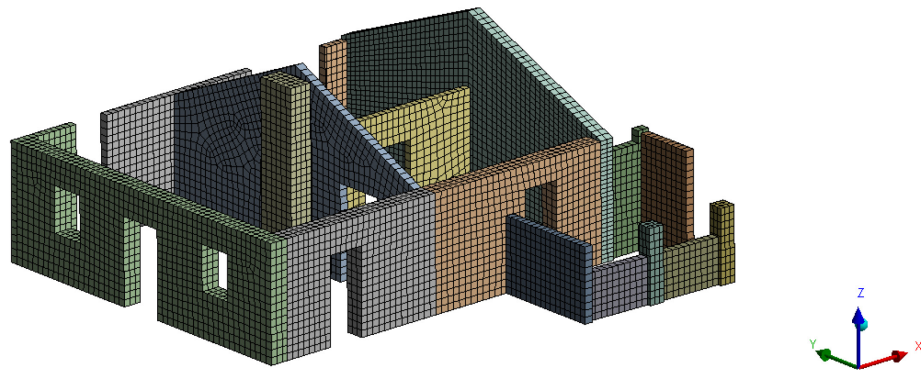
A inspeção visual, como uma técnica não destrutiva, é geralmente o principal método para caracterizar a condição real de um edifício histórico. Foi realizada uma inspeção visual da casa José de Alencar para avaliar o estado atual de conservação. Foram observados visualmente o sistema estrutural, as paredes, o piso e o revestimento. A inspeção abrangeu a presença de rachaduras, os danos à estrutura, o tipo de material e o processo construtivo das paredes e do piso. Além disso, foram inspecionadas as condições ambientais do local da construção e os elementos próximos à parte externa da casa. As informações da inspeção visual são muito importantes para validar o nível e a tipologia dos danos obtidos na comparação da análise de dados digitais. Foram tiradas fotos dos danos (rachaduras, deterioração dos pisos, estrutura e cobertura) para produzir um registro fotográfico da inspeção. Além disso, foram documentados detalhes relevantes das características da casa, como rachaduras, inclinação das alvenarias e presença de umidade.

### ***3.1.5 Simulação numérica***

Nessa análise, a técnica de modelagem macro foi usada para o principal elemento constituinte da estrutura, a alvenaria de tijolos cerâmicos maciços. Essa técnica representa elementos, conexões e uma interface entre eles de forma contínua e equivalente. O chamado macro-elemento, que tem forças e deformações generalizadas para descrever o comportamento desses diferentes materiais em um modelo simplificado, representa a estrutura como um todo.

O modelo 3D da estrutura foi projetado no software Revit Autodesk e analisado no software Ansys® (versão 17.1). A função MultiZone foi usada para discretizar a malha do modelo 3D, gerando uma malha hexagonal. O elemento usado foi o HEX20, que tem 6 nós e 3 graus de liberdade. No total, foram obtidos 10.996 elementos e 67.526 nós. A Figura 59 mostra a malha usada para modelagem.

Figura 59 – Modelo numérico da casa José de Alencar.



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.1.5.1 Cargas e propriedades mecânicas do modelo

Para as cargas atuantes na estrutura, foram pesquisados na literatura valores para as cargas do telhado. A carga utilizada para representar a cobertura, composta por uma estrutura de carnaúba e telhas coloniais seguindo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 1980), foi de  $0,85 \text{ KN/m}^2$  sobre a alvenaria lateral. A sobrecarga utilizada foi de 50% ( $0,425 \text{ KN/m}^2$ ), totalizando uma carga de  $1,275 \text{ KN/m}^2$  (BRANDÃO et al., 2018).

As propriedades mecânicas do macro-elemento foram retiradas da literatura, sendo o módulo de elasticidade (E) e a resistência à tração (ft) o peso específico (w) e a resistência à compressão (Fc) obtidos por parâmetros estimados em (INFRASTRUTTURA, 2008) e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) (BRANCO, 2007; BRANDÃO et al., 2018; DELGADO, 2013), como pode ser visto na Tabela 4.

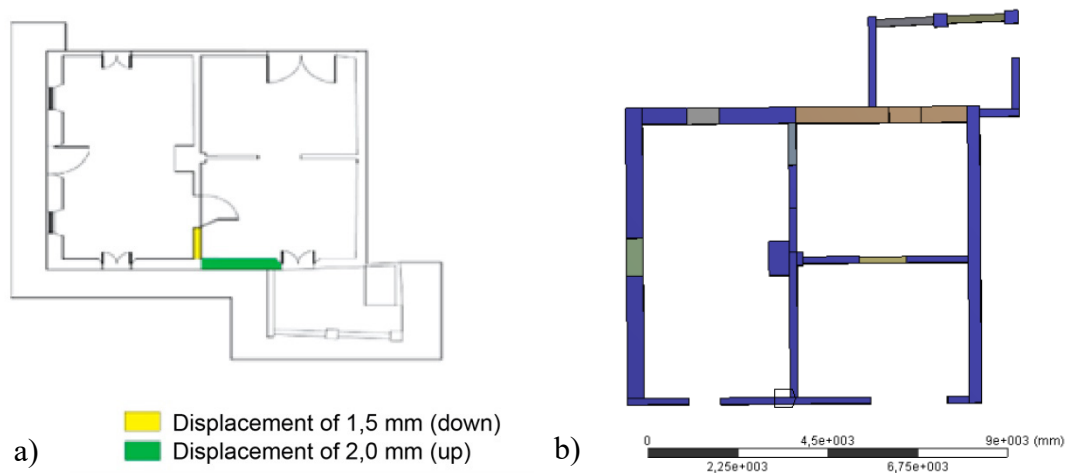
Tabela 4 – Propriedades mecânicas do macro-elemento.

Propriedades mecânicas	Valores
E (GPa)	17,0
W (KN/m <sup>2</sup> )	18,0
Fc (MPa)	3,2
Ft (MPa)	0,16
$\nu$	0,2

Fonte: Elaborado pelo autor

A hipótese de dano à casa José de Alencar pressupõe que as paredes sofreram deslocamentos verticais. Portanto, na simulação numérica, esses deslocamentos foram feitos para tentar simular a realidade, conforme representado na Figura 60. As faces inferiores das paredes foram colocadas no lugar, exceto aquelas que foram deslocadas, para simular o efeito das fundações da residência.

Figura 60 - a) Representação esquemática dos deslocamentos; b) Detalhes da fixação da parede.



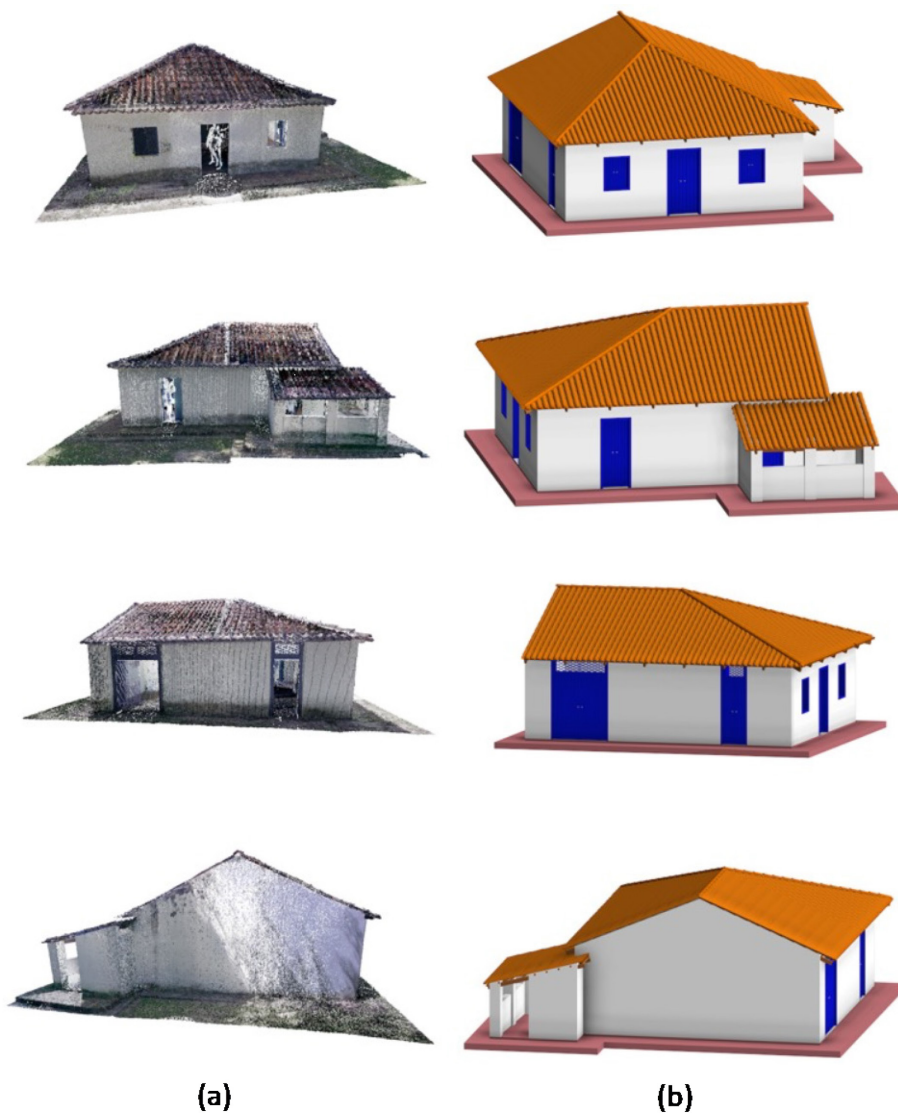
Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.4 Resultados e discussões

#### 3.4.1 Montagem da nuvem de pontos e modelagem 3D HBIM

A nuvem de pontos 3D e o modelo 3D da casa José de Alencar no Revit são mostrados na Figura 61.

Figura 61 – Levantamento 3D da casa José de Alencar: a) Modelo 3D da nuvem de pontos b) Modelo 3D do Revit.



Fonte: Elaborado pelo autor

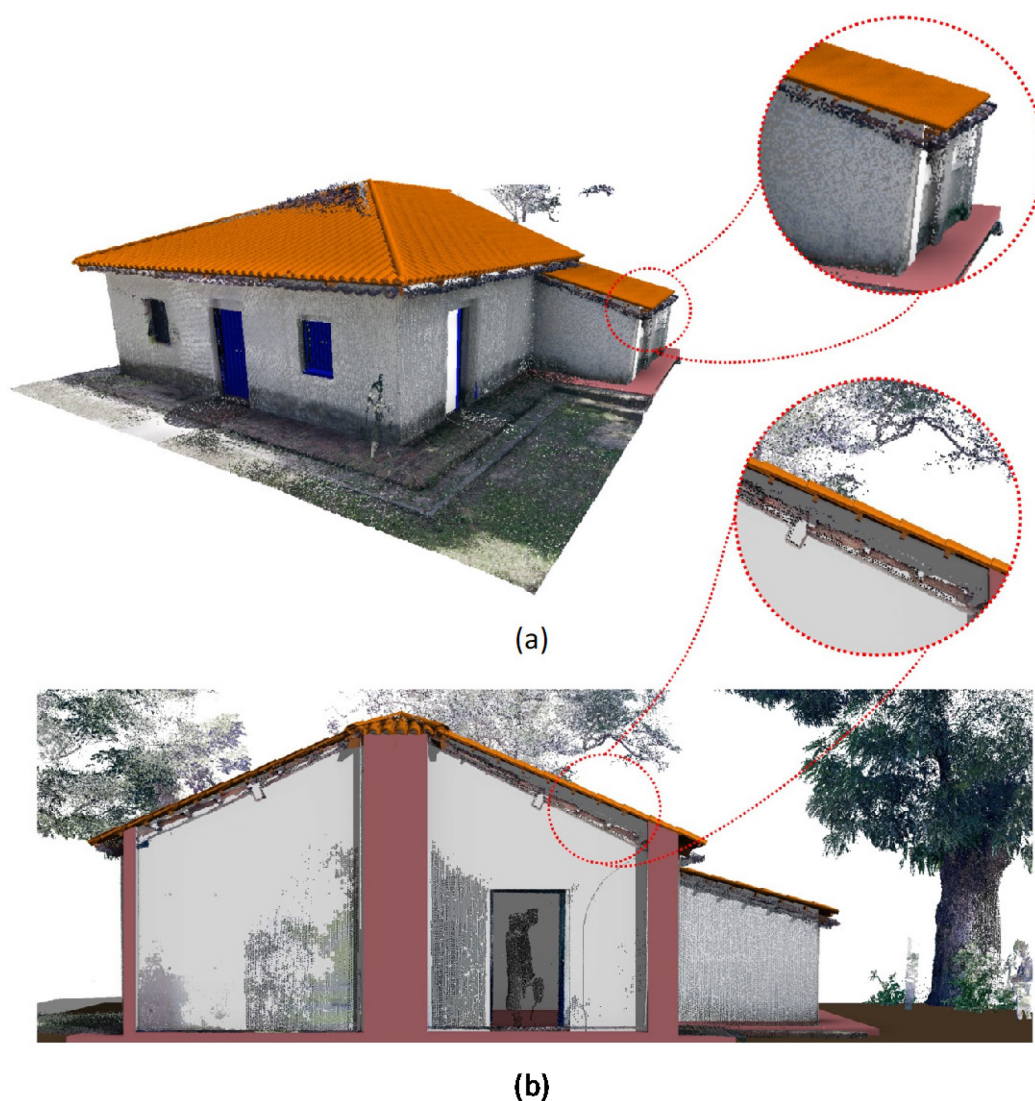
Os resultados (Figura 61) mostram os benefícios de ambas as tecnologias, scanner a laser e BIM, que são soluções muito adequadas para modelar e gerenciar informações relacionadas a edifícios históricos existentes. A partir dos modelos 3D, a geometria arquitetônica é retratada, permitindo uma ampla gama de documentação e análise da casa. Os modelos obtidos também apresentam um alto nível de precisão em relação aos detalhes construtivos da casa, como as informações sobre a geometria da alvenaria.

### ***3.4.2 Comparação entre os modelos 3D***



A comparação entre os modelos 3D (nuvem de pontos e Revit) permitiu a avaliação da divergência nas características geométricas da casa. Os dois telhados apresentaram um nível de diferença: o da varanda (Figura 62a) e o do telhado principal da casa (Figura 62b).

Figura 62 – Comparação entre os dois modelos 3D: a) Fachada da casa; b) Detalhe interno da casa.



