



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE RECONSTRUÇÃO**  
**DIGITAL VISANDO ENGENHARIA REVERSA**

**PAULO HENRIQUE RODRIGUES GUILHERME REIS**

**BELO HORIZONTE**  
**2017**

**PAULO HENRIQUE RODRIGUES GUILHERME REIS**

# **AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE RECONSTRUÇÃO DIGITAL VISANDO ENGENHARIA REVERSA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

**Área de Concentração:** Processos de Fabricação e Materiais

**Orientador:** Juan Carlos Campos Rubio

**BELO HORIZONTE  
ESCOLA DE ENGENHARIA DA UFMG  
2017**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Deus da minha vida, por ter me dado força para concluir mais esta etapa da minha jornada acadêmica.

Agradeço a minha mãe por todo amor, carinho, e palavras de incentivo, e por não ter medido esforços para que meus sonhos fossem realizados.

À minha família, tios, tias e primos, por todo apoio incondicional.

Agradeço à minha Liliane por todo amor, incentivo, paciência e companheirismo nos momentos difíceis.

Ao meu orientador, Juan Carlos Campos Rubio pelos valerosos conselhos, ensinamentos e por toda dedicação e esforço em me orientar.

Aos amigos do Laboratório de Engenharia e Processos Avançados de Manufaturas (LEPAM), em especial ao Breno Lizardo, pela constante disposição em ajudar.

Aos amigos do OhLab 3D, em especial à Mariana Volpini, pelas oportunidades e aprendizado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão de bolsa de mestrado.

“A engenharia não é sobre soluções perfeitas; Trata-se de fazer o melhor que puder com recursos limitados.”

**Randy Pausch**

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1:</b> Engenharia Convencional e ER. ....	17
<b>Figura 2:</b> Processo de ER. ....	18
<b>Figura 3:</b> Técnicas de Digitalização.....	19
<b>Figura 4:</b> Máquinas de Medição por Coordenadas.....	20
<b>Figura 5:</b> Componentes construtivos do sensor de contato .....	21
<b>Figura 6:</b> Processo de funcionamento de um sistema de medição por coordenadas.....	22
<b>Figura 7:</b> Sistemas componentes de uma Máquina de Medição por Coordenadas.....	23
<b>Figura 8:</b> Representação de braços de medição de coordenadas .....	25
<b>Figura 9:</b> Diagrama representativo das principais causas de erros na medição .....	26
<b>Figura 10:</b> Classificação das técnicas de aquisição de dados sem contato. ...	29
<b>Figura 11:</b> disposição dos equipamentos para digitalização por feixe laser. ...	31
<b>Figura 12:</b> Técnica de triangulação. ....	33
<b>Figura 13:</b> Técnica de estimativa time-of-flight. ....	34
<b>Figura 14:</b> Categorias da Fotogrametria.....	37
<b>Figura 15:</b> Aquisição de imagens para a técnica de Fotogrametria.....	37
<b>Figura 16:</b> Princípio de medição da Fotogrametria.....	38
<b>Figura 17:</b> Representação da digitalização por luz estruturada.....	40
<b>Figura 18:</b> Processo para aquisição de datas em métodos volumétricos.....	42
<b>Figura 19:</b> Representação do princípio de funcionamento da TC. ....	43
<b>Figura 20:</b> Tela de um software de processamento digital de imagens médicas .....	44
<b>Figura 21:</b> Representação do princípio de funcionamento da TC .....	45
<b>Figura 22:</b> Representação do princípio de funcionamento da RM.....	46
<b>Figura 23:</b> Tela de um software de processamento digital de imagens médicas .....	47
<b>Figura 24:</b> Representação do princípio de funcionamento do Ultrassom .....	48
<b>Figura 25:</b> Otimização da nuvem de pontos.....	51
<b>Figura 26:</b> Representação de nuvem de pontos e formação de malha. ....	53
<b>Figura 27:</b> Formação de malha. ....	54
<b>Figura 28:</b> Categorização dos métodos de reconstrução da malha. ....	55
<b>Figura 29:</b> MMC Roland Modela MDX-20.....	56
<b>Figura 30:</b> Equipamento de digitalização Laser.....	58
<b>Figura 31:</b> Equipamento utilizado para PR por 3D Pínting. ....	59
<b>Figura 32:</b> Processos de execução do Estudo de Caso A. ....	62
<b>Figura 33:</b> Ilustração do objeto de estudo analisado. ....	63
<b>Figura 34:</b> Representação dimensional do objeto de estudo em centímetros. ....	63
<b>Figura 35:</b> Processo de aquisição de pontos por contato.....	64

<b>Figura 36:</b> Processo de digitalização através do feixe LASER.....	65
<b>Figura 37:</b> Processo de digitalização por fotogrametria. ....	66
<b>Figura 38:</b> Processo de digitalização por e de luz estruturada.....	67
<b>Figura 39:</b> Fotografias utilizadas para execução do modelo virtual.....	71
<b>Figura 40:</b> Indicadores de padrão facial. ....	72
<b>Figura 41:</b> Desenvolvimento da malha a partir da técnica Subdivision Surface. .....	72
<b>Figura 42:</b> Representação dimensional do modelo digital gerado por digitalização por contato.....	75
<b>Figura 43:</b> Representação dimensional do modelo digital gerado por digitalização por feixe LASER.. ....	76
<b>Figura 44:</b> Representação dimensional do modelo digital gerado por digitalização por fotogrametria. ....	77
<b>Figura 45:</b> Representação dimensional do modelo digital gerado por digitalização por luz estruturada.....	78
<b>Figura 46:</b> Análise geometria em escala de cores para o modelo gerado por feixe LASER.....	79
<b>Figura 47:</b> Análise geometria em escala de cores para o modelo gerado por fotogrametria. ....	79
<b>Figura 48:</b> Análise geometria em escala de cores para o modelo gerado por luz estruturada. ....	80
<b>Figura 49:</b> Sólido virtual gerado.....	82
<b>Figura 50:</b> Modelo final com textura aplicada.....	83
<b>Figura 51:</b> Impressão do modelo físico .....	83
<b>Figura 52:</b> Modelo físico do busto desenvolvido com a técnica em estudo. ....	84
<b>Figura 53:</b> Processo de digitalização do busto.....	85
<b>Figura 54:</b> Nuvem de pontos adquirida com o processo de escaneamento ....	86
<b>Figura 55:</b> Marcos faciais utilizados para geração do modelo virtual do busto. .....	86
<b>Figura 56:</b> Modelo virtual do busto prototipado. ....	87
<b>Figura 57:</b> Mapa de cores representativo das distâncias obtidas na comparação dos modelos. ....	88
<b>Figura 58:</b> Histograma relativo às distâncias, em mm, observadas na comparação entre os dois modelos.....	89
<b>Figura 59:</b> Gráfico de variação das distâncias médias entre os dois modelos de estudo. ....	90
<b>Figura 60:</b> Gráfico de variação das distâncias máximas entre os dois modelos de estudo.....	91
<b>Figura 61:</b> Mapa de cores representativo da perda de detalhes para as reduções.....	91

## LISTA DE TABELAS E EQUAÇÕES

<b>Tabela 1:</b> comparação entre métodos de escaneamento por contato. ....	27
<b>Tabela 2:</b> comparação entre métodos de escaneamento sem contato.. ....	49
<b>Tabela 3:</b> descrição das especificações da MMC Roland Modela MDX-20.....	57
<b>Tabela 4:</b> Descrição das especificações técnicas da a Micro-Hite 3D.....	58
<b>Tabela 5:</b> Especificações ZPrint 650.. .....	60
<b>Tabela 6:</b> Tempos decorridos em processos de digitalização. ....	68
<b>Tabela 7:</b> Processos de execução do Estudo de Caso B. ....	70
<b>Tabela 8:</b> Tempos e operações do Estudo de Caso B. ....	71
<b>Equação 1:</b> Cálculo para triangulação do método de luz estruturada. ....	40
<b>Equação 2:</b> Função de minimização de distâncias.....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	(Bidimensional)
3D	(Tridimensional)
ASME	(American Society of Mechanical Engineers )
BAM	(Braço Articulado de Medição)
BfB	( <i>Bits-from-Bytes</i> )
CAD	( <i>Computer-Aided Design</i> )
CAT	( <i>Computer Assisted Tomography</i> )
CDC	( <i>Charge-Coupled Device</i> )
CMM	(Coordinate Measurement Machines)
CNC	(Computer Numerical Control)
CO <sub>2</sub>	(Dióxido de Carbono)
DFM	( <i>Design for manufacturability</i> )
DWG	( <i>Drawing</i> )
EC	(Engenharia Convencional)
ER	(Engenharia Reversa)
FDM	( <i>Fused Deposition Material</i> )
Laser	(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation )
LENS	( <i>Laser-Engineered Net Shaping</i> )
LEPAM	(Laboratório de Processos Avançados de Manufatura)
LOM	( <i>Laminated object Manufacturing</i> )
MIC	( <i>Medical Imaging Center</i> )
MJM	( <i>Multijet Modeling</i> )
mm	(Milímetros)
nm	(nanómetro )
PR	(Prototipagem Rápida)
RM	(Ressonancia Magnética)
SIM	(Sistemas Integrados de Manufatura)
SLA	( <i>Stereolithography</i> )
SLT	( <i>Standard Template Library</i> )
TC	(Tomografia Computadorizada)
TOF	( <i>Time-of-Flight</i> )
WRL	( <i>Wales Rugby League</i> )



# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	12
1.1. OBJETIVOS .....	14
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1. ENGENHARIA REVERSA .....	16
2.2. PROCESSO DE DIGITALIZAÇÃO .....	19
2.2.1. DIGITALIZAÇÃO POR CONTATO .....	20
2.2.2. DIGITALIZAÇÃO SEM CONTATO .....	28
2.3. PROCESSAMENTO DE PONTOS.....	50
2.3.1. OTIMIZAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS .....	50
2.3.2. CORREÇÃO DE ERROS E REMOÇÃO DE RUÍDOS .....	52
2.3.3. CONSTRUÇÃO DA SUPERFÍCIE.....	54
3. TRABALHO EXPERIMENTAL .....	56
3.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS .....	56
3.1.1. MÁQUINAS DE DIGITALIZAÇÃO POR CONTATO .....	56
3.1.2. EQUIPAMENTO DE ESCANEAMENTO POR FAIXA LASER.....	58
3.1.3. EQUIPAMENTO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA.....	59
3.2. FERRAMENTAS DE SOFTWARE .....	60
3.3. DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	61
3.3.1. AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS .....	61
3.3.2. MÉTODO DE PROJEÇÃO FACIAL 3D A PARTIR DE FOTOGRAFIAS.....	68
4. RESULTADOS E COMENTÁRIOS .....	74
4.1. RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO A .....	74
4.2. RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO B .....	81
5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS .....	93
6. BIBLIOGRAFIA.....	95

## RESUMO

A utilização dos métodos e técnicas de manufatura como ferramentas para a implementação da Engenharia Reversa são diversos, e suas vantagens e desvantagens variam de acordo com a finalidade de cada aplicação. Nesse cenário de variadas alternativas, a presente dissertação tem como objetivo apresentar o contexto dos métodos de digitalização levando em consideração suas facilidades e limitações. Considerando o cenário de Manufatura Integrada por Computador (CIM – *Computer Integrated Manufacturing*) este trabalho apresenta uma revisão da literatura sobre as técnicas utilizadas para a implementação da Engenharia Reversa e uma descrição sobre os processos de aquisição de coordenadas geométricas virtuais. Nesta pesquisa será demonstrado um estudo comparativo a respeito da potencialidade das técnicas de digitalização por sensor de contato, feixe LASER, fotogrametria e luz estruturada. Ficou evidenciado a maior fidelidade dimensional e geométrica no escaneamento realizado por sensor de contato. Será demonstrado o método de manipulação e aquisição de modelos faciais virtuais a partir de duas fotografias. Por fim, será apresentado a validação deste método e um estudo comparativo a respeito da redução percentual da nuvem de pontos em função da precisão dimensional obtida. Foi evidenciado, para o modelo em estudo, que a diminuição da nuvem de pontos apresenta tendência exponencial na perda de detalhes geométricos.

**Palavras chave:** Engenharia Reversa, Manufatura Integrada por Computador, Digitalização, Modelos Virtuais.

## ABSTRACT

The use of manufacturing methods and techniques as tools for the implementation of Reverse Engineering are diverse, and their advantages and disadvantages vary according to the purpose of each application. In this scenario of varied alternatives, this present aims to present the context of the methods of digitization leading in its own capacities and limitations. (CIM - Computer Integrated Fabrication) this paper presents a review of the literature on the techniques for an implementation of Reverse Engineering and a description of the processes of acquisition of virtual geometric coordinates. Continuous research of scanning techniques by contact sensor, LASER beam, photogrammetry and structured light. The highest dimensional and geometric fidelity without scanning performed by contact sensor was evidenced. It will be demonstrated Method of manipulation and acquisition of virtual facial models from two photos. Finally, it will be a solution for a comparative method regarding the reduction of cloud of points in function of the obtained dimensional accuracy. It was evidenced, for the model under study, that it is decreased cloud of points presents an exponential tendency in the loss of geometric details.

