



**Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Tecnologia e Geociências  
Departamento de Engenharia Mecânica**

**ESTUDO DE CASO DE TECNOLOGIAS DE DIGITALIZAÇÃO 3D, DE BAIXO  
CUSTO, VISANDO A ENGENHARIA REVERSA E PROTOTIPAGEM 3D**

**ALUNO:**

Carlos Frederico Fenelon dos Santos

**Recife - PE  
2024**

CARLOS FREDERICO FENELON DOS SANTOS

ESTUDO DE CASO DE TECNOLOGIAS DE DIGITALIZAÇÃO 3D, DE BAIXO CUSTO, VISANDO A ENGENHARIA REVERSA E PROTOTIPAGEM 3D

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Orientador:** Prof. Dr. Justo Emilio Alvarez Jácomo

Recife  
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Santos, Carlos Frederico Fenelon dos.

Estudo de caso de tecnologias de digitalização 3d, de baixo custo, visando a engenharia reversa e prototipagem / Carlos Frederico Fenelon dos Santos. - Recife, 2024.

94, tab.

Orientador(a): Justo Emílio Alvarez Jácomo

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2024.

Inclui referências.

1. Escaneamento 3D. 2. Fotogrametria digital. 3. Prototipagem mecânica. 4. Modelagem 3D. 5. Tecnologias de digitalização 3D. 6. Engenharia Reversa. I. Alvarez Jácomo, Justo Emílio. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

CARLOS FREDERICO FENELON DOS SANTOS

### **ESTUDO DE CASO DE TECNOLOGIAS DE DIGITALIZAÇÃO 3D, DE BAIXO CUSTO, VISANDO A ENGENHARIA REVERSA E PROTOTIPAGEM 3D**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 17 de Outubro de 2024.

#### **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Justo Emilio Alvarez Jacobo  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Antônio Marques da Costa Soares Jr. (Avaliador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Anderson Abner de Santana Souza  
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

## **AGRADECIMENTOS**

Dedico este trabalho ao meu Deus, fonte de toda sabedoria e conhecimento, reconhecendo que Ele me ajudou com seu infinito amor, para que eu chegasse até onde estou. Sou grato a Ele por cada dia que recebi como presente para que eu pudesse vivê-los e aprender em cada um deles.

Também estendo a minha gratidão aos meus pais, Sr. Carlos José e Sra. Cristiana Fenelon, que mesmo diante das dificuldades sempre fizeram o possível para contribuir com a minha formação, e à minha querida irmã, Ana Beatriz, uma grande amiga. À minha querida e amada esposa, Evelyn Caroline, por todo o apoio, paciência e cuidado.

Aos professores pela paciência e dedicação e, em especial, ao meu orientador, Justo Emilio Alvarez Jácomo, com quem tive a oportunidade de aprender a ser um profissional melhor.

## RESUMO

As tecnologias de digitalização 3D trouxeram inovações significativas para a Engenharia Reversa e Prototipagem Mecânica, contribuindo para a rápida obtenção de dados e precisa construção de modelos 3D. No entanto, a implementação dessas tecnologias tem desacelerado devido ao alto investimento necessário para aquisição de equipamentos e softwares. Este trabalho investiga a viabilidade de tecnologias de digitalização 3D de baixo custo, visando analisar sua precisão, limitações e custo de implementação. O objetivo geral é demonstrar como essas tecnologias podem ser integradas à indústria, especialmente no contexto de engenharia reversa e prototipagem 3D. Os objetivos específicos incluem a realização de uma análise comparativa entre diferentes tecnologias de digitalização 3D, aquisição de dados de modelos reais, processamento dos dados, criação do modelo sólido paramétrico a ser utilizado em ferramentas de modelagem 3D, bem como avaliação da precisão e qualidade dos modelos digitais gerados pelas tecnologias utilizadas.

A metodologia adotada consiste em uma pesquisa aplicada, com abordagem descritiva e uso do método científico hipotético-dedutivo. Foram escolhidos dois estudos de caso: a digitalização de uma peça de reposição de um veículo antigo e a quantificação do volume da cabeça de um boneco. Para a captura de dados, utilizaram-se equipamentos de baixo custo, como o SCAN CR Ferret, Gopro e XIAOMI Redmi Note 8. O captura de dados gerou nuvem de pontos (.ply) que foram processadas e, a partir dela, obteve-se a malha (.stl), que foi utilizada em análises comparativas no software Cloudcompare e criação de modelos sólidos paramétricos, utilizando o Autodesk Fusion.

Os resultados indicaram que a fotogrametria se mostrou uma solução eficaz para digitalização, no estudo de caso 1, apresentando um desvio médio aceitável de 0.38mm. No segundo estudo de caso, o SCAN CR Ferret demonstrou boa precisão, e a GoPro possibilitou uma captura rápida, ambos com erro relativo inferior a 1% na quantificação do volume. O investimento necessário para implementar os sistemas utilizados neste estudo, apresentou-se cerca de quinze vezes menor que o necessário para adquirir os scanners de alta precisão e softwares mais utilizados no mercado.

Conclui-se que as tecnologias de digitalização 3D de baixo custo são uma abordagem promissora para enfrentar os altos custos dos scanners e softwares tradicionais sem perder em qualidade e precisão.

Palavras-chave: Escaneamento 3D. Fotogrametria digital. Prototipagem mecânica. Modelagem 3D. Tecnologias de digitalização 3D. Engenharia Reversa.

## **ABSTRACT**

3D scanning technologies have brought significant innovations to Reverse Engineering and Mechanical Prototyping, contributing to the rapid acquisition of data and accurate construction of 3D models. However, the implementation of these technologies has slowed down due to the high investment required for the acquisition of equipment and software. This work investigates the viability of low-cost 3D scanning technologies, aiming to analyze their precision, limitations, and implementation costs. The general objective is to demonstrate how these technologies can be integrated into the industry, especially in the context of reverse engineering and 3D prototyping. Specific objectives include conducting a comparative analysis between different 3D scanning technologies, acquiring data from real models, processing the data, creating the parametric solid model to be used in 3D modeling tools, as well as evaluating the precision and quality of the digital models generated by the technologies used.

The methodology adopted consists of applied research, with a descriptive approach and the use of the hypothetical-deductive scientific method. Two case studies were chosen: the digitization of a replacement part from an old vehicle and the quantification of the volume of a doll's head. Low-cost equipment was used for data capture, such as the SCAN CR Ferret, GoPro, and XIAOMI Redmi Note 8. The data capture generated a point cloud (.ply) that was processed, and from it, a mesh (.stl) was obtained, which was used in comparative analyses with the software Cloudcompare and the creation of parametric solid models using Autodesk Fusion.

The results indicated that photogrammetry proved to be an effective solution for digitization, in case study 1, presenting an acceptable average deviation of 0.38 mm. In the second case study, the SCAN CR Ferret demonstrated good precision, and the GoPro allowed for rapid capture, both with a relative error of less than 1% in the volume quantification. The investment needed to implement the systems used in this study was about fifteen times lower than what was necessary to acquire the most widely used high-precision scanners and software on the market.

It is concluded that low-cost 3D scanning technologies are a promising approach to tackling the high costs of traditional scanners and software without sacrificing quality and precision.

Keywords: 3D Scanning. Digital Photogrammetry. Mechanical Prototyping. 3D Modeling. 3D Scanning Technologies.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comparativo entre a engenharia tradicional e reversa.....	18
Figura 2. Engenharia reversa com scanner para criação de órtese.....	20
Figura 3. Etapas do processo de engenharia reversa.....	21
Figura 4. Representação das técnicas de Digitalização.....	22
Figura 5. MMC Mitutoyo Beyond – Crysta C574.....	22
Figura 6. Eliminação de outliers da nuvem de pontos.....	24
Figura 7. Representação de a) nuvem de pontos b) malha c) profundidade de imagem.....	25
Figura 8. Realização do preenchimento de Gaps.....	27
Figura 9. Representação esquemática de uma impressora 3D.....	29
Figura 10. Classificação das tecnologias de medição sem contato.....	31
Figura 11. Tecnologias de digitalização 3D na indústria.....	31
Figura 12. Representação do princípio Time of Flight (TOF).....	32
Figura 13. Modelos de scanners do tipo LiDAR.....	34
Figura 14. Representação da Interferometria.....	35
Figura 15: Representação da Triangulação.....	36
Figura 16. Microsoft Kinect XBOX 360.....	38
Figura 17. Scan CR Ferret.....	39
Figura 18. Geometria de um sistema de visão estéreo.....	40
Figura 19. Parâmetros básicos de uma Fotografia.....	42
Figura 20. Processo de Aquisição de Fotografias.....	43
Figura 21. Representação esquemática da fotogrametria.....	44
Figura 22. Sobreposição necessária na fotogrametria.....	44
Figura 23. Fatores que influenciam na fotogrametria.....	45
Figura 24. Etapas para análise de desvio dimensional no Cloudcompare®.....	50
Figura 25. Resultado do comparativo entre modelos no Cloudcompare.....	50
Figura 26. Etapas utilizada no Projeto.....	52
Figura 27. Calibração do Scan CR FERRET.....	56
Figura 28. Configurações utilizadas - Scan CR FERRET.....	57
Figura 29. Difusor de Ar - Gol Voyage ano 1988.....	58
Figura 30. Escaneamento utilizando o laser SCAN CR Ferret - Parte 01.....	59

Figura 31. Escaneamento utilizando o laser SCAN CR Ferret - Parte 02.....	59
Figura 32. Resultado do Escaneamento - SCAN CR Ferret (Paleta Central).....	60
Figura 33. Resultado do Escaneamento - SCAN CR Ferret (Corpo).....	60
Figura 34. Fotos utilizadas para a Reconstrução Fotogramétrica (Estudo de Caso 1).....	61
Figura 35. Nuvem de Pontos - Reconstrução Fotogramétrica.....	62
Figura 36. Reconstrução Fotogramétrica (Peça na Cor Branca).....	63
Figura 37. Reconstrução Fotogramétrica (Peça na Cor Original).....	64
Figura 38. Reconstrução Fotogramétrica (Estudo de Caso 01).....	64
Figura 39. Análise de desvio dimensional no Cloudcompare.....	65
Figura 40. Resultados da análise no Cloudcompare.....	65
Figura 41. Análise das Medidas no Polycam.....	66
Figura 42. Comparativo entre medidas obtidas e de referência.....	66
Figura 43. Análise por elementos finitos.....	68
Figura 44. Peça Impressa em 3D.....	69
Figura 45. Estimativa do volume da cabeça de bebês.....	70
Figura 46. Processo esquematizado (Estudo de caso 2).....	71
Figura 47. Fotos utilizadas para a Reconstrução Fotogramétrica (Estudo de Caso 2).....	72
Figura 48. Reconstrução Fotogramétrica (Estudo de Caso 02).....	73
Figura 49. Posições para captura de fotos (24 fotos).....	74
Figura 50. Posições para captura de fotos (48 fotos).....	75
Figura 51. Reconstrução Fotogramétrica GoPro (a) 48 fotos (b) vídeo.....	75
Figura 52. Escaneamento utilizando o SCAN CR FERRET.....	76
Figura 53. Nuvem de pontos obtida (estudo de caso 2).....	76
Figura 54. Edição e otimização na nuvem de pontos (estudo de caso 2).....	77
Figura 55. Fusão de malhas (Creality Scan).....	77
Figura 56. Modelo digital 3D (Scan CR Ferret).....	78
Figura 57. Análise da Malha no Autodesk Fusion.....	79
Figura 58. Alinhamento de malhas no Cloudcompare.....	80
Figura 59. Análise do desvio dimensional no Cloudcompare (caso 2).....	80
Figura 60. Histograma de distribuição dos pontos.....	81

## LISTA DE QUADROS E TABELA

Tabela 01: Análise comparativa entre softwares de edição e manipulação de malhas e nuvem de pontos.....	26
Tabela 02: Análise comparativa entre softwares de reconstrução fotogramétrica...	46
Tabela 03: Principais dados EXIF das fotos.....	46
Tabela 04: Especificações do RP LIDAR A1.....	53
Tabela 05: Especificações do Kinect XBOX 360.....	53
Tabela 06: Especificações do SCAN CR FERRET.....	54
Tabela 07: Especificações do Xiaomi Redmi Note 8 e Gopro Hero 10 Black.....	54
Tabela 08: Práticas adotadas na fotogrametria.....	55
Tabela 09: Práticas adotadas no escaneamento 3D.....	57
Tabela 10: Configurações da câmera utilizada (Xiaomi Redmi Note 8).....	62
Tabela 11: Configurações da câmera utilizada (Gopro Hero 10 Black).....	63
Tabela 12. Análise Comparativa das Medidas (Referência x Fotogrametria).....	67
Tabela 13. Configurações da câmera utilizada (Xiaomi Redmi Note 8) (Caso 2).....	72
Tabela 14. Configurações da câmera utilizada (Gopro Hero 10 Black) (Caso 2).....	73
Tabela 15: Informações das fotos obtidas através da Gopro.....	75
Tabela 16: Análise comparativa entre os modelos digitais obtidos através de cada tecnologia.....	79
Tabela 17: Análise do desvio dimensional no Cloudcompare (caso 2).....	81
Tabela 18: Estimativa de custo para utilização dos sistemas apresentados.....	82
Tabela 19: Limitações dos sistemas utilizados.....	84

### **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CFD	Computational Fluid Dynamics
CNI	Conselho Nacional da Indústria
FMI	Future Market Insights Inc.
LIDAR	Light Detection and Ranging
MMC	Máquinas de medição por coordenadas
PLY	Polygon File Format
PR	Prototipagem Rápida
STL	Linguagem de Triângulos Padrão
TOF	Time of Flight

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>18</b>
2.1	ENGENHARIA REVERSA	18
2.1.1	APLICAÇÕES DA ENGENHARIA REVERSA	19
2.1.2	PROCESSOS E METODOLOGIAS	21
2.1.2.1	PRIMEIRA ETAPA: CAPTURA DE DADOS	21
2.1.2.2	SEGUNDA ETAPA: PROCESSAMENTO DOS DADOS	23
2.1.2.3	TERCEIRA ETAPA: MODELAGEM 3D	26
2.1.2.4	QUARTA ETAPA: IMPRESSÃO 3D	28
2.2	DIGITALIZAÇÃO 3D SEM CONTATO	30
2.2.1	CLASSIFICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE MEDIÇÃO SEM CONTATO	30
2.2.2	TEMPO DE VOO (TOF)	32
2.2.3	INTERFEROMETRIA	35
2.2.4	TRIANGULAÇÃO	36
2.3	TECNOLOGIAS DE DIGITALIZAÇÃO POR TRIANGULAÇÃO	37
2.3.1	LUZ ESTRUTURADA	37
2.3.2	VISÃO ESTÉREO	39
2.3.3	TRIANGULAÇÃO A LASER	41
2.3.4	FOTOGRAMETRIA	42
2.4	ERROS DE MEDIÇÃO	48
2.4.1	CLASSIFICAÇÃO DOS ERROS	48
2.4.2	ERRO ABSOLUTO E ERRO RELATIVO	48
2.4.3	DESVIO PADRÃO	49
2.4.4	ANÁLISE DE DESVIOS DIMENSIONAIS COM O CLOUDCOMPARE	49
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>51</b>
3.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	51
3.2	CONFIGURAÇÃO E CALIBRAÇÃO DOS SISTEMAS UTILIZADOS	55
3.3	ESTUDO DE CASO 1	58
3.4	ESTUDO DE CASO 2	70
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>82</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>85</b>
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

## 1 INTRODUÇÃO

A evolução da tecnologia nas últimas décadas proporcionou inovações e melhorias em diversas áreas e no contexto da Engenharia Reversa e Prototipagem Mecânica não foi diferente. Com a incorporação das tecnologias de digitalização 3D, tornou-se possível criar modelos digitais precisos de forma rápida e simplificada. Como consequência, essas tecnologias são aplicadas em diversos contextos da indústria 4.0, permitindo fabricação de próteses personalizadas e com alta precisão, aprimoramento dos projetos e fabricação de peças, escaneamento facial, replicação de objetos e obtenção de modelos tridimensionais mesmo quando não se tem o modelo CAD (HALEEM et al., 2022).

Apesar dos diversos benefícios, a absorção dessas novas tecnologias no cenário industrial ainda está abaixo do esperado devido ao seu alto custo. Uma sondagem industrial realizada pela Confederação Nacional da Indústria (CNI), em 2021, revelou que 69% das indústrias de médio e grande porte, no Brasil, utilizam tecnologias digitais como sistemas de automação, fabricação de produtos, impressão 3D e análises de modelos virtuais para projetos (Agência Brasil, 2022). Apesar disso, a pesquisa aponta que a implementação dessas tecnologias ainda se encontram em uma fase inicial do processo, dentre os principais obstáculos internos relatados por gestores para a implementação destas tecnologias digitais, cerca de 66% destacaram os altos custos de implementação (Agência Brasil, 2022).

Quando se trata de tecnologias de digitalização 3D, mesmo com a queda dos preços e a popularização dos dispositivos eletrônicos nos últimos anos, a grande maioria dos scanners 3D tem um custo elevado. De acordo com o relatório de perspectivas do mercado de scanner 3D, da Future Market Insights Inc (FMI), de 2015 a 2021, as vendas globais de scanner 3D aumentaram cerca de 13.3% e, para o período de 2022 a 2030, é estimado que a demanda global por scanners 3D tenha uma taxa de crescimento de 14.5% (FUTURE MARKET INSIGHTS, 2022).

Em contrapartida, segundo Santaella (2013), a popularização dos smartphones e a constante evolução na qualidade de suas câmeras digitais permitem novas formas de uso desses dispositivos. Sendo cada vez mais aprimoradas e acessíveis, as tecnologias propícias para a obtenção de modelos 3D,

por fotogrametria de baixo custo, poderiam incorporar os avanços implementados nas câmeras de smartphones, com a finalidade de reduzir os custos com projetos de alta qualidade aplicados à Engenharia Reversa no âmbito da prototipagem 3D.

Assim, a motivação deste trabalho surge da necessidade do estudo das tecnologias de digitalização 3D de baixo custo, bem como da análise de suas vantagens, limitações técnicas e precisão, a fim de contribuir com a literatura e organizações no contexto da Engenharia Reversa voltada à prototipagem 3D.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral demonstrar a viabilidade do uso de tecnologias de digitalização 3D de baixo custo, visando a engenharia reversa e prototipagem mecânica, analisando sua precisão, limitações e o custo de implementação.

### 1.1.2 Objetivos específicos

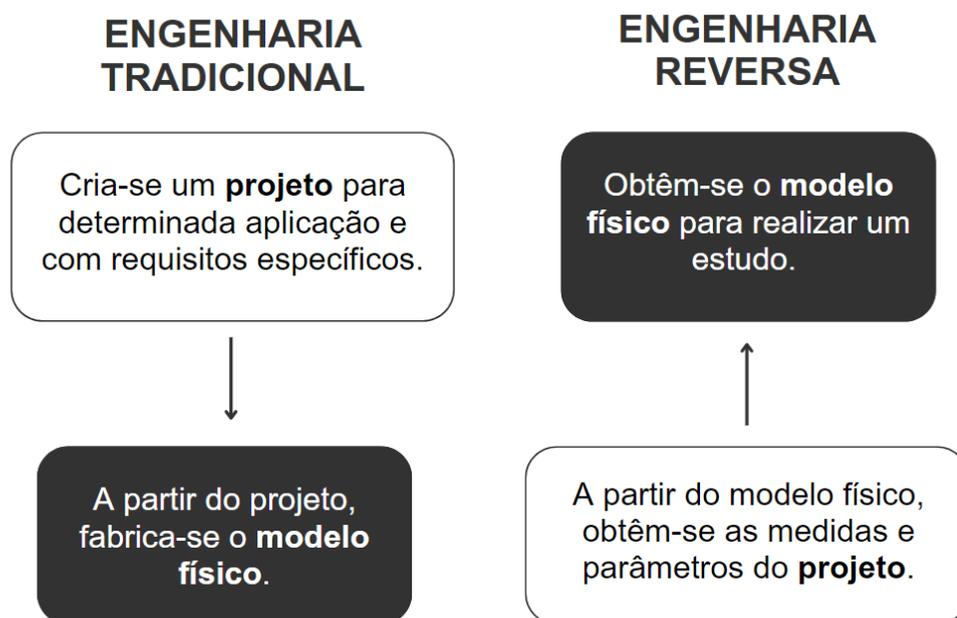
- Descrever e realizar uma análise comparativa entre as tecnologias de digitalização 3D;
- Utilizar tecnologias de digitalização 3D de baixo custo para realizar a captura de dados em dois estudos de caso: peça de reposição de um veículo antigo e medidas antropométricas;
- Realizar o processamento dos dados com o objetivo de gerar o modelo paramétrico a ser utilizado em ferramentas de modelagem 3D;
- Avaliar a precisão e a qualidade dos modelos digitais gerados pelas tecnologias utilizadas;
- Analisar os custos de implementação e utilização dessas tecnologias.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 ENGENHARIA REVERSA

A engenharia reversa é o processo de decompor um produto para entender sua estrutura, função e operação (Ingle, 1994). Conforme Daschbach (1995), é “o processo de levantar dimensões, com rapidez e exatidão, determinar padrões geométricos como área e volume, além de definir as tolerâncias de um modelo existente”. No método tradicional, cria-se inicialmente um projeto ou modelo virtual para posteriormente criar o modelo físico (Varady, 1997), mas, na engenharia reversa, como o próprio nome sugere, o processo ocorre de trás para frente, ou seja, a partir do modelo físico se obtém informações para criação do projeto e modelo digital, conforme apresentado na figura 1.

Figura 1. Comparativo entre a engenharia tradicional e reversa.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2024).

### 2.1.1 Aplicações da Engenharia Reversa

Como prática sistemática, a engenharia reversa é utilizada em diversos segmentos que vão desde contextos militares até indústrias civis, principalmente nas áreas de eletrônica, médica e automotiva. De acordo com Lima (2003), as aplicações da engenharia reversa na indústria estão ligadas à criação de novos produtos, visto que com a sua utilização é possível diminuir o tempo de desenvolvimento de produto, fazer inspeções e melhorias em produtos existentes; fabricar peças que não são mais comercializadas, além de criar moldes personalizados para seres humanos.

Além disso, muitas empresas utilizam esta técnica para analisar a concorrência, realizando estimativas de custos, identificando falhas nos modelos e implementando melhorias em seus próprios designs. Nesse sentido, Monden (1999, p.76) diz o seguinte em relação aos estudos de engenharia reversa realizados pela indústria automobilística japonesa:

“Desmontar veículos competitivos pode fornecer valiosa informação técnica e sugerir maneiras para melhorar planos de engenharia de valor para veículos da próxima geração. Veículos concorrentes devem ser desmontados peça por peça e estudados por vários especialistas, entre eles projetistas, engenheiros, pessoal de compras e gerentes de custo”. (Monden, 1999, p.76)

Apesar das aplicações apresentadas, no passado, muitos fabricantes apresentavam uma resistência à utilização da engenharia reversa por julgar como sendo uma violação à patente do projeto. Mas, a partir dos anos 90, ocorreu a massificação da engenharia reversa para análises da concorrência e por ser a única alternativa quando se perdem fornecedores de peças para a reposição de um equipamento (MITUTOYO, 1998). Além disso, muitas nações em desenvolvimento, emergentes ou até mesmo desenvolvidas utilizam muitos maquinários e equipamentos que podem ter de 30 até 50 anos, o que pode tornar necessário a utilização da engenharia reversa para a fabricação de novas peças.

Com o avanço das tecnologias de manufatura e digitalização, a engenharia reversa evoluiu significativamente. Nos anos 80 e 90, a introdução de ferramentas Computer-Aided Design (CAD) e Computer-Aided Manufacturing (CAM) facilitaram a criação de modelos digitais precisos a partir de objetos físicos, facilitando a análise e

a modificação dos designs. A partir dos anos 2000, o avanço das tecnologias de digitalização 3D e impressão 3D revolucionou ainda mais o campo da engenharia reversa. A digitalização 3D permitiu a captura de geometrias complexas com alta precisão, enquanto a impressão 3D facilitou a produção rápida e econômica de protótipos e peças finais (Cristiane Brasil, 2003).

Com isso, a engenharia reversa se tornou acessível às indústrias automotivas, aeroespaciais e de manufatura, e muitas empresas começaram a utilizá-la não apenas para replicar produtos existentes, mas também para inovar e melhorar design, criando soluções personalizadas e otimizadas para uma variedade de aplicações (Tofail *et al.*, 2017).