Fonte: Elaborado pelo autor

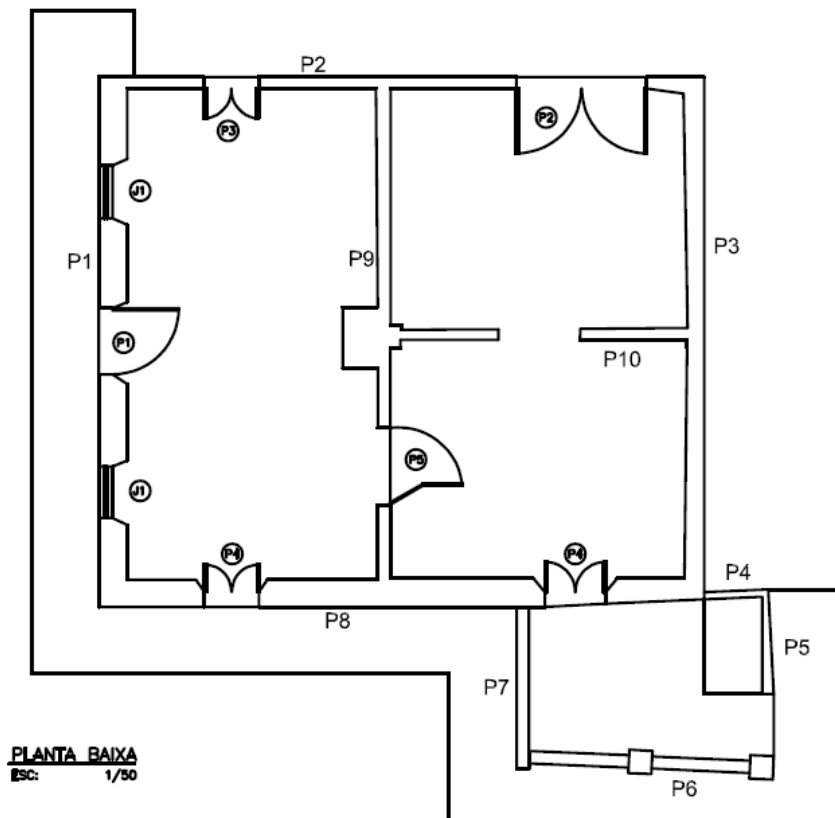
Observe que o modelo gerado a partir do laser scanner foi obtido em 2021, enquanto o modelo construído no Revit foi baseado em um levantamento de arquitetura existente de 2002 fornecido pelo IPHAN. As constatações do desnível entre as duas coberturas são atribuídas à precisão da modelagem para detecção de danos. Ao sobrepor os modelos, observa-se que a estrutura da casa pode estar sofrendo deformações ao longo do

tempo.

Considerando que a casa é composta por paredes de tijolos maciços unidos com uma camada de alvenaria e não apresentou elementos estruturais de concreto, tal deformação pode indicar um nível de movimentação das paredes que compõem a estrutura da edificação. Pode-se destacar que, em uma interpretação estrutural, as paredes da casa estão sob compressão devido ao seu peso e ao peso da cobertura. Outra possibilidade pode ser o comportamento de assentamento de carga devido à interação entre o solo e a estrutura. Portanto, os modelos 3D oferecem muitas opções para avaliar a ocorrência e a tipologia dos danos em edifícios históricos, representando uma ferramenta valiosa para a detecção de danos e o planejamento de reformas.

As espessuras de parede encontradas nos modelos de nuvem de pontos e planta baixa (Figura 63) do projeto arquitetônico existente também foram analisadas. A comparação entre os modelos retornou valores médios de diferentes espessuras que variam entre 1,00 mm e 78,00 mm, conforme mostrado na Tabela 5.

Figura 63 – Planta baixa da casa (identificação das paredes).



Fonte: IPHAN (2002)

Tabela 5 – Valores médios da diferença de espessura das paredes da casa.

Parede	Modelo nuvem de pontos (mm)	Modelo planta baixa (mm)	Diferença média das espessuras (mm)
P1	429,33	420,00	9,33
P2	162,67	170,00	7,33
P3	339,67	273,33	66,33
P4	200,00	208,20	8,20
P5	188,67	266,67	78,00
P6	184,67	190,00	5,33
P7	361,00	360,00	1,00
P8	429,33	400,00	29,33
P9	198,00	196,67	1,33
P10	198,00	160,00	38,00

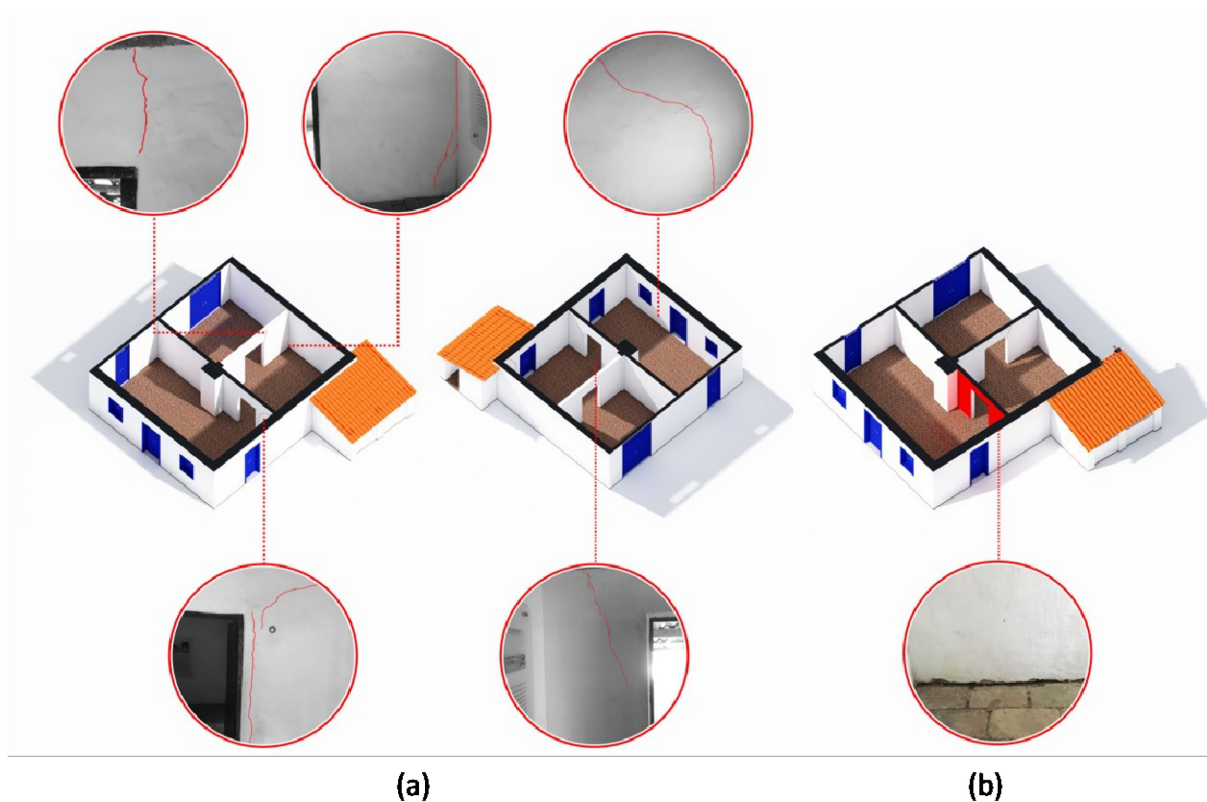
Fonte: Elaborado pelo autor

As diferenças entre os resultados da nuvem de pontos e o modelo baseado no levantamento 2D indicam uma inconsistência na documentação da casa José de Alencar. Observa-se no modelo 3D da nuvem de pontos que as paredes apresentam espessuras médias variadas ao longo da extensão (P2, 162,67 mm, P1, 429,33 mm, e P7, 361,00, são exemplos), inclusive no decorrer da sua estrutura, que é o caso da parede P1 (437,00 mm, 428,00 mm e 423,00 mm). Essas variações se justificam pelo fato de o edifício ter sido construído durante o século XIX sem um processo construtivo preciso e mão de obra especializada, além de possíveis reformas que foram realizadas ao longo do tempo. Os levantamentos 2D anteriores da casa José de Alencar consideraram a espessura da parede como uma medida média, e não como um elemento com variações.

### 3.4.3 Mapeamento de danos

Os resultados obtidos pela inspeção visual dos danos da casa José de Alencar são mostrados na Figura 64. A presença de fissuras detectadas nas paredes é mostrada na Figura 64a, enquanto a Figura 64b apresenta a movimentação de uma parede interna e o rebaixamento do nível do piso do sala. A caracterização do mapeamento de danos em estruturas de alvenaria permite a avaliação de causas, efeitos e consequências.

Figura 64 – Mapeamento de danos da casa: a) Fissuras nas paredes; b) Movimentação da parede interna.



Fonte: Elaborado pelo autor

Foi observada a presença de fissuras verticais e inclinadas (Figura 64a). Essa deterioração pode ser atribuída a movimentos de terra, pois os padrões das fissuras seguem o movimento da parede interna (Figura 64b). As trincas detectadas nas paredes apresentaram, em geral, uma direção diagonal de propagação, com ângulos de  $45^\circ$  e uma superfície plana. Além da movimentação da parede interna, a ocorrência das fissuras pode ser consequência de uma possível elevação das raízes de uma grande árvore (*Mangifera indica*) localizada próxima à casa.

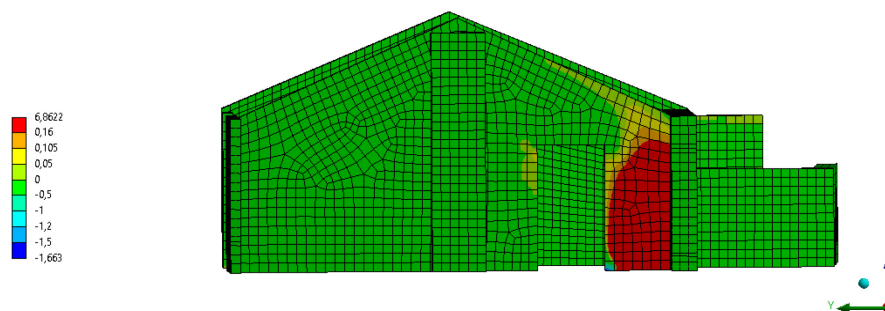
A presença generalizada de fissuras nas paredes pode indicar que a distribuição de tensões nas paredes de alvenaria está associada à falta de elementos estruturais rígidos para melhor distribuição das cargas. Esse nível de tensão pode levar à evolução contínua da propagação e da largura das fissuras, comprometendo a integridade do casa histórica. Esses resultados concordam com a diferença nos níveis do telhado observada na comparação dos dois modelos 3D da casa (consulte a seção 3.4.2).

### 3.4.4 Análise numérica

Após a análise numérica da estrutura, observou-se que grande parte da casa está sob tensões de compressão que variam entre 0 e 1,66 MPa e são provenientes do peso próprio e do telhado. Os valores máximos de tensão de compressão encontrados estão abaixo dos valores de resistência usados pelo modelo macro. Portanto, não há risco de falha por compressão.

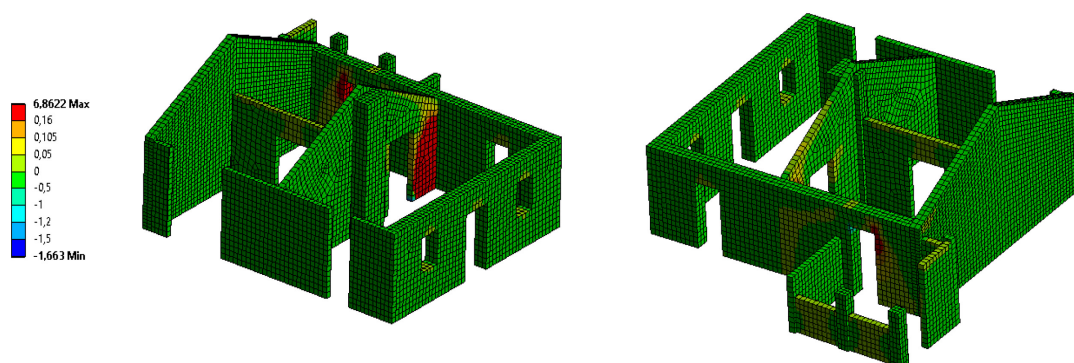
Devido à sua suscetibilidade à tensão de tração, também existem zonas de tração próximas das estruturas. Foram encontradas tensões onde havia fissuras na estrutura real, atingindo valores de 6,86 MPa e reforçando a hipótese de que houve movimentos de terra que fizeram com que a estrutura sofresse deslocamentos junto com o solo (como visto na Figura 65 e na Figura 66). Os valores de tensão de tração encontrados excedem o valor de resistência atribuído ao macro-elemento. Portanto, a estrutura requer maior atenção devido à sua maior suscetibilidade a danos.

Figura 65 – Detalhes das tensões normais no eixo Z.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 66 – Detalhes da tensão máxima no eixo Z.



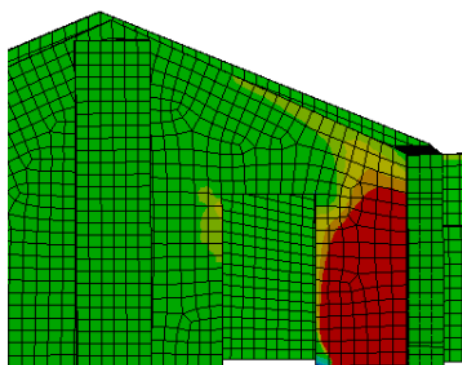
Fonte: Elaborada pelo autor

Foi possível analisar as fissuras reais e as manifestadas no modelo, o que garante a calibração da simulação. Assim, a Figura 67 expressa a comparação de acordo com os resultados da modelagem numérica. Observa-se que, nas Figuras 67(a) e (b), as tensões que provocaram o deslocamento dos painéis, de acordo com as condições de contorno apresentadas, as cargas e as propriedades mecânicas do modelo, convergiram para as posições reais na parede em que se encontram. Fato semelhante ocorreu na análise expressa pelas Figuras 67(c) e (d). As Figuras 67(e) e (f) mostram a região de concentração de tensão que, conseqüentemente, iniciou a fissura nesse ponto.

Figura 67 – Comparação entre os resultados da modelagem numérica e os danos.



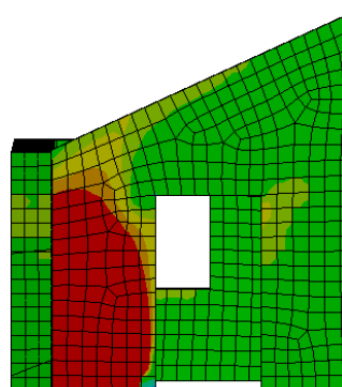
a)



b)



c)

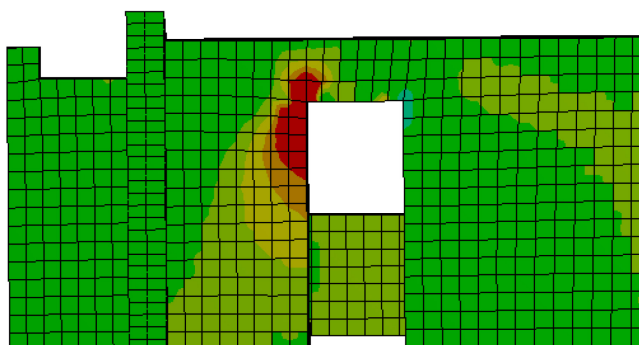


d)





e)



f)

Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.5 Comentários finais

Por meio do estudo de caso realizado na casa José de Alencar, é possível perceber que as ferramentas HBIM permitem a avaliação de danos em edificações históricas. Assim, as seguintes conclusões podem ser extraídas do trabalho:

- O levantamento com laser scanner obteve informações dimensionais e dados para a construção de um modelo 3D de uma casa histórica. A nuvem de pontos gerada apresentou alta precisão de todos os elementos da casa, permitindo a avaliação da condição real da edificação;
- O Revit foi uma ferramenta valiosa para gerar um modelo 3D com alta precisão dos detalhes da casa. O modelo também permitiu a análise de danos à estrutura da casa;
- Empregando a sobreposição dos dois modelos 3D, foi observado um nível de deformação no nível de dois telhados. A comparação entre os modelos pode indicar uma ferramenta útil para a detecção de danos em edificações históricas;
- A inspeção visual detectou a presença de fissuras nas paredes, no assentamento dos pisos e deformação e movimentação das paredes. Esse resultado está de acordo com o nível de deformação observado na comparação do modelo 3D e na análise numérica;

- O estudo mostra boas possibilidades de avaliar as características de construções históricas integrando ferramentas HBIM e procedimentos experimentais. A tecnologia de digitalização e os testes experimentais podem fornecer resultados eficazes sobre os danos aos edifícios históricos.