**Keywords:** Reverse Engineering, Contact Scanning, Optical Scanning, Three Dimensional Reconstruction.

## 1. INTRODUÇÃO

Quando se trata do desenvolvimento de bens de consumo manufaturados, os desafios da fabricação de produtos que se adequam às demandas estabelecidas pelo mercado são diversos, principalmente no quesito qualidade (TAGUSHI, 1986). Dentre estes desafios estão inseridos a fabricação de artefatos de geometria complexa e descontínua, que raramente tem sua manufatura executada pelas ferramentas usualmente empregadas para a produção de objetos de geometria mais simplória. Com a exigência cada vez mais latente de se produzir componentes mais complexos e eficientes, se estabelece um intenso progresso tecnológico no âmbito do processo e desenvolvimento de produtos, principalmente nos métodos de fabricação, de manutenção da qualidade, e de redução do ciclo de vida do produto (OTTO e WOOD, 2003).

Nesse cenário o conceito de Engenharia Reversa (ER) se afirma como uma ferramenta poderosa quanto a possibilidade de reprodução de formas geométricas complexas de determinados objetos além de potencializar as ações tecnológicas para a manufatura de produtos a partir de um modelo físico prévio (SOKOVIK e KOPAC, 2006). Se tratando do conceito de inovação, qualidade e desenvolvimento de novos produtos a ER também é diretamente atuante na medida em que possibilita a exploração de novas funcionalidades para um objeto, projetos para novos produtos e a indicação de melhorias no desempenho para produtos já comercializados (WANG; 2011).

Para BOEHLER *et al.* (2001) as ferramentas utilizadas para a implementação da ER, por se situarem num contexto virtual, representam um expressivo diferencial competitivo para as empresas no âmbito de redução das despesas financeiras com o desenvolvimento do produto, visto que a elaboração do projeto influencia fortemente o custo total e também se relaciona com o atendimento aos requisitos obrigatórios demandados pelo produto acabado.

RAJA e FERNANDES (2008) enumeram dois métodos utilizados para a aquisição do objeto virtual, o método de escaneamento por contato e método de escaneamento sem contato. Para os escaneamentos realizados por contato os dados da superfície do objeto físico são aferidos a partir do apalpamento da superfície do modelo por intermédio de sondas específicas. Com base na medição das coordenadas realizada pela sonda os dados capturados formam a nuvem de pontos do objeto virtual. Para os sistemas de escaneamento sem contato a medição das coordenadas da nuvem de pontos é realizada a partir de sistemas óticos que se utilizam de informações de profundidade capturadas por emissão e reflexão de ondas eletromagnéticas e ondas sonoras para construir o modelo digital (GORE *et al*, 1996).

Contudo, as aplicações dos métodos de digitalização na ER apresentam diversas peculiaridades, e sua eficiência de aplicação dependerá do contexto de uso. Um dos grandes desafios da implementação da ER é correlacionar os benefícios e limitações dos diversos métodos de escaneamento com o contexto da situação de digitalização, encontrando assim, um modelo ótimo de escaneamento (BEHZAD 2015). A aplicação de métodos de digitalização que não correspondem às limitações ou peculiaridades do modelo físico pode causar diversas desvantagens como elevação nos custos de ER, elevação no tempo de digitalização e distorções geométricas e dimensionais no modelo virtual. Sendo assim, conhecer a fundo os métodos de escaneamento é um fator primordial para a eficiência de implementação da ER (RAJA e FERNANDES, 2008).

Considerando o contexto abordado se justifica um estudo aprofundado sobre as possibilidades de aplicações da ER e sobre as técnicas de digitalização com o objetivo de aferir de maneira quantitativa a comparação de eficiência entre os métodos, diminuindo a incerteza na escolha de cada ferramenta de aquisição de dados virtuais. No âmbito acadêmico esta pesquisa busca promover conhecimento científico, na medida em que determina a confiabilidade a respeito dos fatores que influenciam na digitalização de um modelo, além de propiciar fundamentos e fomento para pesquisas mais aprofundadas sobre o assunto.

Esta dissertação tem como principal enfoque apresentar as mais usuais técnicas de digitalização para a realização da coleta de dados virtuais e suas principais aplicações nas diversas áreas. Serão apresentados conceitos técnicos das ferramentas de escaneamento por contato, via Coordinate-Measuring Machine (CMM), e técnicas de escaneamento ótico por intermédio de Fotogrametria, escaneamento por feixe LASER e escaneamento por Luz Estruturada. Esta pesquisa demonstra através de dois estudos de caso a comparação na eficiência da digitalização por diferentes métodos com resposta na precisão dimensional e geométrica e a utilização da ER em técnicas de digitalização por fotografias e processamento digital de imagens no desenvolvimento de projeções faciais.

### **1.1. OBJETIVOS**

Almeja-se com o presente trabalho a investigação dos principais métodos de digitalização, por contato e sem contato, considerando seus benefícios e limitações. Será analisada a pertinência dos métodos de digitalização tridimensional nos diferentes contextos e aplicações da ER no desenvolvimento de técnicas funcionais de modelagem facial. Ainda como objetivos gerais, esta pesquisa pretende:

- Investigar as áreas de atuação da ER e as adaptações de metodologia de implementação para cada situação de aplicação;
- Apontar os princípios das etapas de ER, e analisar a interação do tema com a Manufatura Aditiva e simulações computacionais.

Para que o objetivo geral seja, de fato, alcançado, os seguintes objetivos específicos serão seguidos:

- Identificar na literatura as principais boas práticas das técnicas de digitalização tridimensional;
- Conhecer as diferentes metodologias e procedimentos de reconstrução, manipulação e criação de modelos CAD;

- Parametrizar as técnicas de adaptação das ferramentas de ER para reconstrução de modelos virtuais;
- Identificar o contexto das situações de aplicação estudadas e produzir modelos que atentam às necessidades específicas de cada situação.

## **1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

De acordo com o desenvolvimento da discursão desta dissertação, o capítulo 1 apresenta a contextualização do trabalho desenvolvido, bem como a definição dos problemas de pesquisas e objetivos almejados.

O capítulo 2 irá tratar dos marcos teóricos referentes ao embasamento literário e dos princípios e conceitos que fundamentaram a execução desta dissertação. Os principais conceitos abordados neste capítulo foram a definição e explanação das etapas de ER, compreendendo os métodos de aquisição de dados, processamentos e saídas de processo e os conceitos dos Sistemas Integrados de Manufatura utilizados.

No desenvolvimento deste estudo, o capítulo 3 irá tratar da descrição dos materiais e métodos utilizados nas pesquisas, e do desenvolvimento dos estudos de caso de análise comparativa geométrica e dimensional e criação, validação e análise de projeções faciais virtuais.

O capítulo 4, resultados e comentários, abrange a descrição e análise crítica dos resultados obtidos com as pesquisas realizadas nos estudos de caso, bem como os comentários referentes às limitações e principais desafios observados.

O capítulo 5 apresenta as considerações finais e trabalhos futuros. Neste capítulo serão demonstrados as conclusões e comentários obtidos a partir da integração dos resultados dos estudos de caso descritos, bem como a sugestão para trabalhos futuros.

O capítulo 6 contempla, por ordem alfabética, todas as referências utilizadas neste trabalho.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. ENGENHARIA REVERSA

Também denominada pelo termo em inglês *Reverse Engineering*, ou até mesmo reengenharia, a ER é caracterizada como uma tecnologia dinâmica, apresentando diversas técnicas de implementação e conceitos multidisciplinares que se objetivam em descobrir o funcionamento de um determinado objeto a partir do detalhamento de sua composição tecnológica (RAJA e FERNANDES; 2008). Com a mudança na manufatura dos produtos, gerada pela crescente demanda da indústria por produtos de geometrias cada vez mais complexas, a ER vem se tornando uma resposta eficaz no fabrico de novos produtos, peças e componentes, proporcionando a reprodução conceitual de um objeto físico para um ambiente computacional (BENKO *et al*, 2002).

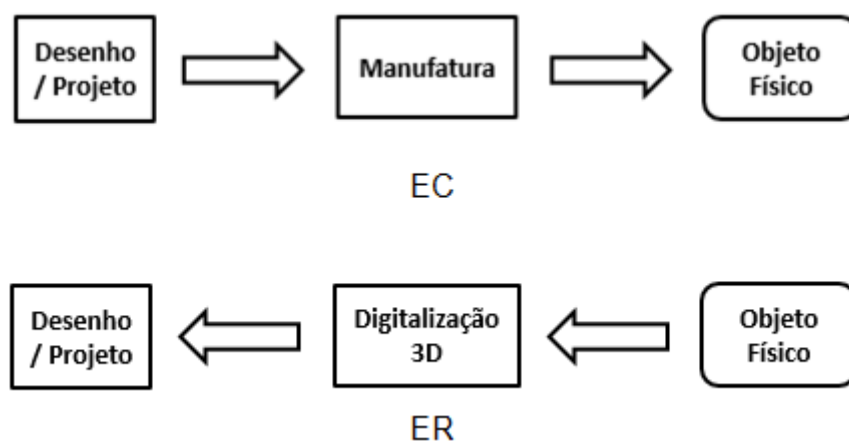
As técnicas de ER são amplamente utilizadas em processos de manufatura, projeto industrial e indústrias joalheiras para finalidades diversas, com o desenvolvimento de testes e reprodução de protótipos. Para RAJA e FERNANDES (2008) uma das principais motivações na execução de processos de ER é geração de conhecimentos sobre determinado produto, como princípio de funcionamento e simulações dimensionais. Ainda como característica atrativa fundamental, os processos de ER proporcionam a modificação conceitual de objetos sem demasiados custos agregados e possibilita a manufatura de modelos físicos de geometria e contornos peculiares por intermédio de Sistemas Integrados de Manufatura (XIUZI e HONGZHENG; 2010).

As ferramentas utilizadas para a implementação da ER estão no âmbito virtual, e seu desenvolvimento é baseado no processo de aquisição de partes geométricas a partir da modificação de um modelo CAD existente que foi previamente digitalizado a partir do escaneamento de uma peça física (YAU, 1993). O resultado deste escaneamento se instala no âmbito da geração de um arquivo virtual modelado por métodos numéricos. O intuito da modelagem do objeto virtual é o de modificação facilitada do objeto digitalizado a partir de



*softwares* específicos (SOKOVIK, 2006). A partir da modificação virtual do modelo a ER tem continuidade, como resposta do processo, no fornecimento de dados para a Manufatura Aditiva e simulações computacionais (DORF *et al*, 2007).

As técnicas de ER são aplicadas em um ambiente de integração entre computadores e o objeto físico a ser analisado. Para a realização do processo o fator de embasamento está situado no desenvolvimento do conjunto de dados técnicos referentes de uma geometria física (RAJA e FERNANDES; 2008). Para DUBRAVTHI (2012) o processo de ER é um processo oposto da engenharia clássica, ou Engenharia Convencional (EC), como mostrado na Figura 1.



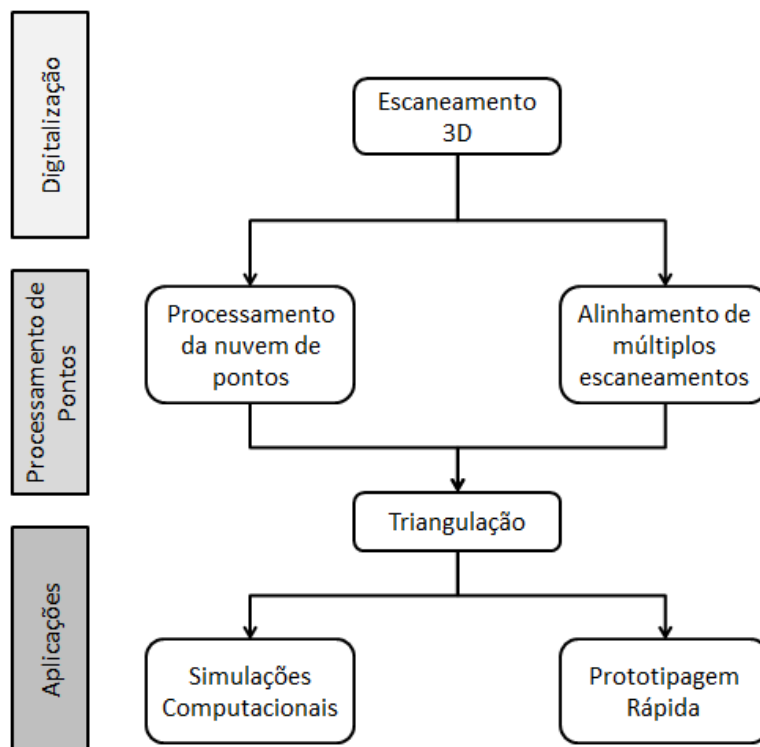
**Figura 1:** Engenharia Convencional e ER

**Fonte:** (PUNTAMBEKAR, 1994).

Nota-se pela Figura 1 que o processo de EC se inicia com o desenvolvimento de um projeto conceitual, e parte para a manufatura de um objeto físico. A ER demonstra o oposto ao processo, partindo de um objeto físico para um modelo virtual, a partir da realização de digitalização tridimensional.