Além dessas aplicações, a engenharia reversa também pode ser utilizada na obtenção de medidas antropométricas para aplicações no setor médico (Lima, 2003). A antropometria é um ramo da ciência que estuda as medidas e dimensões de partes do corpo humano (Santos; Fujão, 2003), através dessas medidas é possível criar próteses e órteses personalizadas (HALEEM *et al.*, 2022), conforme apresentado na figura 2.

Figura 2: Engenharia reversa com scanner para criação de órtese



Fonte: Youtube (2017).

Além disso, a obtenção de medidas antropométricas podem ser utilizadas no acompanhamento de desenvolvimento neuromotor em recém-nascidos (Neubauer *et al.*, 2016) e avaliação do estado nutricional em pessoas de diversas idades (Costa; Blanco; Souza, 2010).

## 2.1.2 Processos e metodologias

Os processos de engenharia reversa envolvem várias etapas, sendo, cada uma delas, essencial para garantir a precisão e eficiência do resultado final. Para o autor Lima (2003, p. 9) “A Engenharia Reversa subdivide-se basicamente nos seguintes passos: captura dos dados, processamentos dos dados, modelagem 3D, validação do projeto e prototipagem rápida”, conforme apresenta a figura 3.

Figura 3: Etapas do processo de Engenharia Reversa



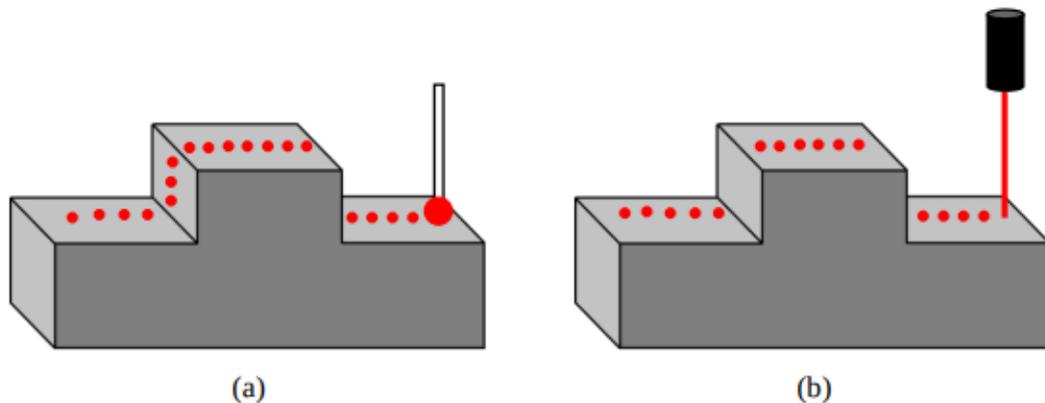
Fonte: Adaptado de Lima (2003).

### 2.1.2.1 Primeira etapa: Captura de dados

Na primeira etapa, que consiste na captura de dados, ocorre a obtenção das informações detalhadas sobre o objeto a ser estudado. Esta obtenção pode ser realizada de diversas formas, mas os métodos podem ser classificados em duas grandes categorias: métodos por contato e métodos sem contato (Lima, 2003).

Nos métodos por contato, como o nome já sugere, ocorre o contato entre a peça e o aparelho de medição, onde essa medida é realizada manualmente utilizando-se instrumentos como paquímetros, blocos de medição, entre outros. Esse método geralmente requer um tempo maior para as medições e durante o procedimento pode-se encontrar dificuldades ao se trabalhar com geometrias complexas (Ingle, 1994). A figura 4 ilustra os processos de aquisição de pontos de uma superfície por contato e sem contato.

Figura 4. Representação das técnicas de Digitalização a) Por contato b) Sem contato



Fonte: JÄHNE; HAUSSECKER; GEISSER (1999).

Além de ferramentas como paquímetros e réguas, o método de digitalização por contato pode ser executado por máquinas de medição por coordenadas (MMC) e braços articulados de medição. As máquinas de medição por coordenadas geralmente são constituídas por um braço ou uma sonda, que se desloca ao longo dos eixos XYZ, tocando a superfície dos objetos e captando dados referente às dimensões e formas do objeto em estudo, devido a sua capacidade de medir objetos complexos com alta precisão, é muito utilizada nas indústrias automobilística e aeronáutica para análise e controle de qualidade (ARAÚJO, 2019), conforme a figura 5.

Figura 5: MMC Mitutoyo Beyond – Crysta C574



Fonte: ARAÚJO (2019)

De forma semelhante à MMC, os braços articulados de medição atuam na digitalização da peça capturando as medidas através do toque de uma sonda que percorre o objeto (ARAÚJO, 2019). As tecnologias de digitalização por contato, apesar de garantirem modelos precisos, podem danificar ou modificar a estrutura do objeto durante a sua operação devido ao toque, não sendo recomendado para objetos frágeis. Além disso, são estruturas robustas, dificultando a portabilidade, e possuem um alto custo.

Em contrapartida, os métodos de digitalização sem contato utilizam lasers, scanners óticos ou câmeras de alta resolução. No contexto atual, a medição sem contato tem se tornado cada vez mais precisa, rápida e acessível para a captura de informações, devido, também, à sua compatibilidade e integração com diversos sistemas digitais (JÄHNE; HAUSSECKER; GEISSER, 1999).

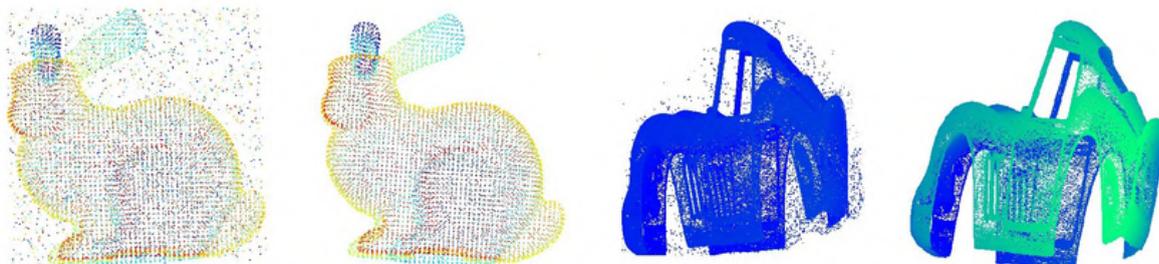
### **2.1.2.2 Segunda etapa: Processamento dos Dados**

No contexto da digitalização 3D, o resultado final da captura de dados (1ª etapa) é um modelo geométrico chamado “nuvem de pontos”. A nuvem de pontos é uma representação básica, onde cada ponto é representado pelas suas coordenadas cartesianas (x,y,z) bem como alguns atributos que podem ser associados a cada um deles, como a distância do ponto a um dado referencial, refletância do material, temperatura ou outras características de interesse. Ela servirá como base para ser utilizada em diversas finalidades, como na medição, animação, visão tridimensional e, principalmente, para criação de modelos geométricos a serem utilizados em ferramentas 3D (GROETAELAARS, 2011).

Na representação de modelos 3D digitalizados, devido a sua simplicidade e flexibilidade, o formato *polygon file format* (.ply) é um dos mais utilizados, armazenando, para cada ponto, informações das coordenadas, cores e informações de textura, estando tanto nas versões ASCII, como na versão binária (McHENRY; BAJCSY, 2008). Cabe ressaltar que, na maioria dos casos, onde a nuvem de pontos foi obtida através de técnicas de digitalização 3D, é necessário realizar um tratamento dos dados que compõem a nuvem de pontos, eliminando aqueles que são redundantes, visto que o mesmo ponto pode ser capturado mais de uma vez

resultando em leituras redundantes e arquivos de maior tamanho (Cristiane Brasil, 2003), e pontos que não correspondem ao objeto que está sendo digitalizado, ou seja, outliers, conforme apresentado na figura 6 (Zaman; Wong, 2016).

Figura 6. Eliminação de outliers da nuvem de pontos



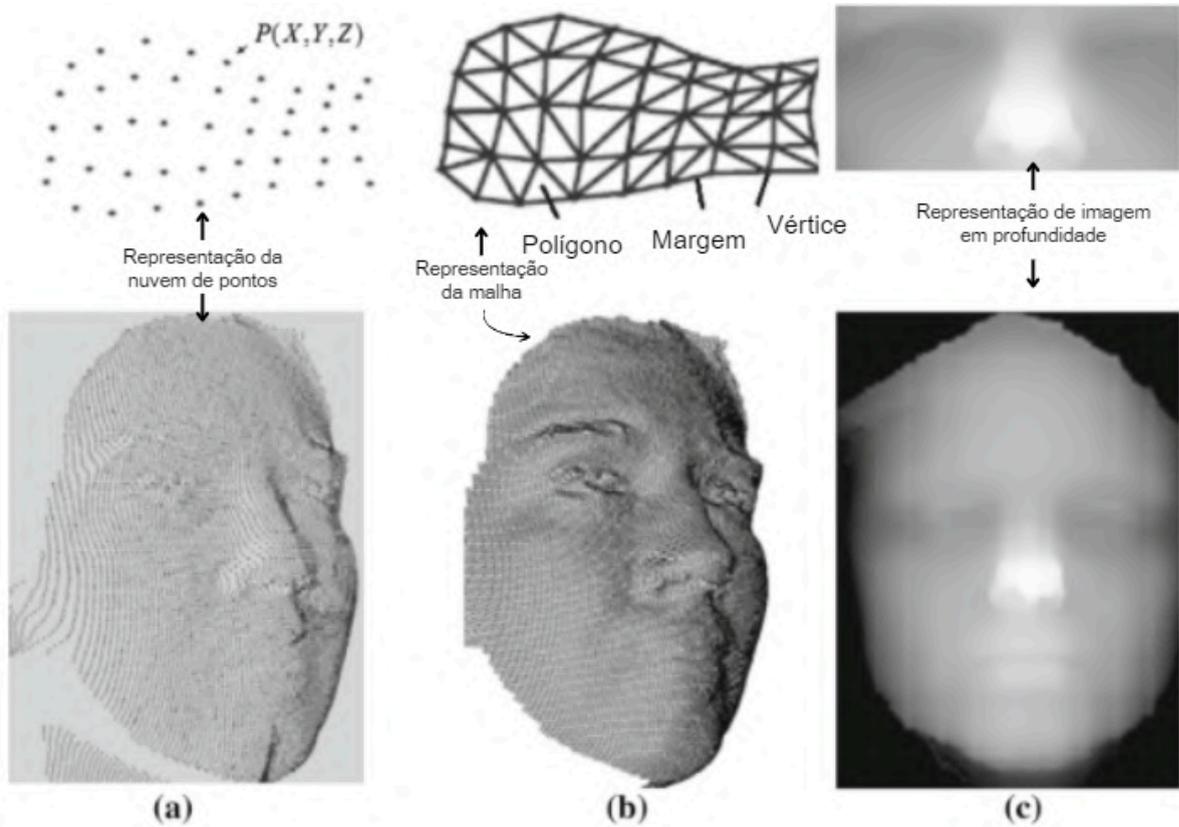
Fonte: Zaman, Wong (2016, p.7)

Além da nuvem de pontos, algumas tecnologias de digitalização 3D, como os sensores RGB-D, capturam informações de profundidade da imagem (*depth image*), esses arquivos são armazenados no formato padrão de imagem e compilam informações de distância entre cada ponto de uma cena e a câmera, ou sensor, que a capturou. A partir disso, é possível obter uma visão tridimensional do objeto capturado (Patil; Kothari; Bhurchandi, 2015).

A partir da nuvem de pontos, em alguns casos associando com as informações de profundidade da imagem, é possível obter a malha. A malha é definida a partir da nuvem de pontos e a principal diferença entre eles é que na malha os pontos estão conectados, enquanto na nuvem de pontos não.

A malha é uma estrutura formada por vértices, arestas e faces que se conectam formando superfícies tridimensionais e definindo, de forma mais clara, o objeto em estudo (Cao, Xu e Cosman, 2020). Na figura 7 é possível visualizar de forma representativa a diferença entre nuvem de pontos, malha e profundidade da imagem aplicados ao um caso de reconstrução facial.

Figura 7. Representação de a) nuvem de pontos b) malha c) profundidade de imagem



Fonte: Patil; Kothari; Bhurchandi (2015, p.11 , fig.6)

Nesse contexto, um dos formatos de arquivos mais utilizados para representar malhas é o formato de arquivo de estereolitografia (.STL), que, apesar de ser desenvolvido inicialmente para a indústria de prototipagem rápida, tornou-se muito útil para representação de malhas em diversos contextos (RYPL; BITTNAR, 2005). Para a realização de edições em nuvem de pontos e malhas existem diversos softwares no mercado, dentre eles cabe citar o Geomagic Design X, que é conhecido por permitir a edição, otimização e comparação entre malhas e nuvem de pontos, além de garantir a integração com softwares de modelagem 3D, como o Solidworks (ARTEC 3D, 2024).

Apesar da enorme gama de funcionalidades oferecidas pelo Geomagic Design X, é necessário adquirir uma licença com valores a partir de US\$8,301, o que corresponde a, aproximadamente, R\$ 45.000,00, tornando-o economicamente

inviável para algumas empresas e aplicações. Contudo, existem alguns softwares gratuitos e de código aberto como por exemplo: Cloudcompare, Blender e Meshlab que apesar de não possuírem todas as funcionalidades do Geomagic Design X, mostram-se úteis nas manipulações e comparação com modelos no formato de malha e nuvem de pontos. Na tabela 1 é possível ver um comparativo entre as funcionalidades disponíveis em cada software.

Tabela 01: Análise comparativa entre softwares de edição e manipulação de malhas e nuvem de pontos.

Funcionalidades	Geomagic	CloudCompare	Blender	MeshLab
Permite edição de nuvem de pontos?	Sim	Sim	Não	Sim
Permite comparação entre nuvem de pontos?	Sim	Sim	Não	Sim
Permite reparo de malhas?	Sim	Limitado	Sim	Sim
Custo Médio	Acima de R\$ 40 mil	Gratuito	Gratuito	Gratuito
Integração direta com Softwares CAD?	Sim	Não (exporta nuvens e malhas)	Não (exporta malhas)	Não (exporta malhas)
Principais formatos suportados:	.ply .xyz .asc .stl .obj .step	.ply .xyz .asc .stl .obj .fbx	.ply .blend .stl	.ply .xyz .asc .stl .obj

Fonte: Próprio Autor (2024).

### 2.1.2.3 Terceira etapa: Modelagem 3D

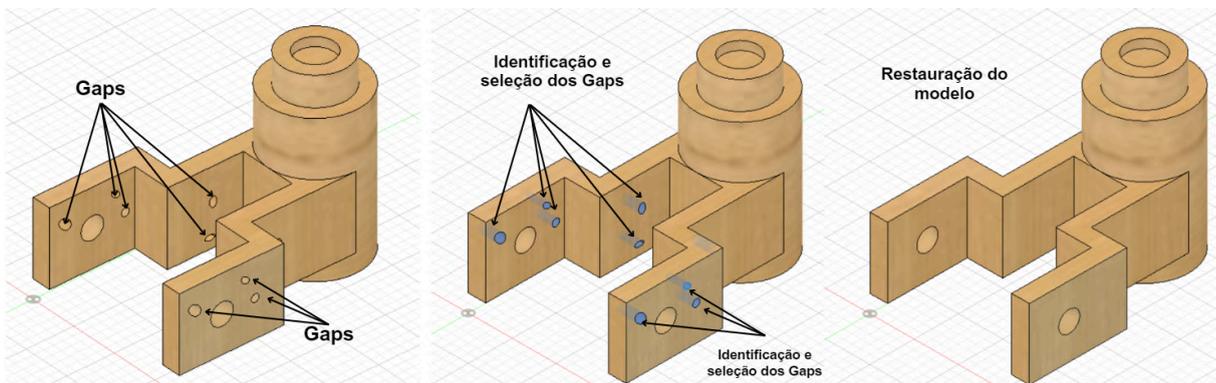
A partir da malha obtida na etapa anterior, é possível obter o modelo sólido editável, podendo ser paramétrico ou não (GROETAELAARS, 2011). O Geomagic Design X apresenta um módulo de integração com o Solidworks, capaz de transformar a malha em um objeto sólido e facilmente editável em ferramentas CAD (ARTEC 3D, 2024).

Através da tabela 1 é possível perceber que as alternativas apresentadas não possuem integração direta com softwares CAD. Diante disso, o Autodesk Fusion 360 surge como uma alternativa, de software CAD, capaz de transformar a malha em um objeto sólido paramétrico permitindo o *design* do objeto e simulações mecânicas e estruturais. Cabe ressaltar que ele é gratuito para uso pessoal e educacional, sendo pago apenas para fins comerciais (SONG; QI; CAI, 2018).

Com a modelagem 3D, é possível se obter o modelo sólido paramétrico com superfícies manipuláveis e próprias para projetos de engenharia e fabricação. Nesta etapa, também é possível realizar ajustes no modelo sólido obtido, incluindo o preenchimento de lacunas, suavização de superfícies, reconstrução de partes quebradas e outras medidas que forem necessárias para uma reconstrução fiel do modelo (Cristiane Brasil, 2003).

Na peça representada na figura 8, é possível perceber espaços não preenchidos que não fazem parte do modelo original, esses espaços são chamados de Gaps e eles podem ocorrer devido áreas de oclusão ou qualidade da digitalização 3D que geram imperfeições durante a reconstrução do modelo sólido a partir da malha (Cristiane Brasil, 2003). Por isso, é necessário identificar os gaps, selecionar eles para utilizar ferramentas como a de extrusão e reconstruir com base no modelo original, conforme apresentado na figura 8.

Figura 8: Realização do preenchimento de Gaps



Fonte: Próprio Autor (2024)

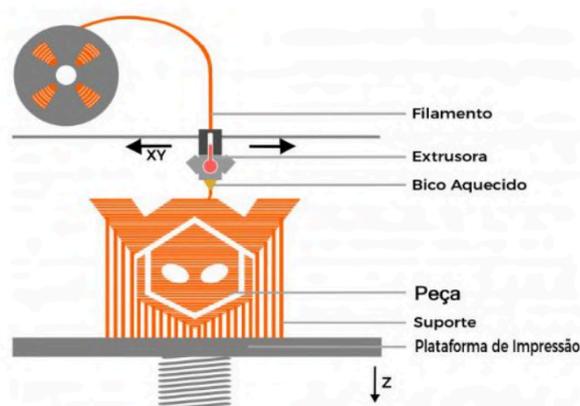
Com isso, o modelo digital pode ser a representação mais fiel possível da geometria capturada. Além disso, ferramentas de modelagem CAD oferecem funcionalidades para adicionar detalhes funcionais e estéticos ao design, garantindo que o modelo digital não apenas corresponda ao objeto físico, mas também atenda aos requisitos de desempenho e funcionalidade (Chhabra & Singh, 2011). A análise detalhada do modelo sólido 3D permitirá identificar e corrigir problemas antes da produção física, economizando tempo e recursos (Thompson et al., 2016).

Com o modelo digital 3D também é possível verificar suas medidas, volume e realizar análises numéricas e estruturais através do método de elementos finitos (MELO, 2024). Esse método se refere a uma abordagem numérica que oferece soluções aproximadas para equações diferenciais que representam problemas encontrados no contexto da engenharia. Através dele, é possível discretizar um sistema em pequenos elementos, analisando o comportamento do corpo em estudo às forças, momentos e demais entidades existentes no problema em questão, podendo ser aplicado numa ampla variedade de casos, incluindo: análises de cargas, resolução de problemas estruturais, acústicos, térmicos, eletromagnéticos e de escoamento. No contexto atual, a maioria dessas análises são realizadas através de softwares de engenharia, como Ansys e Autodesk Fusion (MELO, 2024).

#### **2.1.2.4 Quarta Etapa: Prototipagem Rápida (Impressão 3D)**

Com o modelo digital validado, pode-se realizar a prototipagem e produção do objeto, sendo a impressão 3D uma tecnologia amplamente utilizada para esta finalidade, pois permite a criação rápida de protótipos e peças finais com alta precisão e complexidade geométrica. Essa é uma tecnologia que possibilita a produção de modelos e protótipos diretamente a partir do modelo 3D, obtido por um sistema CAD, por exemplo (MARTINEZ et al., 2023). Diferentemente dos métodos de manufatura tradicionais que realizam a produção a partir da remoção de material, na manufatura aditiva, o processo de construção se dá através da deposição sucessiva de camadas de um determinado material (ABDELAAL; ALDAHASH, 2024), conforme apresentado na figura 9.

Figura 9. Representação esquemática de uma impressora 3D



Fonte: Wishbox (2022)

Para a realização da impressão 3D, utiliza-se uma malha gerada em formato .STL a partir do software CAD. Esta malha é configurada em um software de fatiamento, no qual é possível criar suportes e definir parâmetros como altura da camada, velocidade de impressão, temperatura do extrusor e da mesa de impressão, bem como os padrões de preenchimento, a partir das configurações definidas é possível gerar um arquivo do tipo G-code que será inserido na impressora (MARTINEZ et al., 2023). Um outro aspecto a ser levado em conta nessa etapa é o material escolhido para a impressão 3D, pois poderá afetar diretamente na qualidade, durabilidade e aplicabilidade das peças impressas. Os tipos de materiais podem ser divididos em plásticos, resinas, metais, cerâmicas e materiais compostos (ABDELAAL; ALDAHASH, 2024).

Dentre os materiais utilizados na impressão 3D, os mais populares são os plásticos, mais especificamente, o Ácido Polilático (PLA), que é um material muito utilizado em protótipos e peças decorativas, por ser fácil de usar; Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), material mais resistente que o PLA, apresentando boa durabilidade, resistência térmica e bom custo-benefício (ABDELAAL; ALDAHASH, 2024). É muito utilizado em peças funcionais e aplicações relacionadas a engenharia; E o Polietileno Tereftalato Glicol-modificado (PETG), que, dentre os listados, é o que apresenta maior resistência e melhores características mecânicas, sendo ideal para peças funcionais que precisam de uma boa resistência (Gibson, Rosen & Stucker, 2015).

A partir dos parâmetros definidos, o software gera um arquivo contendo um conjunto de instruções específicas para que a impressora 3D possa construir o modelo camada sobre camada. (Gibson, Rosen & Stucker, 2015).

## 2.2 DIGITALIZAÇÃO 3D SEM CONTATO

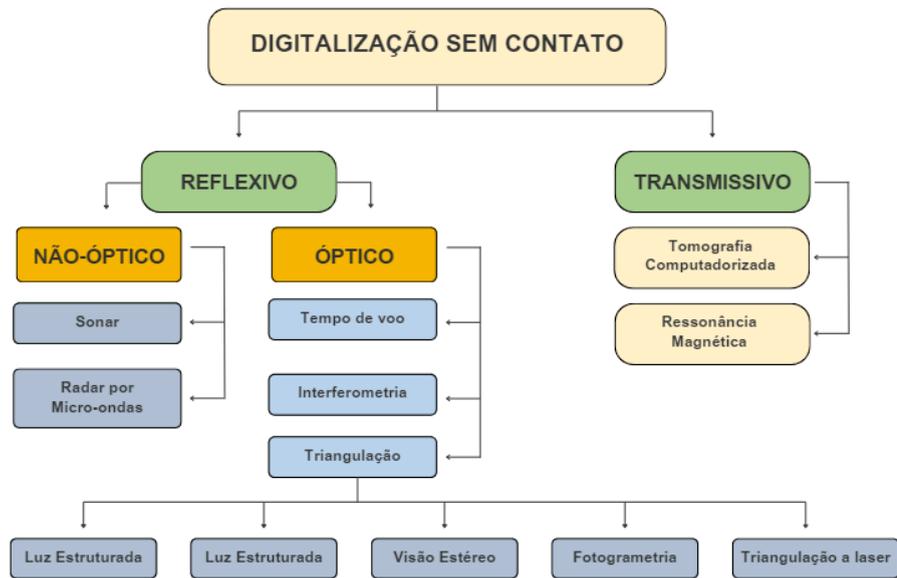
### 2.2.1 Classificação das tecnologias de medição sem contato

As tecnologias de digitalização 3D sem contato podem ser divididas em reflexivas e transmissivas. Na reflexiva, as tecnologias capturam os dados com base na luz ou outro tipo de radiação que é refletida de volta pelo objeto, sendo úteis para objetos que refletem bem a luz. As tecnologias que utilizam a refletividade para obtenção de dados podem ainda ser divididas em ópticas, quando utilizam luz visível, infravermelho ou laser, e não ópticas, quando utilizam radiação que não faz parte do espectro visível como ondas de rádio ou micro-ondas, sendo utilizadas em sonar e radar por micro-ondas (JÄHNE; HAUSSECKER; GEISSER, 1999).