## **4 DIGITALIZAÇÃO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO: IGREJA NOSSA SENHORA DO ROSÁRIO, ARACATI-CE**

### **RESUMO**

A digitalização do patrimônio histórico tem várias vantagens, como a possibilidade de documentar e armazenar informações detalhadas sobre o patrimônio em um formato digital, permitindo um melhor gerenciamento dos bens patrimoniais. Além disso, a digitalização pode permitir a criação de réplicas digitais precisas dos bens patrimoniais, que podem ser acessadas por pessoas em todo o mundo, promovendo assim a disseminação e compartilhamento da cultura. O emprego da varredura a laser terrestre, ou escaneamento a laser, possibilita a digitalização desses bens e a produção de nuvens de pontos que podem auxiliar em diversas atividades de preservação e conservação das edificações. O objetivo desse trabalho foi digitalizar a Igreja Nossa Senhora do Rosário, patrimônio histórico federal, utilizando a tecnologia de varredura a laser terrestre. Um comparativo entre um modelo 3D, gerado a partir da nuvem de pontos e um levantamento 2D do ano de 2010, mostrou que existem diferenças nos valores das áreas dos cômodos e nas espessuras das paredes registrados nos modelos. Por fim, observou-se que há uma grande potencialidade de integrar tecnologias de digitalização a laser com procedimentos manuais em prédios históricos. Essas técnicas de escaneamento e testes experimentais têm o poder de fornecer informações geométricas muito mais precisas e próximas da realidade.

### **4.1 Introdução**

Ao longo das últimas décadas, o mundo tem passado por profundas transformações tecnológicas e digitais, que têm afetado significativamente diversas áreas e instituições, incluindo o patrimônio histórico e cultural. O patrimônio histórico é uma parte importante da identidade cultural e histórica de uma sociedade. No entanto, esses bens patrimoniais estão sujeitos a danos e degradação ao longo do tempo, tais como deformações ocasionadas pela degradação ambiental, desgaste e desabamentos decorrentes de desastres naturais, intervenção excessiva do homem durante os processos de preservação e desenvolvimento, além da substituição inadequada de materiais e tonalidades durante o

processo de restauração (COOMBES; VILES, 2021; LI et al., 2023). Nos últimos anos, o interesse pela preservação e melhoria do patrimônio histórico tem ganhado força, especialmente devido aos avanços significativos de tecnologia que podem contribuir para sua proteção e promoção. Atualmente, muitos pesquisadores estão explorando diferentes maneiras de documentar, gerenciar e sustentar o patrimônio histórico, tornando-se uma abordagem interdisciplinar para o desenvolvimento da cultura (TOBIASZ et al., 2019). A digitalização desses bens patrimoniais é uma forma importante de preservar e compartilhar seu valor cultural e histórico para as futuras gerações (SHABANI et al., 2020).

A digitalização permite a criação de modelos 3D precisos e detalhados de edificações e objetos históricos, proporcionando uma experiência imersiva e interativa para o público em geral. A digitalização do patrimônio histórico apresenta-se como uma estratégia relevante para a preservação e divulgação do patrimônio cultural de um país, permitindo o acesso democrático à cultura e a promoção da sua valorização. A digitalização, nesse sentido, possibilita a criação de registros precisos, detalhados e permanentes do patrimônio histórico, bem como sua ampla difusão e popularização por meio de dispositivos digitais como a Internet, possibilitando o acesso rápido e fácil por parte de pesquisadores do mundo todo (GIUFFRIDA et al., 2022). A digitalização também pode evitar o desgaste e o desaparecimento precoce do patrimônio histórico, e reduzir os riscos de exposição a fatores ambientais ou a ações humanas (BARBASIEWICZ; WIDERSKI; DALIGA, 2018; VACCA; FURFARO; DESSÌ, 2018; KINGSLAND, 2020). No entanto, é importante salientar que a digitalização do patrimônio histórico apresenta desafios e limitações importantes, como a necessidade de investimentos em tecnologia e infraestrutura, a garantia da segurança e privacidade dos dados digitais, bem como a gestão e armazenamento dos dados digitais gerados.

O processo de digitalização de ativos históricos inicia-se com a escolha de metodologias e tecnologias de aquisição de dados quantitativos e qualitativos (SHABANI et al., 2021). As tecnologias de digitalização em 3D tiveram início na metade do século 20, com os primeiros scanners que utilizavam luzes, câmeras e projetores. No entanto, esses primeiros scanners eram limitados e pouco precisos, exigindo muito tempo e esforço para produzir resultados satisfatórios. Com o passar de três décadas, os scanners foram aprimorados por meio do uso de lasers, sombras e luz branca, o que possibilitou escanear objetos com maior precisão. Com o desenvolvimento dos scanners, tornou-se viável capturar melhor os detalhes e criar modelos complexos com textura e cor. O objetivo principal dessa técnica é substituir a

medição manual, que é exaustiva e propensa a erros, por uma abordagem automatizada, resultando em reconstruções das estruturas em modelos 3D mais precisos (EDL; MIZERÁK; TROJAN, 2018; BUGEJA; BONANNO; GARG, 2022).

As metodologias mais usadas para realizar levantamentos geométricos automatizados em edifícios históricos são a fotogrametria e o scanner a laser terrestre (SLT) (GIUFFRIDA et al., 2022). Ademais, técnicas de levantamento manual ou instrumental ainda são utilizadas de forma corriqueira. A fotogrametria é uma técnica desenvolvida para capturar imagens em várias escalas. Diferentemente dos scanners convencionais, a fotogrametria é uma opção muito mais acessível, tanto do ponto de vista financeiro quanto experimental. É uma solução viável para qualquer pessoa, pois pode ser realizada com equipamentos simples, como uma câmera e software de processamento disponível em aplicativos móveis, como um smartphone. Embora a qualidade dos resultados dependa do equipamento utilizado, a fotogrametria é capaz de produzir modelos digitais a partir de praticamente qualquer imagem, graças a programas de processamento para desktops com sistemas operacionais Macintosh e Windows (ZARNOWSKI, ALEKSANDER; BANASKEZ, ANNA, BANASZEK, 2015; VACCA; FURFARO; DESSÌ, 2018; KINGSLAND, 2020). A técnica de fotogrametria digital utiliza imagens para criar modelos 3D com base no princípio da triangulação. Esse processo envolve a captura de fotos bidimensionais a partir de diferentes ângulos, que são então transformadas em um modelo 3D através de algoritmos de softwares específicos. Esses algoritmos são capazes de identificar pontos comuns em um conjunto de fotos sobrepostas, permitindo reconstruir a posição, a forma e o tamanho da cena capturada. A fotogrametria com veículos aéreos não-tripulados (VANT) é amplamente utilizada em arquitetura e arqueologia para criar mapas digitais, modelos 3D, texturas e documentar edifícios históricos. Essa técnica é particularmente atraente por conta de sua acessibilidade financeira, já que é possível utilizar equipamentos de baixo custo. Além disso, a fotogrametria UAV é capaz de calcular volumes de forma eficiente (WESTOBY et al., 2012; GIUFFRIDA et al., 2022).

A digitalização via SLT baseia-se em medições (sensor-alvo) a laser utilizando radiações eletromagnéticas e com isso, gera modelos tridimensionais de pontos densos da geometria do objeto em estudo (nuvem de pontos) com rapidez, precisão e confiabilidade elevadas. Há diversas informações complementares às nuvens de pontos, como dados de cor ou intensidade individual por ponto, bem como imagens de suporte, que permitem ao usuário conseguir uma percepção mais clara da nuvem inicial. O SLT é capaz de medir milhões de pontos em poucos minutos, enquanto que a exatidão em ponto único da técnica se situa na

casa dos milímetros (ARYAN; BOSCHÉ; TANG, 2021). O aparelho de escaneamento é operado através de uma linha de visão, portanto, é necessário realizar múltiplas varreduras em diferentes posições para capturar todos os detalhes essenciais de uma estrutura. Em seguida, cada varredura é associada ao sistema de coordenadas do sensor. Todas as digitalizações precisam ser alinhadas ou registradas em relação aos seus respectivos sistemas de coordenadas para serem integradas em um único sistema de referência (SHANOER; ABED, 2018; MOHAREB; ALSALLOUM; WEBB, 2023). Ao final do processo são gerados modelos 3D de nuvem de pontos que permitem a construção, através de softwares de processamento, de modelos 3D BIM, plantas, seções, elevações e ortofotos das estruturas (PREVIATO et al., 2022).

Os equipamentos de escaneamento a laser passaram por melhorias significativas nas últimas décadas, tanto na velocidade de coleta e na qualidade dos dados, quanto na redução de ruídos presentes nas nuvens de pontos. Além disso, houve o desenvolvimento de métodos que permitem a realização de levantamentos em áreas mais difíceis de alcançar, usando sistemas portáteis ou acoplados em mochilas. A maioria dos scanners a laser opera com base em um dos três princípios diferentes: triangulação, pulso (time of flight, ToF) ou comparação (diferença de fases). Scanners que se baseiam no princípio da triangulação não utilizam lasers, mas sim luz branca projetada em um padrão estruturado de listras ou grelhas. Embora esses dispositivos não sejam classificados como scanners a laser, eles funcionam de maneira semelhante. A utilização de luz estruturada oferece benefícios como segurança e maior rapidez na cobertura de áreas. No entanto, é importante ressaltar que eles exigem um ambiente controlado, uma vez que a luz ambiente pode afetar a qualidade da medição, sendo essa sua principal desvantagem. A precisão dessa técnica está no intervalo de 0,03 mm a 30,00 mm, operando em uma distância máxima de até 20,00 metros (BOARDMAN; BRYAN, 2018).

Os equipamentos de digitalização por pulso empregam uma tecnologia considerada simples: um feixe de luz laser é emitido e o tempo que leva para o seu retorno é medido. A fórmula para o cálculo da faixa de medição é relativamente simples e envolve a velocidade da luz. Porém, para realizar esta medição, o equipamento requer um preciso sistema de temporização, além de um espelho e mecanismo de rotação sofisticado que possibilita uma visão geral (360°) em torno de um eixo vertical, e entre 270° e 300° de visão em torno de um eixo horizontal. Os métodos “comparação de fase” e o por pulso (time-of-flight) apresentam diferenças significativas em relação ao método da triangulação. Sua vantagem principal está na capacidade de proporcionar uma cobertura praticamente completa

ao redor do seu próprio eixo em uma varredura, abrangendo grande parte ou a totalidade de um ambiente, uma sala, por exemplo. Se, em tempos passados, a medição ToF era mais lenta em comparação com a dos scanners de diferença de fase, hoje em dia, taxas de mais de 1 milhão de pontos por segundo (1 MHz) podem ser alcançadas com as melhorias tecnológicas. O pulso de laser emitido pelo método ToF tem energia superior à onda contínua da diferença de fase, o que capacita o equipamento a operar em distâncias mais longas, habitualmente até 1 km e, em alguns casos, até mesmo 6 km. Uma nova tendência na área de scanners de pulso são os dispositivos mais leves e com especificações mais baixas, como é o caso do Leica BLK360. Apesar de pesar somente 1kg, esse scanner é capaz de coletar dados a uma taxa de 360.000 pontos por segundo e possui uma câmera panorâmica de 150MP. Esse produto tem um preço relativamente acessível e é destinado tanto a usuários finais quanto a empresas de pesquisa profissional. A Autodesk tem seguido essa abordagem, oferecendo um software de processamento de baixo custo, o ReCap Pro, que é compatível com esse dispositivo. Contudo, é preciso ter em mente que a redução do peso pode comprometer a estabilidade do scanner, já que se trata de um equipamento com peças móveis. Em equipamentos voltados para varreduras terrestres, o método ToF pode alcançar precisão entre 1 e 6 mm, à distâncias que vão de 0,1 m a 1 km (BOARDMAN; BRYAN, 2018; ARYAN; BOSCHÉ; TANG, 2021).

Os scanners de diferença de fases, também conhecidos como ondas contínuas, utilizam um método de cálculo de alcance diferente dos sistemas de pulso, embora sua precisão seja semelhante. Ao invés de usar o tempo de voo, esses scanners medem as diferenças de fase entre os sinais emitidos e retornados. Por isso, conseguem alcançar taxas de captura de dados muito elevadas, geralmente acima de um milhão de pontos por segundo. No entanto, os scanners de pulso estão avançando em suas especificações e algumas fabricantes estão lançando equipamentos com preços mais competitivos. Esses scanners são capazes de produzir nuvens de pontos com alta densidade, resultando em varreduras detalhadas que são úteis em diversas aplicações, inclusive na gestão de patrimônio.