O processo genérico de efetivação da ER segue três etapas principais, descritas na figura 2. Os três passos são a digitalização do modelo físico, o

processamento dos pontos e a aplicação específica do sólido virtual desenvolvido (RAJA E FERNANDES; 2008).



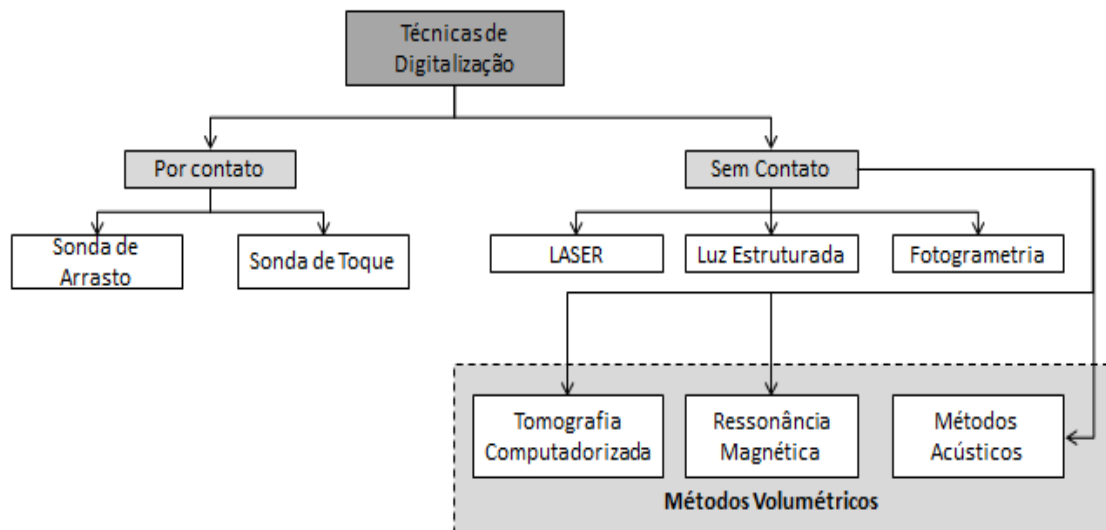
**Figura 2:** Processo de ER.

Conforme observado na figura 2, as etapas do processo de implementação da ER seguem diferentes passos para correta efetivação. A atribuição da etapa de digitalização é o escaneamento do modelo físico a partir de métodos de digitalização. A etapa de Processamento de pontos é realizada a partir do processamento direto da nuvem de pontos ou pela reconstrução e alinhamento de múltiplos escaneamentos, realizados em diferentes angulações. Após a triangulação o processo referente às aplicações se concretiza em simulações computacionais realizadas no modelo virtual ou com a manufatura de um protótipo físico por intermédio da Prototipagem Rápida. As especificações, bem como as aplicações mais comuns de cada etapa serão demonstradas nas seções que seguem.

## 2.2. PROCESSO DE DIGITALIZAÇÃO

O processo de digitalização de objetos físicos envolve as estratégias utilizadas para a escolha do melhor método de escaneamento, preparação do modelo a ser escaneado e as melhores técnicas que otimizam a captura do máximo de informações geométricas, detalhes dimensionais e texturas (PAVLIDIS *et al*, 2007). O principal objetivo do processo de digitalização é transferir as informações geométricas da peça real, física, para o modelo digital a ser estudado. (JAIN *et al.*; 2016).

O produto do escaneamento é a nuvem de pontos, que define a superfície e os contornos do objeto virtual. A nuvem de pontos contém todas as informações geométricas que o escaneamento conseguiu capturar (RAJA e FERNANDES; 2008). Dada a realização da primeira etapa, o escaneamento, estão disponíveis duas técnicas, como observado na Figura 3.



**Figura 3:** Técnicas de Digitalização.

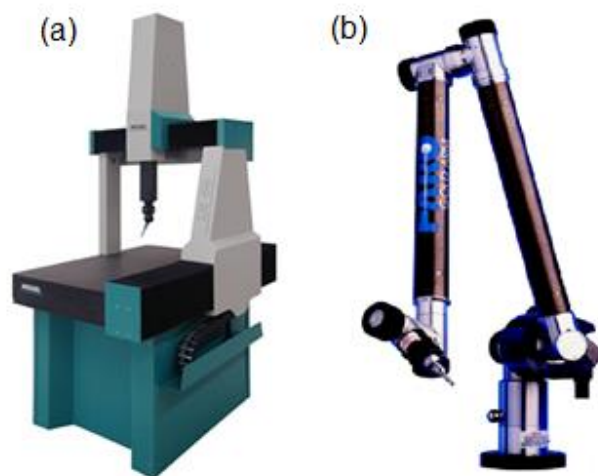
As técnicas de digitalização podem ser divididas em dispositivos que realizam a digitalização por contato e dispositivos que realizam a digitalização sem contato (RAJA e FERNANDES; 2008). Dentre as técnicas de digitalização sem contato existe uma subcategoria utilizada principalmente para aplicações

médicas, que são os Métodos Volumétricos (DUBRAVTHI, 2012). As principais técnicas de escaneamento das duas categorias, com contato e sem contato, serão discutidas nas seções seguintes.

### 2.2.1. DIGITALIZAÇÃO POR CONTATO

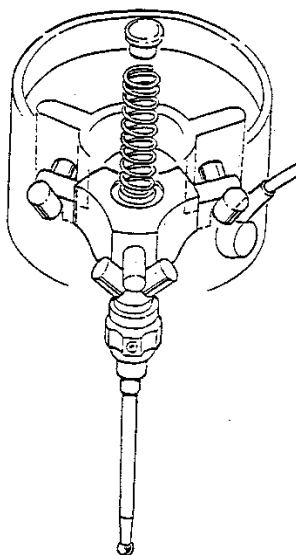
Considerada a forma mais antiga de se adquirir dados virtuais geométricos de um modelo físico, as máquinas de medição de coordenadas são amplamente utilizadas na metrologia industrial para realização de varredura dimensional, graças à flexibilidade, facilidade de uso e exatidão dimensional dos resultados (BOSH, 1995).

Nos equipamentos de medição da categoria de escaneamento por contato o objeto físico é submetido à análise de superfície a partir do contato de um sensor de pontos. Este sensor mensura, de acordo com a superfície do objeto escaneado, as coordenadas tridimensionais da nuvem de pontos. Para a realização da varredura completa da geometria do objeto, esta técnica utiliza braços mecânicos e Máquinas de Medição por Coordenadas (Coordinate Measurement Machines – CMM) além de códigos de controle numéricos (Computer Numerical Control - CNC). A Figura 4 demonstra os diferentes tipos de CMM.



**Figura 4:** (a) Máquinas de Medição por Coordenadas. (b) Braço Articulado  
**Fonte:** (WENZEL; 2017, FARO; 2017)

A avaliação geométrica dos sistemas de escaneamento por contato é definida através da geração de dados virtuais a partir da sonda de contato. Esses dados são parametrizados nos requisitos de posição, forma, localização e orientação a partir de algoritmos matemáticos realizados em *softwares* específicos (WANG; 2011). O sensor de contato funciona basicamente utilizando chaves de contato que são acionadas no determinado momento em que o sensor toca a peça. No momento do toque são adquiridas as coordenadas X, Y e Z do ponto (GENEST, 1994). O princípio de funcionamento se baseia na interrupção de um sinal elétrico no momento em que o sensor de contato toca a peça a ser medida. A representação dos componentes do sensor de contato é demonstrada na Figura 5.

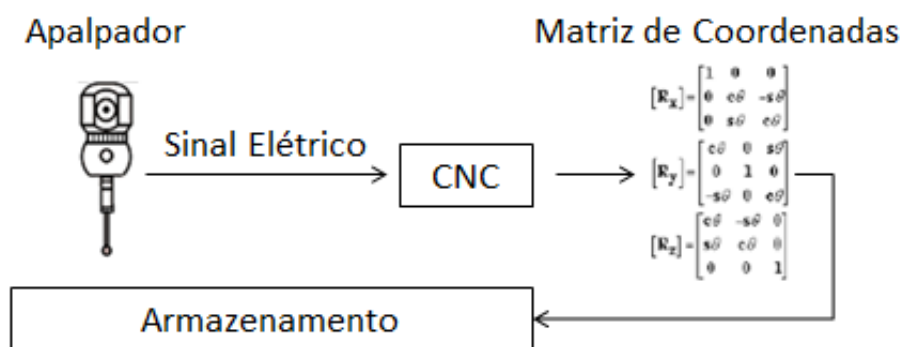


**Figura 5:** Componentes construtivos do sensor de contato  
(BUTLER, 1991)

Conforme observado na Figura 5, a estrutura do apalpador é um mecanismo cinemático composto por três peças cilíndricas dispostas sob pressão em seis esferas (ZHOU, 1996). Uma corrente elétrica passa em série pelos seis rolos e as três peças cilíndricas. Conforme a pressão de contato, entre o apalpador e a peça, ultrapassa a resistência da mola que mantém o sistema estável o mecanismo irá se mover da posição original, fazendo com

que a resistência de um ou mais contatos seja alterada, cortando assim a corrente elétrica. No momento em que a corrente elétrica é interrompida tem-se a medição dos pontos naquela determinada posição. Depois da realização da captura de pontos o apalpador se afasta da peça e a mola força o mecanismo para a posição inicial, restituindo a corrente elétrica (MAYER *et al*, 1996).

Para a realização da captura de pontos o sinal elétrico emitido pelo sensor de contato é convertido em uma informação inteligível para um Comando Numérico Computadorizado (CNC). Após a conversão o sinal é traduzido pelo CNC em coordenadas X, Y e Z, e é armazenado para posterior leitura, cálculos ou geração de relatórios (REID, 1995). O processo de aquisição de dados pode ser visualizado na Figura 6.



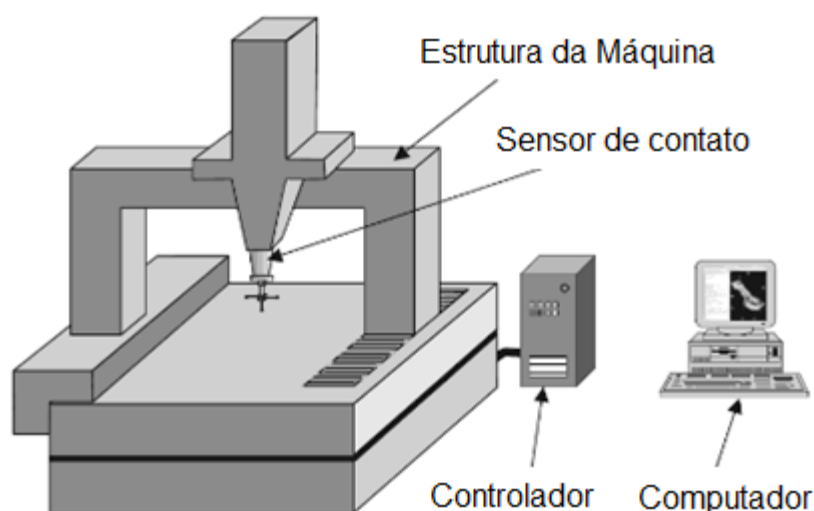
**Figura 6:** Processo de funcionamento de um sistema de medição por coordenadas.

Atualmente para a realização de medições por contato estão disponíveis duas técnicas de escaneamento por contato, sendo elas, a aquisição ponto a ponto, onde o sensor de contato é controlado de maneira automática, e a aquisição por arrasto ou varredura, onde o sensor, acoplado a um braço mecânico, é conduzido manualmente (RAJA e FERNANDES, 2008). Independente da tecnologia utilizada na captura de pontos, o princípio de aquisição, por apalpador de contato demonstrado nessa seção, permanece o mesmo. As duas técnicas de escaneamento por contato serão apresentadas nos tópicos seguintes.

### 2.2.1.1. MÉTODO DE AQUISIÇÃO PONTO A PONTO

No método de aquisição ponto a ponto o sensor de contato se movimenta em sentido vertical para baixo até entrar em contato com a peça a ser digitalizada. A partir do contato do sensor com a superfície da peça é gerada uma coordenada tridimensional da localização exata do sensor, que repete a operação até percorrer por completo a superfície onde a peça se encontra (WANG; 2011). O conjunto de pontos capturados pelo sensor resulta em uma nuvem de pontos organizada.

O sistema demonstrado na Figura 7 representa o método de aquisição ponto a ponto. É composto por uma estrutura com deslocamento triaxial ou livre, sensor de contato para a realização da captura de dados, uma unidade de controle, para sistemas de tri axiais e um computador para a realização dos cálculos e retorno visual do resultado do escaneamento (HOKEN E PEREIRA, 2016).