Nas tecnologias de digitalização sem contato refletivas ópticas, a captura de informações em três dimensões podem ser percebidas de três formas principais: (i) Método de medição de profundidade baseado no tempo de voo (*time-of-flight*); (ii) Triangulação de pontos correspondentes, resultando na estimativa da profundidade e (iii) Interferometria. Além disso, cabe ressaltar que o método da triangulação é a base teórica para a realização das técnicas de visão estéreo, fotogrametria, luz estruturada e triangulação a laser (JÄHNE; HAUSSECKER; GEISSER, 1999).

Em contrapartida, nas tecnologias transmissivas a captura de dados baseia-se na radiação que passa através do objeto, sendo úteis para superfícies transparentes, semitransparentes ou quando se deseja analisar a parte interna de objetos. Como exemplo dessas tecnologias, é importante citar a Tomografia Computadorizada, que utiliza raios-X para obter imagens detalhadas das estruturas internas do corpo, e Ressonância Magnética, que gera imagens através de campos magnéticos e ondas de rádio. (JÄHNE; HAUSSECKER; GEISSER, 1999). A classificação das tecnologias de medição sem contato está representada na figura 10.

Figura 10. Classificação das tecnologias de medição sem contato



Fonte: Aviz (2010) e Jahne; Haussecker; Geissler (1999)

No contexto industrial pode-se destacar tecnologias de digitalização 3D que utilizam o princípio óptico (HALEEM et al., 2022), como a fotogrametria, scanners 3D de luz estruturada e scanners baseados em pulsos de laser, conforme apresentado na figura 11.

Figura 11. Tecnologias de digitalização 3D na indústria



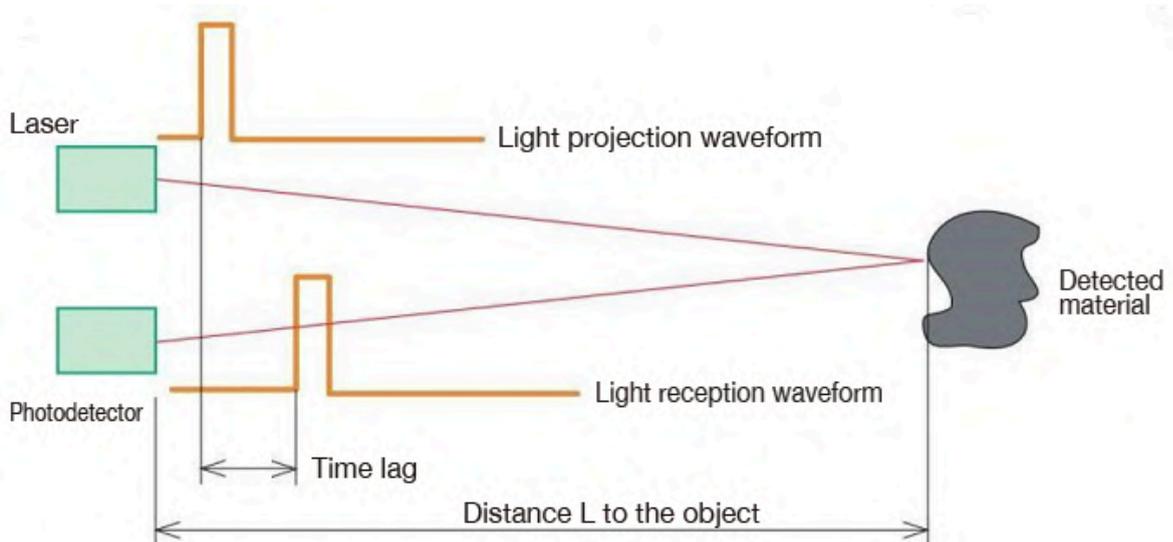
Fonte: Haleem et al. (2022).

Em continuação serão apresentados os princípios matemáticos para cálculos de distância nas tecnologias do tipo reflexivo e óptico como *time of flight*, interferometria e triangulação.

### 2.2.2 Tempo de voo (TOF)

A técnica de medição por tempo de voo ou *time of flight*, tem suas origens na física do século XIX com a exploração da propagação de ondas acústicas e eletromagnéticas, onde a aplicação dessa técnica passou a ser mais explorada com os desenvolvimentos das tecnologias de radar e laser. Essa é uma técnica utilizada para determinar distâncias calculando o tempo que um sinal emitido leva até encontrar o objeto e retornar ao receptor, que na maioria das vezes é igual ao emissor (Alvarez-Jácobo, 2013).

Figura 12: .Representação do princípio Time of Flight (TOF)



Fonte: Hokuyo (2024)

Com o tempo de voo, é possível calcular a distância percorrida a partir da equação 1.

$$L = \frac{v \cdot t}{2} \quad (1)$$

Nesse caso, a equação 1 é dividida por um fator 2, pois o tempo medido é calculado considerando-se o tempo de ida e volta. Além disso,  $L$  representa a distância a ser medida,  $t$  é o tempo de voo e  $v$  é a velocidade do sinal que pode coincidir com a velocidade da luz, conforme a figura 12.

Essa técnica é muito utilizada em sensores de proximidade, tecnologias como o LIDAR e sistemas de navegação e Radar. Dentre as vantagens das medições por tempo de voo têm-se a sua versatilidade podendo ser utilizada em diferentes condições e tipos de ondas, como luz, radar ou som (JÄHNE; HAUSSECKER; GEISSER, 1999). No entanto, dentre as principais desvantagens das tecnologias que utilizam esta técnica tem-se a dependência da velocidade do sinal, que pode variar dependendo das condições do ambiente onde o sinal é propagado e o custo dos equipamentos, que por muitas vezes podem ser complexos e caros (Hoyuko, 2024).

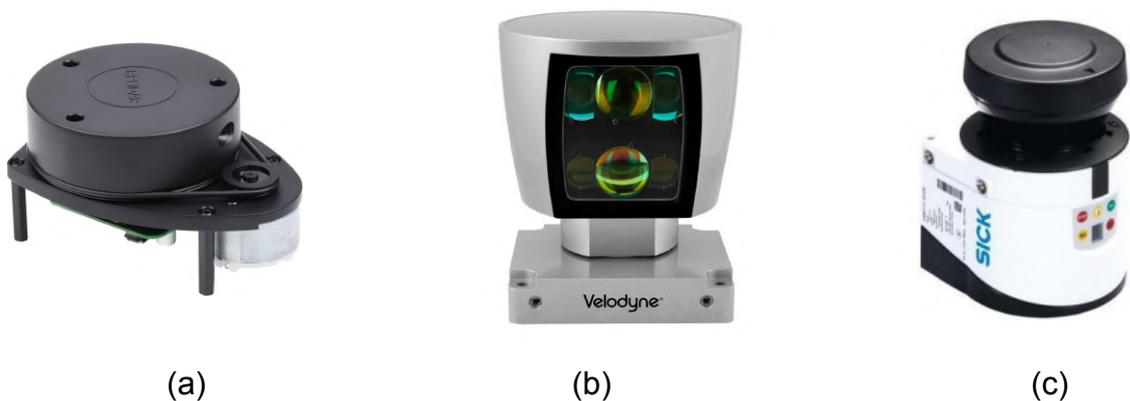
O LiDAR (Light Detection and Ranging) é uma tecnologia de sensoriamento remoto que mede distâncias a partir da emissão de pulsos de laser, calculando o tempo que esses pulsos levam para retornar após refletirem na superfície dos objetos. Esta tecnologia é amplamente utilizada em uma variedade de campos, incluindo mapeamento topográfico, arqueologia, geologia, e veículos autônomos, devido à sua capacidade de fornecer dados precisos e detalhados sobre a geometria de um ambiente (Wegman et al., 2007).

Utilizando o método matemático do tempo de voo, ela calcula distâncias e combina os dados de distâncias obtidos e informações de localização do sensor para criar uma nuvem de pontos que é um conjunto de coordenadas tridimensionais que representam a superfície do objeto ou ambiente (Szeliski, 2010). Na tecnologia LiDAR o cálculo utilizando o método matemático do tempo de voo é o mais usual para a maioria dos sistemas, especialmente para os que possuem longo alcance e alta precisão. Essa tecnologia também é muito utilizada em aplicações para Localização e Mapeamento Simultâneos (SLAM) permitindo que robôs, drones ou veículos autônomos possam mapear ambientes desconhecidos e se localizar dentro deles.

No mercado, existem diversos tipos de sensores LiDAR, como os da marca Velodyne, utilizados em veículos autônomos, Ouster, muito utilizados em aplicações industriais, e dentro da linha dos sensores de baixo custo encontra-se o RP LiDAR

que é uma linha muito utilizada em projetos de robótica e pesquisas acadêmicas. Sensores da linha RP LIDAR são desenvolvidos pela empresa Robotic Positioning, e oferecem opções acessíveis e de boa qualidade para aplicações robóticas, mapeamento de superfícies e veículos autônomos. Esses sensores realizam uma varredura a laser num campo de 360° e são muito conhecidos por serem compactos, acessíveis e ideais para diversas aplicações (SLAMTEC, 2024), conforme apresentado na figura 13.a. Além disso, existem sensores tipo LiDAR da marca Velodyne, figura 13.b, que são indicados no mapeamento de ambientes 3D, veículos autônomos e robótica (VELODYNE LIDAR, 2024) e os da marca SICK, apresentados na figura 13.c, que são muitas vezes utilizados na robótica (Alvarez-Jácobo, 2013).

Figura 13. Modelos de scanners do tipo LiDAR a) RPLIDAR A1 b)VELODYNE LIDAR c)SICK



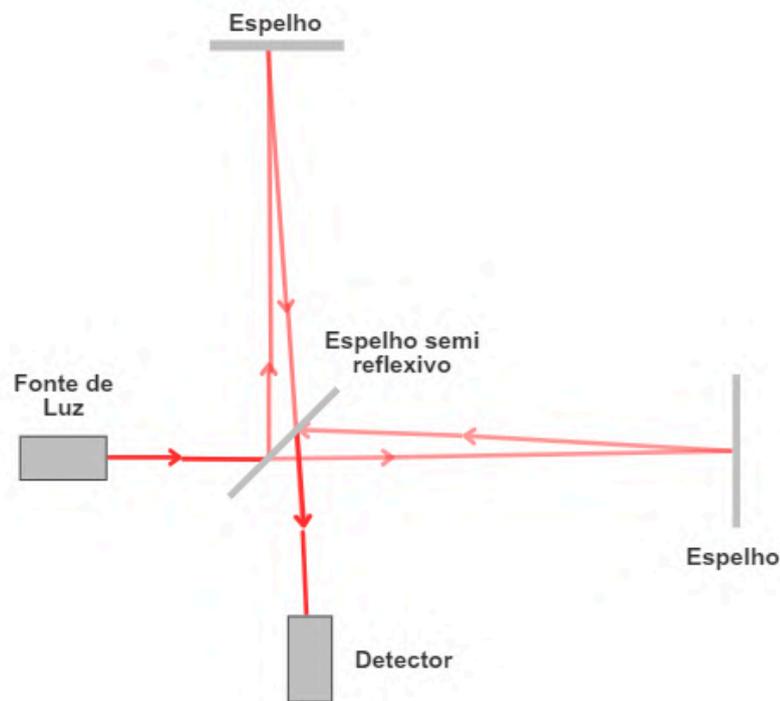
Fonte: a) Fabricante SLAMTEC ( 2024) b)

Além disso, a tecnologia ToF também é utilizada em outros dispositivos como o Microsoft Kinect V2, que é a segunda versão do sensor Kinect da Microsoft, e as linhas PRO de smartphones da Apple sendo aplicadas no escaneamento de objetos. De forma geral, dispositivos que utilizam a linha ToF tendem a ser mais econômicos e compactos, ideal para aplicações em dispositivos móveis e ambientes com baixa iluminação, apresentando boa limitação e alcance, mas com maior complexidade na integração e processamento de dados.

### 2.2.3 Interferometria

As tecnologias baseadas no processo da Interferometria baseiam-se no fenômeno de interferência causada pelo deslocamento da fase do feixe de luz que é refletido ao incidir sobre uma superfície. Existem diversos tipos de interferômetros como os de Michelson, Fabry-Pérot e Fizeau, mas basicamente nestes tipos de sistema uma fonte de luz é dividida em dois ou mais feixes (sendo um de referência e outro de medição), onde os feixes divididos percorrem trajetórias diferentes e são refletidos de volta para um ponto onde se encontram novamente (Thiago Yuji Hiran, 2020).

Figura 14. Representação da Interferometria



Fonte: (Renishaw, 2024)

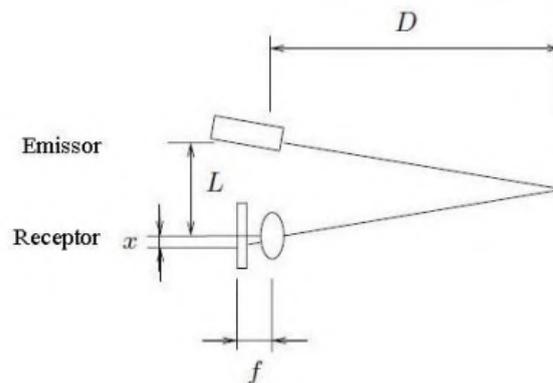
Neste ponto de encontro, pode ocorrer uma interferência construtiva ou destrutiva (onde os feixes se somam ou subtraem, respectivamente) e isso irá depender das diferenças de caminho percorrido por cada feixe. Na figura 14 é possível ver a representação deste princípio quando o feixe de luz emitido, através da fonte de luz, se divide no espelho semi reflexivo onde ambos percorrem trajetórias diferentes e se encontram no detector final (Thiago Yuji Hiran, 2020).

Com isso, é possível medir diferenças pequenas entre os caminhos percorridos pelos feixes de luz e tais diferenças podem ser traduzidas em medidas de deslocamento e variações de comprimento. Por este motivo, a interferometria é uma técnica muito utilizada quando se deseja medir distâncias com precisão nanométrica, detectar deformidades e rugosidades em componentes, e analisar superfícies em escala microscópica. Como são de alta precisão e utilizados em aplicações avançadas, os sensores que utilizam a interferometria para a digitalização 3D apresentam um custo elevado (Renishaw, 2024).

### 2.2.4 Triangulação

Um outro método para medição de distâncias é a triangulação, nela existe um emissor e um receptor que estão separados por uma distância relativa  $L$ , onde o emissor emite o sinal e o receptor faz a captação do sinal com um desvio  $x$  (Alvarez-Jácomo, 2001), conforme representado na figura 15.

Figura 15: Representação da Triangulação



Fonte: Alvarez-Jácomo (2013)

Com base nesse desvio, é possível calcular a distância a partir da equação 2, onde  $F$  é a distância focal, que é a distância entre o sensor da câmera e o centro óptico da lente.

$$D = f \frac{L}{x} \quad (2)$$

Devido a sua versatilidade, as tecnologias que utilizam a triangulação são aplicadas em diversas áreas da ciência e engenharia, sendo utilizadas principalmente para reconstrução 3D de objetos, mapeamento de superfícies e sistemas de posicionamento.

## 2.3 TECNOLOGIAS DE DIGITALIZAÇÃO POR TRIANGULAÇÃO

### 2.3.1 Luz estruturada

A luz estruturada é uma técnica que realiza a projeção de um padrão de luz sobre um objeto e analisa a deformação que a luz sofre ao se encontrar com o objeto em análise, a partir dessa deformação é possível calcular a posição de cada ponto do objeto analisado. Essa posição é determinada utilizando o princípio da triangulação e levando em conta fatores como: distância entre o projeto de luz e câmera ( $B$ ), distância focal da câmera ( $f$ ) e posições do ponto na imagem capturada pela câmera ( $px$ ) e posição do ponto no padrão de luz projetado ( $ps$ ). A posição é calculada através da equação 3 (HALEEM et al., 2022).

$$Z = \frac{B \cdot f}{(px - ps)} \quad (3)$$

Dentre os sensores que utilizam esta técnica é interessante citar o Microsoft Kinect 360, da 1ª geração, cuja estrutura é apresentada na figura 16. Ele foi lançado em 2010 e é um dos mais populares da Microsoft por ser utilizado em entretenimento e jogos computacionais, além disso, é leve, flexível e de baixo custo, quando comparado a outros sistemas de escaneamento (MICROSOFT, 2024).

Figura 16. Microsoft Kinect XBOX 360



Fonte: Fabricante Microsoft (2024)

Esse sensor é classificado como RGB-D que é um acrônimo para: *Red* (vermelho), *Green* (verde), *Blue* (azul) e *depth* (profundidade), e eles são equipados com um sistema de captação de imagens em cores (RGB) e profundidade (D), conforme apresentado na figura 16 ele conta com um projetor infravermelho, que irá emitir um padrão de luz infravermelha sobre o ambiente, esse padrão de luz é refletido pelas superfícies e objetos no campo de visão do Kinect e as deformações no padrão de luz causadas pelas superfícies ou objetos são capturadas pela câmera infravermelha, que utiliza essas informações para calcular a profundidade e determinar a distância de cada ponto na superfícies. Por fim, a câmera RGB captura imagens coloridas do ambiente e funciona como uma câmera comum captando cores e detalhes visuais dos objetos em cena para em conjunto com os detalhes de profundidade obtidos pela câmera infravermelho gerar modelos 3D coloridos (Patil; Kothari; Bhurchandi, 2015).

Com uma aplicação mais voltada a engenharia e oferecendo maior qualidade e precisão na captura de detalhes finos e peças com geometria complexa, é interessante citar o Scan CR-Ferret, desenvolvido pela Creality Scan, que é um modelo acessível, compacto e ideal para digitalização de objetos menores e ambientes restritos. (Creality, 2023).

Figura 17. Scan CR Ferret



Fonte: (Fabricante Creality Scan, 2024)

Como é possível observar através da figura 17, a estrutura de câmeras e projetor do Scan CR Ferret é bem semelhante a do Kinect XBOX 360. A principal diferença é que ele conta com duas câmeras infravermelho, podendo, a câmera adicional, fornecer informações adicionais sobre a luz e apoiar a captura de dados. De forma geral, os dispositivos que utilizam a tecnologia de luz estruturada oferecem boa precisão, detalhamento, velocidade na captura e tem preços variados, de baixo até alto custo, no entanto, suas principais desvantagens são em relação a sensibilidade à iluminação do ambiente e limitações de alcance para grandes peças ou superfícies a serem escaneadas (Patil; Kothari; Bhurchandi , 2015).

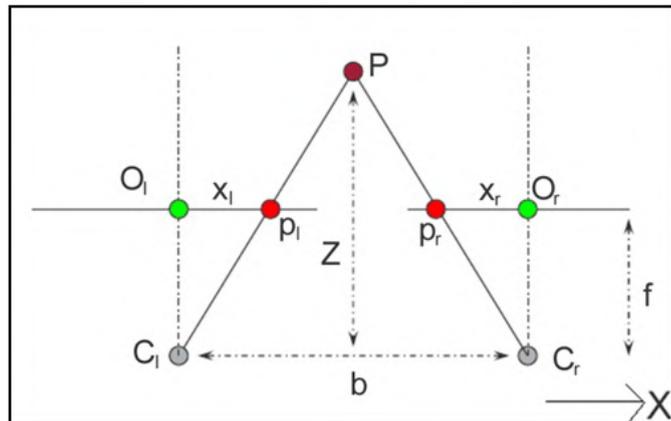
### 2.3.2 VISÃO ESTÉREO

Esta técnica é inspirada no processo visual humano e nela utiliza-se duas ou mais câmeras para capturar imagens de um objeto a partir de diferentes ângulos, e, a partir dessas imagens, realizando-se uma correspondência de pontos ou blocos, é possível reconstruir a estrutura tridimensional dos objetos (Alvarez-Jácobo, 2001).

Por se tratar de imagens capturadas de câmeras diferentes, durante o processo é necessário realizar a calibração das câmeras para ajustar distorções ópticas e garantir que as imagens sejam alinhadas corretamente, além de utilizar algoritmos para encontrar a correspondência entre pontos em diferentes imagens.

Dentre os algoritmos mais comuns, destaca-se o método de Block Matching, que divide a imagem em blocos e encontra correspondências para cada bloco, e método da correspondência de pontos, que compara pontos individualmente e encontra a correspondência entre eles (HOLA et al., 2016).

Figura 18. Geometria de um sistema de visão estéreo



Fonte: (HOLA et al., 2016)

A partir disso, é possível calcular a profundidade dos pontos usando a correspondência das posições das câmeras e o método da triangulação. Na figura 18 é possível ver a geometria de um sistema de visão estéreo. No cálculo, apresentado na equação 4, logo abaixo, se assume que a geometria das câmeras são conhecidas e que a disparidade, ou seja, a diferença na posição do ponto nas duas imagens capturadas pelas câmeras, podem ser medidas com precisão (JÄHNE; HAUSSECKER; GEISSER, 1999).

$$Z = \frac{b \cdot f}{d} \quad (4)$$

“Z” é a profundidade ou distância do ponto na cena, “b” é a base, ou seja, a distância entre as duas câmeras, “f” é a distância focal da câmera e “d” é a disparidade, na figura 18 d é representado por \$x\_1 - x\_2\$.

A Visão Estéreo é muito versátil e utilizada em áreas como robótica, navegação autônoma e modelagem 3D, suas principais vantagens estão ligadas ao fornecimento de boas reconstruções tridimensionais precisa de cenas e objetos, mesmo em cenários com pouca textura ou contraste. Suas desvantagens estão

ligadas à sensibilidade a erros na calibração, que podem afetar a reconstrução precisa e complexidade computacional, visto que o processamento das correspondências pode ser computacionalmente intensivo (Alvarez-Jácobo, 2013).

### 2.3.3 TRIANGULAÇÃO A LASER

A triangulação a laser é uma técnica de medição tridimensional que realiza a emissão do Feixe de Laser sobre a superfície de um objeto. Esse feixe pode ser contínuo ou pulsado, dependendo do tipo de sistema. O feixe que incide sobre o objeto é refletido de volta para um detector que captura a posição do feixe refletido e mede a distância entre o ponto de emissão e o ponto refletido. Nesse tipo de sistema, assume-se que o ângulo de incidência do feixe de laser e a distância entre o laser e o detector são conhecidos (Alvarez-Jácobo, 2013).

Com base nisso a posição de cada ponto é calculada através da equação 5 .

$$Z = \frac{d.L}{\sin(\theta)} \quad (5)$$

Na equação apresentada acima, “Z” é a distância até o ponto na superfície, “d” é a distância medida entre o feixe de laser e o detector, “L” é a distância conhecida entre o laser e o detector e “θ” é o ângulo de incidência do feixe de laser (Alvarez-Jácobo, 2013).

A triangulação laser é amplamente utilizada em scanners 3D devido à sua alta precisão e resolução e é uma escolha comum em aplicações industriais, de engenharia e arquitetura, além de ser umas das principais tecnologias utilizadas para digitalização de objetos de diversas formas e tamanhos, especialmente quando a precisão é crucial. Dentre os modelos disponíveis no mercado cabe mostrar o FARO Focus S, que é amplamente utilizado para engenharia reversa, controle de qualidade a aplicações na engenharia civil e o Keyence LK-G5000 que possui uma aplicação mais voltada à automação industrial na medição de espessura de peças. A triangulação a laser é uma técnica poderosa que permite a obtenção de medições detalhadas e precisas de superfícies e objetos, bem como aplicações versáteis, no entanto, ela apresenta limitações na captura de informações em superfícies altamente reflexivas, pouco reflexivas, transparentes e, em alguns casos, podem ser

caros e complexos, exigindo manutenção e calibração especializadas (JÄHNE; HAUSSECKER; GEISSER, 1999).

### 2.3.3 FOTOGRAMETRIA

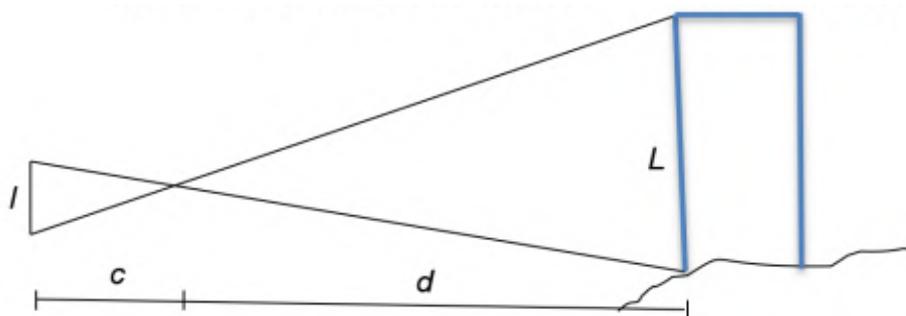
A fotogrametria consiste na obtenção de medidas confiáveis acerca de objetos físicos utilizando imagens fotográficas (Tommaselli et al., 1999), por este motivo, ela é uma ferramenta muito utilizada na reconstrução tridimensional de modelos físicos. Nos últimos 20 anos, devido à integração entre os sistemas computacionais e câmeras digitais, ela é muito utilizada na engenharia, robótica e geociência, tanto na reconstrução tridimensional de objetos a uma curta distância, como na fotogrametria aérea para o mapeamento de áreas de largo alcance. (Cordeiro, 2021).