O SLT possibilita desde a coordenação e supervisão de projetos de edificação até a elaboração de registros referentes aos projetos que estão em andamento ou finalizados (ARYAN; BOSCHÉ; TANG, 2021). Entre outras possibilidades, essa tecnologia garante a aquisição de dados tridimensionais necessários para a construção de geometrias complexas de grandes construções históricas (JO, 2019; DONG; ZHANG; ZHU, 2020; GIUFFRIDA et al., 2022), estudos em fachadas de edifícios (CHEN et al., 2022), conservação de patrimônios históricos (ALSHAWABKEH et al., 2020; PEPE et al., 2021; GARCIA-GAGO; S, 2022;

MOYANO et al., 2022), medições de estruturas de grande escala e de alta complexidade (ZHANG et al., 2022), modelagem de objetos de tamanho médio presentes em museus (KUZMINSKY; GARDINER, 2012), entre outras aplicações. Os scanners SLT vêm sendo cada vez mais utilizados na identificação de fissuras e deformações em materiais de construção, mas a qualidade dos dados de varredura depende de vários parâmetros, como o tipo de material e as configurações de varredura. O estudo de Oytun and Atasoy (2022) investigou a precisão das medições do SLT no contexto da análise de fissuras em placas de espuma e materiais de construção comuns, como concreto, madeira e alvenaria, realizando experimentos controlados com diferentes configurações de varredura para facilitar o planejamento do SLT e propor limites de faixa para diferentes configurações de varredura em relação a diferentes materiais de construção e larguras de trincas. Ainda nos estudos das medições utilizando o SLT, Fu et al. (2022) desenvolveu um método automatizado para avaliação dimensional da qualidade (ADQ) de estruturas espaciais (EE) na indústria da construção civil. O método utiliza o SLT para registrar dados precisos das nuvens de pontos das EEs, permitindo o reconhecimento de componentes, a estimativa de parâmetros geométricos e o ADQ. Algoritmos de estimativa de parâmetros geométricos para juntas esféricas e tubos cilíndricos foram propostos. O método dos autores demonstrou-se mais eficiente do que a medição manual, que é subjetiva e ineficiente, obtendo resultados mais precisos e completos. O método proposto foi verificado por um experimento de validação em 13 juntas esféricas e 33 tubos cilíndricos. Já no âmbito do patrimônio histórico, Baik et al. (2021) escolheram o sistema de SLT para realizar um processo de documentação arquitetônica completo da Casa Hazzazi em Jeddah. O principal objetivo do estudo foi fornecer aos arquitetos e profissionais um mapeamento preciso do patrimônio arquitetônico da região antiga de Jeddah, através da combinação da varredura a laser terrestre e de levantamentos tradicionais. Segundo os autores, a metodologia poderá ser aplicada em outras regiões do Oriente Médio para estabelecer estratégias de conservação de antigas construções históricas.

Observa-se nos estudos a necessidade de incluir tecnologias de escaneamento a laser para apoiar atividades de documentação, representação, preservação e restauração de patrimônios históricos, tendo em vista a elevada precisão nas medições de elementos complexos e de difícil acesso, seja devido a fragilidade das estruturas, seja pela subjetividade nas medições manuais. A realização dessas atividades em edifícios históricos pode ser dificultada devido a vários problemas, incluindo a negligência, o abandono, a falta de manutenção, a ausência de material arquitetônico que norteie o corpo técnico e até mesmo

estudos geométricos equivocados. A superação desses obstáculos depende da identificação completa do problema e das etapas necessárias para atender às necessidades identificadas. Antes da fase de restauração, é necessário realizar uma documentação arquitetônica e estudos detalhados (MURPHY; MCGOVERN; PAVIA, 2011, 2013; LÓPEZ et al., 2018; DIARA; RINAUDO; HERITAGE, 2020; ROCHA; FERN, 2020). E como visto, a utilização de tecnologias de SLT podem auxiliar diretamente na obtenção de medições qualificadas dos patrimônios históricos, assegurando que os levantamentos para atividades de reforma, por exemplo, tenham um orçamento mais próximo do real, justificando o seu emprego.

O trabalho deste capítulo teve como objetivo digitalizar a Igreja Matriz Nossa Senhora do Rosário, patrimônio histórico localizado no município de Aracati-CE, utilizando a tecnologia de escaneamento a laser terrestre. Com o auxílio da ferramenta Revit Autodesk, o modelo 3D da Igreja foi gerado através dos dados da nuvem de pontos. Ademais, uma análise comparativa das dimensões dos cômodos e das paredes da Igreja foi realizada entre os modelos 3D e 2D existente.

#### **4.2 Estudo de caso – Igreja Nossa Senhora do Rosário**

A Igreja Nossa Senhora do Rosário é um monumento histórico da cidade de Aracati, localizado no estado do Ceará, no Nordeste brasileiro (Figura 68). Esta igreja católica foi construída no final do século XVIII e é uma das mais antigas da cidade. Com sua arquitetura barroca, ela representa um importante marco histórico e cultural para a região. Uma capela coberta de palha e paredes de tijolos e de taipa foi erguida, onde hoje encontra-se a Igreja Matriz, por charqueadores vindos da Bahia e de Pernambuco em 1714. Em 1745, a capela desmoronou devido às inundações do Rio Jaguaribe, e em 1747, o padre José Lopes de Lima iniciou a construção de uma nova capela com tijolos e telhas produzidos localmente. No entanto, este edifício também caiu devido aos invernos rigorosos (ROCHA, 2011, 2022).

Figura 68 – Igreja Nossa Senhora do Rosário, Aracati-CE.



Fonte: Elaborado pelo autor

Na igreja, há algumas esculturas e uma mesa de comunhão confeccionada em jacarandá. A bandeira que fica na porta do batistério foi cuidadosamente entalhada à mão. Além disso, há uma entrada feita em arenito baiano, com portas de almofada em alto relevo decoradas com detalhes que apresentam características morfológicas semelhantes às dos vegetais. Na parte externa da igreja, foi construído um grande cruzeiro em 1859, com os símbolos que representam o sofrimento de Cristo durante a Paixão (dados, mão, galo, caneca de fel, lança, escada e coroa de espinhos). Em 1845, os sinos da igreja foram instalados em Aracati. Posteriormente, em 1985, foi realizada uma manutenção nos sinos, uma vez que apresentavam rachaduras. O sino de maior tamanho possui uma massa de 550 quilos, enquanto o sino de tamanho médio pesa 250 quilos e o menor, 80 quilos. Dentro da igreja, pode-se contemplar o altar em madeira com detalhes dourados em relevo, onde está localizada a imagem barroca da padroeira, Nossa Senhora do Rosário. O forro da igreja também é feito de madeira, enquanto uma parte do piso é composta por lajotas de argila queimada (ROCHA, 2011, 2022).



Figura 69 – Imagem do presbitério, altar-mor e retábulo da Igreja.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Igreja de Nossa Senhora do Rosário de Aracati segue a tradição arquitetônica das igrejas brasileiras com influência portuguesa, apresentando um formato retangular que garante a unidade da estrutura. O templo cresceu a partir de uma pequena capela até atingir sua forma atual, com a capela-mor situada no centro e a nave principal cercada por corredores laterais que oferecem acesso à sacristia e ao consistório. Ao contrário de outras igrejas no Ceará, esta não apresenta arcos nas paredes dos corredores laterais. A igreja possui apenas uma torre com pináculos, finalizada em forma de bulbo. O governo federal classificou a Matriz de Nossa Senhora do Rosário de Aracati como patrimônio histórico em 1957. Hoje em dia, a igreja é um local de culto importante para os fiéis católicos da região e um destino turístico popular para aqueles que desejam explorar a rica história e cultura da cidade de Aracati (ROCHA, 2011, 2022). Essas informações são provenientes do levantamento histórico e arquivístico proposto para o desenvolvimento deste trabalho.

#### 4.3 Materiais e métodos

Nesta seção, são descritos os métodos utilizados para a digitalização da Igreja Nossa Senhora do Rosário e os procedimentos realizados durante a varredura. O processo de

digitalização de patrimônio histórico é um processo delicado e que exige um planejamento cuidadoso para garantir a precisão e a qualidade dos modelos digitais. A metodologia adotada para a digitalização da Igreja Nossa Senhora do Rosário foi dividida em três etapas: planejamento, aquisição e processamento dos dados.

#### ***4.3.1 Planejamento***

Esta etapa foi dividida em três partes, a saber: levantamento histórico e arquivístico, inspeção visual e reconhecimento do local. A primeira parte visa a obtenção de documentos históricos e informações sobre o período de construção e evolução da igreja, tais como: método construtivo, materiais utilizados, reformas, existência de cômodos ocultos e influência arquitetônica. Ainda nesta etapa, foram solicitadas plantas arquitetônicas: planta baixa, de elevações, das fachadas e cortes que auxiliassem nas atividades posteriores.

A equipe de digitalização visitou a igreja e realizou uma inspeção visual da estrutura. Durante essa inspeção, foi verificada a existência de manifestações patológicas e o estado de conservação do sistema estrutural da edificação, bem como, a identificação de áreas com possível risco de desabamento. A atividade final do planejamento consistiu no conhecimento dos níveis de iluminação na igreja, a possível interferência de obstáculos na digitalização, como colunas, elementos arquitetônicos, bancos, entre outros, e a organização das áreas internas e externas, como a retirada de objetos, materiais e móveis não pertencentes à arquitetura da igreja.

Após a análise, foi definido um plano de digitalização, que incluía o objetivo da digitalização, a escolha dos equipamentos para aquisição das varreduras, áreas e zonas restritas, planta dos pontos de varredura, catálogo de elementos com necessidade de detalhamento especial, estimativa de tempo da digitalização, softwares para o processamento dos dados, definição do produto final da digitalização e a equipe responsável pelos procedimentos.

#### ***4.3.2 Aquisição e processamento dos dados***

A fase de obtenção e processamento dos dados inclui três passos principais: Aquisição de dados, pré-processamento e processamento das nuvens de pontos. A aquisição de dados faz parte do trabalho de campo, que pode envolver a criação de croquis, medições diretas e levantamento dos pontos de varredura. Inicialmente, os detalhes da igreja foram

verificados, como a presença de portas, janelas e elementos estruturais e arquitetônicos únicos que exigem atenção especial. Devido à complexidade arquitetônica da construção e à existência de detalhes especiais identificados, o processo de digitalização foi planejado para que todos esses elementos estivessem incluídos na varredura, mesmo não sendo o objetivo principal deste trabalho, a captura dos elementos decorativos foi realizada para a produção de trabalhos complementares.

A digitalização da igreja foi realizada utilizando o equipamento Leica BLK360 Geosystems (Figura 70). Esse equipamento permite a coleta de até 360.000 pontos de escaneamento a laser por segundo, com precisão de milímetros, em um intervalo de tempo médio de 3 minutos para cada cena. Para realizar a digitalização, a equipe posicionou o equipamento em todos os cômodos e no entorno da igreja, verificando sempre a sobreposição entre as cenas, sendo os locais escolhidos previamente no planejamento. Em cada ponto, o equipamento foi posicionado em um tripé e foi realizada a digitalização em 360 graus, garantindo que o scanner tenha uma linha de visão para capturar todos os elementos necessários. Durante a digitalização, a equipe utilizou o aplicativo móvel Leica Cyclone Field para recebimento em tempo real das imagens e dos dados de nuvem de pontos do scanner. O aplicativo possibilita a otimização, o alinhamento e a visualização prévia da nuvem de pontos. As etapas de captura de dados foram realizadas por dois operadores e levaram cerca de 8 horas para serem concluídas.

Figura 70 – Imagem do laser scanner Leica BLK 360.

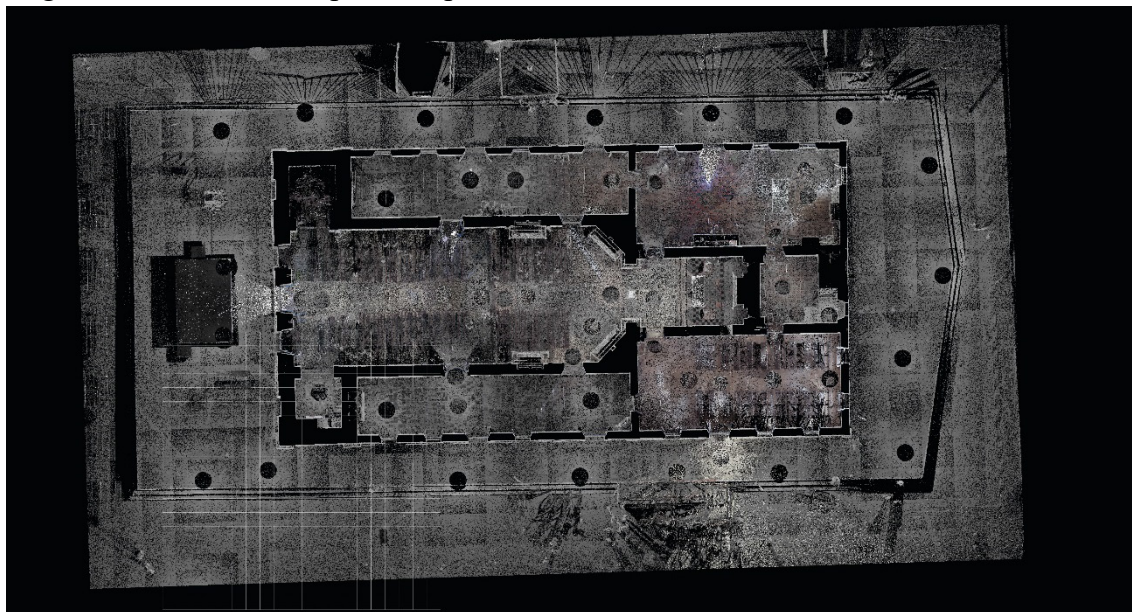


Fonte: Elaborado pelo autor



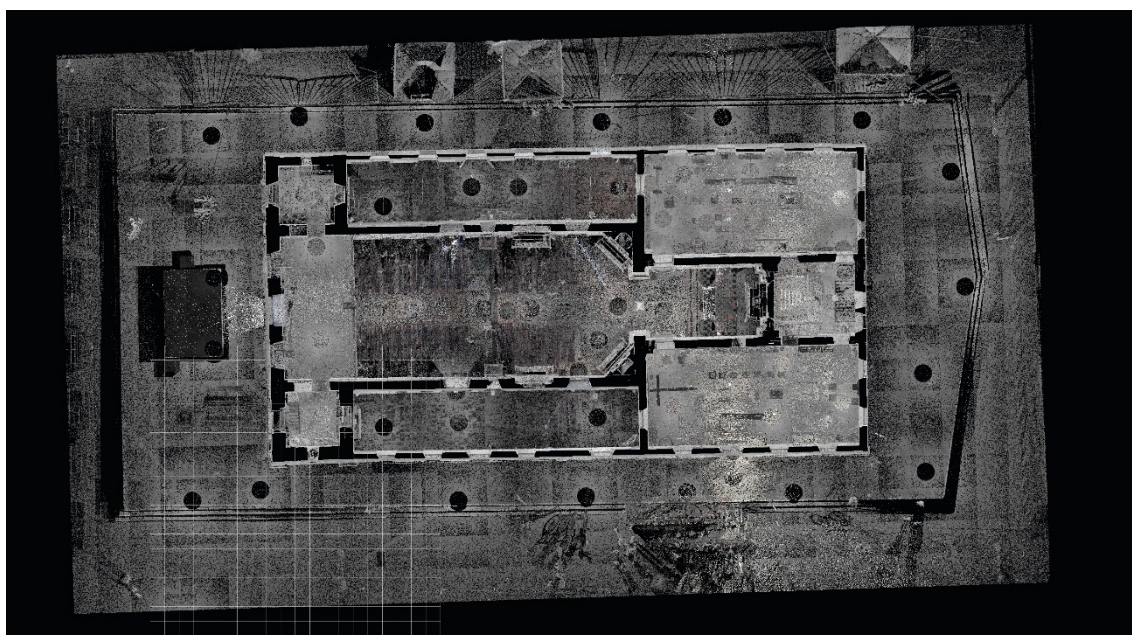
As figuras 71 e 72 apresentam o posicionamento de todos os pontos de captura (pavimentos térreo e superior).

Figura 71 – Locais de captura no pavimento térreo.