**Figura 7:** Sistemas componentes de uma Máquina de Medição por Coordenadas.

Para que o processo de medição ponto a ponto seja eficaz e capture os dados geométricos com precisão se faz necessário a preparação da peça e do ferramental de digitalização. Para SILVA (2005) a preparação segue os seguintes passos:

- Limpeza da peça: remoção, antes do início do escaneamento, de toda impureza que possa interferir no processo de captura de pontos pelo sensor de contato;
- Estabilização térmica da peça: garantir que toda a peça esteja com temperatura próxima à temperatura ambiente, evitando assim variações dimensionais causadas por dilatação ou contração da peça, gerando valores não reais para a medição dimensional;
- Fixação da peça: estabilização e imobilização da peça na mesa da máquina de medição de coordenadas, garantindo que perturbações no ambiente, como vibrações, não alterem o resultado da captura da geometria.

Após a realização da preparação da peça é preciso atentar para a preparação da máquina de medição de coordenadas, bem como o procedimento de medição, que segue os seguintes passos:

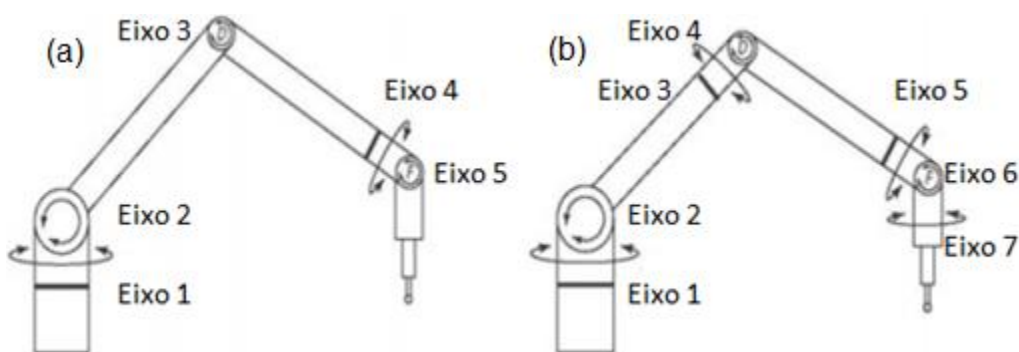
- Determinação e avaliação do apalpador a ser utilizado, levando em consideração as limitações geométricas da peça;
- Determinação da calibração da posição do sensor de contato, levando em consideração a localização da peça em relação ao sistema de coordenadas da máquina;
- Mensuração da superfície da peça em relação ao sistema de coordenadas da máquina;
- Definição dos contornos geométricos da peça;
- Representação das coordenadas adquiridas pela realização da coleta da captura de dados.

Observa-se com os passos relatados que não é possível definir, de maneira exata, uma estratégia de medição padronizada, visto que para peças de geometrias e dimensões diferentes, existirão estratégias de medição distintas (RAJA e FERNANDES; 2008). Vale observar que a realização da captura de pontos deve ser orientada de acordo com as características da peça.



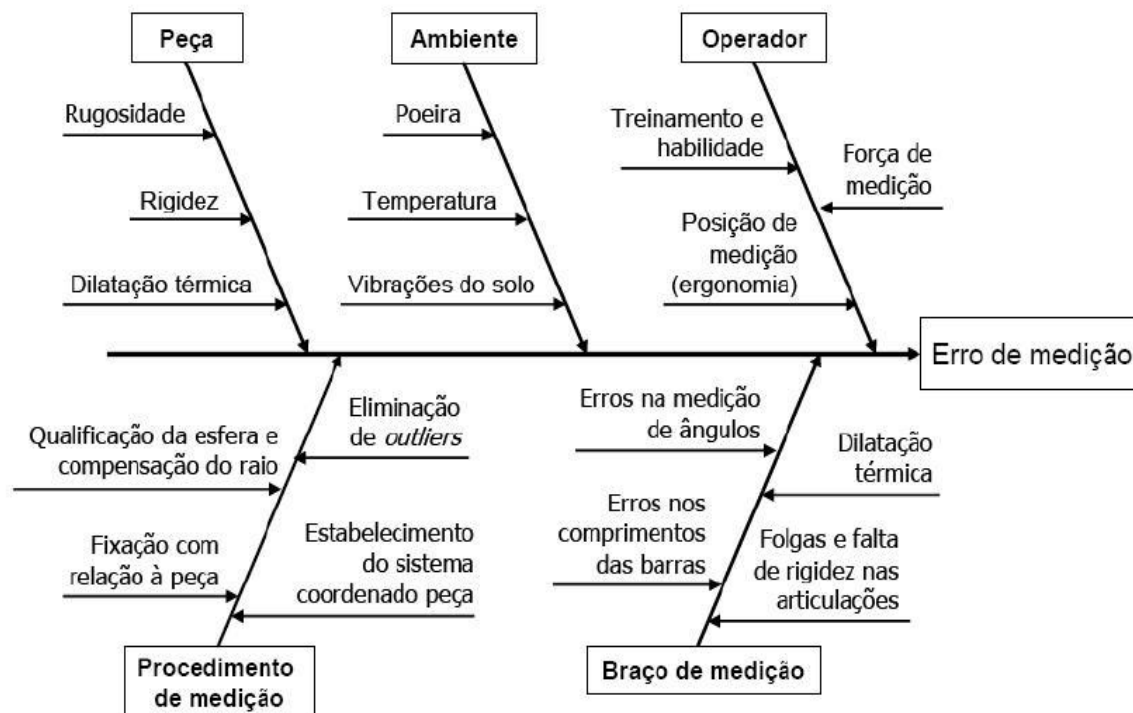
### 2.2.1.2. MÉTODO DE AQUISIÇÃO POR BRAÇO ARTICULADO

O segundo método de digitalização por contato, a medição por braço articulado, consiste em um dispositivo de medição realizada manualmente a partir de um braço mecatrônico composto de uma série de articulações, podendo conter cinco, seis ou sete graus de liberdade, e sensores angulares de posicionamento, que permitem determinar a posição do sensor de contato no espaço tridimensional (JÚNIOR, 2010). A Figura 8 apresenta duas representações de braços articulados em função do grau de liberdade.



**Figura 8:** Representação de braços de medição de coordenadas com cinco (a) e sete (b) graus de liberdade. (ASME; 2004)

Em geral, a precisão dos métodos de escaneamento por braço articulado é menor se comparado com o método de aquisição ponto a ponto, fator esse determinado pela dependência da habilidade do operador no caso, dos sistemas de braço articulado, e da rigidez do contato do braço articulado com relação à peça, fator esse que pode deformar a estrutura da peça, produzindo dados geométricos fictícios. Outros fatores que podem interferir no desempenho da digitalização de peças por braços articulados foram investigados por GONÇALVES (2006), e são demonstrados no diagrama de causa e efeito apresentado na Figura 9.



**Figura 9:** Diagrama representativo das principais causas de erros na medição por braços articulados. (GONÇALVES; 2006)

As principais formas de erros que afetam o desempenho da medição da peça física pela sonda de contato estão concentradas nas distorções causadas por erros geométricos, variações térmicas e erros de transdutor (RAJA e FERNANDES; 2008).

Os erros geométricos estão ligados principalmente à erros na montagem da CMM para a execução do processo de medição. Montagens fora das especificações corretas podem acarretar em medições fictícias causadas por excesso de força da sonda no momento do contato. Os erros causados por variações térmicas podem ser causados por deflexões no *probe* de medição, ou expansão e contração dos objetos de medição. Erros de transdutores são principalmente causados pela inadequação da superfície de contato do *probe* com a superfície de contato da peça a ser medida. Peças de dimensões menores necessitam de sensores com áreas de contato reduzidas para que as coordenadas capturadas sejam precisas (HERMANN; 2009).

Apesar da considerável quantidade de fatores que podem resultar em erros dimensionais nos escaneamentos por braços articulados, o método de digitalização em questão se sobrepõe ao método de aquisição ponto a ponto quando se trata de facilidade de uso e pontos alcançados. Por ser um sistema manual com variados graus de liberdade a sonda acoplada ao braço articulado possibilita maior captura de detalhes geométricos da peça se comparado com os equipamentos de aquisição ponto a ponto.

A Tabela 1 compara os dois métodos de escaneamento por contato, aquisição ponto a ponto e aquisição por braço articulado. São levadas em consideração características de acurácia e tipo de operação para os dois métodos. A comparação é realizada a partir de típicos *hardwares* comercializados para realização de ER.

Tecnologia	Fabricante/ Modelo	Precisão	Operação
Sonda de toque-gatilho, Braços mecânicos	FARO tecnologia/ FaroArm Platinum	$\pm 0.090$ até $\pm 0.431$ mm	Manual
	Immersion Corp./ MicroScribe MLX	0.1270 mm	Manual
Sensoriamento ponto-a-ponto com sonda de toque, CMM	Mitutoyo/ Euro-C-121210	0.001 mm	Automática
Sensores analógicos com sonda de varrimento, Máquinas CNC	Roland DGA Corp./ Picza PIX-30	0.05–5.0 mm em passos de 0.05 mm. Precisão de 0,025 para o eixo Z	Automática

**Tabela 1:** comparação de acurácia entre métodos de escaneamento por contato.

**Fonte:** (RAJA e FERNANDES; 2008)

Como características da técnica de escaneamento por contato pode-se observar como vantagens a alta acurácia na captura do objeto virtual, os custos reduzidos, e a possibilidade de mensurar geometrias com fendas profundas

(WANG; 2011). Considerando os dois métodos de aquisição de dados, ponto a ponto e por braço articulado, percebe-se que a escolha do método de escaneamento depende das características dimensionais e geométricas da peça, bem como da aplicação do modelo digital gerado (RAJA e FERNANDES, 2008). Por oferecer maior liberdade de movimento na operação de captura de pontos e por ter estrutura portátil, o método de aquisição de pontos por braço articulado se demonstra mais eficaz na captura dimensional de objetos de grande porte e de geometria complexa. Por ter uma característica estrutural rígida, sem oferecer total liberdade de movimentos, e dispor de maior precisão dimensional e geométrica na captura de pontos, o método de aquisição ponto a ponto é mais eficaz para realização de escaneamento em peças menores e que demandam maior precisão dimensional (AVIS, 2010).

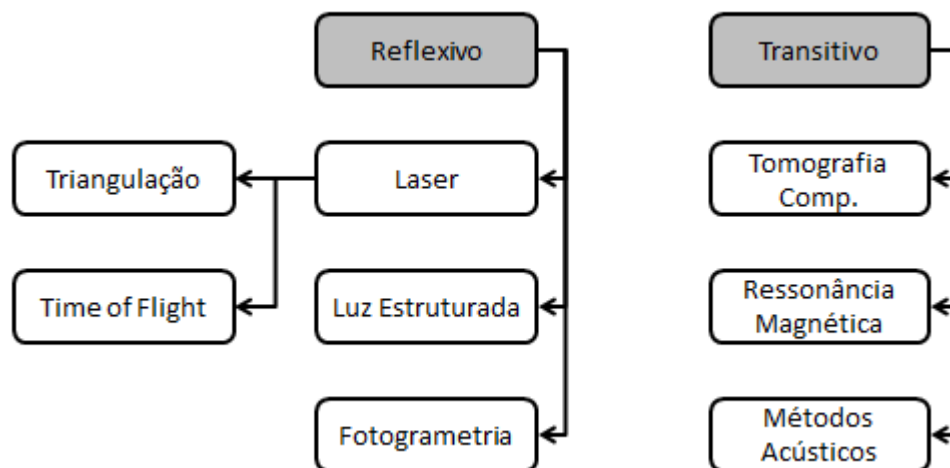
Como desvantagens, para ambos os métodos, pode-se listar a lenta captura de dados, a alta influencia de fatores externos, como temperatura e limpeza e a distorção na captura dos pontos em objetos macios, considerando que contato da sonda pode deformar a superfície da peça gerando dados virtuais fictícios (JUNIOR; 2010).

## **2.2.2. DIGITALIZAÇÃO SEM CONTATO**

A segunda técnica de digitalização faz referência ao escaneamento sem contato. Nessa técnica padrões geométricos do objeto físico, capturadas através de fontes luminosas, sonoras ou campos magnéticos são reconstruídos em um modelo virtual através de algoritmos de Processamento Digital de Imagens (WANG, 2011). Os dados geométricos da digitalização são calculados e o sólido é gerado por técnicas de triangulação e sobreposição de imagens, contudo, não existe contato do *hardware* de aquisição com o objeto físico durante o processo de escaneamento (GALANTUCCI e PIPEN; 2015).

Dentre os métodos dispostos para a realização do escaneamento digital sem contato as técnicas disponíveis são classificadas de acordo com a característica da tecnologia de processamento do sensor de captura de dados, se por forma transitiva, reconstruindo o objeto virtual a partir de fatiamento e

sobreposição de imagens, ou por forma reflexiva, capturando os dados a partir da reflexão da luz incidente no objeto (LARTIGUE *et al*, 2002). A Figura 10 apresenta a classificação das diversas formas de aquisição de dados para o escaneamento sem contato.