Neste estudo, cabe destacar alguns parâmetros importantes da foto, como a escala que é representada pela razão entre o comprimento do objeto representado na imagem ( $l$ ) e o comprimento do objeto físico ( $L$ ), conforme a equação 6.

$$E = \frac{l}{L} \quad (6)$$

Nesse sentido, alguns outros parâmetros importantes na tomada de uma foto são a distância focal da câmera utilizada ( $c$ ) e a distância até o objeto a ser fotografado ( $d$ ) (Barbosa, 2022), conforme representado na figura 19.

Figura 19. Parâmetros básicos de uma Fotografia



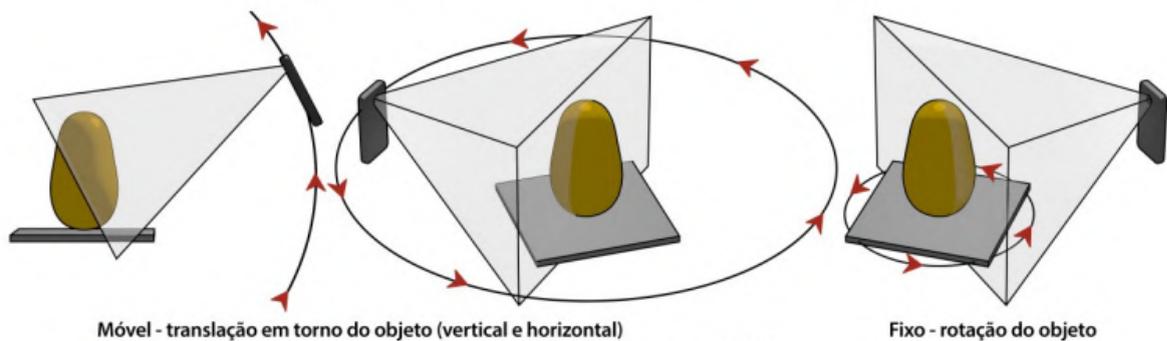
Fonte: Barbosa (2022, p.38)

A partir da equação 6, utilizando-se a semelhança de triângulos, representada na figura 19, é possível obter a seguinte relação:

$$E = \frac{l}{L} = \frac{c}{d} \quad (7)$$

Conhecer estes parâmetros é fundamental, pois a partir deles será possível identificar a posição dos pontos no espaço, corrigir distâncias e proporções além de gerar modelos precisos (Barbosa, 2022). No processo da aquisição de fotos para a fotogrametria, são retiradas múltiplas fotos do objeto em estudo em diferentes posições e ângulos, evitando áreas de oclusão, podendo ser a câmera fixa ou móvel, conforme apresentado na figura 20 (Cordeiro, 2021).

Figura 20. Processo de Aquisição de Fotografias

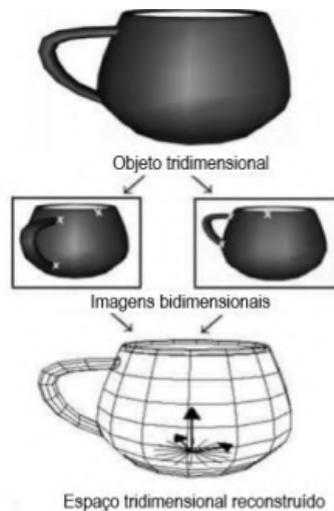


Fonte: Cordeiro (2021, p.36)

Com as imagens capturadas, um software de reconstrução fotogramétrica analisa as imagens, identifica pontos e padrões com o objetivo de gerar uma nuvem de pontos que representam a visão tridimensional do objeto em estudo. (Cordeiro, 2021). Para se ter uma visão tridimensional dos objetos é necessário ver um mesmo ponto sob vistas diferentes (Barbosa, 2022), por este motivo, quanto mais áreas de sobreposição tiver entre as imagens, maior a chance de se obter uma reconstrução fotogramétrica conforme desejado.

Isso ocorre porque o espaço tridimensional é reconstruído devido ao fenômeno da visão estereoscópica. Nesse caso, a formação de uma imagem tridimensional ocorre através da sobreposição de duas imagens bidimensionais (Minich, 2020), denominado par estereoscópico, que são registradas a partir de pontos diferentes, conforme exemplificado na figura 21.

Figura 21. Representação esquemática da fotogrametria

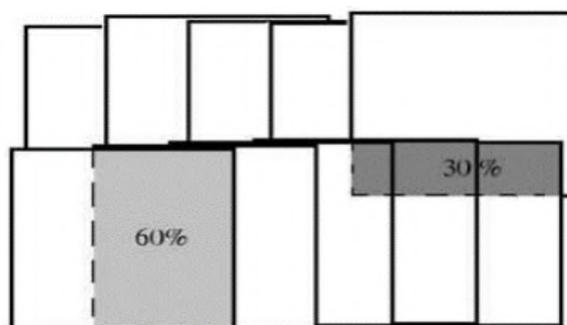


Fonte: Minich (2020, p.22)

Para uma boa reconstrução, o par de imagens adjacentes necessita de uma sobreposição de pelo menos 60% lateralmente e 30% longitudinalmente. (Coelho e Brito, 2007). E ao se utilizar softwares específicos como o Agisoft Metashape espera-se que imagens adjacentes forme sequências com sobreposição superior a 70% (Nogueira, 2023).

A figura 22 apresenta a porcentagem necessária de sobreposição para uma boa reconstrução:

Figura 22. Sobreposição necessária na fotogrametria



Fonte: Minich (2020, p.22)

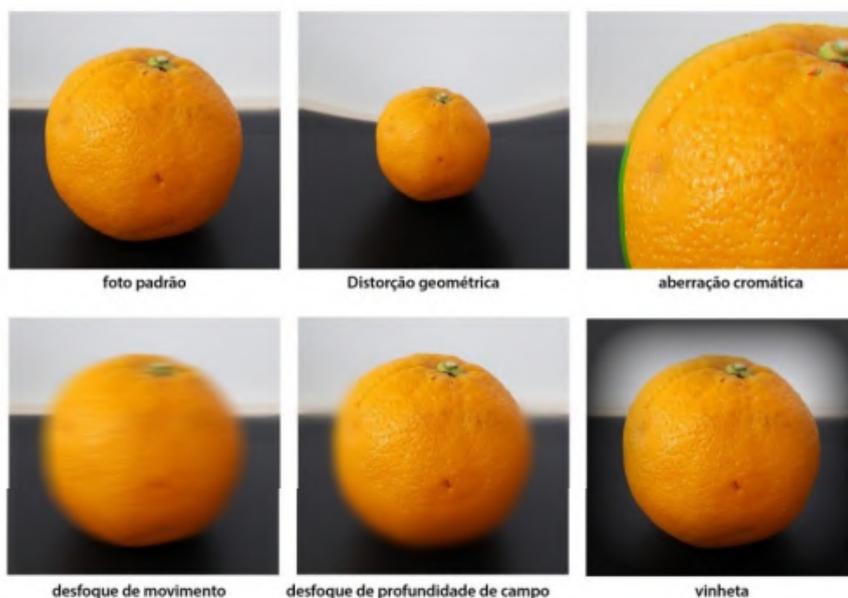
Na fotogrametria, a qualidade do modelo obtido está diretamente relacionado à qualidade das imagens. Sendo assim, a câmera utilizada é uma das principais

responsáveis pela precisão e qualidade. Posto isso, a qualidade pode ser extremamente alta se forem usadas câmeras de alta resolução (Cordeiro, 2021).

Na última década, os smartphones vêm sendo aprimorados em performance, podendo muitas vezes ter qualidades semelhantes às das câmeras digitais DSLR (Seo, 2016) e o rápido e espontâneo uso dos smartphones, bem como a acessibilidade à câmera que eles proporcionam levam a preferência deles ao invés dos modelos tradicionais de câmeras (Nguyen, 2018).

Além do equipamento a ser utilizado, a qualidade da imagem pode ser afetada por fatores como distorções geométricas, aberrações cromáticas, desfoque e vinheta (quando a borda da lente se torna invisível). (Brito e Coelho, 2007). A figura 23 representa esquematicamente a fotogrametria:

Figura 23. Fatores que influenciam na fotogrametria



Fonte: Cordeiro (2021, p.38)

Cabe destacar que a qualidade da imagem também pode ser afetada pela iluminação do local e características do material fotografado, como reflexão e refração. Um outro ponto, que pode influenciar na qualidade da reconstrução fotogramétrica obtida, é o software utilizado. Softwares pagos apresentam qualidade superior aos softwares gratuitos quando se trata de precisão, no entanto, em alguns casos a diferença torna-se imperceptível (Cordeiro, 2021).

Segundo Nascimento e Cafezeiro (2024), cada software de fotogrametria

apresenta suas particularidades que podem ser úteis a depender do caso. É possível analisar a particularidade apresentada de alguns softwares na tabela 2.

Tabela 02: Análise comparativa entre softwares de reconstrução fotogramétrica

Software	Vantagens	Desvantagens	Custo
Agisoft Metashape	Alta precisão e inúmeros recursos e funcionalidades	Exige maior curva de aprendizado e alto custo	Acima de R\$ 15.000
PolyCam	Permite um processamento em nuvem e facilidade no manuseio.	Limitações para edições dos modelos	Exige assinatura para exportar modelos ( a partir R\$ 70/mês)
Meshroom	Oferece recursos avançados de processamento e facilidade no manuseio.	Exige alto desempenho de software	Gratuito

Fonte: Adaptado de Nascimento e Cafezeiro (2024)

Buzayan et al. (2023) concluíram que o software de fotogrametria, Agisoft Metashape, apresentou maior precisão se comparado ao Meshroom e Polycam (sendo os resultados entre estes bem próximos) na criação de próteses nasais.

Dentre os softwares disponíveis em aplicativos para smartphones, o Polycam se destaca pela sua precisão, desempenho e tempo de processamento, se comparado com outros softwares disponíveis neste mesmo segmento (Silva et al., 2022).

Por fim, é necessário destacar que as informações EXIF (arquivo de imagem intercambiável) das fotos auxiliam no processo de reconstrução fotogramétrica, visto que esses dados fornecem: as coordenadas e o ângulo da câmera no momento da captura, distância focal e configurações de exposição (TERPSTRA, 2017). Dentre os dados EXIF, os principais são apresentados na tabela 3.

Tabela 03: Principais dados EXIF das fotos

Dados EXIF das Fotos
Data e Hora em que a foto foi tirada
Coordenadas GPS
Informações da câmera
Configurações da câmera (ISO, distância focal, abertura da lente)
Dimensões da foto

Fonte: Adaptado de Terpstra (2017)

Os dados EXIF das fotos também auxiliam no processo de calibração automática dos softwares de reconstrução fotogramétrica. Ao coletar dados utilizando as câmeras, as imagens podem sofrer distorções devido a lente utilizada, para corrigir as distorções é necessário realizar o processo de calibração utilizando informações como: distância focal da lente ( $f$ ), coordenadas do centro de projeção da imagem ( $x_p$ ,  $y_p$ ) e coeficientes de distorção radial da lente ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ). Um dos modelos matemáticos mais utilizados para este fim é o modelo da calibração de *Brown*, descrito pelas equações 8 - 12 (Baletti et al.; 2014).

$$dx_{radial} = x \cdot (1 + k_1 \cdot r^2 + k_3 \cdot r^4 + k_5 \cdot r^5) \quad (8)$$

$$dy_{radial} = y \cdot (1 + k_1 \cdot r^2 + k_3 \cdot r^4 + k_5 \cdot r^5) \quad (9)$$

$$dx_{tan} = x + [2 \cdot p_1 \cdot x \cdot y + p_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot x^2)] \quad (10)$$

$$dy_{tan} = y + [p_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot y^2) + 2 \cdot p_2 \cdot x \cdot y] \quad (11)$$

$$r = (x^2 + y^2) \quad (12)$$

Como os parâmetros descritos anteriormente estão disponíveis nos dados EXIF das fotos, os softwares de visão computacional utilizados no mercado (como o Agisoft Metashape, Polycam, Reality Capture e etc.) executam automaticamente a calibração da câmera corrigindo erros e distorções produzidas pela lente (Baletti et al.; 2014).

## 2.4 ERROS DE MEDIÇÃO

Erros de medição são variações indesejadas entre o valor medido e o valor real de uma grandeza. Essas variações podem ser decorrentes de diversos fatores como o instrumento de medição, operador, ambiente ou método utilizado (Cabral, 2004).

### 2.4.1 CLASSIFICAÇÃO DOS ERROS

Nesse sentido, os erros podem ser classificados principalmente em 2 categorias principais, que são: erros sistemáticos e aleatórios. Os erros sistemáticos apresentam um padrão repetitivo em todas as medições sob as mesmas condições, ou seja eles são previsíveis e podem ser causados por fatores como instrumentos descalibrados, métodos de medição inadequados e condições ambientais (Cabral, 2004).

Em contrapartida, os erros aleatórios são variações imprevisíveis que ocorrem em diferentes medições, mesmo que estejam sob as mesmas condições, ou seja, elas não seguem um padrão específicos e podem ser causadas por flutuações ambientais, variações no operador, como imprecisão na leitura ou manuseio do instrumento, além de ruídos e interferências nos instrumentos (Cabral, 2004).

### 2.4.2 ERRO ABSOLUTO E ERRO RELATIVO

O erro absoluto e relativo são métricas fundamentais na análise da precisão das medições. Com isso, o erro absoluto consiste na diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro, ou de referência, conforme apresentado na equação 13. Através desse erro, é possível analisar o quanto a medição está afastada do valor real. No entanto, não indica a significância do erro em comparação à magnitude da grandeza medida (Cabral, 2004).

$$\text{Erro Absoluto} = \text{valor medido} - \text{valor verdadeiro} \quad (13)$$

Em contrapartida, o erro relativo expressa o erro absoluto em relação ao valor

verdadeiro, sendo geralmente expresso em porcentagem conforme a equação 14.

$$\text{Erro Relativo} = \frac{(\text{Valor Real} - \text{Valor Medido})}{\text{Valor Real}} \cdot (100\%) \quad (14)$$

Nesse sentido, o erro absoluto se torna útil quando se deseja analisar a precisão em termos absolutos, em medições onde o desvio exato é importante, sem considerar a proporção em relação ao valor medido e quando as tolerâncias aceitáveis são definidas de forma absoluta. Em contrapartida, o erro relativo é indicado quando se deseja analisar a proporcionalidade do erro e se comparar medições de grandezas com diferentes magnitudes (Cabral, 2004).

### 2.4.3 DESVIO PADRÃO

Dentro de uma análise estatística, o desvio padrão indica a dispersão dos dados em relação à média (Cabral, 2004). Por definição, o desvio padrão de um número infinito de dados pode ser definido a partir da equação 15.

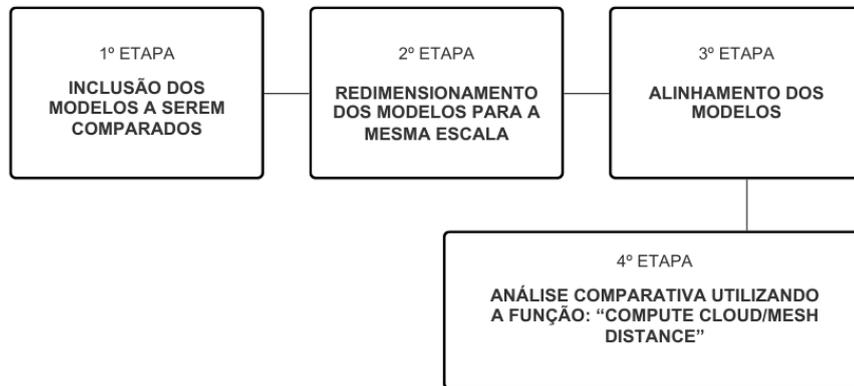
$$\sigma = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad (15)$$

Onde  $d$  representa a diferença entre cada valor e a média do conjunto de dados e o  $n$  representa o número de leituras. A partir desse resultado é possível obter o desvio padrão, onde quanto menor o desvio padrão menor a variabilidade dos dados, indicando que os conjuntos de dados tendem a se aproximar da média desse conjunto (Cabral, 2004).

### 2.4.4 ANÁLISE DE DESVIOS DIMENSIONAIS COM O CLOUDCOMPARE

No ambiente virtual, é possível analisar a precisão e calcular os desvios entre dois modelos tridimensionais, em formato de malhas ou nuvem de pontos, através de softwares como o Cloud Compare (Cordeiro, 2021). O processo para a comparação entre as nuvens ocorre utilizando as etapas apresentadas na figura 24.

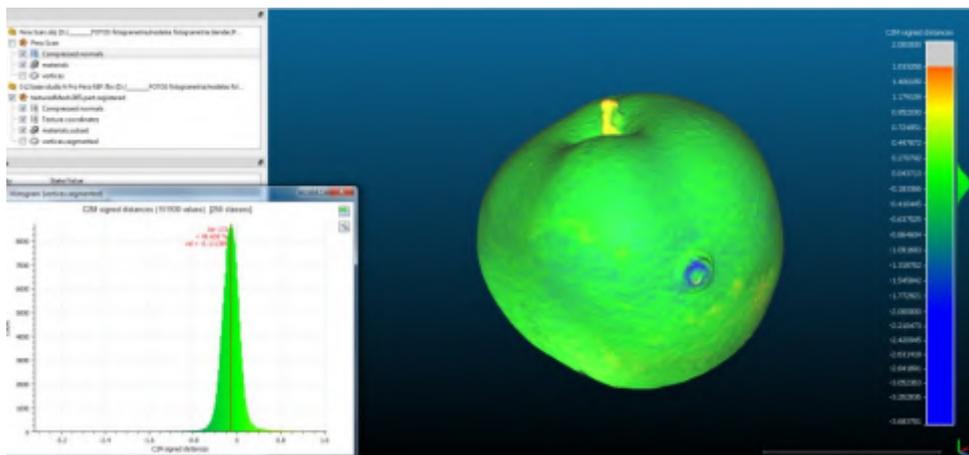
Figura 24. Etapas para análise de desvio dimensional no Cloudcompare



Fonte: Próprio Autor (2024)

Para a realização da análise, o software utiliza os cálculos das posições dos modelos tridimensionais, incluindo posições relativas e absolutas, e compara com o objeto de referência. A partir disso, ele fornece a distância entre os pontos e um gráfico do tipo histograma apresentando a distribuição da distância entre os pontos, bem como o respectivo desvio padrão, conforme apresentado na figura 25 (Cordeiro, 2021).

Figura 25. Resultado do comparativo entre modelos no Cloudcompare



Fonte: Cordeiro (2021, p.90)

A partir do comparativo, é possível identificar falhas e analisar a precisão entre os modelos, aperfeiçoando e adaptando-os, caso necessário (Cordeiro, 2021).

### **3. METODOLOGIA**

Esse trabalho trata-se de uma pesquisa classificada como pesquisa aplicada. Seu propósito é descritivo, com objetivos qualitativos e quantitativos. A abordagem metodológica será bibliográfica, enquanto o método científico aplicado será o método científico hipotético-dedutivo.

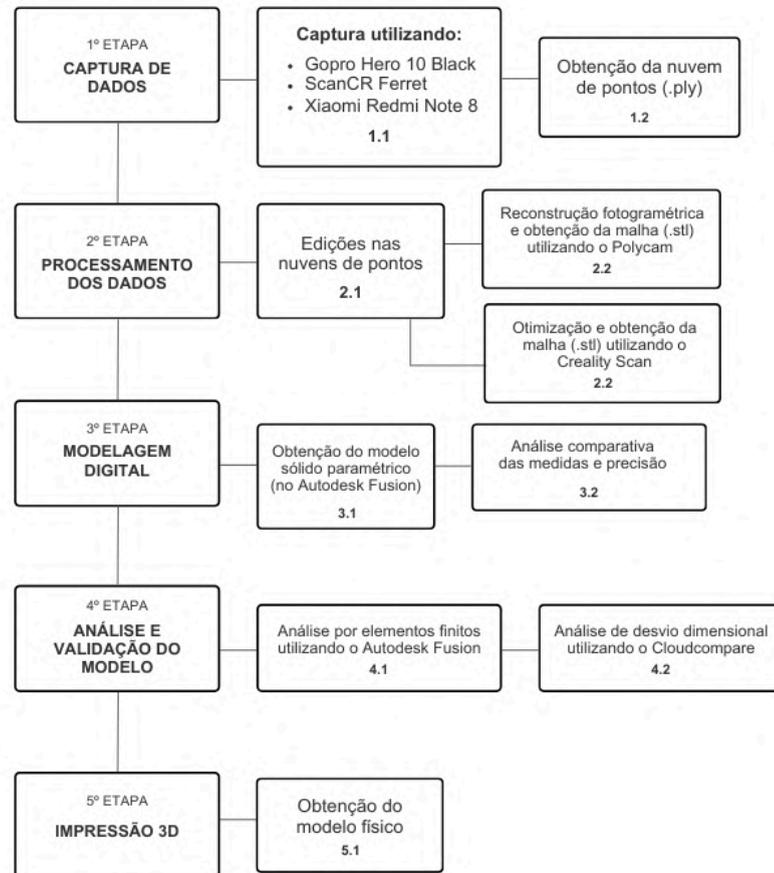
#### **3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO**

A principal proposta deste trabalho será utilizar tecnologias de digitalização 3D sem contato e de baixo custo, além de analisar a viabilidade da sua utilização em alguns casos específicos aplicadas à engenharia reversa e prototipagem 3D, realizar otimizações no modelo digital e, por fim, realizar análises de desvio para verificar a precisão comparando a peça digitalizada e o modelo de referência.

Nesse contexto, a engenharia reversa será aplicada em dois estudos de caso, são eles: utilização de tecnologias de digitalização 3D sem contato para obtenção do modelo 3D e impressão 3D de uma peça de reposição de um veículo antigo e estimativa volumétrica da cabeça de um boneco utilizando a fotogrametria digital e escaneamento 3D.

Nas etapas deste projeto será adaptada a metodologia apresentada por Lima (2003, p.9), seguindo-se as etapas apresentadas na figura 26. Dentre as atividades a serem seguidas têm-se: captura de dados, processamento dos dados, modelagem digital, análise e validação do modelo e impressão 3D. A captura de dados consiste em utilizar as tecnologias e técnicas de digitalização 3D para a obtenção da nuvem de pontos (.ply), a partir da nuvem de pontos será realizado o processamento de dados excluindo os outliers e obtendo-se os modelos em formato de malha (.stl). Nesta etapa, cabe ressaltar que para a obtenção da malha será utilizado na fotogrametria o software de reconstrução fotogramétrica Polycam, enquanto no escaneamento 3D será utilizado o Creality Scan (disponibilizado pelo fabricante do Scan CR Ferret). Após a obtenção da malha será utilizado o Autodesk Fusion para a criação do modelo 3D paramétrico, onde nele será possível realizar ajustes na peça, análises comparativas e análises por elementos finitos, deixando o modelo digital pronto para ser impresso em 3D.

Figura 26. Etapas utilizada no Projeto



Fonte: Próprio Autor (2024)

Neste projeto as tecnologias de digitalização 3D a serem utilizadas serão as que possuem baixo custo, estão acessíveis e se encontram disponíveis no laboratório de prototipagem da UFPE. Dentre elas, é interessante destacar algumas, como:

O RP LIDAR A1, que é um sensor LiDAR de baixo custo, custando em média R\$1.400, utilizado para mapeamento 2D e navegação em aplicações robóticas. As especificações do RP LIDAR A1 são apresentadas na tabela 04.