Fonte: Elaborado pelo autor

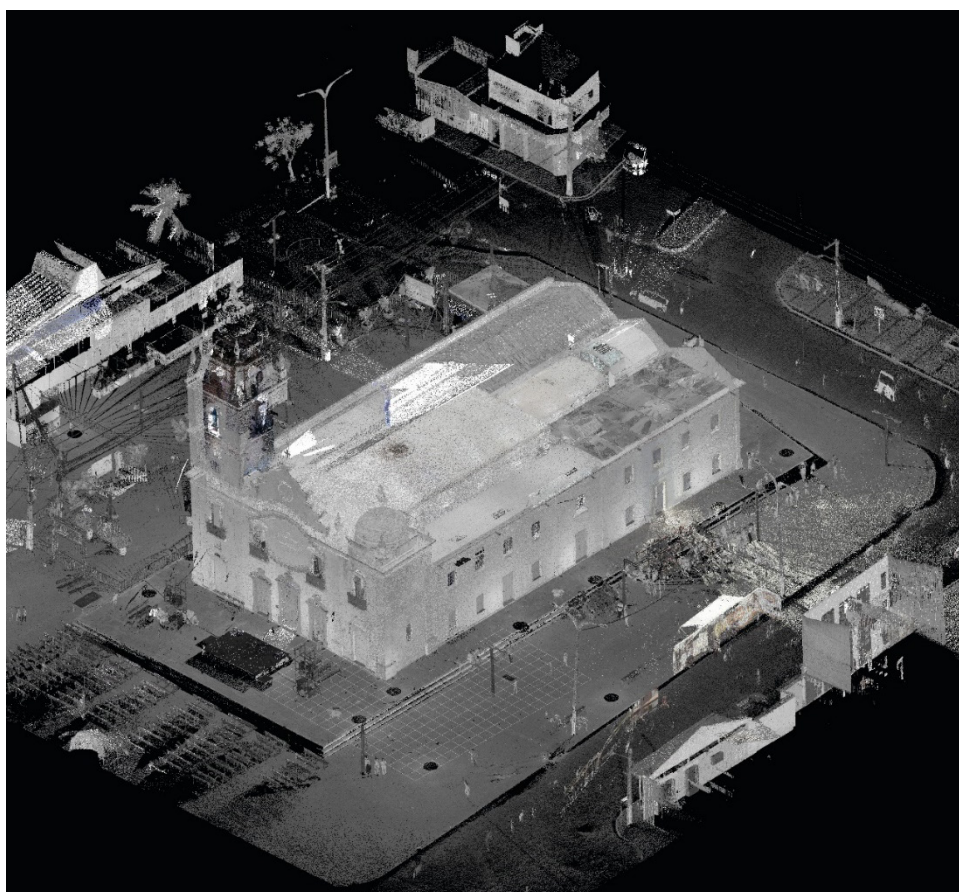
Figura 72 – Locais de captura no pavimento superior.



Fonte: Elaborado pelo autor

A fase de pré-processamento compreende o registro das cenas digitalizadas, o alinhamento da nuvem de pontos nos níveis planimétrico e altimétrico, e a remoção da grande parte dos pontos indesejados (tratamento bruto), de acordo com as necessidades do projeto. Com o auxílio do software Cyclone REGISTER 360 as digitalizações foram registradas (Figura 73), ajustadas nos níveis planimétrico e altimétrico (Figura 74). Através da figura 75 pode-se ver os links de conexão dos locais de digitalização, onde os processos de alinhamento e otimização possibilitam que as cenas sejam ajustadas para garantir uma maior precisão da nuvem de pontos, procedimentos que favorecem a execução das atividades de modelagem e medição dos cômodos, paredes e elementos estruturais e arquitetônicos.

Figura 73 – Nuvem de pontos após o registro e alinhamento de todas as cenas.



Fonte: Elaborado pelo autor

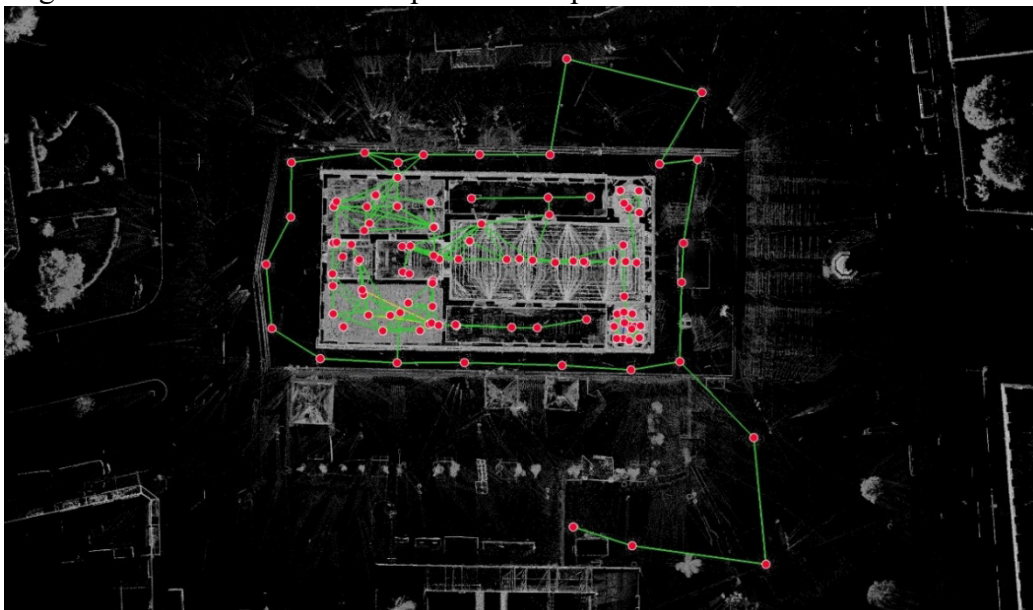


Figura 74 – Fachada frontal da igreja.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 75 – Conexões entre os pontos de captura das cenas.



Fonte: Elaborado pelo autor

A etapa final para gerar a nuvem de pontos 3D é o processamento do modelo 3D, que inclui armazenamento e exportação dos arquivos. Neste projeto, optou-se por exportar os

arquivos em formato LGS, que podem ser visualizados em aplicativos como Leica TruView Digital Reality Viewer ou JetStream Viewer, além dos formatos RCP/RCS, que permitem a transferência dos dados para softwares como AutoCAD e Autodesk BIM. A Figura 76 mostra o modelo 3D da nuvem de pontos finalizado, após a revisão dos ajustes e limpeza bruta da nuvem.

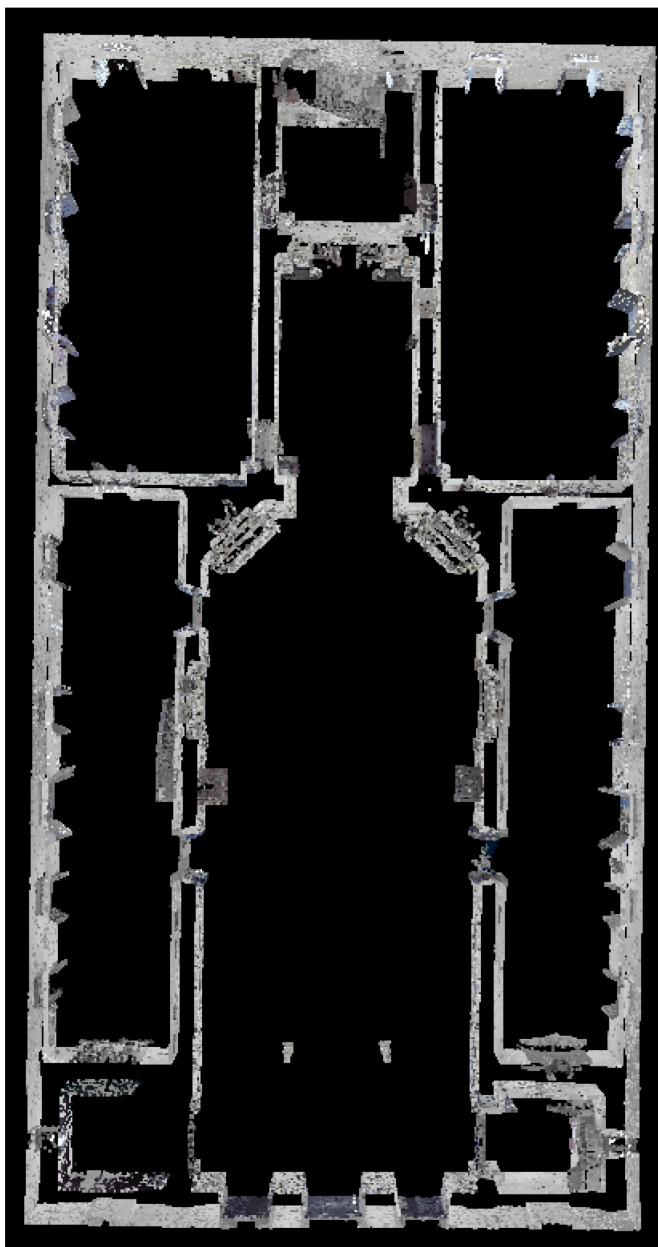
Figura 76 – Nuvem de pontos após a etapa de processamento.



Fonte: Elaborado pelo autor

A nuvem de pontos foi exportada para o software ReCap Autodesk. No ReCap, que também é um software de tratamento de nuvens de pontos, foi realizada a limpeza mais fina dos pontos indesejados da nuvem da igreja. Nessa etapa foram removidos elementos não interessantes para o objetivo do projeto, como mesas, cadeiras, caixas de som, bancos, quadros, entre outros, deixando todos os cômodos e espaços vazios, sem interferência para as medições e modelagem (Figura 77). Por fim, a nuvem de pontos foi exportada do formato RCP.

Figure 77 – Nuvem de pontos após limpeza dos espaços a serem medidos.



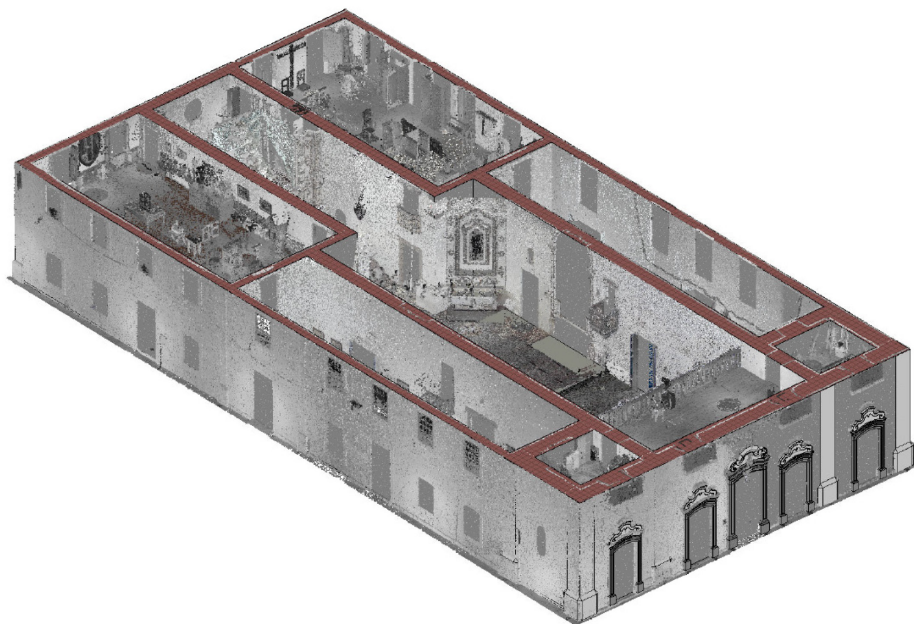
Fonte: Elaborado pelo autor

#### ***4.3.3 Modelagem BIM***

A fase de modelagem BIM envolve as tarefas do processo de construção do modelo 3D de uma edificação. A Igreja Nossa Senhora do Rosário foi modelada utilizando o software Revit Autodesk. A Figura 78 mostra a sobreposição da nuvem de pontos e do modelo 3D. A fachada e os detalhes dos elementos arquitetônicos do modelo 3D podem ser visualizadas na Figura 79.



Figura 78 – Modelagem 3D da igreja a partir da nuvem de pontos.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 79 – Modelagem 3D da igreja a partir da nuvem de pontos.