**Figura 10:** Classificação das técnicas de aquisição de dados sem contato.

Apesar da semelhança no que se refere à abordagem de escaneamento, sem contato direto do *hardware* com a peça, os métodos de digitalização sem contato apresentam características distintas quanto à técnica de processamento de dados e aquisição da nuvem de pontos, que serão abordados nos parágrafos que seguem.

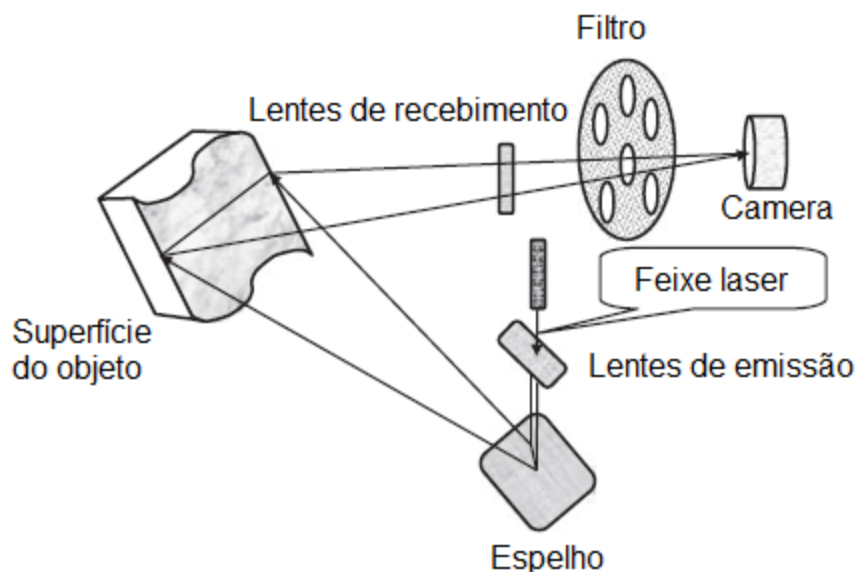
O método de escaneamento LASER e de luz estruturada utiliza técnicas baseadas na captura de uma fonte adicional de luz projetada. Para o método LASER a técnica consiste na captura de linhas projetadas pelo LASER no objeto, definindo assim seu contorno geométrico, ou na captura de dados através da reflexão do laser incidente no objeto. Para o método de luz estruturada a técnica consiste na projeção de um padrão conhecido de luz, tais como linhas, pontos e grades, sobre a superfície do objeto sujeito à medição. A informação da geometria 3D é obtida através da análise das deformações da projeção incidente sobre o objeto (SALVI *et al.*; 2007).

A técnica predominante no método de Fotogrametria se baseia na consideração de informações adicionais como sombreamento, forma de textura e sobreposição de imagens em diferentes angulações para se adquirir as informações tridimensionais do modelo (RAJA e FERNANDES, 2008). São utilizados para essa técnica informações de imagens bidimensionais que permitem estimar a profundidade do modelo. A estimativa é realizada a partir da distorção das unidades de textura e do sombreamento capturado nas imagens (GERONÈS; 2007).

Para a categoria de métodos transitivos, Tomografia Computadorizada, Ressonância Magnética e Métodos Acústicos, a técnica de aquisição e processamento de dados se baseia na captura de múltiplas visões de uma mesma camada do objeto a ser escaneamento (RAJA e FERNANDES, 2008). Duas ou mais vistas são tomadas de locais diferentes formando a geometria do objeto em determinada camada. O cálculo da sobreposição das camadas digitalizadas forma a superfície 3D do modelo virtual. As seções que seguem demonstram, com mais detalhes, os princípios de funcionamento dos métodos de escaneamento sem contato (SOKOVIC, 2006).

#### **2.2.2.1. DIGITALIZAÇÃO POR FEIXE LASER**

O método de escaneamento por feixe LASER é realizado através da captura, por intermédio de uma câmera, do padrão formado entre a linha LASER emitido pelo cabeçote de digitalização e o objeto a ser digitalizado. O cabeçote de digitalização emite um feixe LASER, o qual incide pontualmente sobre o objeto físico, formando um contorno padrão entre o LASER e a superfície do objeto (PEARS, 2014). Esse padrão é refletido para a câmera, que captura o contorno. O contorno é então processado por um *software* específico. A integração entre os contornos gerados pela incidência do LASER na superfície do objeto gera o modelo digital (GESTEL; 2008). A Figura 11 apresenta a representação dos equipamentos de digitalização por feixe LASER.



**Figura 11:** disposição dos equipamentos para digitalização por feixe **laser**

**FONTE;** (WANG; 2011).

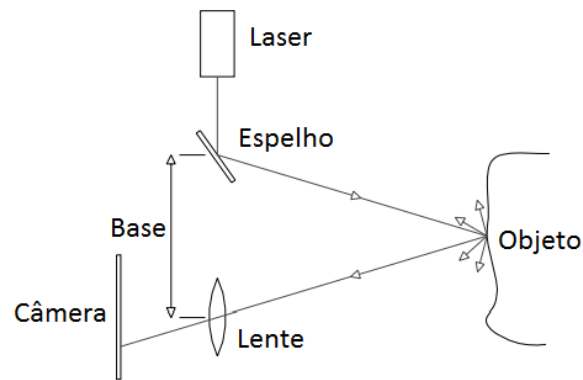
Os dispositivos de captura de coordenadas baseadas em feixe LASER são compostos por um módulo de emissão LASER de classe 1 operando em um comprimento de onda média de 180 a  $1,0 \cdot 10^6$  nm, de uma lente de emissão que tem finalidade de ajustar o foco do laser, um espelho refletor, uma lente de recebimento de feixe com o objetivo de ajustar o foco do LASER incidente, o filtro de câmera, necessário para a filtragem da incidência de luz, e o dispositivo câmera, com a finalidade de capturar os feixes LASER com as informações de geometria e dimensão (RAJA E FERNANDES, 2008).

Em um primeiro momento, o feixe de LASER acionado tem seu foco ajustado pela lente de emissão, de maneira automática ou manual. O espelho reflete o feixe para o objeto de estudo. O feixe então refletido pelo objeto e viaja em direção a lente de recebimento, que ajusta automaticamente o foco do feixe LASER. O componente filtro retém a captura de fontes luminosas com comprimento de onda fora do intervalo compreendido entre as especificações do LASER, e a câmera de captura, que tem sua resolução variante de acordo com o modelo utilizado, realiza a captura do feixe LASER refletido (WANG, 2011).

Para a realização dos cálculos de processamento e formação do sólido virtual o método de escaneamento LASER dispõe de duas técnicas distintas de medição, a triangulação e a técnica denominada estimativa *time-of-flight*, que serão descritas nos parágrafos que segue (FRANCA *et al*, 2005).

Para a técnica de triangulação um LASER pontual, ou um feixe LASER, é projetado sobre a superfície do objeto a ser digitalizado, e a geometria de incidência do LASER é registrada por uma ou mais câmeras. A angulação entre a câmera e o LASER é registrado internamente pelo software de escaneamento (WANG, 2011). O comprimento entre a fonte do LASER emitido e a câmera é conhecido por intermédio de calibração prévia. O ângulo registrado, juntamente com a distância entre o LASER e a câmera (base), determina, geometricamente, a distância entre o objeto e o instrumento de fonte LASER, distância essa que também pode ser medida a partir de calibração prévia. A partir desses dados de referenciais de distância é possível calcular as dimensões do padrão capturado pela incidência do LASER no objeto. O processo de captura de padrões é repetido, e o conjunto dos padrões define a geometria completa do sólido virtual. Essa técnica de escaneamento abrange desvios padrão de pontos 3D de menos de 1 milímetro. A precisão será influenciada pelo comprimento da base dos instrumentos de medição e da distância do objeto. Com um comprimento de base fixa, o desvio padrão de medição da distância aumentará proporcionalmente ao quadrado da distância, considerando a determinação geométrica das dimensões do objeto. (CHEN; 2013). A Figura 12 apresenta a representação esquemática da técnica de digitalização por triangulação.

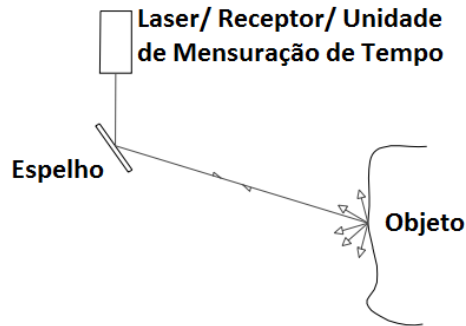




**Figura 12:** Técnica de triangulação.

**FONTE:** (BOEHLER, *et al.*; 2001)

A técnica de estimativa *time-of-flight* consiste em um diodo LASER que projeta uma série de pulsos LASER para o objeto a ser escaneado. O pulso LASER é então refletido de maneira difusa pela superfície, e parte da luz volta para o receptor (GERONES, 2007). O comprimento de onda do LASER refletido é medido e comparado com o comprimento de onda da emissão LASER original. Essa comparação fornece a estimativa de distância entre o módulo de projeção LASER e o objeto a ser escaneado. O conjunto de padrões captados pelo receptor forma a geometria do sólido virtual. A técnica de estimativa *time-of-flight* fornece uma varredura laser capaz de medir distâncias muito mais longas do que a triangulação, no entanto, essa técnica de digitalização é menos precisa, principalmente para curtas distâncias. A precisão observada é, por volta, de dois e três centímetros, dependendo da distância entre o objeto real e o dispositivo de escaneamento (LEE *et al.*, 2012). A Figura 13 apresenta a representação esquemática da técnica de digitalização por *time-of-flight*.



**Figura 13:** Técnica de estimativa time-of-flight.

**FONTE:** (BOEHLER; *et al.* 2001)

O escaneamento LASER produz nas duas técnicas apresentadas uma matriz de coordenadas tridimensionais para cada varredura realizada pelo escaneamento. O conjunto das matrizes de varreduras realizadas produz a nuvem de pontos do modelo virtual (RAJA e FERNANDES; 2008). Dado o alinhamento das nuvens de pontos segregadas é realizado a partir do efeito do padrão Moiré. O efeito em questão se trata da deformação de padrão entre amostragens de imagens similares causados pela interferência entre a sobreposição destas imagens. Com este padrão de interferência é possível determinar, posição, movimento e deformações de objetos compostos pelas imagens em sobreposição (SPILLMANN; 1993). Para a tecnologia de escaneamento LASER, a sobreposição das nuvens de pontos de escaneamentos distintos podem ser alinhadas graças à deformação causada pelo padrão de interferência entre os escaneamentos.

De acordo com SOKOVIC (2006) o processo de digitalização a LASER tem como principal vantagem a velocidade de digitalização, sendo possível a aquisição do modelo virtual em um relativo curto espaço de tempo além da possibilidade de digitalização de diversos materiais, até mesmo em estado líquido. O tempo demandado para a digitalização LASER, a disposição das coordenadas obtidas, bem como a velocidade de processamento da nuvem de pontos está diretamente relacionada com a tecnologia utilizada para a realização do escaneamento (RATHNAYAKA, 2012).

Segundo GESTEL (2008) o principal êxito do escaneamento LASER em detrimento das outras técnicas de escaneamento se situa na capacidade de captura de muitos pontos em um curto espaço de tempo sem exigir contato físico com o objeto, possibilitando um escaneamento mais preciso de geometrias complexas.

Todavia, existem desafios relacionados com a captura de imagens no escaneamento a LASER. Se por um lado o tempo de captura dos pontos é reduzido, por outro lado existem limitações na captura de pontos em superfícies demasiadamente brilhantes e objetos translúcidos, como alguns plásticos e vidros. Para estes casos é preciso de um tratamento prévio no material do objeto escaneado de modo a deixar sua superfície difusa (WANG, 2011).

Outras fontes de erros na obtenção do objeto virtual pela técnica de escaneamento a LASER podem ser oriundas de perturbações externas na digitalização, como vibrações de mecanismos e do cabeçote de medição e erros de software. Para a correção de tais erros o processo de calibração dos instrumentos de medição se apresenta não só como um instrumento de verificação de erros de digitalização, mas também como um compensador na reconstrução de superfícies (SANSONI; 2004).

#### **2.2.2.2. DIGITALIZAÇÃO POR FOTOGRAMETRIA**

De acordo com os princípios e conceitos da digitalização sem contato, o método de digitalização por meio da fotogrametria é definido como a ciência de aferir e determinar os contornos e posições geométricas de um determinado objeto a partir do processamento de duas ou mais imagens bidimensionais desse objeto em questão. (SCHWENKE; 2007).