Tabela 04: Especificações do RP LIDAR A1

<b>Especificação RP LIDAR A1</b>
<b>Alcance:</b> 12 Metros
<b>Resolução angular:</b> 1°
<b>Precisão:</b> 1% da distância medida
<b>Campo de visão:</b> 360°
<b>Frequência de varredura configurável:</b> 2 a 10Hz
<b>Alimentação:</b> 5 Volts
<b>Custo:</b> em torno de R\$ 1.400

Fonte: (Próprio Autor, 2024)

O KINECT XBOX 360, que é um sensor desenvolvido pela Microsoft e também utilizado para rastreamento corporal e algumas aplicações de escaneamento 3D. No mercado, os principais softwares para realizar o escaneamento 3D utilizando o Kinect XBOX 360 são o Skanect e o Microsoft 3D Scan, no entanto, ambos foram descontinuados e não recebem mais atualizações. As especificações do KINECT XBOX 360 são apresentadas na tabela 5.

Tabela 05: Especificações do Kinect XBOX 360

<b>Especificação Kinect XBOX 360</b>
<b>Resolução Câmera RGB:</b> 640x 480 pixels;
<b>Resolução angular:</b> 1°
<b>Taxa de quadros:</b> 30 FPS;
<b>Resolução câmera infravermelho:</b> 320x240pixels;
<b>Precisão:</b> de 1 a 3cm
<b>Custo:</b> em torno de R\$ 149

Fonte: (Próprio Autor, 2024)

O SCAN CR Ferret, que é um scanner 3D de uso geral, é muito comum em aplicações de engenharia e para o escaneamento de objetos de médio porte. Através do SCAN CR Ferret é possível realizar a captura de dados e o seu processamento utilizando o software disponibilizado pela própria fabricante do modelo, o Creality Scan. As especificações do Scan CR Ferret são apresentadas na

tabela 6.

Tabela 06: Especificações do SCAN CR FERRET

<b>Especificação SCAN CR FERRET</b>
<b>Alcance:</b> entre 0.2 e 1 metro;
<b>Precisão de captura:</b> 0.5 mm;
<b>Resolução:</b> 0.16;
<b>Distância de digitalização:</b> 150 mm - 700mm;
<b>Digitalização mínima:</b> 50 x 50 x 50 mm;
<b>Custo:</b> em torno de R\$ 2.400

Fonte: (Próprio Autor, 2024)

Além disso, na fotogrametria será utilizado para a captura das fotos a Gopro modelo Hero 10 Black, e a câmera do smartphone Xiaomi Redmi Note 8 com as especificações apresentadas na tabela 7.

Tabela 07: Especificações do Xiaomi Redmi Note 8 e Gopro Hero 10 Black

<b>Especificação</b>	<b>XIAOMI REDMI NOTE 8</b>	<b>GO PRO HERO 10 BLACK</b>
Câmera:	48 Megapixels.	23 Megapixels.
Custo	em torno de R\$ 800	em torno R\$ 1.660

Fonte: (Próprio Autor, 2024)

Nesse sentido, ao longo dos estudos foram utilizados o Xiaomi Redmi Note 8, a Gopro Hero 10 Black e o Scan CR Ferret. Devido à baixa precisão e softwares descontinuados, o Kinect não foi utilizado. E, por ser mais apropriado para aplicações 2D, o RP LIDAR A1 também não foi utilizado. Dentre os softwares de reconstrução fotogramétrica, optou-se por utilizar o Polycam, pois apresenta boa precisão e não necessita de computadores avançados, visto que o processamento é realizado em nuvem.

### 3.2 CONFIGURAÇÃO E CALIBRAÇÃO DOS SISTEMAS UTILIZADOS

Como já apresentado, serão utilizados a Gopro Hero 10 Black, Xiaomi Redmi Note 8 e SCAN CR FERRET, além das especificações já demonstradas serão adotadas uma série de práticas com o objetivo de melhorar a qualidade dos modelos obtidos.

Na Fotogrametria a câmera permanecerá fixa e o objeto em estudo será rotacionado em 360° capturando-se imagens em todos os ângulos. Neste sistema a distância entre o objeto e a câmera foi de cerca de 40 centímetros, permitindo uma captura detalhada e sem distorções excessivas. Cabe destacar que, na fotogrametria quanto mais fotos melhor será a qualidade da reconstrução fotogramétrica obtida, no entanto o software utilizado, Polycam, recomenda coletar de 50 à 150 fotos para uma boa reconstrução. Além disso, também serão adotadas algumas práticas descritas na tabela 8.

Tabela 08: Práticas adotadas na fotogrametria

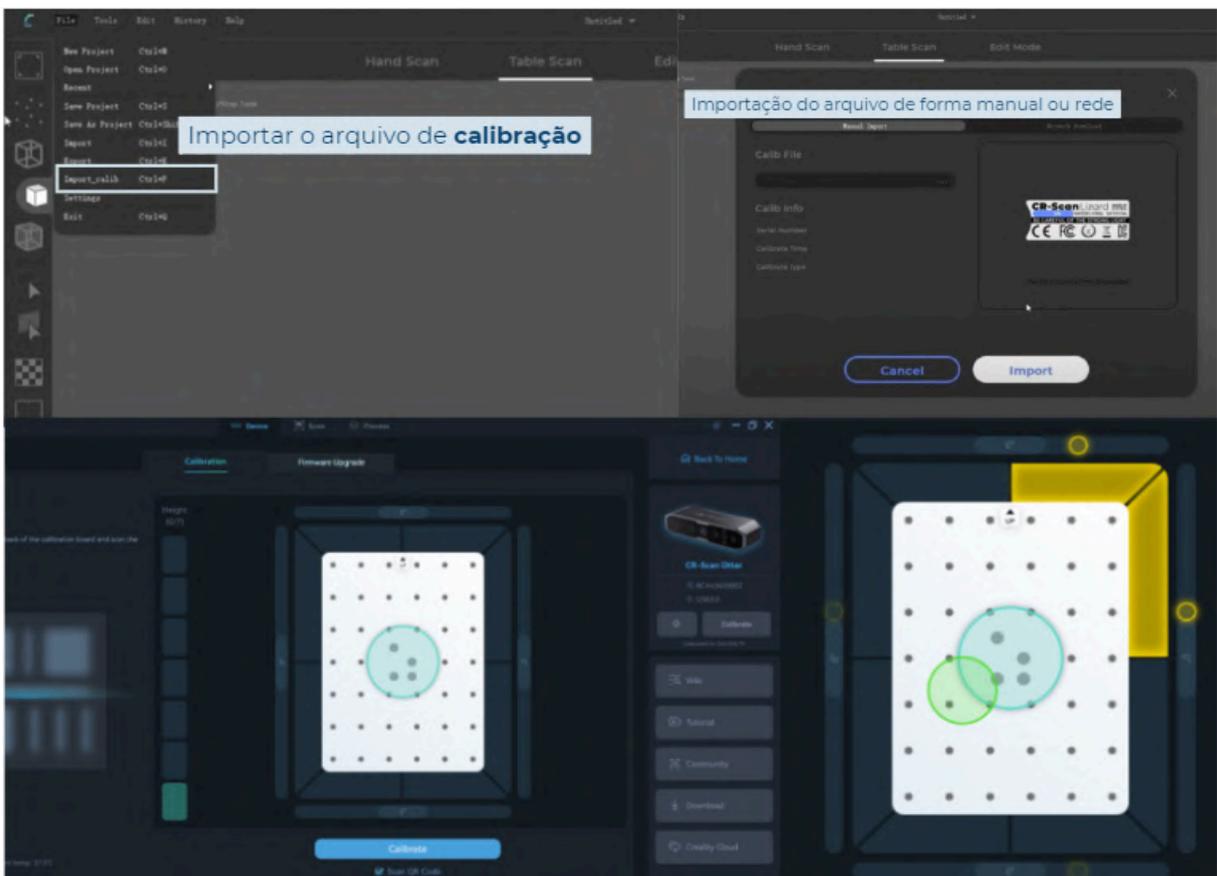
Utilização de cenário com iluminação adequada e uniforme, evitando regiões de sombreamento.
Utilização de fundo neutro e contrastante com a cor da peça;
Utilização da sensibilidade do sensor da câmera à luz, representada pela ISO, no menor valor possível, para diminuir o nível de ruído nas fotos;
Utilização de menor abertura da lente;
Utilização do temporizador, com o objetivo de evitar imagens trêmulas;

Fonte: (Próprio Autor, 2024)

Cabe destacar que no processo de fotogrametria 3D automatizada, o processo de calibração é feito de forma automática pelo software utilizado, Polycam. Visto que, ele utiliza os dados EXIF das imagens, como: distância focal, coordenadas do centro de projeção da imagem e coeficientes de distorção radial da lente, para realizar a calibração (Baleti et al., 2014). Além da calibração utilizando os parâmetros descritos anteriormente, o software é capaz de analisar cenas e refinar a calibração com base no padrão de imagens e geometria do objeto em estudo. Por este motivo, não é necessário realizar a calibração manual das câmeras utilizadas (Gopro Hero 10 Black e Xiaomi Redmi Note 8).

Ao se utilizar o SCAN CR FERRET o primeiro passo é a realização da calibração, conforme apresentado na figura 27. Nesse processo, é realizada a importação do arquivo de calibração fornecido pelo Creality 3D e realizada as leituras e procedimentos, de acordo com as recomendações do software disponibilizado pelo fabricante.

Figura 27. Calibração do Scan CR FERRET



Fonte: Próprio Autor (2024)

Cabe destacar que, durante o escaneamento, utilizando o CR FERRET, o objeto em estudo permaneceu fixo e o SCANNER em movimento ao redor do objeto para capturar o máximo de detalhes. Manteve-se uma distância média de 10 centímetros a 50 centímetros entre o scanner e o objeto em estudo e foram adotadas algumas práticas apresentadas na tabela 9.

Tabela 09: Práticas adotadas no escaneamento 3D

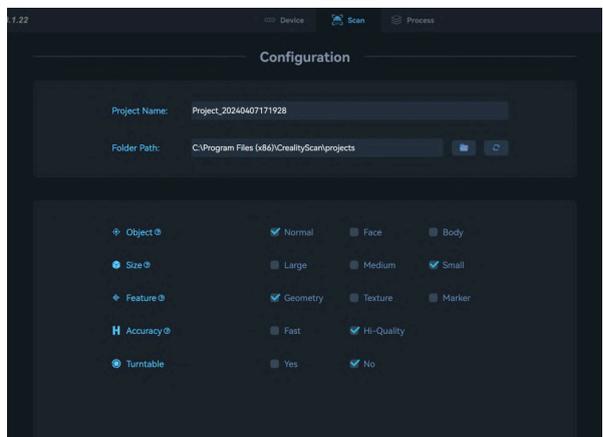
Utilização de cenário com iluminação adequada e uniforme, evitando regiões de sombreamento.
---

Utilização de fundo neutro;
-----------------------------

Fonte: (Próprio Autor, 2024)

Cabe destacar que durante o escaneamento no estudo de caso 1 e 2, foram utilizadas algumas configurações específicas, de acordo com as recomendações do fabricante, conforme é possível observar na figura 28.

Figura 28. Configurações utilizadas - SCAN CR FERRET

	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Configurações Utilizadas</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Object: normal (para o estudo de caso 1) e face (para o estudo de caso 2);</td> </tr> <tr> <td>Size: Small;</td> </tr> <tr> <td>Feature: Geometry;</td> </tr> <tr> <td>Accuracy: Hi-Quality;</td> </tr> <tr> <td>Turntable: No;</td> </tr> </tbody> </table>	Configurações Utilizadas	Object: normal (para o estudo de caso 1) e face (para o estudo de caso 2);	Size: Small;	Feature: Geometry;	Accuracy: Hi-Quality;	Turntable: No;
Configurações Utilizadas							
Object: normal (para o estudo de caso 1) e face (para o estudo de caso 2);							
Size: Small;							
Feature: Geometry;							
Accuracy: Hi-Quality;							
Turntable: No;							

Fonte: Próprio Autor (2024)

### 3.3 ESTUDO DE CASO 01: ENGENHARIA REVERSA DE UMA PEÇA DE REPOSIÇÃO DE VEÍCULO ANTIGO

Como já visto, uma das aplicações da Engenharia reversa é a sua utilização para fabricação de peças que não são mais fabricadas. Por isso, optou-se por utilizar a peça de reposição de um Gol Voyage, ano 1988, pois se trata de uma peça que não é mais produzida por meios convencionais de fabricação, mas que possui demanda de mercado.

Para a realização da engenharia reversa, a peça foi desmontada em 03 componentes básicos: corpo, aleta central e aleta lateral, conforme a figura 29.

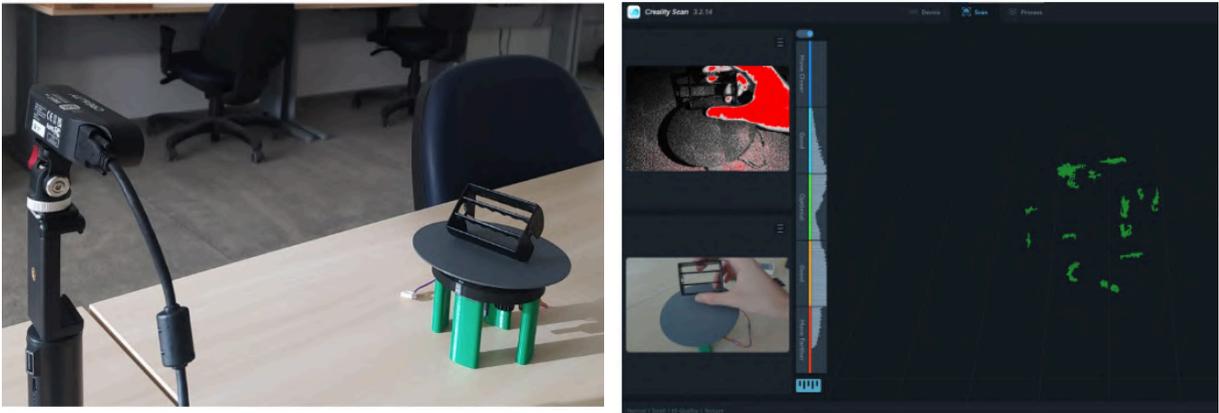
Figura 29. Difusor de Ar - Gol Voyage ano 1988



Fonte: (Próprio Autor, 2024)

Dentre as tecnologias de digitalização 3D sem contatos disponíveis, utilizou-se o Scan CR Ferret e o Xiaomi Redmi Note 8 para a realização do escaneamento 3D e fotogrametria, respectivamente. Para a realização do escaneamento a peça foi colocada em uma base fixa, movimentando o scanner ao longo da peça para serem realizadas leituras sob diferentes ângulos, conforme a figura 30.

Figura 30. Escaneamento utilizando o laser SCAN CR Ferret - Parte 01



Fonte: (Próprio Autor, 2024)

É possível acompanhar o escaneamento através do software disponibilizado pela fabricante a Creality 3D, que faz a interface com o scanner. No entanto, pelo fato da peça ser escura, o scanner não conseguiu realizar as leituras de maneira adequada, devido à baixa refletividade da cor preta. Na figura 30 é possível notar que o scanner consegue identificar a mão, mas não consegue identificar a peça. Diante desse desafio, optou-se por utilizar o escaneamento da peça suspensa sem nenhum objeto próximo, conforme representado na figura 31.

Figura 31. Escaneamento utilizando o laser SCAN CR Ferret - Parte 02



Fonte: (Próprio Autor, 2024)

Com isso, foi possível obter melhores resultados na obtenção dos dados para as aletas, no entanto para o corpo ainda não foi possível, conforme apresentado na

figura 32.

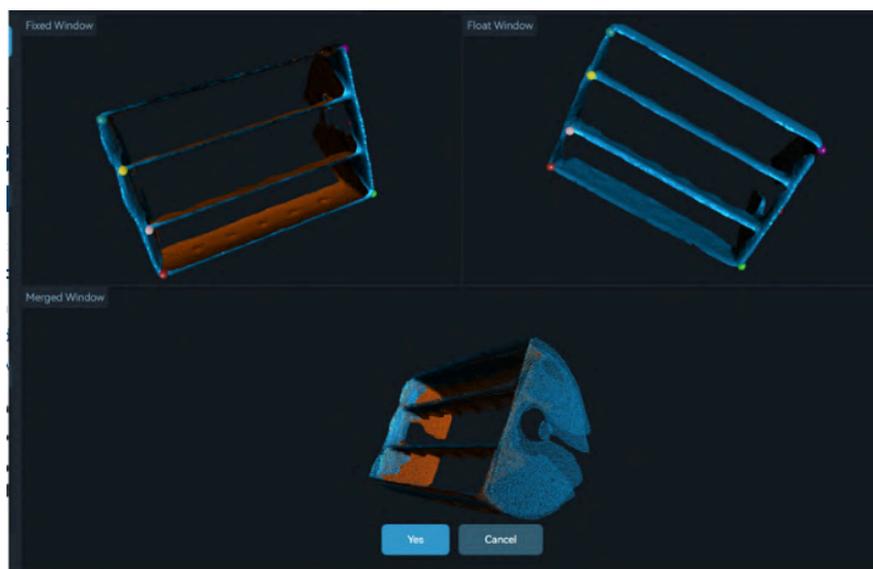
Figura 32. Resultado do Escaneamento - SCAN CR Ferret (Paleta Central)



Fonte: (Próprio Autor, 2024)

Uma outra alternativa para melhorar as leituras foi pintar a peça de branco aumentando a refletividade da peça e, conseqüentemente, a qualidade da leitura. Com isso, obteve-se melhores informações a respeito da peça. No entanto, devido às bordas finas e áreas de sombra, não foi possível obter uma boa qualidade final do modelo 3D após a fusão da nuvem de pontos, conforme a figura 33.

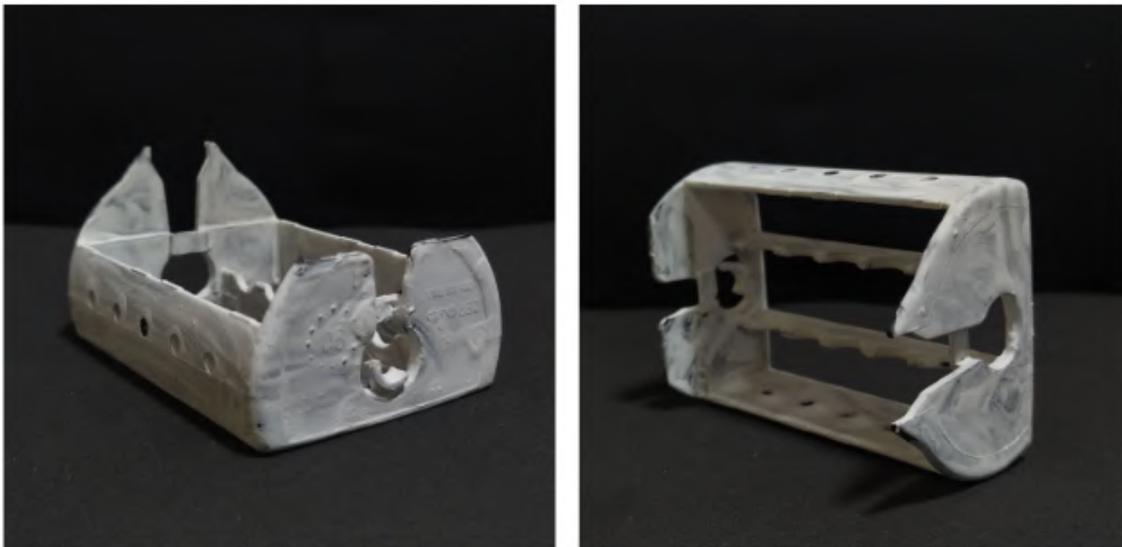
Figura 33. Resultado do Escaneamento - SCAN CR Ferret (Corpo)



Fonte: Próprio Autor (2024)

Como alternativa, foi realizada a fotogrametria digital, utilizando-se a câmera do Celular Xiaomi Redmi Note 8, Xiaomi Inc e o software de reconstrução fotogramétrica Polycam - Lidar 3D Scanner. Nesse procedimento, foram realizadas sucessivas fotografias do objeto sobre diferentes ângulos, conforme a figura 34.

Figura 34. Fotos utilizadas para a Reconstrução Fotogramétrica (Estudo de Caso 1)



Fonte: (Próprio Autor, 2024)

Durante a realização das fotos foram adotadas algumas medidas e configurações das câmeras, como a

- Utilização de fundo neutro e contrastante com a cor da peça;
- Utilização da sensibilidade do sensor da câmera à luz, representada pela ISO, no menor valor possível, nesse caso 100, para diminuir o nível de ruído nas fotos;
- Utilização de menor abertura da lente
- Utilização do temporizador, com o objetivo de evitar imagens trêmulas;
- Obtenção das imagens em formato RAW, com o objetivo de obter a imagem com a maior qualidade possível.

Com isso, foram capturadas 106 imagens, totalizando 78 megabytes, da peça sobre diferentes ângulos com as informações referentes às fotos apresentadas na tabela 10.

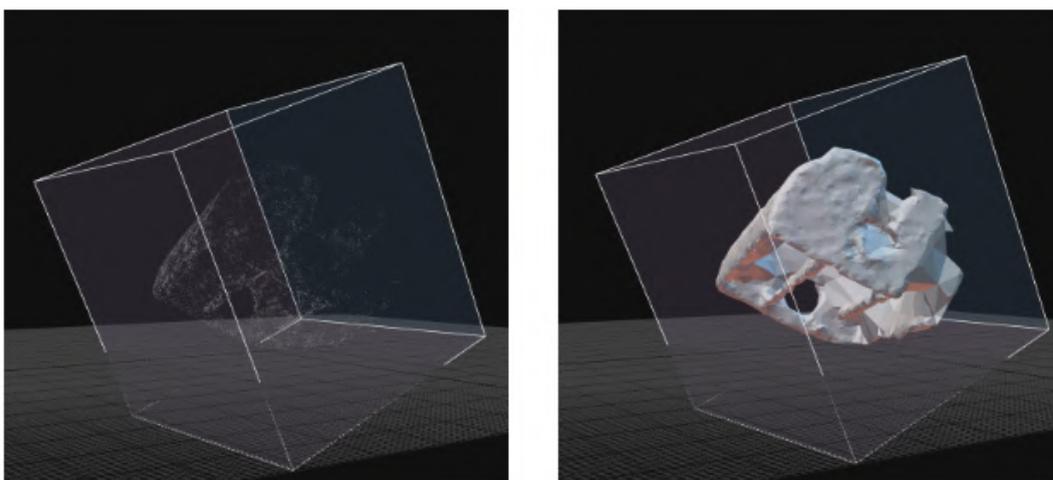
Tabela 10: Configurações da câmera utilizada (Xiaomi Redmi Note 8).

Câmera:	Redmi Note 8, Xiaomi
Abertura da lente:	F/2.2
Velocidade do Obturador:	1/30
ISO:	100
Distância focal:	1.66mm
Flash:	Sem Flash

Fonte: (Próprio Autor, 2024)

A partir das imagens capturadas, foi possível realizar a reconstrução para o respectivo processamento. Como processamento inicial, obteve-se a nuvem de pontos e reconstrução do sólido, conforme apresentado na figura 35.

Figura 35. Nuvem de Pontos - Reconstrução Fotogramétrica



Fonte: (Próprio Autor, 2024)

É possível ver algumas imperfeições na peça, por isso foi realizado um refinamento na nuvem de pontos, retirando outliers e criando máscaras para uma melhor separação do fundo da imagem e objeto a ser escaneado. Após essas correções, observou-se uma melhora nos resultados obtidos, conforme apresentado na figura 36.

Figura 36. Reconstrução Fotogramétrica (Peça na Cor Branca)



Fonte: Próprio Autor (2024)

Nesse caso, a peça está pintada de branco pois aproveitou-se a necessidade de pintar de branco para a realização do escaneamento 3D, mas após a retirada da tinta também realizou-se a reconstrução fotogramétrica da peça na cor escura, e a qualidade das reconstruções foram bem parecidas, embora a reconstrução utilizando a peça na cor branca tenha sido melhor, visto que a peça na cor preta apresenta uma superfície brilhosa.

De forma semelhante, foi realizada a captura de imagens utilizando a GoPro Hero 10 Black, com a qual foram capturadas 100 fotos (totalizando 72 megabytes), utilizando as boas práticas apresentadas anteriormente e utilizando as configurações da câmera apresentadas na tabela 11.

Tabela 11: Configurações da câmera utilizada (GoPro Hero 10 Black).

Dimensões:	5568 x 417
Resolução Horizontal e Vertical:	72 dpi
Escala de número f:	f/2.5
Tempo de Exposição:	1/240s
Velocidade ISO:	ISO-177
Distância Focal:	3mm
Abertura máxima:	2.5

Fonte: (Próprio Autor, 2024)

A partir das imagens capturadas, foi possível obter a reconstrução fotogramétrica apresentada na figura 37.