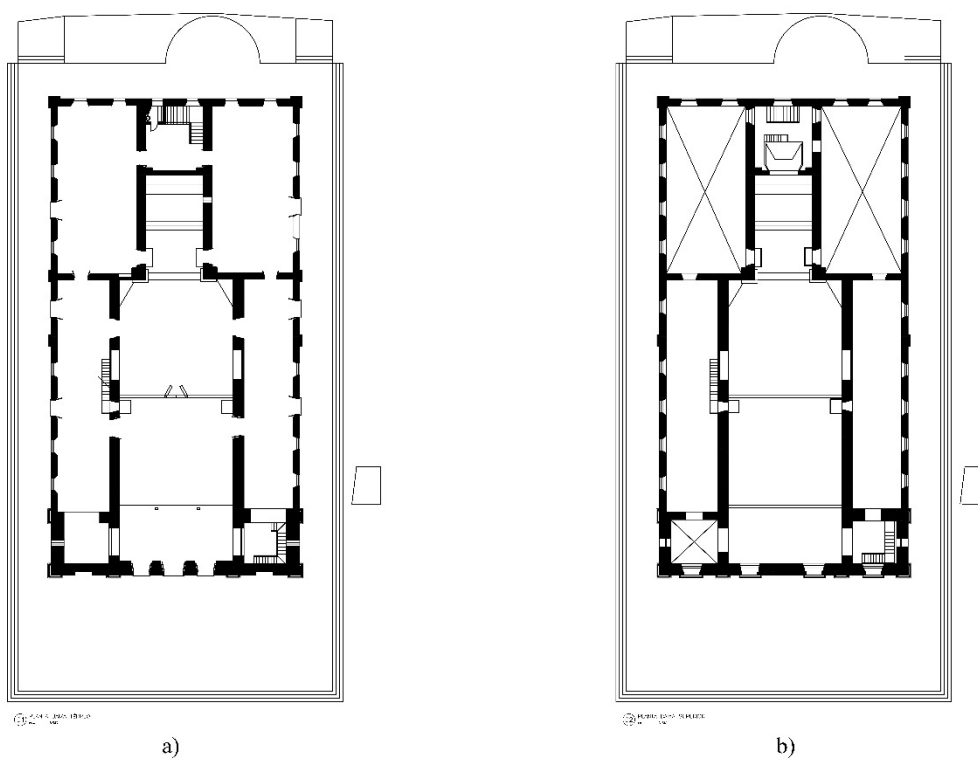


Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.3.4 Levantamento 2D

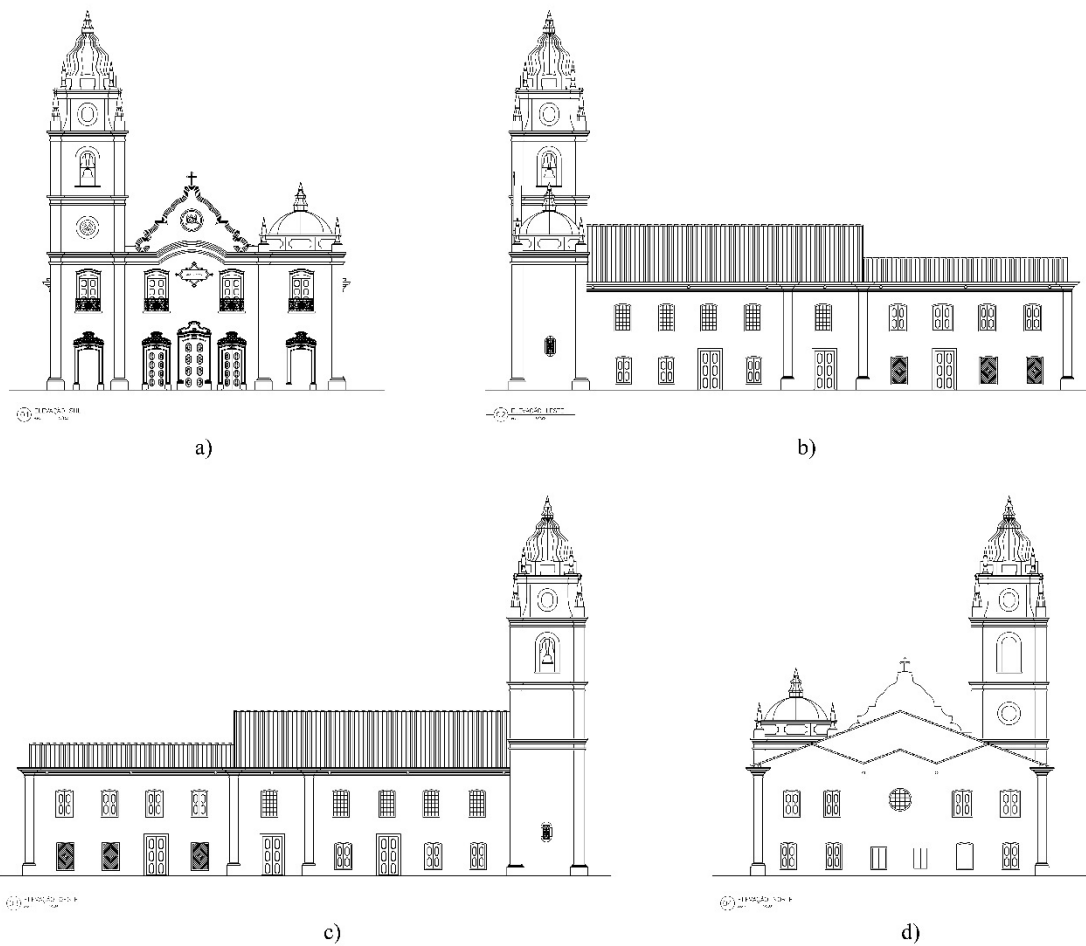
O levantamento arquitetônico da igreja data de julho de 2010, foi fornecido pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) e durou cerca de quatro meses para ser concluído. As figuras apresentam as plantas baixas (Figura 80), as elevações (fachadas) (Figura 81) e o corte (Figura 82).

Figura 80 - a) Planta baixa do térreo; b) Planta baixa do piso superior.



Fonte: (IPHAN, 2010)

Figura 81 - Elevações: a) Sul; b) Leste; c) Oeste e d) Norte.



Fonte: (IPHAN, 2010)

Figura 82 – Corte longitudinal.



Fonte: (IPHAN, 2010)

## 4.4 Resultados e discussões

### 4.4.1 Modelagem 3D

A figure 83 apresenta o modelo 3D sobrepondo a nuvem de pontos da igreja. Toda a criação do modelo foi executada tomando como referência os pontos da nuvem.

Figura 83 – Modelagem 3D da igreja a partir da nuvem de pontos.

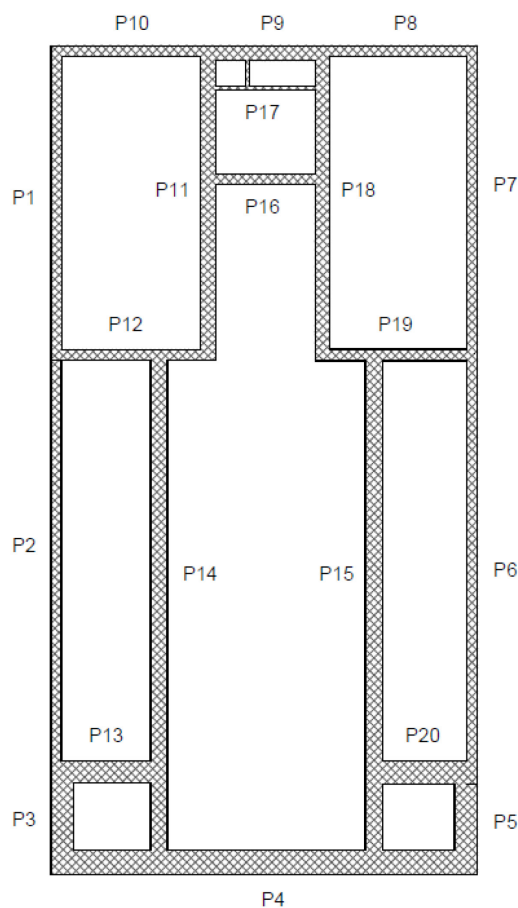


Fonte: Elaborado pelo autor

### 4.4.2 Comparação entre os modelos 2D e 3D

A comparação entre os modelos 2D e 3D, plantas do IPHAN e modelo 3D REVIT, respectivamente, permitiu avaliar as divergências nas características geométricas da igreja, principalmente os valores de dimensões (largura, comprimento e altura) e áreas dos cômodos. Também foram analisadas as espessuras das paredes (Figura 84).

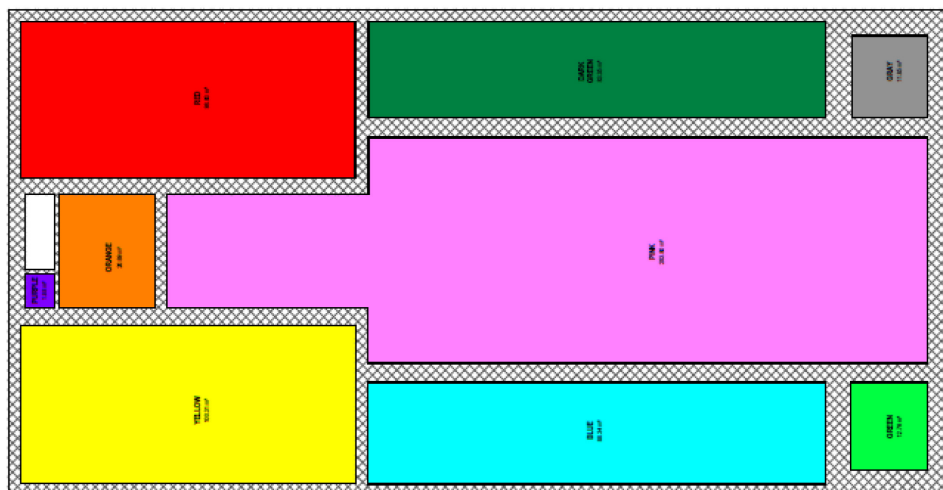
Figura 84 – Identificação das paredes da igreja.



Fonte: Elaborado pelo autor

As áreas encontradas nos modelos de nuvem de pontos (Figura 85) e planta baixa do projeto arquitetônico existente também foram analisadas. A comparação entre os modelos retornou valores diferentes de áreas que variam entre 0,49 m<sup>2</sup> e 3,87 m<sup>2</sup>, conforme a Tabela 6. O levantamento retornou uma diferença média de 4,41% no valor das áreas medidas.

Figura 85 – Áreas do modelo 3D.



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 6 – Valores da áreas dos cômodos por modelo.

Cômodo	Modelo 3D (m <sup>2</sup> )	Modelo 2D (m <sup>2</sup> )	Diferença das áreas (m <sup>2</sup> )
Amarelo (Sacristia)	100.31	100.31	0.00
Azul (Corredor esquerdo)	88.34	90.90	2.56
Verde (Capela lateral)	12.76	13.88	1.12
Rosa (Nave)	283.80	287.67	3.87
Laranja (Despensa)	20.69	20.20	0.49
Roxo (Banheiro)	1.88	2.07	0.19
Vermelho (Consistório)	98.93	101.94	3.01
Verde escuro (Corredor direito)	83.35	85.79	2.44
Cinza (Acesso ao coral)	11.85	13.18	1.33

Fonte: Elaborado pelo autor

A comparação entre os modelos retornou valores diferentes de espessuras das paredes que variam entre 0.00 mm e 150.00 mm, conforme a Tabela 7. A pesquisa retornou uma diferença média de 7,72% no valor das espessuras das paredes.

Tabela 7 – Valores médios da diferença das espessuras das paredes da igreja.

Parede	Modelo 3D (mm)	Modelo 2D (mm)	Diferença média das espessuras (mm)
P1	570.00	550.00	20.00
P2	530.00	550.00	20.00
P3	1140.00	1100.00	40.00
P4	1230.00	1200.00	30.00

Tabela 7 – Valores médios da diferença das espessuras das paredes da igreja.

(Continua)

Parede	Modelo 3D (mm)	Modelo 2D (mm)	Diferença média das espessuras (mm)
P5	1160.00	1200.00	40.00
P6	570.00	550.00	20.00
P7	570.00	600.00	30.00
P8	570.00	620.00	50.00
P9	770.00	620.00	150.00
P10	570.00	620.00	50.00
P11	750.00	800.00	50.00
P12	560.00	550.00	10.00
P13	1120.00	980.00	140.00
P14	850.00	850.00	0.00
P15	850.00	950.00	100.00
P16	500.00	350.00	150.00
P17	200.00	200.00	0.00
P18	750.00	800.00	50.00
P19	590.00	600.00	10.00
P20	1140.00	1200.00	60.00

Fonte: Elaborado pelo autor

As diferenças encontradas nas dimensões dos espaços e nas paredes da igreja, podem ser resultados de práticas incorretas de medições, falta de atenção na utilização e no posicionamento dos equipamentos, acesso às alvenarias dificultado pela presença de elementos arquitetônicos, interferindo na medição direta, entre outras.

#### 4.5 Comentários finais

A verificação da existência de manifestações patológicas e do estado de conservação do sistema estrutural da edificação não retornaram resultados consideráveis e que impedissem a execução da digitalização.

Através do estudo desenvolvido na Igreja Nossa Senhora do Rosário, foi possível constatar que o emprego da tecnologia de varredura a laser terrestre, mostrou-se promissora em atividades de levantamento geométrico de edificações históricas. Dessa forma, pode-se concluir que:

- O escaneamento a laser forneceu informações dimensionais e dados necessários para construir um modelo 3D da igreja com alta precisão;

- Com o emprego do REVIT foi possível identificar diferenças dimensionais entre os modelos observados e modelar com precisão elementos arquitetônicos complexos;
- O levantamento geométrico de edificações históricas utilizando equipamentos de medição manuais, além levar mais tempo para ser realizado, que no caso deste estudo, foram quatro meses, pode retornar informações métricas imprecisas, o que possibilita erros na geração de orçamentos e quantitativos;
- O estudo mostra boas possibilidades de integração entre tecnologias de varredura a laser e procedimentos manuais em edifícios patrimoniais. A tecnologia de digitalização e testes experimentais podem efetivamente fornecer informações geométricas mais próximas das reais.



## 5. CONCLUSÃO

Nesta dissertação, foram abordados dois estudos de caso relevantes que destacam a importância da digitalização do patrimônio cultural como uma ferramenta fundamental para a preservação, documentação e análise de monumentos e edifícios históricos. No primeiro estudo de caso, descrito no capítulo 3, realizou-se a digitalização completa da casa histórica de José de Alencar, utilizando escaneamento a laser de alta resolução, o que permitiu a criação de um modelo tridimensional detalhado e preciso. Além disso, foram aplicadas técnicas avançadas de HBIM para integrar informações sobre as condições físicas do edifício e os dados obtidos através da digitalização. Isso permitiu realizar uma avaliação abrangente dos danos presentes na estrutura e nas superfícies do edifício, bem como identificar áreas de preocupação para a preservação futura. O levantamento inicial foi realizado com um scanner a laser, que proporcionou informações dimensionais e dados necessários para construir um modelo 3D extremamente preciso da casa. A nuvem de pontos gerada pelo scanner permitiu uma representação detalhada de todos os elementos da estrutura, possibilitando uma avaliação realista de sua condição atual. Além disso, por meio do software Revit foi possível a geração de um modelo 3D altamente preciso e detalhado da casa. Esse modelo permitiu uma análise minuciosa dos danos presentes e seu impacto na integridade estrutural do edifício. Outra abordagem utilizada foi a comparação entre os dois modelos 3D gerados. Essa técnica de sobreposição e comparação dos modelos possibilitou identificar um nível de deformação nos telhados da casa, demonstrando ser uma ferramenta promissora para detecção de danos em edifícios patrimoniais. Essa análise comparativa pode fornecer insights valiosos sobre as áreas que requerem atenção e intervenção durante o processo de restauração e preservação. Adicionalmente, uma inspeção visual foi realizada durante a avaliação da casa. Essa inspeção visual revelou a presença de fissuras nas paredes, no assentamento dos pisos e deformações e movimentação das paredes. Esses achados estão em conformidade com o nível de deformação observado na comparação dos modelos 3D e na análise numérica, reforçando a confiabilidade dos resultados obtidos.

O segundo estudo de caso teve como objetivo digitalizar a Igreja Nossa Senhora do Rosário, um patrimônio histórico federal, utilizando a tecnologia de escaneamento a laser terrestre. A comparação entre um modelo 3D gerado a partir da nuvem de pontos e um levantamento 2D realizado em 2010 mostrou diferenças nos valores das áreas dos cômodos e espessuras das paredes registradas nos modelos. A utilização do escaneamento a laser

proporcionou informações dimensionais e dados necessários para criar um modelo 3D altamente preciso da igreja. Através do software Revit, foi possível identificar diferenças dimensionais entre os modelos observados e modelar com precisão elementos arquitetônicos complexos. Esses resultados destacam a importância da tecnologia de escaneamento a laser, pois o levantamento geométrico manual em edifícios históricos pode levar a informações métricas imprecisas, resultando em erros na geração de orçamentos e quantitativos. O estudo evidencia as vantagens da integração entre as tecnologias de escaneamento a laser e os procedimentos manuais em edifícios patrimoniais, mostrando que essas ferramentas podem fornecer informações geométricas mais próximas da realidade e diminuir consideravelmente a duração de um levantamento arquitetônico, contribuindo para uma avaliação e análise mais precisa e ágil do patrimônio histórico.

Essas conclusões demonstram a eficácia e o potencial das tecnologias de digitalização e escaneamento de alta resolução, como o escaneamento a laser e o HBIM, na preservação e documentação do patrimônio cultural. Essas tecnologias fornecem informações dimensionais precisas e detalhadas, permitindo a construção de modelos 3D de alta qualidade e a análise precisa de elementos arquitetônicos complexos em edificações históricas. Além disso, a integração dessas tecnologias com procedimentos manuais tradicionais demonstrou ser uma abordagem promissora, proporcionando resultados mais próximos da realidade e auxiliando na detecção de danos e deformações em edifícios históricos. Essas descobertas indicam que a digitalização do patrimônio cultural por meio de técnicas avançadas oferece benefícios significativos para a preservação adequada, a documentação precisa e a gestão financeira eficiente das atividades relacionadas ao patrimônio histórico-arquitetônico.