Para RAJA E FERNANDES (2008) a digitalização por fotogrametria é um processo de representação tridimensional de um determinado objeto a partir de imagens planas, onde a câmera é o dispositivo que realiza a transformação, ou o mapeamento, das coordenadas 3D em espaços 2D. Como

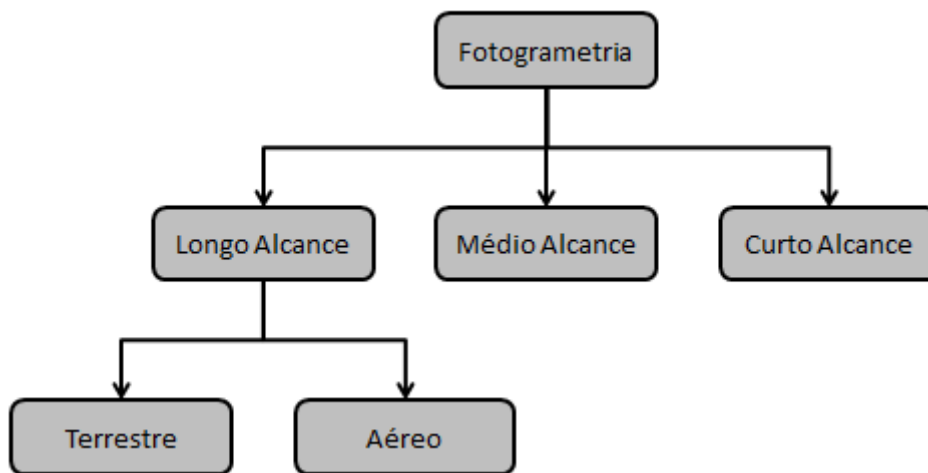
limitação, a técnica de fotogrametria não realiza o completo mapeamento dimensional do objeto, uma vez que a perda de informações, como a profundidade, é comum.

Ao realizar a captura das fotografias de dois locais distintos, pontos comuns são identificados em cada imagem. A partir de então um raio de visão é instituído a partir da localização da câmera até o ponto capturado do objeto, produzindo assim as coordenadas tridimensionais do modelo virtual. A fotogrametria é uma técnica estereoscópica, ou seja, utilizada para se obter informações do espaço tridimensional, e utiliza como fundamento a lei dos senos para encontrar as coordenadas e a distância de um ponto desconhecido (WANG, 2011).

Atualmente as técnicas do método de fotogrametria são utilizadas em diversas aplicações em variadas áreas do conhecimento, como no estudo da topografia, controle da qualidade em linhas de produção, indústria aeroespacial e automotiva, desenho computacional para engenharia civil e para a arquitetura e preservação de documentos históricos (GERBINO *et al*, 2004).

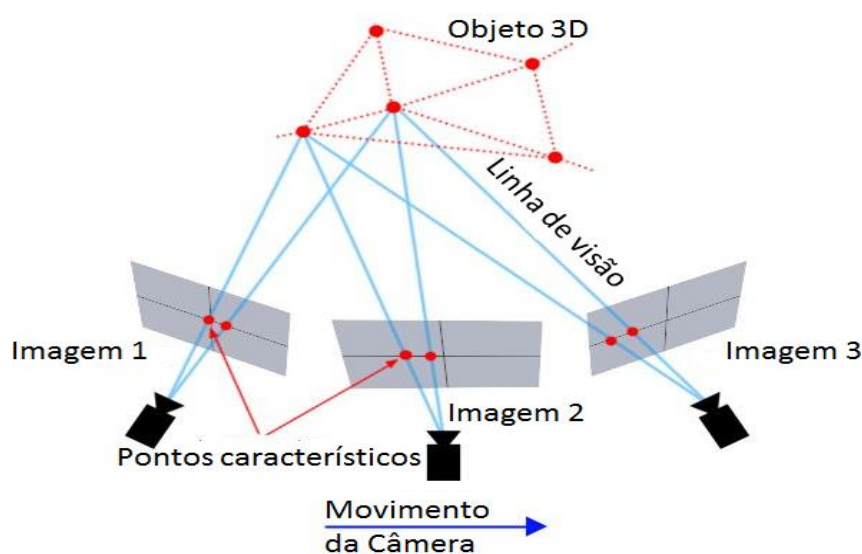
As aplicações da fotogrametria são diversas, sendo que algumas empresas utilizam a técnica para gerar um sistema de referência de coordenadas de alta precisão com o objetivo, principalmente, de mensurar o dimensionamento de objetos (MILES, 2012).

As técnicas de fotogrametria podem ser classificadas em três categorias (Figura 14), que se distinguem por sua aplicabilidade, que são a fotogrametria de longo alcance, utilizada para a produção de mapas topográficos e reconstrução de edifícios, a fotogrametria de médio alcance, utilizada para aplicações industriais, e a fotogrametria de curto alcance, que é utilizada para digitalização de peças de pequenas dimensões (WANG, 2011).



**Figura 14:** Categorias da Fotogrametria

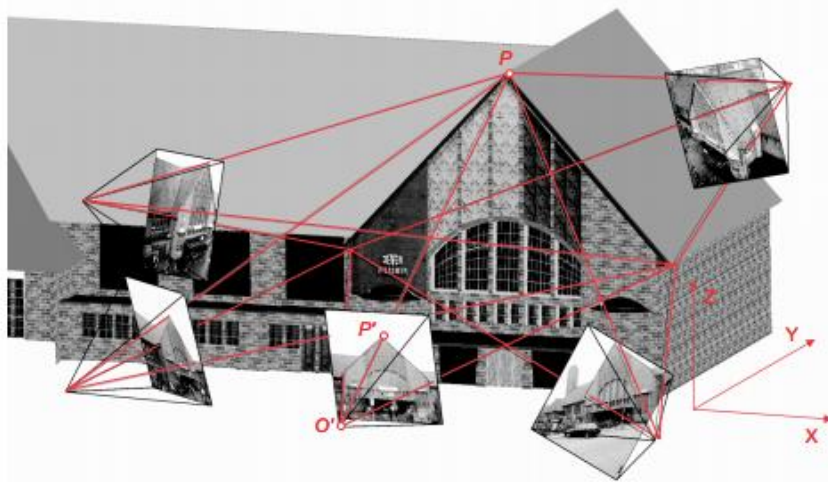
Para RAJA E FERNANDES (2008) a técnica de fotogrametria parte do conhecimento das coordenadas bidimensionais semelhantes entre duas ou mais imagens capturadas pela câmera em ângulos diferentes. A partir da projeção das imagens é possível realizar aferição das coordenadas tridimensionais do objeto através do princípio da triangulação. A Figura 15 demonstra o sistema de aquisição de imagens a partir de câmeras para o método de Fotogrametria.



**Figura 15:** Aquisição de imagens para a técnica de Fotogrametria

**FONTE:** (MANSON; 2013).

A localização dos pontos tridimensionais no espaço é determinada a partir da análise geométrica de pares de fotografias bidimensionais tomadas em distâncias e angulações distintas. Os pontos característicos tridimensionais coletados são então relacionados para a construção do modelo virtual a partir de imagens 2D por intermédio da correlação entre o mesmo ponto de diferentes imagens representando diferentes angulações. A profundidade do modelo é estimada pelo cálculo aproximado da linha de visão entre a câmera e o objeto a ser digitalizado, como mostra a Figura 16.



**Figura 16:** Princípio de medição da **Fotogrametria**.

**FONTE:** (LUHMANN, 2006)

Considerando o princípio ilustrado na Figura 16, a construção da forma e posição do modelo virtual é determinada pelo conjunto de imagens bidimensionais de perspectivas diferentes, onde cada ponto de imagem  $P'$  juntamente com o correspondente centro de perspectiva  $O'$  define a direção espacial o ponto correspondente a  $P$ .

A aquisição de imagens pelo método da fotogrametria apresenta a vantagem de consumir pouco tempo na preparação e obtenção dos dados iniciais, já que eles se resumem a imagens digitais. Outro aspecto relevante é que não há limitação dos objetos digitalizados no que tange a peso e tamanho.

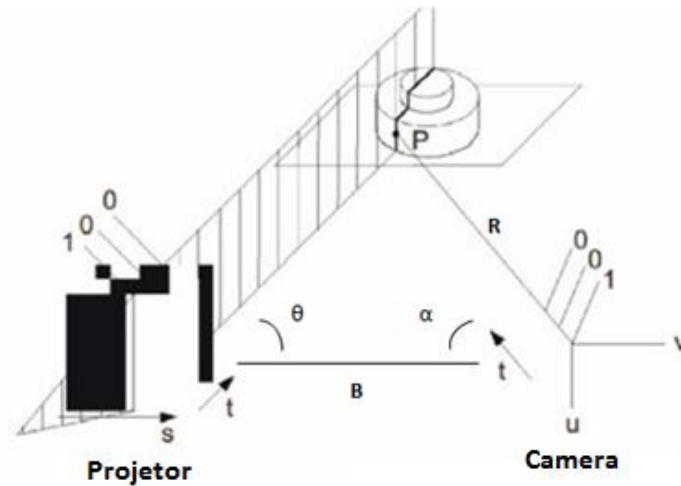
Para AHRENS et al.(2013) esse método apresenta grandes variações no modelo final quando são utilizadas imagens com diferentes distâncias focais e

alto custo relacionado à obtenção dos equipamentos quando uma maior precisão é demandada, sendo as câmeras de alta resolução equipamentos de alto valor agregado. Segundo REMONDINO (2013), quando utilizadas as câmeras digitais convencionais, este método apesar de apresentar menor precisão, é uma técnica de baixo custo, de alta flexibilidade e portabilidade, possibilitando a medição de objetos in loco.

### **2.2.2.3. DIGITALIZAÇÃO POR LUZ ESTRUTURADA**

O método de escaneamento a partir de luz é realizado por intermédio de uma ou mais câmeras *Charge-Coupled Device* (CCD) e um projeto de luz branca estruturada. A técnica consiste na projeção de padrões conhecidos sobre o objeto em estudo. A análise da deformação dos padrões projetados fornece o contorno geométrico do objeto, construindo a partir desses dados o modelo virtual.

O ângulo formado entre a luz que incide sobre o objeto a ser digitalizado e luz refletida não deve ser muito pequeno, caso contrário o padrão projetado na superfície se torna desprezível e não é capturado pela câmera. O centro óptico e o plano da imagem da câmera são calculados a partir dos parâmetros de calibração da própria câmera. A captura dos pontos é realizada a partir da diferença entre a geometria esperada, plano, e os contornos obtidos pela deformação de luz causada pela incidência do padrão luminoso. Quando os pontos das coordenada espaciais são calculados a superfície pode ser construída (PESHKO, 2005). Uma única imagem pode ser suficiente para construir toda a superfície examinada, porém, em superfícies com muita curvatura, o sombreamento causado pela geometria do objeto pode interferir na captura dos padrões e produzir um modelo virtual com distorções geométricas (SALVI *et al*, 2004). A Figura 17 ilustra a digitalização por luz estruturada.



**Figura 17:** Representação da digitalização por luz estruturada

**FONTE:** (JECIĆ; 2003)

A câmera captura as imagens bidimensionais projetadas sobre a superfície do objeto, sendo que, o princípio do método de luz estruturada se fundamenta na extração dos contornos tridimensionais a partir da distorção do padrão projetado sobre o objeto (HANSARD, 2012). Conforme os ângulos ilustrados na Figura 17, a relação entre o sensor de imagem (câmera), o projetor de luz estruturada e o ponto da superfície do objeto pode ser expressa pelo princípio da triangulação conforme a Equação 1.

$$R = B \cdot \frac{\text{sen}(\theta)}{\text{sen}(\alpha + \theta)}$$

**Equação 1:** Cálculo para triangulação do método de luz estruturada. (GENG; 2011).

O objetivo da técnica de triangulação para o método de luz estruturada é a diferenciação dos pontos de luz projetados e capturado pela câmera. A distância entre o ponto de luz e a câmera (R) fornece a medição da coordenada de profundidade do objeto no ponto da incidência do padrão. A forma e a geometria do modelo virtual é estimada a partir do conjunto de pontos das coordenadas bidimensionais X e Y associadas com o conjunto de variáveis R capturadas no decorrer do processo de digitalização (GENG, 2011).

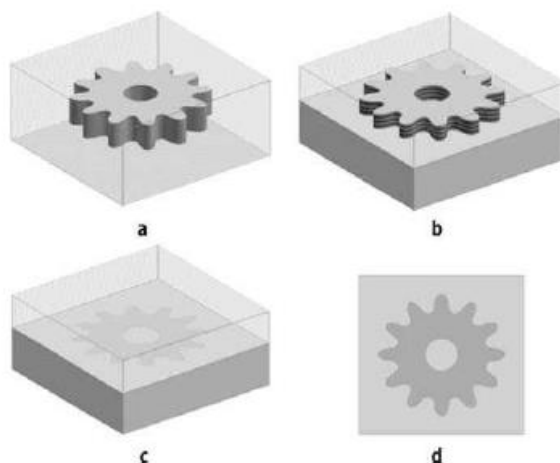


Durante a realização da medição a orientação entre a câmera e projetor deve permanecer intacta para que a calibração seja precisa e as dimensões do objeto em estudo sejam alcançadas pelo modelo virtual. A resolução do modelo digital é uma função direta do número de pixels alcançado pela resolução da câmera na captura do padrão projetado (WANG; 2011).