Figura 37. Reconstrução Fotogramétrica (Peça na Cor Original)



Fonte: (Próprio Autor, 2024)

Realizando-se os mesmos procedimentos, foi realizada a reconstrução fotogramétrica para as demais peças do modelo, conforme a figura 38.

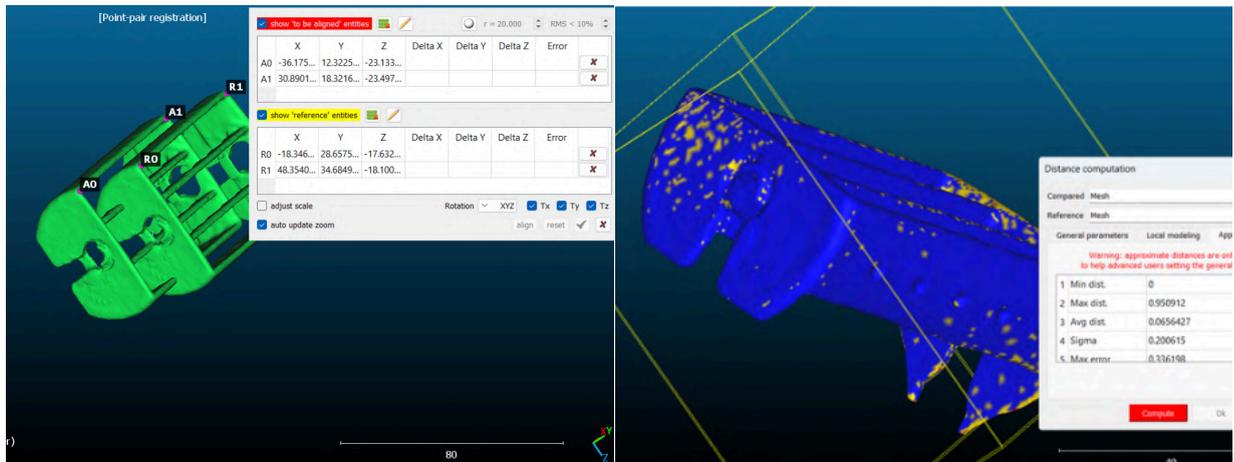
Figura 38. Reconstrução Fotogramétrica (Estudo de Caso 01)



Fonte: (Próprio Autor, 2024)

Com o objetivo de realizar uma análise comparativa entre os modelos obtidos através da Fotogrametria utilizando o Xiaomi Redmi Note 8 e Gopro Hero 10 Black, realizou-se uma análise de desvio dimensional utilizando o Cloudcompare, conforme apresentado na figura 39.

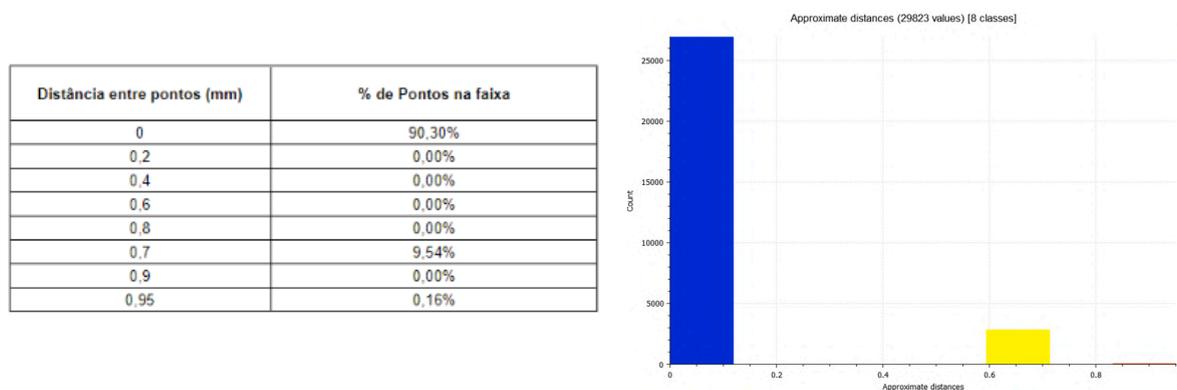
Figura 39. Análise de desvio dimensional no Cloudcompare



Fonte: (Próprio Autor, 2024)

A partir da análise, obteve-se que a máxima distância entre os pontos foi de 0.95mm e um desvio padrão de 0.2mm. A distribuição dos pontos está demonstrada no histograma e tabela representados na figura 40.

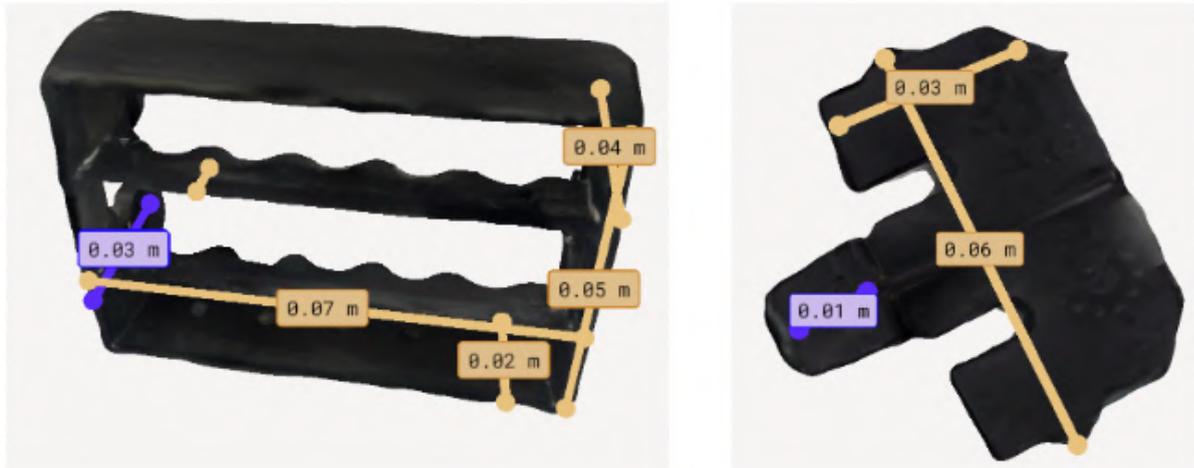
Figura 40. Resultados da análise no Cloudcompare



Fonte: Próprio Autor (2024)

Após a reconstrução fotogramétrica do modelo, realizou-se a exportação do arquivo no formato .STL para utilização num software CAD (que nesse caso foi o Autodesk Fusion). neste software, a malha gerada na reconstrução fotogramétrica foi transformada em um corpo sólido para, a partir disso, realizar-se correções, como o da profundidade dos furos, imperfeições e redimensionamento deixando-o numa escala mais próxima ao modelo de referência, conforme a figura 41.

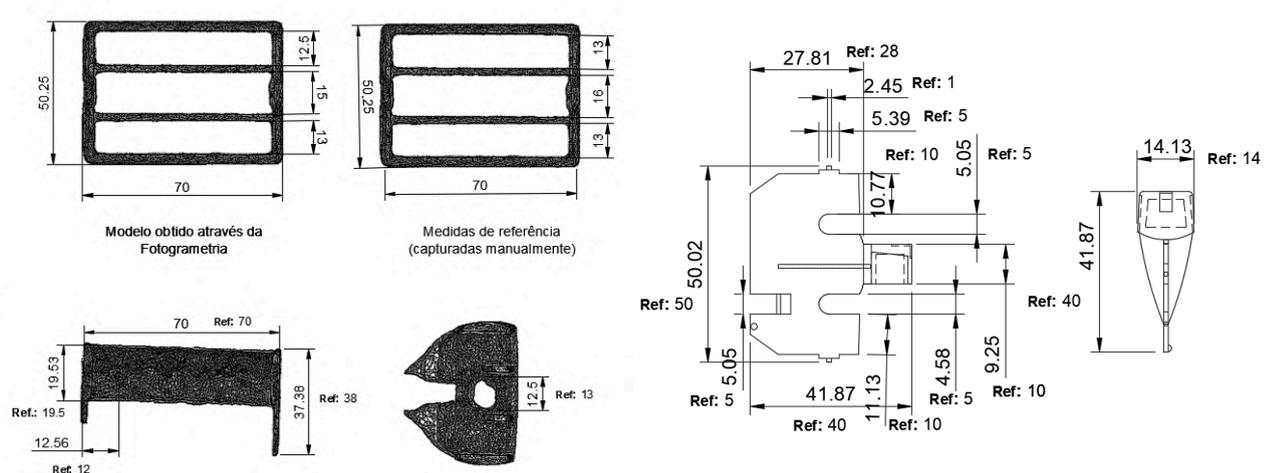
Figura 41. Análise das Medidas no Polycam



Fonte: Próprio Autor (2024)

Nesse caso, pelo fato de não possuir a modelagem CAD da peça real, foram capturadas medidas de referência da peça, suficientes para garantir um bom encaixe entre os componentes e aspecto visual semelhante ao da peça original. Um comparativo entre as medidas de referência e medidas obtidas através da fotogrametria podem ser vistas através da figura 42.

Figura 42. Comparativo entre medidas obtidas e de referência



Fonte: Próprio Autor (2024)

Por se tratar de uma análise de medidas lineares para análise da precisão, será utilizado o erro absoluto, pois dessa forma é possível acompanhar as tolerâncias permitidas. Para isso, todas as medidas analisadas foram compiladas e são representadas de forma comparativa na tabela 12. A partir dessas medidas, encontrou-se um erro absoluto médio de 0.57mm, sendo o maior erro apresentado de 1.87mm, e um desvio padrão de 0.56mm.

Tabela 12. Análise Comparativa das Medidas (Referência x Fotogrametria)

Medida no Modelo de Referência (mm)	Medidas no Modelo Obtido Através da Fotogrametria	Erro Absoluto (mm)
70	70	0,00
13	13	0,00
16	15	1,00
13	12,5	0,50
50,25	50	0,25
19,5	19,53	0,03
12	12,56	0,56
38	37,38	0,62
13	12,5	0,50
50	50,02	0,02
5	5,05	0,05
5	4,58	0,42
40	41,87	1,87
10	11,13	1,13
10	9,25	0,75
5	5,05	0,05
10	10,77	0,77
5	5,39	0,39
1	2,45	1,45
28	27,81	0,19
40	41,87	1,87
14	14,13	0,13
<b>Média</b>		<b>0,57</b>

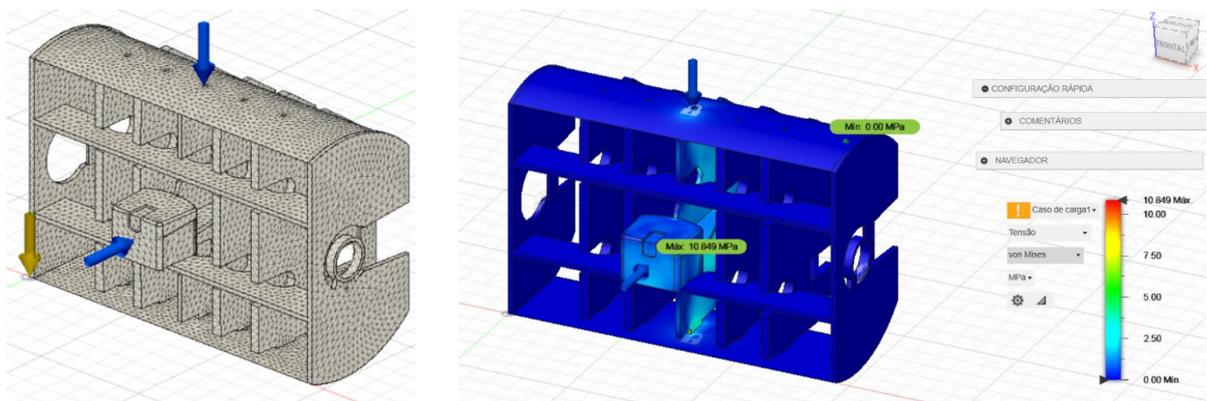
Fonte: (Próprio Autor, 2024)

Nesse caso, também foi realizada uma análise estrutural do modelo com o

objetivo de validar a resistência obtida para os diferentes materiais na impressão 3D. Por se tratar de um difusor de ar, a peça ficará no painel frontal do carro e não será submetida a esforços ou grandes impactos, onde seu uso estará relacionado à operação manual dos usuários ao ajustar para direcionar o fluxo de leves impactos ou vibrações. Sendo assim utilizou-se uma força relativamente baixa na ordem dos 30N para realizar a análise do componente utilizando o ABS (Acrlonitrila Butadieno Estireno), um material muito comum na impressão 3D.

Realizando-se a análise estrutural utilizando o critério de Von Mises obteve-se a tensão máxima de 10,849 megapascal, conforme apresentado na figura 43. Sabendo que a tensão de escoamento do ABS é de 40 megapascal, é possível concluir que a peça resistirá aos esforços a qual será submetida.

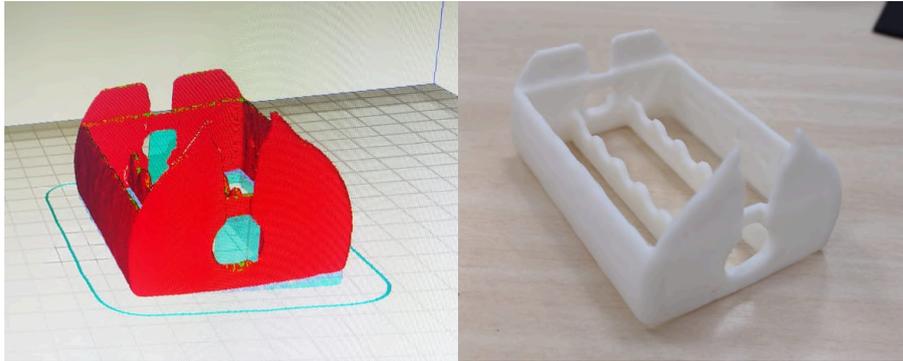
Figura 43. Análise por elementos finitos



Fonte: (Próprio Autor, 2024)

O modelo digital obtido e validado no Autodesk Fusion, foi exportado no formato .STL para ser utilizado no software de fatiamento e impressão 3D, nesse caso, utilizou-se o Ultimaker Cura, conforme a figura 44.

Figura 44. Peça Impressa em 3D



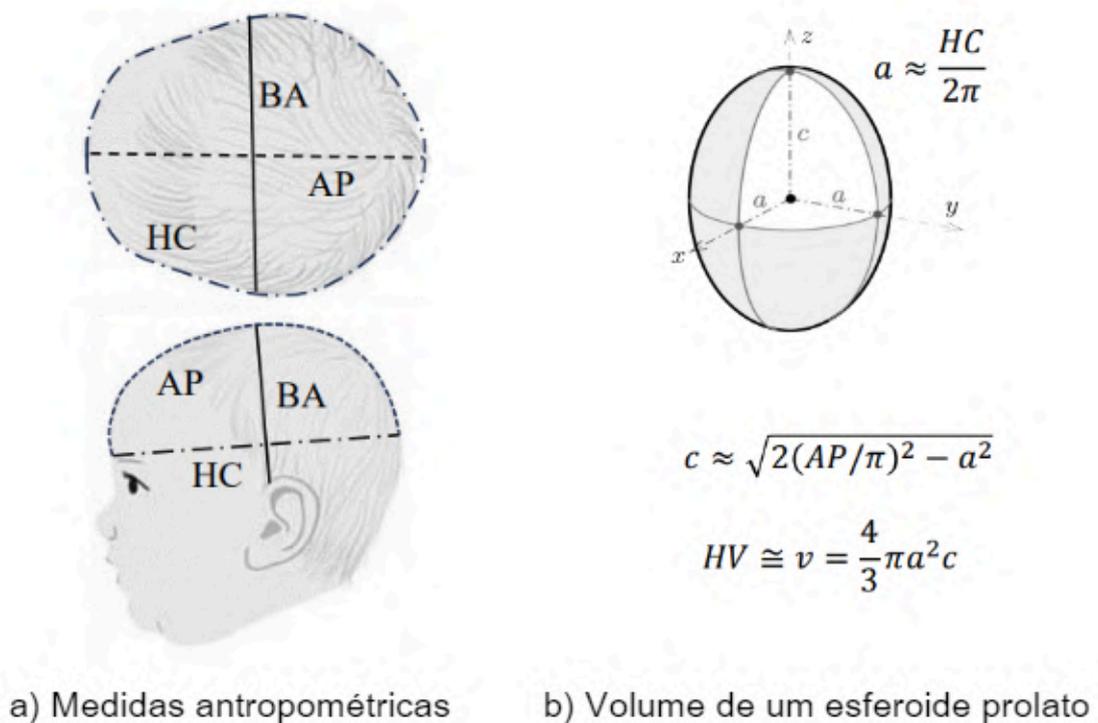
Fonte: (Próprio Autor, 2024)

Durante a impressão, utilizou-se suporte para facilitá-la, visto que a peça possui uma base curva, conforme é possível ver na figura 44. Dentre as opções de material, utilizou-se o ABS, pelo fato de apresentar a resistência necessária para o caso descrito, apresentar boa resistência ao calor e ter um bom custo benefício. Além disso, na impressão utilizou-se um bico de 0.3mm garantindo um bom nível de detalhamento e precisão, o tempo médio de impressão foi de 7h e 41 minutos e o custo estimado com o material foi de R\$2,79, para as aletas e demais componentes o custo foi de R\$ 1,85 e o tempo médio de impressão foi de 1h.

### 3.4 ESTUDO DE CASO 02: PREVISÃO DO VOLUME DA CABEÇA DE UM BONECO

Além das aplicações na indústria, a Engenharia Reversa é muito utilizada na área da saúde para a obtenção de medidas antropométricas. Nesse sentido, serão utilizadas as tecnologias de digitalização 3D com o objetivo de quantificar o volume da cabeça de um boneco, onde a aplicação desse estudo de caso servirá como ponto de partida para avaliação do desenvolvimento neurológico em bebês prematuros. No Brasil, a principal forma de obter essa medida é correlacionando algumas medidas da cabeça de um bebê e aproximando-as ao do modelo matemático de um esferóide para estimativa de volume, conforme apresentado na figura 45.

Figura 45. Estimativa do volume da cabeça de bebês



Fonte: Próprio Autor (2024)

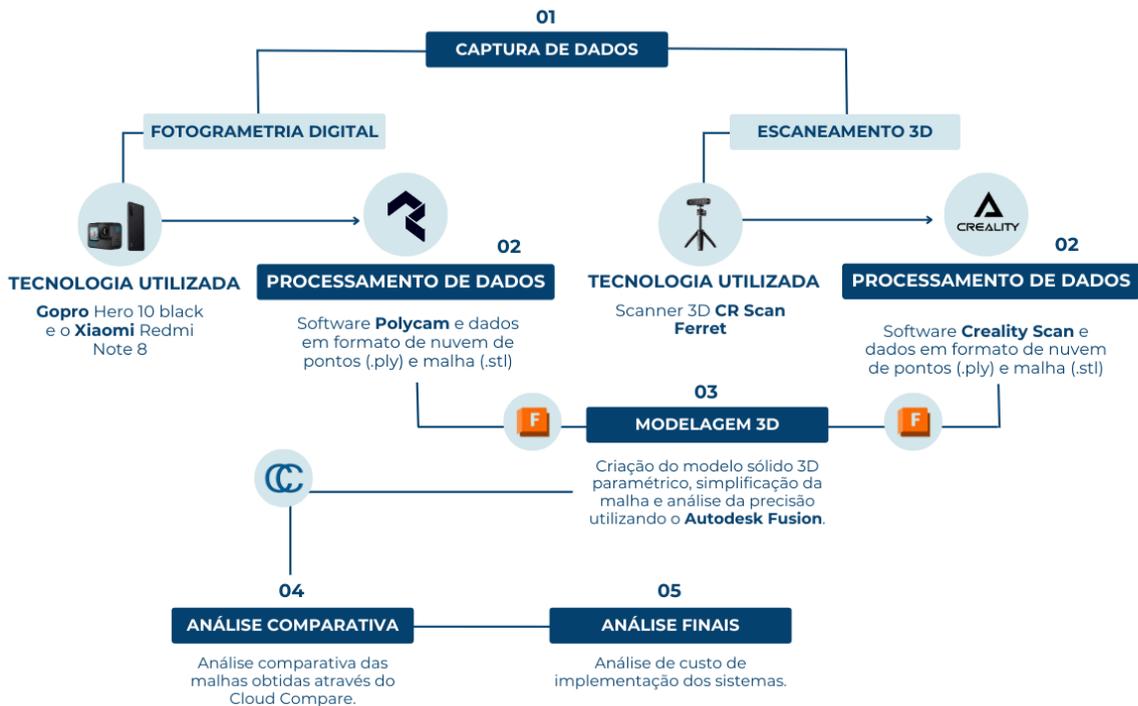
Na figura 45 é possível ver as medidas obtidas e o modelo esferóide utilizado para estimativa do volume, onde “a” representa o raio do eixo maior e “c” o raio do eixo menor. Nesse estudo de caso, alguns requisitos devem ser considerados, são

eles:

- O processo deve ser rápido, apresentando o menor tempo de captura;
- Apresentar uma alta precisão na estimativa do volume;
- Ser adequado para bebês.

Utilizando os equipamentos disponíveis foi realizada a Fotogrametria utilizando o Smartphone Xiaomi Redmi Note 8, Gopro Hero 10 Black e o Scanner 3D - Scan CR Ferret. Um resumo do processo realizado está esquematizado na figura 46.

Figura 46. Processo esquematizado (Estudo de caso 2)



Fonte: Próprio Autor (2024)

Cabe destacar que o processo utilizado no estudo de caso 2 é semelhante ao utilizado no estudo de caso 1, com exceção apenas da impressão 3D e análise estrutural que foram realizadas apenas no estudo de caso 1.

### 3.4.1 FOTOGRAMETRIA UTILIZANDO O SMARTPHONE

Seguindo as boas práticas para a fotogrametria já descritas anteriormente, como boa iluminação e cenário com contraste, realizou-se a captura de fotos

utilizando o smartphone Xiaomi Redmi Note 8, conforme apresentado na figura 47.

Figura 47. Fotos utilizadas para a Reconstrução Fotogramétrica (Estudo de Caso 2)



Fonte: (Próprio Autor, 2024)

No total, foram capturadas 150 fotos em diferentes ângulos e posições, totalizando 621 megabytes de armazenamento e as informações dos dados EXIF são apresentadas na tabela 13.

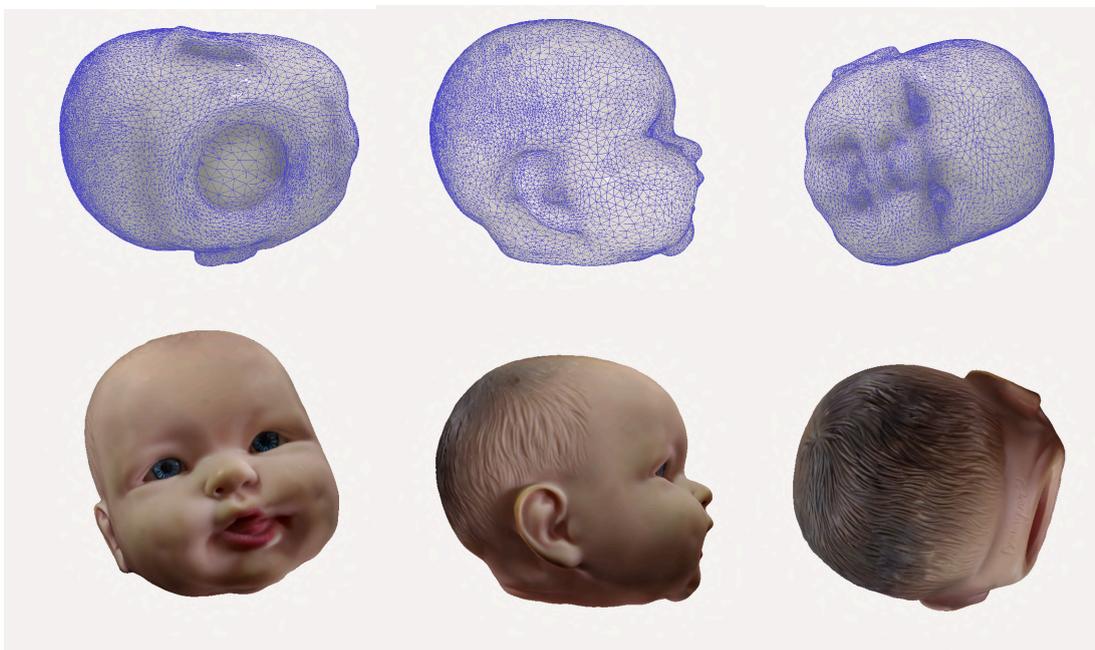
Tabela 13. Configurações da câmera utilizada (Xiaomi Redmi Note 8) (Caso 2)

Câmera:	Redmi Note 8, Xiaomi
Abertura da lente:	F/2.2
Velocidade do Obturador:	1/30
ISO:	100
Distância focal:	1.66mm
Flash:	Sem Flash

Fonte: Próprio Autor (2024).