## REFERÊNCIAS

- ACIERNO, M. et al. **Architectural heritage knowledge modelling: An ontology-based framework for conservation process.** *Journal of Cultural Heritage*, v. 24, p. 124–133, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2016.09.010>>.
- ALSHAWABKEH, Y. et al. **Heritage documentation using laser scanner and photogrammetry. The case study of Qasr Al-Abidit, Jordan.** *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, v. 16, n. August 2019, p. e00133, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00133>>.
- ANASTASOVITIS, E.; ROUMELIOTIS, M. **Transforming computed tomography scans into a full-immersive virtual museum for the Antikythera Mechanism.** *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, v. 28, n. December 2022, p. e00259, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.daach.2023.e00259>>.
- ANGULO-FORNOS, R.; CASTELLANO-ROMÁN, M. **HBIM as support of preventive conservation actions in heritage architecture. experience of the renaissance quadrant facade of the cathedral of seville.** *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 10, n. 7, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6120: Cargas para cálculo de estruturas de edificações.** Rio de Janeiro: ABNT, 1980.
- ARC METROLOGIA. **Structured light scanners.** Disponível em: <<https://www.arc-bg.com/en/253-structured-light-scanners>>. Acesso em: 20 jun. 2023.
- ARIAS, P. et al. **Control of structural problems in cultural heritage monuments using close-range photogrammetry and computer methods.** *Computers and Structures*, v. 83, n. 21–22, p. 1754–1766, 2005.
- ARYAN, A.; BOSCHÉ, F.; TANG, P. **Planning for terrestrial laser scanning in construction : A review.** *Automation in Construction*, v. 125, n. May 2020, 2021.
- BAIK, A. et al. **Applying digital methods for documenting heritage building in Old Jeddah : A case study of Hazzazi House.** *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, v. 21, n. May 2020, p. e00189, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.daach.2021.e00189>>.
- BARBASIEWICZ, A.; WIDERSKI, T.; DALIGA, K. **The analysis of the accuracy of spatial models using photogrammetric software: Agisoft Photoscan and Pix4D.** *E3S Web of Conferences*, v. 26, 2018.
- BIAGINI, C. et al. **Towards the BIM implementation for historical building restoration sites.** *Automation in Construction*, v. 71, p. 74–86, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2016.03.003>>.
- BISCARINI, C. et al. **UAV photogrammetry, infrared thermography and GPR for enhancing structural and material degradation evaluation of the Roman masonry bridge of Ponte Lucano in Italy.** *NDT and E International*, v. 115, n. Maio, p. 102287, 2020.

Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102287>>.

BOARDMAN, C.; BRYAN, P. **3D Laser Scanning for Heritage**. Historic England. Swindon, 2018.

BRANCO, M. E. M. **Reforço Sísmico de Edifícios de Alvenaria: Aplicação a edifícios “Gaioleiros”**. 2007. Universidade Técnica de Lisboa, 2007.

BRANDÃO, F. et al. **Seismic behavior assessment of a brazilian heritage construction**. *Frattura ed Integrita Strutturale*, v. 12, n. 45, p. 14–32, 2018.

BRAUN, A.; BORRMANN, A. **Combining inverse photogrammetry and BIM for automated labeling of construction site images for machine learning**. *Automation in Construction*, v. 106, n. January, p. 102879, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102879>>.

BRUNO, N.; RONCELLA, R.; AREA, P. **A restoration oriented hbim system for cultural heritage documentation: The case study of Parma Cathedral**. v. XLII, n. June 2018, p. 4–7, 2020.

BRUNO, S.; FINO, M. De; FATIGUSO, F. **Historic Building Information Modelling : performance assessment for diagnosis-aided information modelling and management**. *Automation in Construction*, v. 86, n. November 2017, p. 256–276, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.11.009>>.

BUGEJA, A.; BONANNO, M.; GARG, L. **3D scanning in the art & design industry**. *Materials Today: Proceedings*, v. 63, p. 718–725, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.069>>.

CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Terrestrial Laser Scanning Specifications**. n. June, p. 1–41, 2018.

CHAREF, R.; ALAKA, H.; EMMITT, S. **Beyond the third dimension of BIM: A systematic review of literature and assessment of professional views**. *Journal of Building Engineering*, v. 19, n. May 2020, p. 242–257, 2018.

CHEN, Z. et al. **3D model-based terrestrial laser scanning (TLS) observation network planning for large-scale building facades**. *Automation in Construction*, v. 144, n. June, p. 104594, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104594>>.

CHEVRIER, C. et al. **Parametric Documenting of Built Heritage: 3D Virtual Reconstruction of Architectural Details**. *International Journal of Architectural Computing*, v. 8, n. 2, p. 135–150, 2010.

CHUANG, T. Y.; SUNG, C. C. **Learning-guided point cloud vectorization for building component modeling**. *Automation in Construction*, v. 132, n. April, p. 103978, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103978>>.

COGIMA, C. K. et al. **Scan-To-Hbim Aplicado À Igreja Da Pampulha**. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, v. 15, n. 1, p. 117–134, jan. 2020. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.116/gtp.v14i1.152828>>.

COLOMINA, I.; MOLINA, P. **Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 92, p. 79–97, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>>.

COOMBES, M. A.; VILES, H. A. **Integrating nature-based solutions and the conservation of urban built heritage: Challenges, opportunities, and prospects**. Urban Forestry and Urban Greening, v. 63, n. May, p. 127192, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127192>>.

COTELLA, V. A. **From 3D point clouds to HBIM: Application of Artificial Intelligence in Cultural Heritage**. Automation in Construction, v. 152, n. May, p. 104936, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104936>>.

CROCE, V. et al. **Semi-automatic classification of digital heritage on the Aïoli open source 2D/3D annotation platform via machine learning and deep learning**. Journal of Cultural Heritage, v. 62, p. 187–197, 2023.

Delgado JL (2013) **Avaliação sísmica de um edifício crítico em alvenaria**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Instituto Superior Técnico, Lisboa, p. 201.

DE PAOLIS, L. T. et al. **Virtual reality for the enhancement of cultural tangible and intangible heritage: The case study of the Castle of Corsano**. Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage, v. 27, n. March, p. e00238, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.daach.2022.e00238>>.

DIARA, F.; RINAUDO, F.; HERITAGE, C. **Open source hbim for cultural heritage : a Project Proposal**. v. XLII, n. June 2018, p. 4–7, 2020.

DONG, Q.; ZHANG, Q.; ZHU, L. **of Chinese classical garden rockeries : Zhanyuan's South Rockery**. Heritage Science, p. 1–15, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s40494-020-00405-z>>.

DORE, C.; MURPHY, M. **Integration of HBIM and 3D GIS for Digital Heritage Modelling**. DIGITAL DOCUMENTATION, Edinburgh, 2012. Disponível em: <<https://arrow.tudublin.ie/beschrecon>>.

DORE, C.; MURPHY, M. **Current state of the art historic building information modelling**. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, v. 42, n. 2W5, p. 185–192, 2017.

DORFFNER, L.; FORKERT, G. **Generation and visualization of 3D photo-models using hybrid block adjustment with assumptions on the object shape**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 53, n. 6, p. 369–378, 1998.

EASTMAN, C. et al. **BIM handbook : a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors**. John Wiley & Sons, Inc. 2nd ed. New Jersey, 2011.

EDL, M.; MIZERÁK, M.; TROJAN, J. **3D Laser Scanners: History and Applications**. Acta Simulatio, v. 4, n. 4, p. 1–5, 2018.

ENGLISH HERITAGE. **3D Laser\_Scanning**. p. 41, 2011.

FARO. **Faro Focus Premium**. FARO. Flórida, 2023.

FONTENELE, A. D. **Vulnerability assessment tools for historic facades**. 2022. UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ, 2022.

FORLIN, P.; VALENTE, R.; KÁZMÉR, M. **Assessing earthquake effects on archaeological sites using photogrammetry and 3D model analysis**. Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage, v. 9, n. February, p. 1–14, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.daach.2018.e00073>>.

FRANCZUK, J. et al. **Direct use of point clouds in real-time interaction with the cultural heritage in pandemic and post-pandemic tourism on the case of Klodzko Fortress**. Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage, v. 24, n. February, 2022.

FRAUNHOFER IFF MAGDEBURG. **Guidelines on laser scanning in plant design**. 2018. Disponível em: <<https://www.iff.fraunhofer.de>>.

FREGONESE, L. et al. **Survey and modelling for the bim of Basilica of San Marco in Venice**. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, v. 42, n. 2W3, p. 303–310, 2017.

FU, L. et al. **Terrestrial laser scanning assisted dimensional quality assessment for space frame components**. Measurement, v. 204, n. March, p. 112067, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112067>>.

G. **GSA BIM Guide for 3D Imaging**. U.S. General Services Administration. Washington, DC, 2009. Disponível em: <[http://www.gsa.gov/graphics/pbs/GSA%7B\\_%7DBIM%7B\\_%7DGuide%7B\\_%7DSeries%7B\\_%7D03.pdf](http://www.gsa.gov/graphics/pbs/GSA%7B_%7DBIM%7B_%7DGuide%7B_%7DSeries%7B_%7D03.pdf)>.

GALANTUCCI, R. A.; FATIGUSO, F. **Advanced damage detection techniques in historical buildings using digital photogrammetry and 3D surface analysis**. Journal of Cultural Heritage, v. 36, p. 51–62, 2019. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2018.09.014>>.

GALANTUCCI, R. A.; FATIGUSO, F.; GALANTUCCI, L. M. **A proposal for a new standard quantification of damages of cultural heritages, based on 3D scanning**. Scires-It, v. 8, n. 1, p. 121–138, 2018.

GARCIA-GAGO, J.; S, L. J. **Automation in Construction HBIM for supporting the diagnosis of historical buildings : case study of the Master Gate of San Francisco in Portugal**. v. 141, n. June, 2022.

Giles K (2012) **Recording, documentation and information management for the conservation of heritage places: illustrated examples**. Antiquity 86:566–568

GIUDICE, M. Del; OSELLO, A. **BIM FOR CULTURAL HERITAGE**. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. XL, 2013.

GIUFFRIDA, D. et al. **Digitization of two urban archaeological areas in Reggio Calabria (Italy): Roman Thermae and Greek fortifications**. Journal of Archaeological Science: Reports, v. 43, n. November 2021, 2022.

GODINHO, M. et al. **BIM as a resource in heritage management: An application for the National Palace of Sintra, Portugal**. Journal of Cultural Heritage, v. 43, p. 153–162, 1 maio 2020.

GOMES, M. G.; TOMÉ, A. **A digital and non-destructive integrated methodology for heritage modelling and deterioration mapping. The case study of the Moorish Castle in Sintra**. Developments in the Built Environment, v. 14, n. March, 2023.

GROETELAARS, N. J. **Criação de modelos BIM a partir de “Nuvens de Pontos”: estudo de Métodos e Técnicas para documentação arquitetônica**. p. 372, 2015. Disponível em: <<http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/20220%0A>>.

HAMDAN, A. et al. **A semantic modeling approach for the automated detection and interpretation of structural damage**. Automation in Construction, v. 128, n. May 2020, p. 103739, 2021.

HULL, J.; EWART, I. J. **Conservation data parameters for BIM-enabled heritage asset management**. Automation in Construction, v. 119, n. June, p. 103333, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103333>>.

IHEATURU, C. et al. **A simplified structure-from-motion photogrammetry approach for urban development analysis**. Remote Sensing Applications: Society and Environment, v. 28, p. 100850, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100850>>.

INÊS, M. A. M. C. **Digitalização 3D por meio de Fotogrametria: uma análise comparativa**. 2022. Universidade de Minho, 2022.

J. ALBRECHT. **Pioneer of Photogrammetric Documentation of the Cultural Heritage**. Proceedings of the XVIII International Symposium of CIPA, ICOMOS / UNESCO / ISPRS, Postdam, 2001. Disponível em: <[http://www.theulegium.de/fileadmin/user\\_upload/Texte/Meydenb.pdf%0Ahttp://www.hasler.net/meydalb.htm](http://www.theulegium.de/fileadmin/user_upload/Texte/Meydenb.pdf%0Ahttp://www.hasler.net/meydalb.htm)>.

JIA, S. et al. **Conservation and management of Chinese classical royal garden heritages based on 3D digitalization - A case study of Jianxin courtyard in Jingyi garden in fragrant hills**. Journal of Cultural Heritage, v. 58, p. 102–111, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.09.020>>.

JO, Y. H. **Three-Dimensional Digital Documentation of Cultural Heritage Site Based on the Convergence of Terrestrial Laser Scanning and Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry**. 2019.



JOSÉ LÓPEZ, F. et al. **Multimodal Technologies and Interaction A Review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM)**. 2018. Disponível em: <[www.mdpi.com/journal/mti](http://www.mdpi.com/journal/mti)>.

KALLAS, J.; NAPOLITANO, R. **Image-based 3D modeling as a damage prioritization tool for historic buildings in post-disaster areas: The case of the 2020 Beirut blast**. *Journal of Cultural Heritage*, v. 62, p. 314–321, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.06.007>>.

KERSTEN, T.; MECHELKE, K.; MAZIULL, L. **3D model of al zubarah fortress in qatar- Terrestrial laser scanning vs. dense image matching**. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, v. 40, n. 5W4, p. 1–8, 2015.

KINGSLAND, K. **Comparative analysis of digital photogrammetry software for cultural heritage**. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, v. 18, n. October 2019, p. e00157, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.daach.2020.e00157>>.

KUTLU, I.; SOYLUK, A. **A comparative approach to using photogrammetry in the structural analysis of historical buildings**. *Ain Shams Engineering Journal*. p. 102298, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102298>>.

KUZMINSKY, S. C.; GARDINER, M. S. **Three-dimensional laser scanning : potential uses for museum conservation and scientific research**. *Journal of Archaeological Science*, v. 39, n. 8, p. 2744–2751, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2012.04.020>>.

LENDA, G. et al. **Laser Scanning in Engineering Surveying: Methods of Measurement and Modeling of Structures**. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, v. 100, n. 1, p. 109–130, 2016.

LI, Y. et al. **3D LiDAR and multi-technology collaboration for preservation of built heritage in China: A review**. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 116, n. December 2022, p. 103156, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103156>>.

LI, Y.; WU, B.; GE, X. **Structural segmentation and classification of mobile laser scanning point clouds with large variations in point density**. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 153, n. May, p. 151–165, 2019.

LÓPEZ, F. J. et al. **A Review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM)**. *Multimodal Technologies and Interaction*, 2018.

MACHETE, R. et al. **Information transfer between two heritage BIMs for reconstruction support and facility management: the case study of the Chalet of the Countess of Edla, Sintra, Portugal**. *Journal of Cultural Heritage*, v. 49, p. 94–105, 2021.