Como vantagem para a utilização de digitalizados baseados no método de luz estruturada pode-se considerar a velocidade de escaneamento, visto que, ao passo de digitalizar um ponto de cada vez, o método de luz estruturada realiza a digitalização de vários pontos de uma só vez, a vantagem da realização da varredura em movimento e em tempo real, e a acurácia elevada do método de digitalização. Como desvantagens é observado a limitação na iluminação ambiente, visto que a alta incidência de luz pode interferir na captura da projeção do padrão incidente sob a superfície do o objeto, e a baixa capacidade de digitalizar materiais translúcidos, já que o padrão luminoso não retorna os dados de geometria do objeto para esses materiais (GEORGOPOULOS, 2010).

#### **2.2.2.4. DIGITALIZAÇÃO POR TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA**

Considerando os métodos de digitalização sem contato, estão os métodos se varredura transversal. Para essa técnica é utilizado o princípio volumétrico de digitalização (Figura 18), e o objeto virtual é formado a partir de diversas imagens adquiridas (RAJA E FERNANDES, 2008).



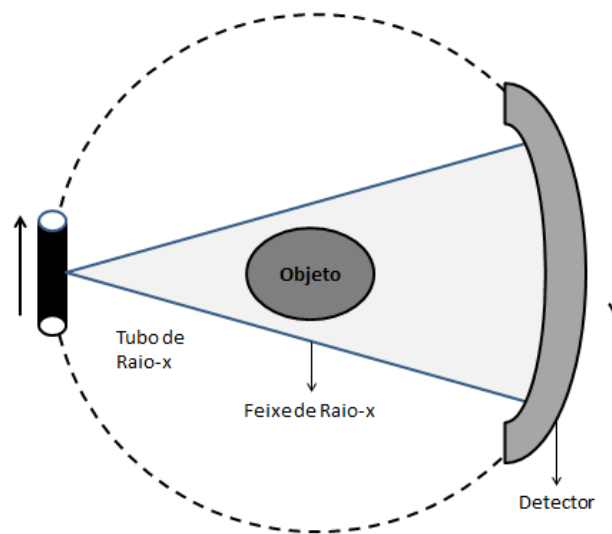
**Figura 18:** Processo para aquisição de datas em métodos volumétricos. (a) peça a ser digitalizada. (b) cortes em seções da peça, (c) realização do corte. (d) seção correspondente.

A partir do método volumétrico de escaneamento, a Tomografia Computadorizada (T.C), também denominada CAT (*Computer Assisted Tomography*) é um método de escaneamento amplamente utilizado pela medicina para a realização de diagnósticos médicos, sendo o primeiro método de escaneamento capaz de fornecer imagens tridimensionais do corpo (PUYBASSET *et al*, 1998).

Nesse método de escaneamento imagens são digitalizadas a partir da incidência de raio-x. Essas imagens são processadas em um computador para criar fatias virtuais de um corpo. A sobreposição das fatias forma o modelo virtual (HSIEH, 2003). O método de T.C é uma solução para suporte aos diagnósticos em ossos, visto que esses absorvem mais a radiação do que outras partes do corpo, todavia, é possível adicionar material de contraste, permitindo que outros órgãos se tornem mais sensíveis à radiação e sejam digitalizados tal como os ossos (PESHKO, 2005).

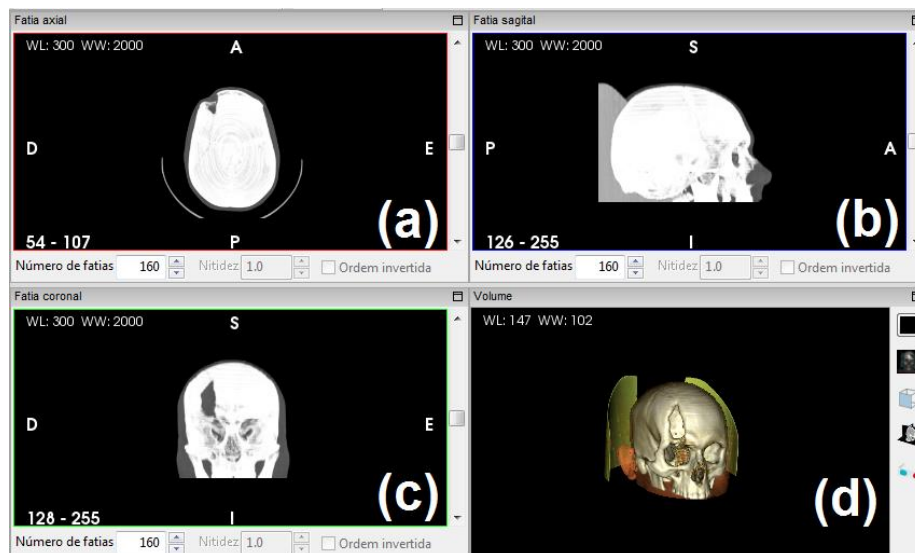
O princípio de funcionamento utilizado nas máquinas atuais (Figura 19) consiste em um feixe de radiação que varre 360° o corpo a ser digitalizado. Os detectores acoplados na máquina realizam a leitura da radiação e enviam os dados para o software de processamento, que constrói virtualmente a fatia do corpo correspondente à leitura dos dados enviados. As várias fatias

construídas e sobrepostas formam a superfície tridimensional do corpo (MIC, 2003).



**Figura 19:** Representação do princípio de funcionamento da TC.

Para a reconstrução tridimensional do objeto o equipamento de tomografia computadorizada deve percorrer a dimensão do copo. Os dados de imagem virtual são processados e enviados para software de reconstrução em escala de cinza, sendo que a intensidade do contraste da imagem irá depender da absorção do raio-x pelo tecido digitalizado (HSIEH, 2003). A Figura 20 demonstra a representação de um software de processamento de imagens digitais de TC.

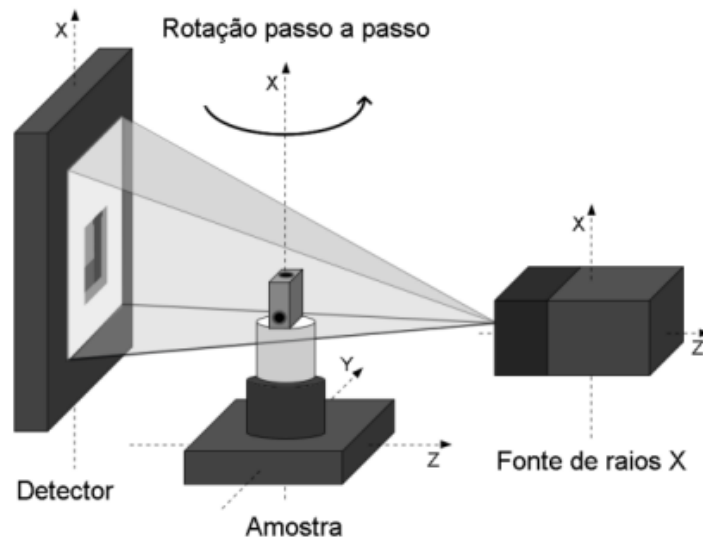


**Figura 20:** Tela de um software de processamento digital de imagens médicas – Imagens de TC. (a) Corte axial. (b) corte sagital. (c) corte coronal. (d) sólido 3D.

Podem ser observadas na Figura 20 as imagens em escala de cinza, em diferentes perspectivas, juntamente com o sólido gerado a partir da sobreposição das imagens. É possível observar também que o tecido ósseo se destaca entre os outros tecidos, fator determinado pela maior absorção do raio-x por esse tecido.

Além da aplicação da TC para finalidades médicas é observável a sua aplicabilidade para digitalização de outros objetos, como peças metálicas (SILVA, 2013). O método de escaneamento em questão se torna uma solução viável para a detecção de trincas, poros e descontinuidades presentes no material metálico.

A Figura 21 apresenta o princípio de funcionamento de uma máquina de TC por raio-x para digitalização de uma peça metálica.



**Figura 21:** Representação do princípio de funcionamento da TC para digitalização de peças metálicas

**FONTE:** (SILVA, 2013).

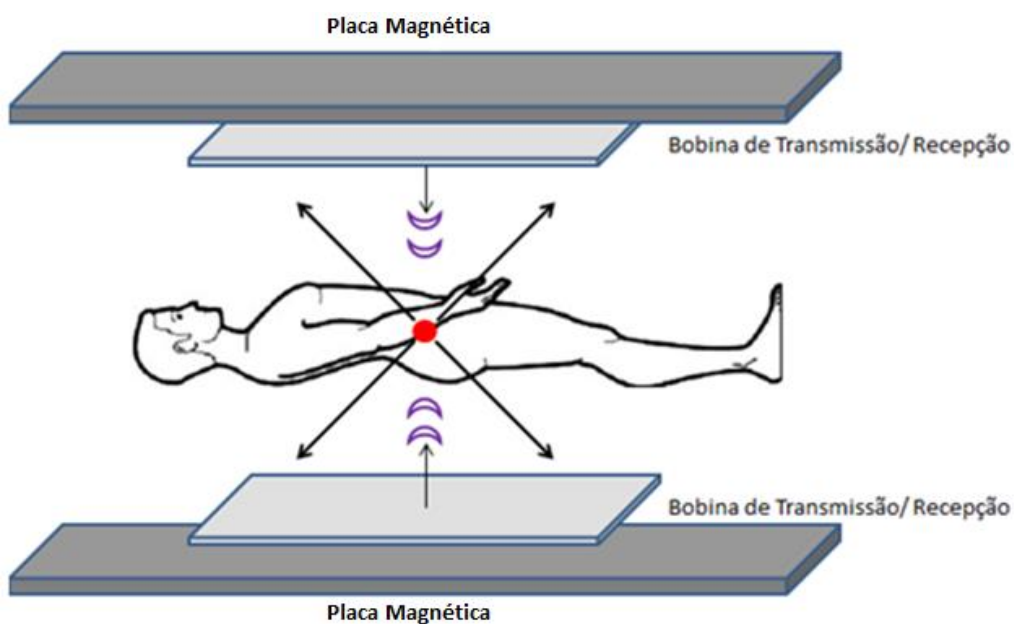
Como vantagem do uso da tomografia computadorizada pode-se ressaltar a capacidade de digitalização de objetos que não estejam visíveis, como no caso de órgãos e ossos. (RAJA e FERNANDES; 2008) A acurácia e a fidelidade do modelo digital dependem da quantidade de seções em que o objeto virtual é construído. Como desvantagens pode-se citar a alta demanda de energia para a realização da digitalização, o custo elevado e a dimensão dos equipamentos de escaneamentos, que afetam a praticidade do método. Segundo SILVA (2013) os materiais metálicos digitalizados a partir da TC se limitam quanto ao tamanho na realização da digitalização, visto que peças de maior densidade e tamanho demandam alto nível de energia no processo, inviabilizando assim a digitalização.

#### **2.2.2.5. DIGITALIZAÇÃO POR RESSONÂNCIA MAGNÉTICA**

O método de digitalização por Ressonância Magnética (RM) consiste em uma tecnologia de imageamento não invasiva que produz imagens tridimensionais digitais, principalmente, de um corpo animal sem a utilização de radiação prejudicial ao organismo. A técnica de RM é comumente utilizada para

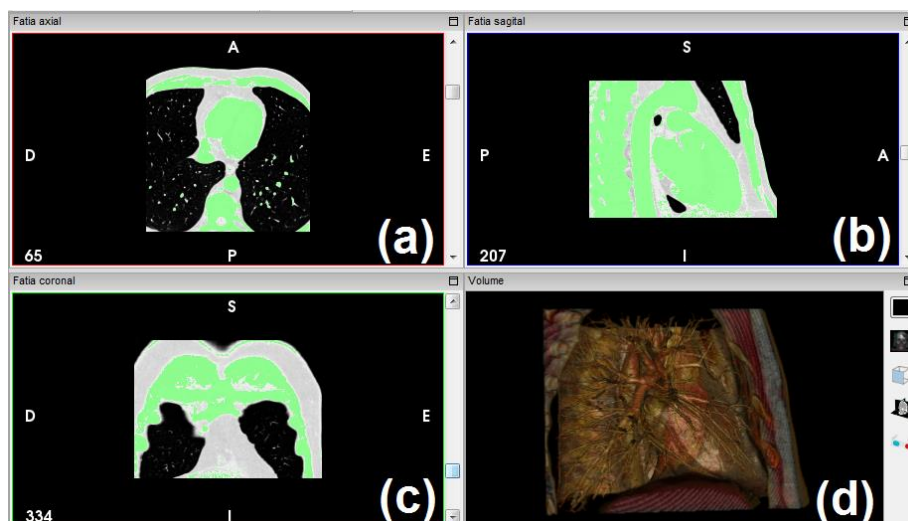
detecção de diagnósticos de doenças, monitoramento e tratamento (PEAT, 2015).