A partir delas, foi utilizado o software Polycam para a reconstrução fotogramétrica, gerando a nuvem de pontos e malha apresentada na figura 48.

Figura 48. Reconstrução Fotogramétrica (Estudo de Caso 02)



Fonte: (Próprio Autor, 2024)

### 3.4.2 FOTOGRAMETRIA UTILIZANDO A GOPRO HERO 10 BLACK

De forma análoga, foi realizada a captura de fotos utilizando a GOPRO HERO 10 Black, onde cada imagem apresenta os dados EXIF apresentados na tabela 14.

Tabela 14. Configurações da câmera utilizada (Gopro Hero 10 Black) (Caso 2)

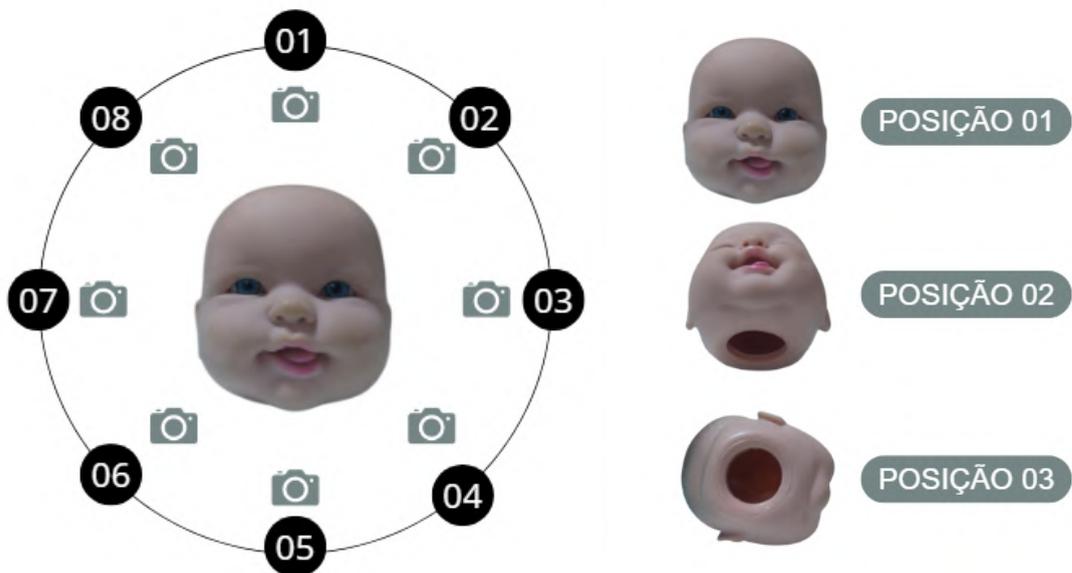
Dimensões:	5568 x 417
Resolução Horizontal e Vertical:	72 dpi
Escala de número f:	f/2.5
Tempo de Exposição:	1/240s
Velocidade ISO:	ISO-177
Distância Focal:	3mm
Abertura máxima:	2.5

Fonte: Próprio Autor (2024).

Um outro aspecto importante a se analisar durante este processo é o tempo de captura de fotos, visto que quanto menor o tempo mais adequado será o processo para ser utilizado em bebês, pois quando se trata de medições antropométricas o modelo a ser escaneado é móvel.

Com o objetivo de reduzir o tempo, calculou-se o número mínimo de fotos a serem tiradas durante o processo. Como já visto, alguns autores recomendam pelo menos 70% de sobreposição entre as imagens durante a reconstrução fotogramétrica, no caso em estudo uma foto é capaz de cobrir pelo menos 14% do objeto em estudo, logo a parte não sobreposta de cada foto será de 30%. Com isso, para capturar 100% do objeto será recomendado cerca de 24 fotos, o que se aproxima com o valor mínimo recomendado pelo software utilizado, que é de 20 fotos. Como as fotos foram capturadas em 3 posições diferentes, foram realizadas cerca de 8 capturas em cada posição, conforme apresentada na figura 49.

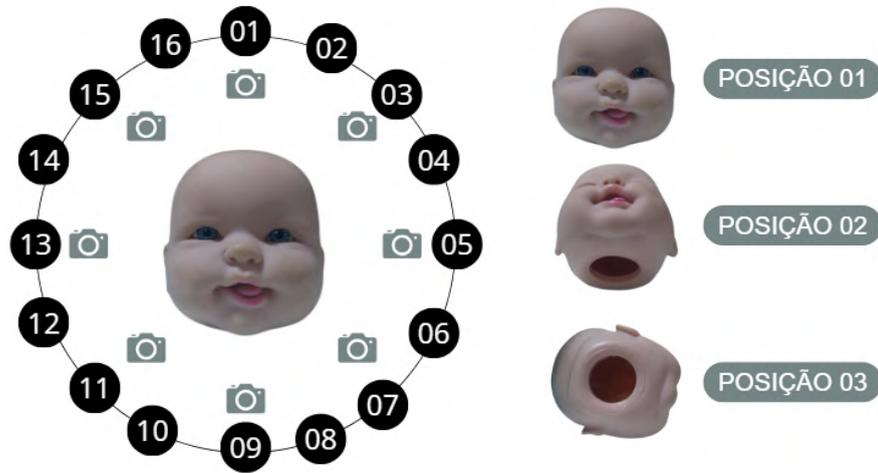
Figura 49. Posições para captura de fotos (24 fotos)



Fonte: Próprio Autor (2024)

No entanto, ao capturar 24 fotos com a câmera nas posições especificadas na figura 49, o software não foi capaz de realizar as reconstruções fotogramétricas. Sendo assim, entre cada espaço foi acrescentado a captura de mais uma imagem, totalizando 48 fotos no total como mínimo recomendado, conforme apresentado na figura 50.

Figura 50. Posições para captura de fotos (48 fotos)



Fonte: Próprio Autor (2024)

Sendo assim, foram realizadas capturas de 48 fotos e um vídeo, conforme apresentado na tabela 15.

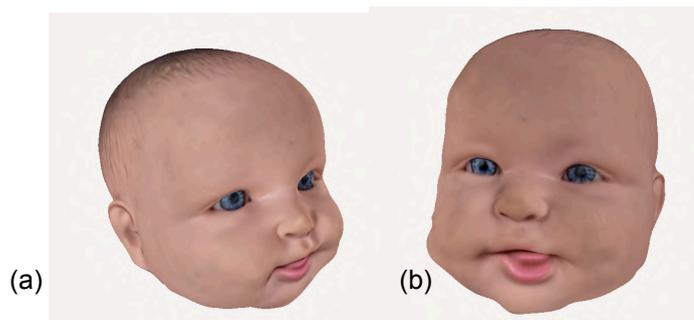
Tabela 15: Informações das fotos obtidas através da GoPro

Informações Utilizadas	Tempo de Captura (s)	Armazenamento Total (KB)
48 fotos	144 segundos	212.978KB
Vídeo	60 segundos	69.574KB

Fonte: Próprio Autor (2024).

Cabe destacar que o vídeo de 60 segundos foi dividido em 180 frames, utilizando uma ferramenta de extração de frames e, a partir dessas imagens, foi realizada a reconstrução fotogramétrica dos modelos conforme apresentado na figura 51.

Figura 51. Reconstrução Fotogramétrica GoPro (a) 48 fotos (b) vídeo



Fonte: Próprio Autor (2024)

### 3.4.3 ESCANEAMENTO UTILIZANDO O SCAN CR-FERRET

Nesta etapa foi realizada a captura de dados do objeto utilizando o Scan CR-Ferret, conforme apresentado na figura 52.

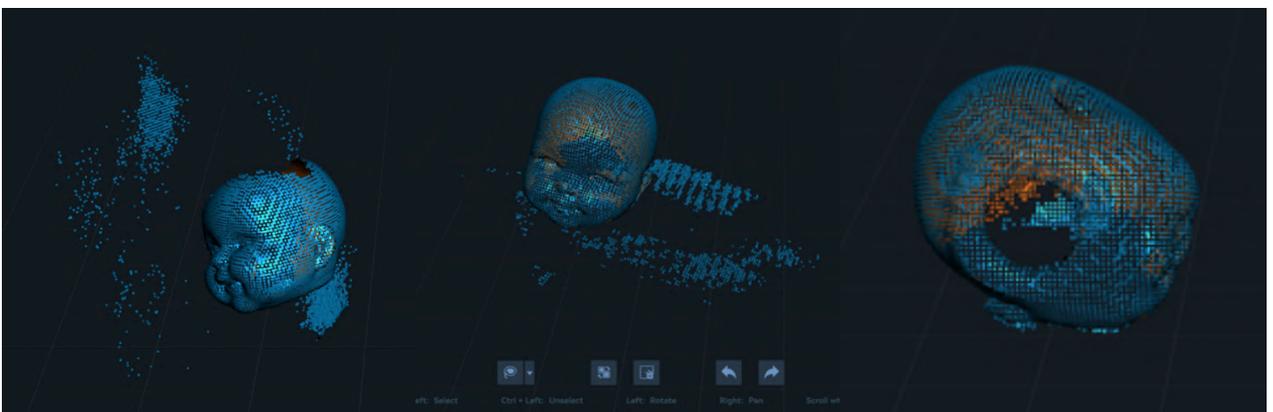
Figura 52. Escaneamento utilizando o SCAN CR FERRET



Fonte: Próprio Autor (2024)

Foram realizados 3 escaneamentos com a cabeça em 3 posições distintas, com o objetivo de evitar áreas de oclusão garantindo o melhor resultado possível, conforme apresentado na figura 53.

Figura 53. Nuvem de pontos obtida (estudo de caso 2)



Fonte: Próprio Autor (2024)

Na figura 53, também é possível perceber que a nuvem de pontos apresenta outliers. Por isso, será realizada uma exclusão dos pontos discrepantes evitando que o software realize reconstruções incorretas, a nuvem de pontos após a exclusão dos outliers é apresentada na figura 54.

Figura 54. Edição e otimização na nuvem de pontos (estudo de caso 2)



Fonte: Próprio Autor (2024)

Cabe ressaltar que os 3 escaneamentos realizados não foram capazes de capturar a cabeça por completo, onde algumas partes oclusas em um dos escaneamentos foram apresentadas em outro. Sendo assim, foi necessário realizar uma mesclagem entre a nuvem de pontos utilizando o próprio software da Creality Scan, o modo automático de mesclagem não apresentou bons resultados, visto que o software não foi capaz de realizar as correspondências da forma correta, por isso a mesclagem foi realizada de forma manual utilizando as correspondências entre os pontos apresentadas na figura 55.

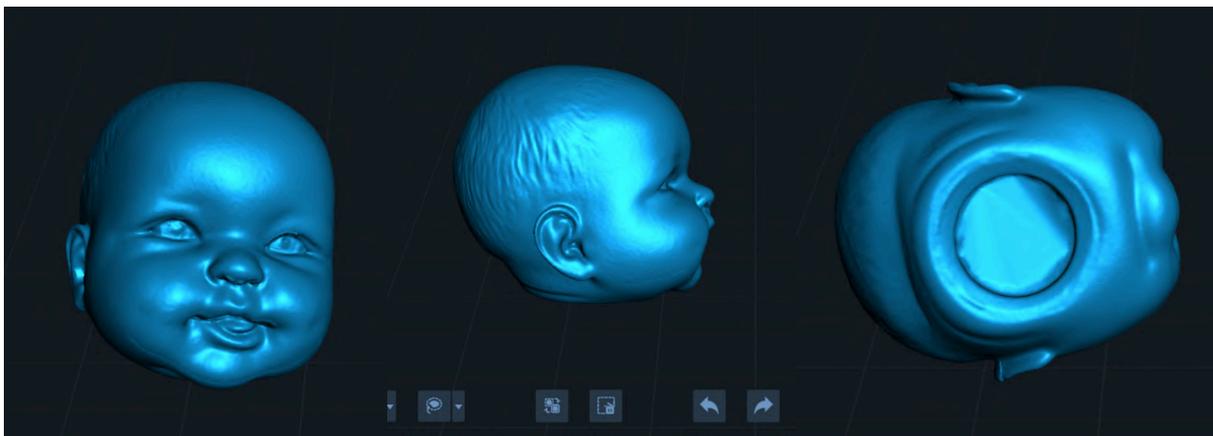
Figura 55. Fusão de malhas (Creality Scan)



Fonte: Próprio Autor (2024)

O processo de mesclagem entre as malhas e correspondências entre os pontos foram realizados duas vezes obtendo-se o modelo 3D final com uma boa qualidade, conforme apresentado na figura 56.

Figura 56. Modelo digital 3D (Scan CR Ferret)



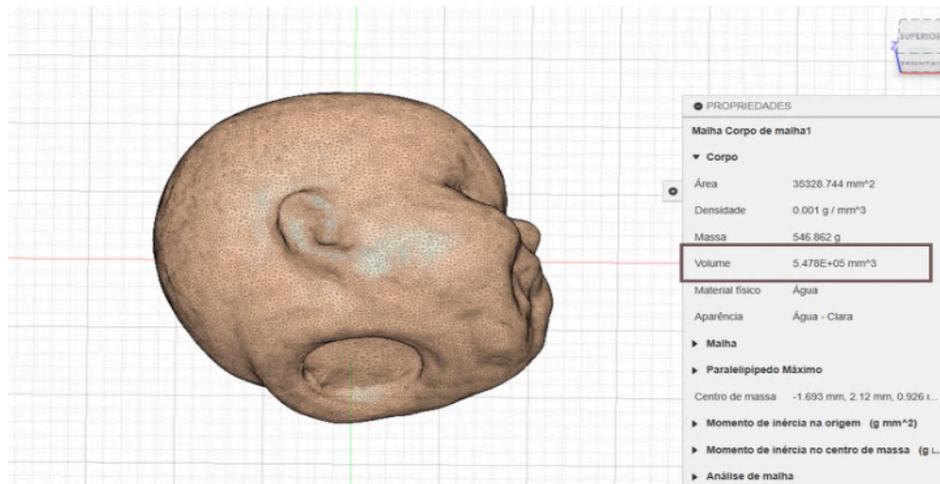
Fonte: Próprio Autor (2024)

#### 3.4.4 MODELO CAD 3D

Como resultado da etapa anterior, obteve-se a nuvem de pontos e a malha em formato .STL, A partir disso, foi importado o arquivo no Autodesk Fusion, realizada uma simplificação da malha, criação de uma casca para análise do modelo digital e transformação em um corpo sólido. Além disso, cabe destacar que para análises comparativas entre o modelo real e o modelo digitalizado, utilizou-se como medida de referência o volume real da cabeça do boneco.

Para calcular o volume utilizou-se o método de medição por imersão, por se tratar de uma cabeça oca, o método consiste em preencher a cabeça com água e medir a capacidade volumétrica, nesse caso a capacidade foi de 547 ml, indicando um volume de aproximadamente  $547.000 \text{ mm}^3$ , sabendo  $1 \text{ ml}$  corresponde a  $1.000 \text{ mm}^3$ . E por se tratar da análise de um objeto irregular, o erro relativo se torna mais adequado para avaliação da digitalização, pois assim é possível entender o desvio de forma comparativa levando em conta a magnitude total da cabeça. Nesse sentido, utilizando a ferramenta de propriedade do Autodesk Fusion é possível encontrar o volume estimado do corpo, conforme apresentado na figura 57.

Figura 57. Análise da Malha no Autodesk Fusion



Fonte: Próprio Autor (2024)

Analisando-se cada modelo de forma separadamente, foi possível estimar os volumes separadamente e para cada volume o erro relativo, em relação a medida de referência, conforme a tabela 16.

Tabela 16: Análise comparativa entre os modelos digitais obtidos através de cada tecnologia

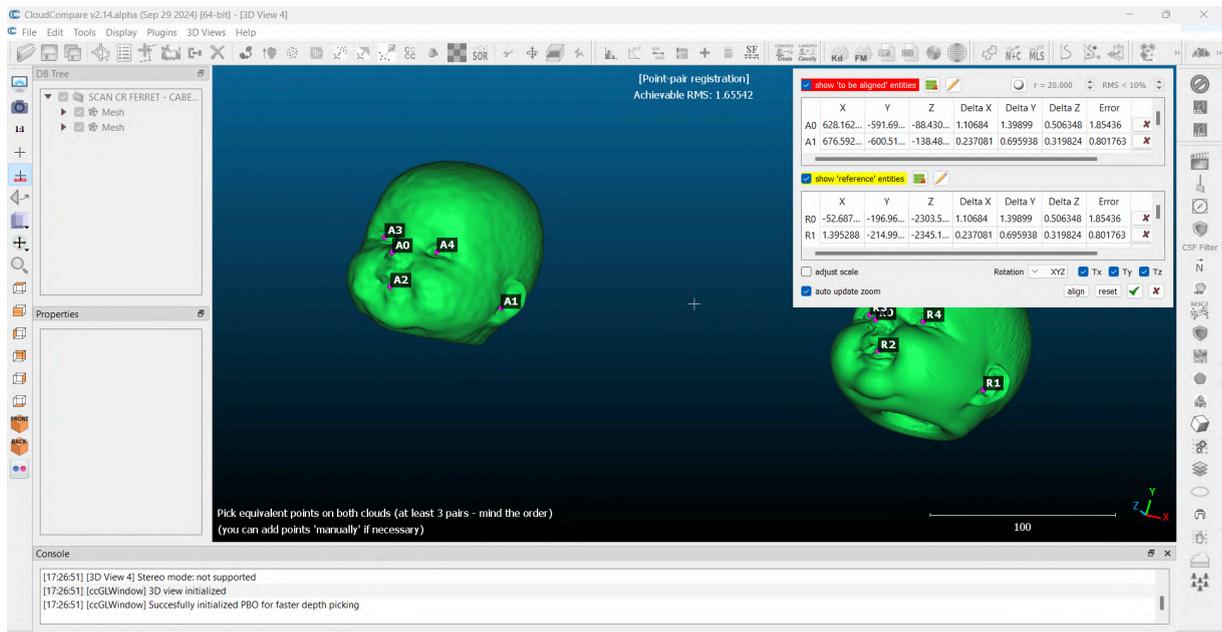
Descrição	Tempo de Captura (s)	Volume Medido (mm <sup>3</sup> )	Área (mm <sup>2</sup> )	Erro Relativo
Xiaomi Redmi Note 8 (150 fotos)	450	548.100	35601.548	0.182%
GoPro (48 fotos)	144	547.780	35328.744	0.143%
Gopro (Vídeo)	60	547.850	35334.821	0.155%
Scan-CR Ferret	150	547.100	36933.551	0.018%

Fonte: Próprio Autor (2024).

### 3.4.5 COMPARAÇÃO ENTRE MALHAS (CLOUD COMPARE)

Conforme apresentado na tabela 14, os modelos que apresentaram menor erro foram o escaneamento utilizando o Scan CR Ferret e as fotos capturadas através da Gopro. Com isso, foi realizada uma análise comparativa dos modelos utilizando o software Cloud Compare. Para isso, foi realizada a importação das nuvens de pontos e alinhamento dos pontos para que as malhas coincidissem, conforme apresentado na figura 58.

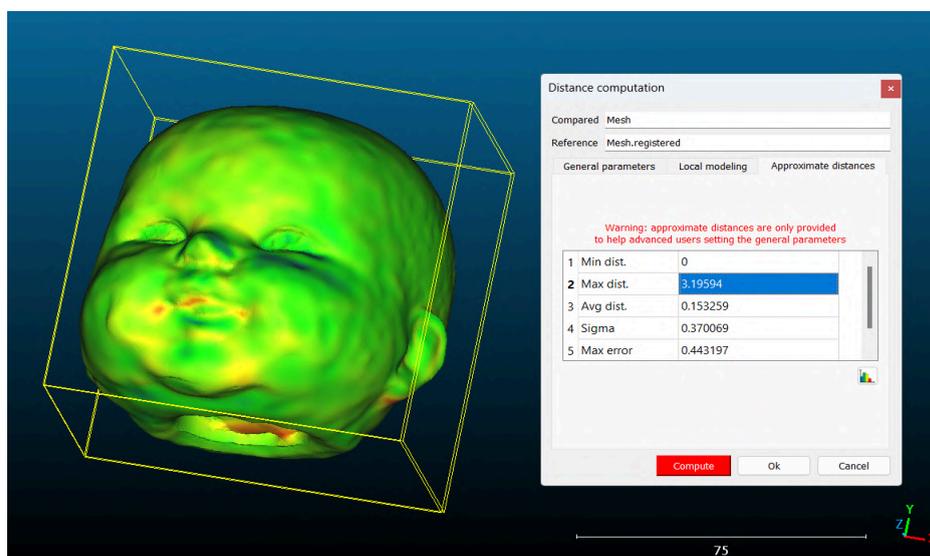
Figura 58. Alinhamento de malhas no Cloudcompare



Fonte: Próprio Autor (2024)

Com as malhas alinhadas, utilizou-se a função “Compute cloud/mesh distance”, sendo possível analisar as distâncias entre as nuvens de pontos conforme apresentado na figura 58. As regiões em verde representam os pontos coincidentes, as regiões em vermelho apresentaram uma diferença de cerca de 3 milímetros e as regiões em amarelo apresentam uma diferença de cerca de 2 milímetros, conforme apresentado na figura 59.

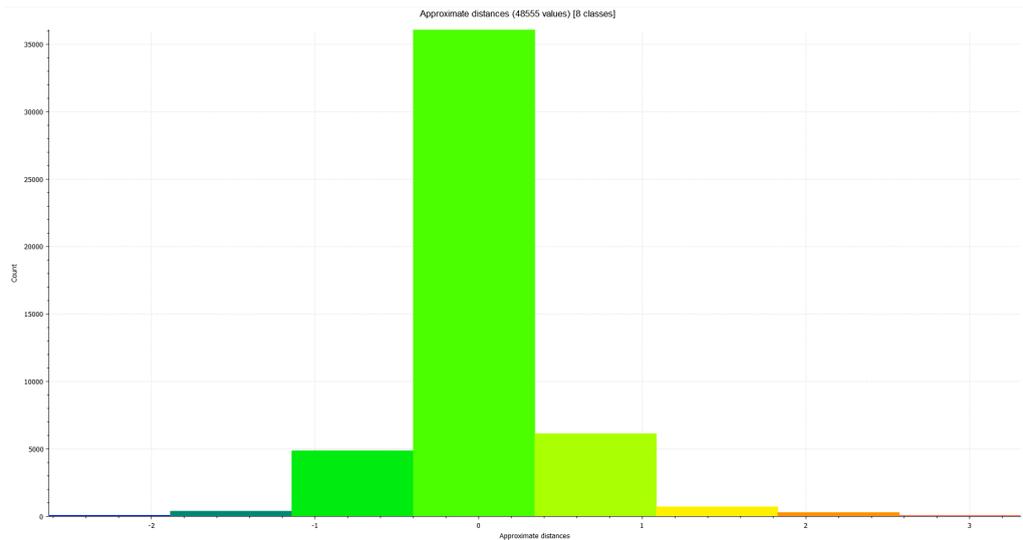
Figura 59. Análise do desvio dimensional no Cloudcompare (caso 2)



Fonte: Próprio Autor (2024)

Através do Cloudcompare, também foi possível verificar que a máxima distância entre os pontos foi de 3.196 milímetros e a diferença entre os pontos apresentou um desvio padrão médio de 0.37 milímetros. É possível analisar a distribuição entre os pontos no histograma apresentado na figura 60.

Figura 60. Histograma de distribuição dos pontos



Fonte: Próprio Autor (2024)

Com base no Histograma apresentado, compilou-se a distribuição dos pontos, sendo possível identificar que 74.28% dos pontos foram coincidentes e os demais apresentaram uma diferença, conforme apresentado na tabela 17.

Tabela 17: Análise do desvio dimensional no Cloudcompare (caso 2)

<b>Distância entre os pontos (mm)</b>	<b>% de pontos na faixa</b>
0 (pontos coincidentes)	74.28%
De 0-1mm	22.63%
De 1-2mm	2.25%
De 3-3.14mm	0.85%

Fonte: Próprio Autor (2024).