MAMMOLI, R.; MARIOTTI, C.; QUATTRINI, R. **Modeling the fourth dimension of architectural heritage: Enabling processes for a sustainable conservation**. *Sustainability (Switzerland)*, v. 13, n. 9, 2021.

- MARTINELLI, L.; CALCERANO, F.; GIGLIARELLI, E. **Methodology for an HBIM workflow focused on the representation of construction systems of built heritage.** v. 55, p. 277–289, 2022.
- MATEUS, L. et al. **Graphical data flow based in tls and photogrammetry for consolidation studies of historical sites. The case study of Juromenha Fortress in Portugal.** International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, v. 42, n. 2/W15, p. 767–773, 2019.
- MENDOZA, M. A. D.; DE LA HOZ FRANCO, E.; GÓMEZ, J. E. G. **Technologies for the Preservation of Cultural Heritage - A Systematic Review of the Literature.** Sustainability (Switzerland), v. 15, n. 2, 2023.
- MESQUITA, E. et al. **11º Boletim Técnico ALCONPAT: Caracterização, avaliação e recuperação estrutural de construções históricas.** Alconpat-Brasil, v. 11, n. April, p. 19, 2015.
- MISTRETTA, FAUSTO; SANNA, GIANNINA, STOCHINO, FLAVIO; VACCA, G. **Structure from Motion Point Clouds for Structural Monitoring.** Remote Sensing, v. 11, 2019.
- MOHAREB, N.; ALSALLOUM, A.; WEBB, N. **A morphological analysis of historic buildings entries using affordable photogrammetry techniques: Old Tripoli, Lebanon.** Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage, v. 28, n. December 2021, p. e00261, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.daach.2023.e00261>>.
- MORA, R. et al. **An historical building information modelling approach for the preventive conservation of historical constructions: Application to the Historical Library of Salamanca.** Automation in Construction journal, v. 121, n. November 2020, 2021.
- MOYANO, J. et al. **Analysis and management of structural deformations through parametric models and HBIM workflow in architectural heritage.** Journal of Building Engineering, v. 45, n. September 2021, 2021.
- MOYANO, J. et al. **Evaluation of records using terrestrial laser scanner in architectural heritage for information modeling in HBIM in construction: The case study of the La Anunciacion church (Seville).** v. 62, n. August, 2022a.
- MURPHY, M.; MCGOVERN, E.; PAVIA, S. **Historic building information modelling (HBIM).** Structural Survey, v. 27, n. 4, p. 311–327, 2009.
- MURPHY, M.; MCGOVERN, E.; PAVIA, S. **Historic building information modelling adding intelligence to laser and image based surveys.** v. XXXVIII, n. March, p. 2–4, 2011.
- MURPHY, M.; MCGOVERN, E.; PAVIA, S. **Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 76, p. 89–102, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.11.006>>.

NATIONAL INSTITUTE OF BUILDING SCIENCES. **Assessment to the US Congress and U.S. Department of Energy on high performance buildings**. 2008. Disponível em: <[https://c.ymcdn.com/sites/www.nibs.org/resource/resmgr/HPBC/NIBS\\_HighPerformanceBuilding.pdf](https://c.ymcdn.com/sites/www.nibs.org/resource/resmgr/HPBC/NIBS_HighPerformanceBuilding.pdf)>.

NOONAN, D. S.; RIZZO, I. **Economics of cultural tourism: issues and perspectives**. *Journal of Cultural Economics*, v. 41, n. 2, p. 95–107, 2017.

Norme tecniche per le costruzioni. 2008 D.M. **Ministero Infrastrutture e Trasporti 14 gennaio 2008**. GURI 4 Febbraio. Roma (in Italian).

NOWAK, R.; ORŁOWICZ, R.; RUTKOWSKI, R. **Use of TLS (LiDAR) for building diagnostics with the example of a historic building in karlino**. *Buildings*, v. 10, n. 2, p. 1–14, 2020.

OMAR, H.; MAHDJOUBI, L.; KHEDER, G. **Towards an automated photogrammetry-based approach for monitoring and controlling construction site activities**. *Computers in Industry*, v. 98, p. 172–182, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.03.012>>.

OSELLO, A.; LUCIBELLO, G.; MORGAGNI, F. **HBIM and Virtual Tools: A New Chance to Preserve Architectural Heritage**. Disponível em: <[www.mdpi.com/journal/buildings](http://www.mdpi.com/journal/buildings)>.

OYTUN, M.; ATASOY, G. **Effect of Terrestrial Laser Scanning ( TLS ) parameters on the accuracy of crack measurement in building materials**. *Automation in Construction*, v. 144, n. September, p. 104590, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104590>>.

PEPE, M. et al. **Scan to BIM for the digital management and representation in 3D GIS environment of cultural heritage site**. *Journal of Cultural Heritage*, v. 50, p. 115–125, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.05.006>>.

PEPE, M.; FREGONESE, L.; SCAIONI, M. **Planning airborne photogrammetry and remote-sensing missions with modern platforms and sensors**. *European Journal of Remote Sensing*, v. 51, n. 1, p. 412–435, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1444945>>.

PESCI, A.; TEZA, G.; BONALI, E. **Terrestrial laser scanner resolution: Numerical simulations and experiments on spatial sampling optimization**. *Remote Sensing*, v. 3, n. 1, p. 167–184, 2011.

POLO, M.; FELICÍSIMO, M.; DUR, G. **Accurate 3D models in both geometry and texture : An archaeological application**. v. 27, n. October, 2022.

POUX, F. et al. **Automatic region-growing system for the segmentation of large point clouds**. *Automation in Construction*, v. 138, n. April, p. 104250, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104250>>.

- PREVIATO, C. et al. **A multi-scalar approach for the study of ancient architecture: Structure for Motion, laser scanning and direct survey of the Roman theatre of Nora (Cagliari, Sardinia)**. *Journal of Archaeological Science: Reports*, v. 43, n. November 2021, p. 103440, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2022.103440>>.
- QUATTRINI, R. et al. **From tls to hbim. high quality semantically-aware 3D modeling of complex architecture**. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, v. 40, n. 5W4, p. 367–374, 2015.
- RADANOVIC, M.; KHOSHELHAM, K.; FRASER, C. **Geometric accuracy and semantic richness in heritage BIM : A review**. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, v. 19, n. August, p. e00166, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.daach.2020.e00166>>.
- RAMM, R. et al. **Portable solution for high-resolution 3D and color texture on-site digitization of cultural heritage objects**. *Journal of Cultural Heritage*, v. 53, p. 165–175, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.11.006>>.
- RAMSEY, A. **X-ray tomography of the Antikythera Mechanism**. *Proceedings of Science*, v. 2012-June, n. June 2012, p. 1–12, 2012.
- REBEC, K. M.; DEANOVI, B.; OOSTWEGEL, L. **Old buildings need new ideas: Holistic integration of conservation-restoration process data using Heritage Building Information Modelling**. *Journal of Cultural Heritage journal*, v. 55, p. 30–42, 2022.
- RECHICHI, F.; FIORILLO, F. **Creating, visualizing and sharing high-poly and multi-textures models on the web**. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 42, n. 2/W9, p. 655–662, 2019.
- REIS, M. G. dos. **Patrimônio Cultural Brasileiro na era digital: da digitalização de acervos à preservação participativa na internet**. 2019. Universidade Federal de Pelótas, 2019.
- REMONDINO, F. **Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning**. *Remote Sensing*, v. 3, n. 6, p. 1104–1138, 2011.
- REMONDINO, F.; EL-HAKIM, S. **Image-based 3D modelling: A review**. *Photogrammetric Record*, v. 21, n. 115, p. 269–291, 2006.
- ROCHA, F. D. **Um passeio por Aracati**. 1ª ed. Fortaleza-CE: Demócrito Rocha, 2011.
- ROCHA, F. D. **Anuário do Ceará 2022-2023**. 1ª ed. Fortaleza-CE: Demócrito Rocha, 2011,
- ROCHA, G.; FERN, J. **A Scan-to-BIM Methodology Applied to Heritage Buildings**. p. 47–65, 2020.
- RODRIGUES, O. S. **Proposta de um fluxo de trabalho visando o mapeamento de patologias em modelos hbim a partir da identificação automatizada em imagens**. 2023. Universidade Estadual de Campinas, 2023.
- ROMERO-JARÉN, R.; ARRANZ, J. J. **Automatic segmentation and classification of BIM**

**elements from point clouds.** Automation in Construction, v. 124, n. January 2020, 2021.

SAINT-PIERRE, F. et al. **Concrete Quality Designation based on Ultrasonic Pulse Velocity.** Construction and Building Materials, v. 125, p. 1022–1027, 2016.

SÁNCHEZ-APARICIO, L. J. et al. **Heritage site preservation with combined radiometric and geometric analysis of TLS data.** Automation in Construction, v. 85, n. October 2017, p. 24–39, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.09.023>>.

SANTAGATI, C. et al. **HBIM approach for the knowledge and documentation of the St. John the Theologian cathedral in Nicosia (Cyprus).** Journal of Archaeological Science: Reports, v. 36, n. July 2020, p. 102804, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.102804>>.

SANTANA QUINTERO, M. et al. **Ethical framework for heritage recording specialists applying digital workflows for conservation.** International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, v. 42, n. 2/W15, p. 1063–1070, 2019.

SANTONI, A. et al. **Hbim Approach To Implement The Historical And Constructive Knowledge. The Case Of The Real Colegiata Of San Isidoro (León, Spain).** Virtual Archaeology Review, v. 12, n. 24, p. 49–65, 2021.

SELVAGGI, I. **Surveying and three-dimensional modeling for preservation and structural analysis of cultural heritage.** 2017. Disponível em: <<http://amsdottorato.unibo.it/8182/>>.

SHABANI, A. et al. **Structural vulnerability assessment of heritage timber buildings: A methodological proposal.** Forests, v. 11, n. 8, p. 1–20, 2020.

SHABANI, A. et al. **3D simulation models for developing digital twins of heritage structures: Challenges and strategies.** Procedia Structural Integrity, v. 37, n. C, p. 314–320, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.090>>.

SHANOER, M. M.; ABED, F. M. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences Evaluate 3D laser point clouds registration for cultural heritage documentation.** The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, v. 21, n. 3, p. 295–304, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.11.007>>.

SILVA, G. L. da; GROETELAARS, N. J. **Reconstrução digital do patrimônio arquitetônico para ambientes virtuais interativos 3D: estudo de métodos para modelagem geométrica de edificações existentes.** Gestão & Tecnologia de Projetos, v. 16, n. 3, 2021.

SNAVELY, N.; SEITZ, S. M.; SZELISKI, R. **Modeling the world from Internet photo collections.** International Journal of Computer Vision, v. 80, n. 2, p. 189–210, 2008.

SONKOLY, GÁBOR; VAHTIKARI, T. **Innovation in Cultural Heritage.** European Union, 2018.

SUCCAR, B. **Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders**. *Automation in Construction*, v. 18, n. 3, p. 357–375, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003>>.

SUN, Z.; CAO, Y. K. **Data processing workflows from low-cost digital survey to various applications: Three case studies of Chinese historic architecture**. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, v. 40, n. 5W7, p. 409–416, 2015.

TANG, P. et al. **Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques**. *Automation in Construction*, v. 19, n. 7, p. 829–843, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2010.06.007>>.

TETZNER, G. D. E. C. **Aplicação da tomografia computadorizada industrial na análise de rochas**. 2008. Universidade de São Paulo, 2008.

TOBIASZ, A. et al. **Review of Methods for Documentation, Management, and Sustainability of Cultural Heritage. Case Study: Museum of King Jan III's Palace at Wilanów**. *Sustainability (Switzerland)*, v. 11, n. 24, p. 1–42, 2019.

TORTOSA, J. A. H. et al. **The façade of the church of nuestra señora de la asunción in biar (Spain): From point cloud to HBIM**. *WIT Transactions on the Built Environment*, v. 169, p. 69–77, 2017.

UNESCO. **Cutting Edge | Bringing cultural tourism back in the game | UNESCO**. Disponível em: <<https://www.unesco.org/en/articles/cutting-edge-bringing-cultural-tourism-back-game>>. Acesso em: 15 maio. 2023.

URSINI, A. et al. **From scan-to-BIM to a structural finite elements model of built heritage for dynamic simulation**. *Automation in Construction*, v. 142, n. July, p. 104518, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104518>>.

VACCA, G.; FURFARO, G.; DESSI, A. **The use of the uav images for the building 3D model generation**. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, v. 42, n. 4W8, p. 217–223, 2018.

VAN GENDEREN, J. L. **Airborne and terrestrial laser scanning**. *Int. J. Digital Earth*. 4. 183-184. 10.1080/17538947.2011.553487. 2011.

VIEIRA, M. et al. **Updating the documentation of a historic building: a case study of the José de Alencar theatre**. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, v. 8, n. 1, p. 1–14, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s41024-023-00281-7>>.

VOLK, R.; STENGEL, J.; SCHULTMANN, F. **Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs**. *Automation in Construction*, v. 38, p. 109–127, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>>.

VOLPATO, L. N. **Tecnologias digitais na preservação do patrimônio cultural edificado do imigrante italiano**. 2020. UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC PROGRAMA, 2020.

WANG, J. et al. **BIM-based structural health monitoring and early warning for heritage timber structures**. *Automation in Construction*, v. 144, n. October, p. 104618, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104618>>.

WESTOBY, M. J. et al. **Geomorphology ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications**. *Geomorphology*, v. 179, p. 300–314, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>>.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A.; WILKINSON, B. E. **Elements of Photogrammetry with applications in GIS: Chapter 1: Introduction**. MCGraw-Hill Education. Fourth Edition. United States of America, 2014.

ZARNOWSKI, ALEKSANDER; BANASKEZ, ANNA, BANASZEK, S. **Application of Technical Measures and Software in Constructing Photorealistic 3D Models of Historical Building Using Ground-Based and Aerial (UAV) Digital Images**. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, v. 99, p. 54–63, 2015.

ZHANG, D. et al. **Three-dimensional laser scanning for large-scale as-built surveying of 2022 Beijing Winter Olympic Speed Skating Stadium: A case study**. *Journal of Building Engineering*, v. 59, n. March, p. 105075, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105075>>.

ZHANG, S. **High-speed 3D shape measurement with structured light methods: A review**. *Optics and Lasers in Engineering*, v. 106, n. December 2017, p. 119–131, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.02.017>>.

## PUBLICAÇÕES DECORRENTES DESTA DISSERTAÇÃO

### Artigo de revista

#### Capítulo 3

Rubens, T., Ribeiro, G., Paulo, R. *et al.* Digitalization based on high-resolution scanning and HBIM tools for damage assessment of the José de Alencar house. **J Build Rehabil** 8, 30 (2023). <https://doi.org/10.1007/s41024-023-00275-5>

### Artigo de revista

#### Capítulo 4

Rubens, T., Ribeiro, G., Moreira, E. *et al.* Digitization of historical heritage: Nossa Senhora do Rosário Church, Aracati-CE. **J Build Rehabil** 8, 71 (2023). <https://doi.org/10.1007/s41024-023-00320-3>