Como resultado, é possível perceber que cerca de 96.91% não apresentaram nenhuma diferença ou apresentaram uma diferença de até 1 milímetro mostrando que os modelos obtidos pela fotogrametria, utilizando a GOPRO e Scan CR Ferret apresentam pequenas diferenças entre si.

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo serão demonstrados os resultados obtidos nos estudos de caso apresentados anteriormente, com o objetivo de se analisar a precisão e viabilidade do projeto. É importante mencionar que o custo total para a implementação dos sistemas utilizados (considerando que será realizado um uso comercial) foi de R\$1.250 - R\$2.780, conforme especificado na tabela 16. Onde, se comparado com scanners 3D de alta precisão que custam em torno de R\$87.720, conforme apresentado na tabela 18, os sistemas utilizados apresentam um bom custo benefício.

Tabela 18: Estimativa de custo para utilização dos sistemas apresentados

<b>Fotogrametria (Xiaomi)</b>	<b>Fotogrametria (GoPro)</b>	<b>Scanner 3D (CR FERRET)</b>	<b>Scanners 3D de Alta Precisão</b>
Xiaomi Redmi note 8: R\$ 800	GoPro Hero 10 Black: R\$ 1.660	Scan CR Ferret: R\$ 2.400	Scanner 3D da Faro (Focus X330 3D) R\$ 42.720,00
Polycam: R\$ 70/mês	Polycam: R\$ 70/mês	Creality Scan: R\$ 0.00	Geomagic: R\$ 45.000
CloudCompare: Gratuito	CloudCompare: Gratuito	CloudCompare: Gratuito	-
Autodesk Fusion: R\$ 380/mês (gratuito para uso pessoal e educacional)	Autodesk Fusion: R\$ 380/mês (gratuito para uso pessoal e educacional)	Autodesk Fusion: R\$ 380/mês (gratuito para uso pessoal e educacional)	-
<b>Total: R\$ 1.250</b>	<b>Total: R\$ 2.110</b>	<b>Total: R\$ 2.780</b>	<b>Total: R\$ 87.720</b>

Fonte: Próprio Autor (2024).

##### 4.1 ANÁLISE DO ESTUDO DE CASO 1

Embora o SCAN CR FERRET tenha sido capaz de realizar a captura de dados, o software utilizado não foi capaz de realizar a fusão correta entre a nuvem de pontos, por este motivo não se mostrou a solução adequada para o caso utilizado. Para o estudo em questão a fotogrametria, utilizando tanto o Xiaomi Redmi Note 8 como a GoPro Hero 10 Black, se mostraram como soluções adequadas, visto que através deles se obteve um desvio médio de 0.38mm.

No contexto da indústria automotiva, de acordo com o Manual Automotivo publicado pela Robert Bosch, as principais tolerâncias aceitas para peças críticas, como motores e transmissões, estão entre  $\pm 0,01$  mm e  $\pm 0,1$  mm, enquanto para peças externas e carroceria a tolerância aceitável está entre  $\pm 0,5$  mm e  $\pm 1$  mm (Bosch, 2014). Com base nisso, os sistemas de fotogrametria utilizados apresentam tolerâncias adequadas para o caso em questão, visto que se trata de uma peça a ser utilizada na carroceria do veículo.

Analisando-se o custo total para a realização da engenharia reversa do modelo utilizando a fotogrametria cabe destacar o custo com energia para a impressão 3D: A impressora 3D do modelo xxx, consome em média 270 Watts por hora, considerando que o tempo total foi de 13h 21 minutos (13,35h) o consumo total foi de 3,6045 quilowatt-hora, considerando o custo de 1 quilowatt-hora na Neoenergia de R\$ 0,706 têm-se o consumo total para a fabricação da peça uma média de R\$ 2,54.

O custo com material também é um fato a ser destacado, visto que o custo total para a impressão com o material ABS foi de R\$4,64. Além disso, tem-se o custo com o projeto. O tempo para a realização da Fotogrametria, modelagem CAD e ajustes levou em média 3h, considerando a hora do engenheiro mecânico R\$211.92, o custo total para o desenvolvimento do projeto foi de R\$635,76.

De forma geral, para a realização da engenharia reversa do modelo utilizando a Fotogrametria o custo total com o projeto foi em média de R\$854,86, no entanto, com o projeto pronto o custo para a produção da peça fica em torno de R\$7,18. Nesse caso, a peça foi adquirida no Mercado Livre por R\$80 e, utilizando as ferramentas e tecnologias descritas é possível fabricá-la por R\$7,18, tornando-se uma opção economicamente viável.

#### 4.2 ANÁLISE DO ESTUDO DE CASO 2

Nesse caso, o Scan CR Ferret foi o que apresentou melhor precisão e a GoPro permitiu a captura das informações de forma mais rápida, em apenas 60 segundos. Além disso, cabe ressaltar que na utilização de objetos móveis, como neste caso, ambas as ferramentas são aplicáveis, mas ao se trabalhar com bebês a Gopro pode ser a mais indicada, visto que permite a captura das informações em menor tempo.

Mas, de forma geral, todas as tecnologias utilizadas se mostraram aplicáveis e apresentaram boa precisão, visto que em todos os casos observou-se um erro relativo menor que 1% na quantificação do volume.

#### 4.3 LIMITAÇÕES DOS SISTEMAS UTILIZADOS

Apesar dos diversos benefícios apresentados, é necessário destacar as limitações inerentes a cada tecnologia utilizada, conforme apresentado na tabela 19.

Tabela 19: Limitações dos sistemas utilizados

<b>Fotogrametria (Utilizando a Gopro e Xiaomi Redmi Note 8)</b>	<b>Escaneamento utilizando o Scanner 3D (CR FERRET)</b>
Não indicado para projetos que necessitam de precisão inferior a 0.03mm	Não indicado para peças na cor preta (devido a baixa refletividade);
Não indicado para objetos em movimento.	Não indicado para peças com bordas finas e regiões de sombreamento;
Não indicado para ambientes com iluminação excessiva ou pouca iluminação	Não indicado para peças transparentes;

Fonte: Próprio Autor (2024).

Cabe destacar que as limitações apresentadas servem como base para que se possa analisar a aplicabilidade dos sistemas em futuras pesquisas e aplicações dessas tecnologias no contexto da Engenharia Reversa e Prototipagem 3D.

## 5. CONCLUSÕES

Em suma, este projeto teve como objetivo a utilização de tecnologias de escaneamento 3D e fotogrametria de baixo custo, partindo da aplicação da metodologia da Engenharia Reversa e utilizando equipamentos disponíveis no Laboratório de Prototipagem disponíveis no LITPEG - UFPE. A implementação destas tecnologias representam uma abordagem promissora para lidar com os altos custos da manufatura tradicional e scanners avançados no mercado.

As discussões inicialmente levantadas mostram os benefícios da adoção das tecnologias de digitalização 3D sem contato, aplicadas a indústria e a área da saúde. A redução significativa dos custos e tempo de desenvolvimento dos projetos refletem o potencial desta tecnologia para obtenção de modelos mais precisos e baratos.

Os resultados obtidos são focados na análise da precisão e viabilidade da utilização das tecnologias de digitalização 3D de baixo custo, para que empresas e indústrias dos diversos segmentos possam aplicar a sua realidade, seja no desenvolvimento de produtos ou análises de qualidade. Por fim, espera-se que este trabalho contribua para avanços significativos na utilização de tecnologias de digitalização 3D no cenário industrial melhorando seus resultados e reduzindo custos.

### 5.1 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Obtenção da circunferência cefálica utilizando a Fotogrametria em bebês;
- Quantificar através de escaneamentos a energia de impacto, para fins de laudos técnicos;
- Utilização de tecnologias de baixo custo para análises de reconhecimento facial.

## REFERÊNCIAS

RENISHAW. Como funcionam os sistemas interferométricos [imagem]. Disponível em: [https://www.renishaw.com/pt/como-funcionam-os-sistemas-interferometricos--38612?srsltid=AfmBOorK3w7\\_gGJ2Bu\\_sG5ITahdJcFz3suXmiAWDmILbLt\\_W47dyq6dN](https://www.renishaw.com/pt/como-funcionam-os-sistemas-interferometricos--38612?srsltid=AfmBOorK3w7_gGJ2Bu_sG5ITahdJcFz3suXmiAWDmILbLt_W47dyq6dN). Acesso em: 6 set. 2024.

ALVAREZ-JÁCOBO, Justo Emilio Alvarez. Desenvolvimento de um robô autônomo móvel versátil utilizando arquitetura subsumption. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2001. Orientador: Prof. Dr. Pablo Siqueira Meirelles.

ALVAREZ-JÁCOBO, Justo Emilio. Geração de mapas de ambientes utilizando um sistema de percepção LIDAR – 3D. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2013.

ADOLF, A. Figura 2 - Princípio da triangulação. 2011. Disponível em: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Principio-da-triangulacao-Fonte-Adolf-2011-A-imagem-RGB-obtida-e-projetada\\_fig2\\_290938231](https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Principio-da-triangulacao-Fonte-Adolf-2011-A-imagem-RGB-obtida-e-projetada_fig2_290938231). Acesso em: 16 set. 2024.

INGLE, K. A. Reverse Engineering. Lexington: McGraw-Hill, 1994. 240 p.

HOKUYO. Data Product URG-04LX-UG01. Disponível em: <https://www.hokuyo-aut.jp/products/data.php?id=35>. Acesso em: 16 set. 2024.

FUTURE MARKET INSIGHTS. 3D Scanner Market Report. Disponível em: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/3d-scanner-market>. Acesso em: 16 set. 2024.

ANDRETTA, Alberto Carlos. Ferramentas para escaneamento por triangulação a laser e reconstrução tridimensional. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Computação) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2022.

STEFANI, Mário Antonio. Medidores de distância por triangulação a laser. 1995.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

MURY, Luiz Gilberto Monclaro. Uma metodologia para adaptação e melhoria de produtos a partir da engenharia reversa. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Porto Alegre, 2000.

LIMA, Cristiane Brasil. Engenharia reversa e prototipagem rápida: estudos de casos. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2003.

FERNANDES, Afonso Fonseca; SOUZA, Lucas Lopes Ferreira de. Inovação, eficiência e competitividade nos subsetores do polo industrial de Manaus. Revista de Pesquisa e Contabilidade Aplicada, Rio de Janeiro, v. 17, n. 2, p. 118-134, abr.-jun. 2023.

REIS, Lucas de Souza. Análise e melhoria do funcionamento de uma linha de produção industrial usando simulação. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica, Área de Especialização em Gestão Industrial) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2024.

SILVA, Wellyson Carlos Pontes da. Aplicação de engenharia reversa e obtenção do molde em uma peça de geometria complexa. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019. Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Lima Júnior.

PILON, José Aguilar; XAVIER, Antonio Augusto de Paula. Aplicação da fotogrametria digital na obtenção de medidas confiáveis do corpo humano. 2006. Trabalho apresentado no XIII SIMPEP - Simpósio de Engenharia de Produção, Bauru, SP, Brasil, 6 a 8 de novembro de 2006

JARDINI, André Luiz; BINELI, Aulus Roberto Romão; ULRICH, Cristiane Brasil; BERNARDES, Luis Fernando; MACIEL FILHO, Rubens. Integração de prototipagem rápida e engenharia reversa no desenvolvimento rápido do produto. In: 6º

CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 11 a 15 de abril de 2011, Caxias do Sul - RS. Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2011.

FERNEDA, Amauri Bravo. Integração metrologia, CAD e CAM: uma contribuição ao estudo de engenharia reversa. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

DONG, Pinliang; CHEN, Qi. LiDAR remote sensing and applications. Remote Sensing Applications Series. Terre Haute, Indiana: Indiana State University, 2018.

OLIVEIRA FILHO, Willian Lima de. Projeto e construção de um sistema para digitalização tridimensional de superfícies através de triangulação a laser. 2016. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) – Universidade Católica de Petrópolis, Centro de Engenharia e Computação, Petrópolis, 2016.

DASCHBACH, Abella; McNichols. Reverse Engineering: A Tool for process planning. 17th Internacional Conference on Computers and Industrial Engineering. Elsevier Science Ltd. Vol. 29, No. 1-4, pp. 637-640. Setembro, 1995.

VÁRADY, Tamás; MARTIN Ralph R.; COXT Jordan. Reverse Engineering of geometric models – an introduction. Computer-Aided Design. Elsevier Science Ltd. Vol. 29, No. 4, pp. 255-268. Abril, 1997.

MONDEN, Yoshiro. Toyota Production System: An Integrated Approach to Just-In-Time. São Paulo: Editora ABC, 1999.

MITUTOYO. Guia de medição e engenharia reversa com equipamentos de medição tridimensional. Tokyo: Mitutoyo Corporation, 1998.

TOMMASELLI, A. M. G.; SILVA, J. F. C da; HASEGAWA, J. K.; GALO, M.; DAL POZ, A. P.. Fotogrametria: aplicações a curta distância. In: MENEGUETE Jr, M.; ALVES, N. (Organizadores), FCT 40 anos, Perfil Científico - Educacional, Presidente Prudente SP, p. 147-159, 1999.

BARBOSA, Theo de Carvalho. Parâmetros de fotogrametria terrestre para a geração de nuvem de pontos em modelos BIM. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Cartográfica, Recife, 2022.

CORDEIRO, Joe Wallace. Design estrutural de embalagens: uso de fotogrametria digital, por meio de smartphones, para obtenção de modelos 3D de baixo custo. 2021. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Comunicação e Expressão, Florianópolis, 2021.

MINICH, Andressa Marques. Utilização da fotogrametria digital aliada a modelagem numérica para previsão do comportamento mecânico da ponte natural de pedra de Alegrete-RS. 2020.

NOGUEIRA, Moroni Henrique Ribeiro. Metodologias digitais para o registro arqueológico: estudos de caso com aplicação da fotogrametria digital e modelagem 3D. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Arqueologia) – Universidade Federal de Sergipe, Campus de Laranjeiras, Departamento de Arqueologia, Laranjeiras, 2023.

SEO, Suyoung. Investigation on Image Quality of Smartphone Cameras as Compared with a DSLR Camera by Using Target Image Edges. *Korean Journal of Remote Sensing*, v.32. p.49-60, 2016.

BRITO, Jorge Nunes; COELHO, Luiz. *Fotogrametria digital*. Rio de Janeiro: EDUERJ, 2007.

PEREIRA, Larissa S.; RIBEIRO, João M. Um estudo sobre os sistemas open source de fotogrametria disponíveis na atualidade. In: 15º Jornada Científica e Tecnológica - 12º Simpósio de Pós-graduação, IFSUL de Minas, 2023. Resumo. Disponível em: <https://josif.ifsuldeminas.edu.br/ojs/index.php/anais/article/view/1751/908>. Acesso em: 10 set. 2024.

SILVA, K. F. et al. Uso do aplicativo de celular como alternativa para digitalizar fósseis para impressão em 3D. In: *Encontros Regionais de Paleontologia – PALEOS*

2022, São Gonçalo, Brasil. Resumo. Disponível em: [https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/24706/1/silva\\_et\\_al\\_uso\\_aplicativo\\_celular\\_alternativa.pdf](https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/24706/1/silva_et_al_uso_aplicativo_celular_alternativa.pdf). Acesso em: 10 set. 2024.

NGUYEN, Van Nhat. SMARTPHONE PHOTOGRAPHY: THE USE OF SMARTPHONE CAMERA IN 2018. International Business, 2018.

ARTEC 3D. SolidWorks CAD Software for 3D Scanning. Disponível em: <https://www.artec3d.com/3d-software/solidworks-cad>. Acesso em: 1 out. 2024.

ARAÚJO, Rogério Pontes de. Procedimento para avaliação de erros geométricos em centros de usinagem com auxílio de ferramenta computacional dedicada. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

GROETAELAARS, Natalie Johanna; AMORIM, Arivaldo Leão de. Tecnologia 3D Laser Scanning: características, processos e ferramentas para manipulação de nuvens de pontos. LCAD, Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Brasil. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Arivaldo-Amorim/publication/275962667\\_Tecnologia\\_3D\\_Laser\\_Scanning\\_caracteristicas\\_processos\\_e\\_ferramentas\\_para\\_manipulacao\\_de\\_nuvens\\_de\\_pontos\\_3D\\_Laser\\_Scanning\\_Technology\\_characteristics\\_processes\\_and\\_point\\_cloud\\_tools/links/554bc2d50cf29f836c98f01c/Tecnologia-3D-Laser-Scanning-caracteristicas-processos-e-ferramentas-para-manipulacao-de-nuvens-de-pontos-3D-Laser-Scanning-Technology-characteristics-processes-and-point-cloud-tools.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Arivaldo-Amorim/publication/275962667_Tecnologia_3D_Laser_Scanning_caracteristicas_processos_e_ferramentas_para_manipulacao_de_nuvens_de_pontos_3D_Laser_Scanning_Technology_characteristics_processes_and_point_cloud_tools/links/554bc2d50cf29f836c98f01c/Tecnologia-3D-Laser-Scanning-caracteristicas-processos-e-ferramentas-para-manipulacao-de-nuvens-de-pontos-3D-Laser-Scanning-Technology-characteristics-processes-and-point-cloud-tools.pdf). Acesso em: 01 out. 2024.

MELO, Maize Cibele de Lima. Análise de tensões via elementos finitos em dutos retos e curvos contendo defeitos de amassamento. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2024.

TUDO SOBRE IMPRESSÃO 3D: O QUE É, COMO FUNCIONA E TIPOS. WISHBOX, 2022. Disponível em: <https://www.wishbox.net.br/blog/impressao-3d/>. Acesso em 01 out.2024.

TOFAIL, Syed A. M.; KOUMOULOS, Elias P.; BANDYOPADHYAY, Amit; BOSE, Susmita; O'DONOGHUE, Lisa; CHARITIDIS, Costas. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, v. 20, n. 8, p. 22-28, 2017. DOI: 10.1016/j.mattod.2017.07.001. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>. Acesso em: 01 out.2024..

JÄHNE, Bernd; HAUßECKER, Horst; GEIßLER, Peter (Eds.). Handbook of computer vision and applications. Vol. 1: Sensors and imaging. San Diego: Academic Press, 1999. ISBN 0-12-379771-3.

AGÊNCIA BRASIL. Sete em cada dez empresas no Brasil utilizam tecnologias digitais. Agência Brasil, 19 abr. 2022. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2022-04/sete-em-cada-dez-empresas-no-brasil-utilizam-tecnologias-digitais>. Acesso em: 08 maio. 2024.

FUTURE MARKET INSIGHTS. 3D scanner market: global industry analysis 2017-2021 and opportunity assessment 2022-2032. Disponível em: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/3d-scanner-market>. Acesso em: 08 maio. 2024.

McHENRY, Kenton; BAJCSY, Peter. An overview of 3D data content, file formats and viewers. Urbana: National Center for Supercomputing Applications, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2008. Disponível em: <https://www.ncsa.uiuc.edu>. Acesso em: 12 setembro. 2024.

ZAMAN, Faisal; WONG, Ya Ping; NG, Boon Yian. Density-based denoising of point cloud. Faculty of Computing and Informatics, Multimedia University, Malaysia, 2016.

CAO, Keming; XU, Yi; COSMAN, Pamela. Visual Quality of Compressed Mesh and Point Cloud Sequences. *IEEE Access*, v. 8, p. 188820-188834, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3024633. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9200318>. Acesso em: 16 set. 2024.

PATIL, Hemprasad; KOTHARI, Ashwin; BHURCHANDI, Kishor. 3-D face recognition: features, databases, algorithms and challenges. Springer Science+Business Media Dordrecht, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11042-015-2512-3>. Acesso

em: 20 set. 2024.

RYPL, D.; BITTNAR, Z. Generation of computational surface meshes of STL models. *Computers & Mathematics with Applications*, v. 50, n. 7-8, p. 1125-1135, 2005. DOI: 10.1016/j.cam.2005.04.054. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cam.2005.04.054>. Acesso em: 08 out. 2024.

NG, P. P.; QI, Y. M.; CAI, D. C. Research and application of Autodesk Fusion360 in industrial design. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 359, p. 012037, 2018. DOI: 10.1088/1757-899X/359/1/012037. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/359/1/012037>. Acesso em: 08 out. 2024.

NASCIMENTO, Nailania Romão do; CAFEZEIRO, Yan Graco Dantas. OVAS ferramentas de preservação do patrimônio construído. In: SENAI CIMATEC. Anuário de resumos expandidos apresentados no IX SAPCT - SENAI CIMATEC, Salvador, 2024. ISSN 0805-2010.

BUZAYAN, Muaiyed Mahmoud; ELKEZZA, Aeman H.; AHMAD, Siti Fauzza; SALLEH, Nosizana Mohd; SIVAKUMAR, Indumathi. A comparative evaluation of photogrammetry software programs and conventional impression techniques for the fabrication of nasal maxillofacial prostheses. *Journal of Prosthetic Dentistry*, [s.l.], 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2023.08.027>. Acesso em: 23 set. 2023.

TERPSTRA, Toby; MILLER, Seth; HASHEMIAN, Alireza. An evaluation of two methodologies for lens distortion removal when EXIF data is unavailable. *SAE Technical Paper*, v. 2017-01-1422, 2017. DOI: 10.4271/2017-01-1422.

CABRAL, Paulo. Erros e incertezas nas medições. Porto: Instituto Electrotécnico Português; Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2004.

ABDELAAL, Osama; ALDAHASH, Saleh Ahmed. Realization of impression evidence with reverse engineering and additive manufacturing. *Applied Sciences*, v. 14, n. 13, p. 5444, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14135444>.

MARTINEZ, Andressa Carmo Pena; SOUZA, Douglas Lopes de; SANTOS, Denise Mônaco dos; PEDROTI, Leonardo Gonçalves; CARLO, Joyce Correna; MARTINS,

Marianna Auxiliadora Dias. Avaliação do comportamento mecânico dos polímeros ABS e PLA em impressão 3D visando simulação de desempenho estrutural. Universidade Federal de Viçosa, 2023. DOI: <https://doi.org/10.11606/gtp.v14i1.148289>.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. 2. ed. New York: Springer, 2015.

SANTOS, Raquel; FUJÃO, Carlos. Antropometria. Fevereiro 2003. Trabalho apresentado à Universidade de Évora – Curso Pós-Graduação: Técnico Superior de HST.

NEUBAUER, Vera; FUCHS, Teresa; GRIESMAIER, Elke; KAGER, Katrin; PUPP-PEGLOW, Ulrike; KIECHL-KOHLENDORFER, Ursula. Poor postdischarge head growth is related to a 10% lower intelligence quotient in very preterm infants at the chronological age of five years. *Acta Paediatrica*, [s.l.], v. 105, n. 2, p. 208-212, jan. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/apa.13336>. Acesso em: 12 out. 2024.

COSTA, Raquel Figueiredo; BLANCO, Reginaldo Carlos; SOUZA, Maria José. Antropometria como ferramenta de avaliação do estado nutricional coletivo de adolescentes. *Revista de Nutrição*, v. 23, n. 4, p. 591-599, ago. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-52732010000400010>. Acesso em: 12 out. 2024.

YOUTUBE. Cranial Helmet Scanning. 2017. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=h3yIIICKCOGA>. Acesso em: 12 out. 2024.

VELODYNE LIDAR. Velodyne Lidar. Disponível em: <https://velodynelidar.com>. Acesso em: 12 out. 2024.

HOLA, Guilherme Costa; ALMEIDA BESSA, Jéssyca; BESSA, Renan; MOTA, Francisco Alan Xavier da; REGO DA ROCHA NETO, Ajalmar; RIPAR DO ALEXANDRIA, Auzuir. Sistema de determinação de coordenadas cartesianas baseado em visão estéreo. *Conexões: Ciência e Tecnologia, Fortaleza*, v. 10, n. 2, p. 94-109, jul. 2016. DOI: 10.21439/conexoes.v10i2.752.

BOSCH, Robert. *Automotive Handbook*. 9. ed. Wiley-VCH, 2014. ISBN 978-1118979947.

HALEEM, Abid; JAVAID, Mohd; SINGH, Ravi Pratap; RAB, Shanay; SUMAN, Rajiv; KUMAR, Lalit; KHAN, Ibrahim Haleem. Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: An overview. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijcme.2022.08.003>. Acesso em: 01 out. 2024.

BALLETTI, Caterina; GUERRA, Francesco; TSIUKAS, Vassilios; VERNIER, Paolo. Calibration of action cameras for photogrammetric purposes. *Sensors*, v. 14, n. 9, p. 17471-17490, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s140917471>. Acesso em: 23 out. 2024.