O princípio básico da Ressonância Magnética é fundamentado no estímulo atômico das moléculas de água submetidas a um campo magnético induzido. A técnica consiste na criação de um campo magnético ao redor da área a ser digitalizada e detectar a mudança da direção de rotação dos prótons da água que compõe os tecidos vivos. Os equipamentos de RM são compostos de ímãs que produzem um campo magnético (WASSERMANN, 2015). A Figura 22 ilustra o princípio de funcionamento da Ressonância Magnética, onde um corpo, sujeito a um campo magnético, libera energia a partir do realinhamento de eixo. Essa energia é capturada pelas bobinas de recepção e transmissão.



**Figura 22:** Representação do princípio de funcionamento da RM.

A principal diferença observada entre o método de RM e o método de TC é a capacidade, do primeiro método, de digitalizar de maneira mais eficiente os tecidos moles do corpo como articulações, órgãos pélvicos, fígado, sistema biliar e coração. A Figura 22 demonstra a representação de imagens produzidas através de Ressonância Magnética em um software de processamento digital de imagens médicas.

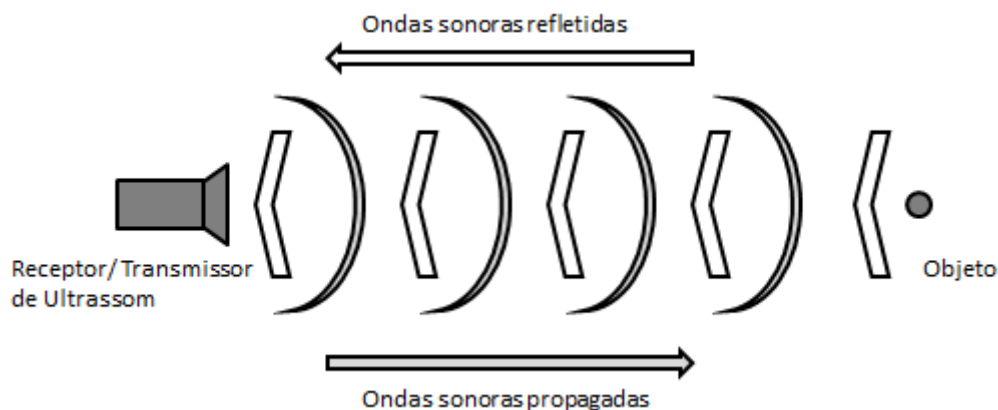


**Figura 23:** Tela de um software de processamento digital de imagens médicas – Imagens de RM. (a) Corte axial. (b) corte sagital. (c) corte coronal. (d) sólido 3D

As vantagens de digitalização pelo método de Ressonância Magnética são a capacidade de digitalizar tecidos moles, além de ossos, e a vantagem de ser um método menos invasivo que a TC, com a ausência de radioatividade prejudicial. As desvantagens do método são similares às desvantagens da Tomografia Computadorizada, que são o elevado custo de implantação e a alta complexidade operacional.

#### 2.2.2.6. DIGITALIZAÇÃO POR MÉTODOS ACÚSTICOS

Os métodos acústicos de escaneamento se fundamentam na emissão de sons de alta frequência para a realização do escaneamento. A técnica consiste em um som de alta frequência que é dirigido para o corpo a partir de um transdutor colocado em contato com a pele (DAVID; 1996). Esse som que é refletido por tecidos a medida que percorre o corpo. O som refletido, em uma frequência diferente do emitido, é então captado por detectores e transformado em sinais elétricos (THOMAS, 2006). O princípio de funcionamento descrito é ilustrado na Figura 24.



**Figura 24:** Representação do princípio de funcionamento do Ultrassom

O imageamento do método de escaneamento por Ultrassom é realizado por intermédio dos dados do som refletido e transforma em impulso elétrico. Como tecidos ósseos, gases e materiais calcificados absorvem grande parte do som emitido, essa técnica é mais utilizada para a visualização de órgãos, como o fígado e os rins (RAJA E FERNANDES, 2008).

Para a formação do modelo tridimensional a técnica de Ultrassom segue o mesmo princípio das técnicas de TC e RM, que é a sobreposição de camadas. O conjunto de imagens formado a partir do escaneamento por ultrassom forma o modelo virtual.

Além da aplicabilidade médica das técnicas de ultrassonografia, SELLITTO (2011) observa a viabilidade do uso do método nas indústrias automobilísticas e metalúrgicas. A aplicação da ultrassonografia em peças soldadas auxilia no controle da qualidade do mesmo, visto que acusa a presença de trinca, poros e descontinuidades.

A Tabela 2 compara as duas categorias de escaneamento sem contato, considerando os métodos e as técnicas de digitalização. Para a avaliação são consideradas características como a acurácia, o tipo de operação e a velocidade de digitalização dos métodos. A comparação é realizada a partir de típicos hardwares comercializados para realização de ER.



<b>Tecnologia</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Velocidade (pontos/ s)</b>	<b>Precisão (mm)</b>
Laser: Triangulação	Perceptron	23,040	0,05 até 3
Laser: TOF	Riegl	8 – 12	5 - 10
Fotogrametria	123D Catch	-	≥ 1,7
Luz Estruturada	Steinbichler Optotechnik	Max 6,6	0,02
Tomografia Computadorizada	Aracor	1024 em 16 horas	0,04
Ressonância Magnética	Philips	30000 em 0,4 s	0,15
Ultrassom	Optimet	800	0,8

**Tabela 2:** comparação de acurácia entre métodos de escaneamento sem contato.  
**FONTE:** (RAJA e FERNANDES; 2008).

Como vantagens dos métodos de digitalização sem contato pode-se ressaltar a alta praticidade das técnicas de digitalização e a elevada acurácia dos modelos virtuais. Se tratando das categorias de digitalização é possível observar a supremacia da categoria dos métodos transitivos em relação aos métodos reflexivos observando a precisão geométrica e dimensional, todavia, os métodos reflexivos apresentam maior praticidade, amplitude da possibilidade de escaneamento e custos reduzidos (RAJA E FERNANDES, 2008). Entre os métodos Reflexivos a digitalização por luz estruturada apresenta maior desempenho na captura de pontos na precisão geométrica, seguida pelo escaneamento por faixa laser e fotogrametria. É observado para os métodos transitivos maior desempenho da Ressonância Magnética, se tratando de precisão dimensional e geométrica (WANG, 2011).

Como desvantagens dos métodos de digitalização sem contato pode-se ressaltar a limitação de digitalização em ambientes com alta incidência luminosa, e em objetos translúcidos para os métodos reflexivos (RAJA e

FERNANDES, 2008). Para os métodos transitivos é observado, apesar da alta acurácia e precisão, a baixa praticidade do escaneamento, o alto custo de aquisição e digitalização e a limitação na digitalização de objetos densos (THOMAS, 2006). Para todos os modelos a densidade elevada da captura dos pontos gera uma nuvem de pontos densa e difícil de ser processada pelos sistemas computacionais, se tornando uma desvantagem do modelo, visto que se faz necessário um tratamento de pós-processamento da nuvem de pontos, tema da próxima seção.

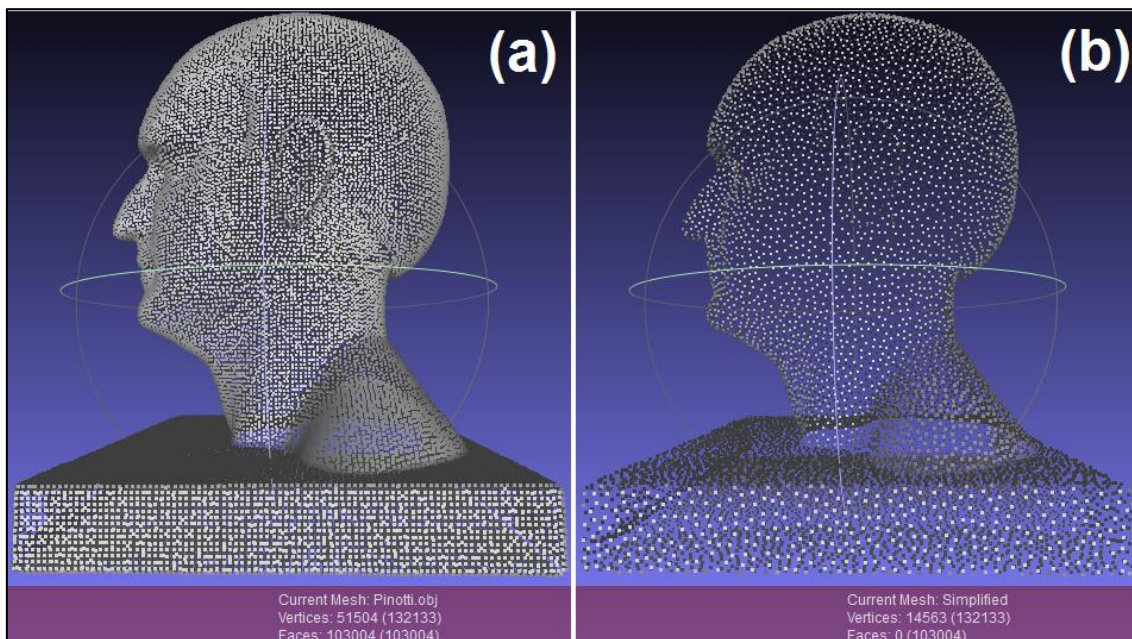
## **2.3. PROCESSAMENTO DE PONTOS**

Considerando os passos para implementação da ER, após a captura da nuvem de pontos, está o processamento de pontos. Essa etapa envolve a importação dos dados capturados pela digitalização, a redução do número de pontos e a correção de erros com a utilização de técnicas e filtros predefinidos de processamento digital de imagens e construção da superfície. Para essa etapa são utilizados robustos algoritmos computacionais capazes de, geometricamente, construir o sólido tridimensional final (RAJA e FERNANDES, 2008). As etapas de processamento de pontos, sendo elas, otimização da nuvem de pontos, correção de erros e remoção de ruídos e construção da superfície, serão descritas nas seções que seguem.

### **2.3.1. OTIMIZAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS**

A aquisição de pontos pelos métodos de escaneamento convencionais, principalmente os métodos sem contato, embora apresentem eficiência na representação do objeto digitalizado reproduzindo com fidelidade as formas geométricas e dimensionais, produz grande quantidade de pontos, o que torna o processamento de dados lento e trabalhoso (SALMAN, 2010). É observável que muitos dos pontos adquiridos pela aquisição do escaneamento são redundantes ou estão sobrepostos, permitindo assim sua remoção, não comprometendo a fidelidade do modelo virtual em comparação com o objeto

real (RAJA E FERNANDES. 2013). A otimização da nuvem de pontos se baseia nesse princípio, e busca identificar os pontos não relevantes presentes no modelo a fim de reduzir o tempo de processamento da nuvem, bem como o custo computacional envolvido para o processamento de pontos (MITRA *et al*, 2004). A Figura 25 demonstra a otimização de uma nuvem de pontos densa, em que os pontos não considerados não interferem na construção do modelo virtual após processamento por algoritmo.



**Figura 25:** Otimização da nuvem de pontos. (a) nuvem de pontos com densidade eleva. (b) nuvem de pontos processada por algoritmo de simplificação.

Como pode ser observado na Figura 25 a simplificação da nuvem de pontos não interferiu na formação da geometria espacial do modelo. Para a ilustração acima a nuvem de pontos do modelo em questão foi reduzida para 28% do número de pontos original, sendo transformada de uma nuvem de pontos de 51504 pontos para uma nuvem de pontos de 14563 pontos.

As principais técnicas de simplificação de nuvem de pontos densas estão fundamentadas na análise geométrica dos pontos a partir de métodos de distancias mínimas, como o método de k-medianas, onde os pontos são agrupados a partir de parâmetros pre-definidos de otimização e alocação de

distância entre pontos (KRISHNA e MURTY, 1999). A técnica consiste em agrupar os pontos  $C_i$  em um conjunto  $Q$ , considerando que um conjunto de pontos  $C_i$  não contém nenhum ponto em interseção com outro conjunto de pontos  $C_j$ , ou seja,  $C_i \subseteq Q$  e  $C_i \cap C_j = \emptyset$ , para  $i \neq j$ . Para essa técnica todo conjunto contém um elemento centroide  $u_i$  que é centralizado a partir do valor médio de todos os pontos pertencentes ao conjunto. O método de k-medianas para um conjunto de pontos  $Q$  pode ser descrito como uma função de otimização de minimização (Equação 2), onde o esperado é a distância ótima para o agrupamento de pontos (ERIKSSON, 2014).

$$F(\text{Min}) \sum_{j=1}^k \sum_{i \in C_j} \|q^i - u^j\|^2, \forall q^i \in Q$$

**Equação 2:** Função de minimização de distâncias para o método de K-medianas de simplificação de nuvem de pontos

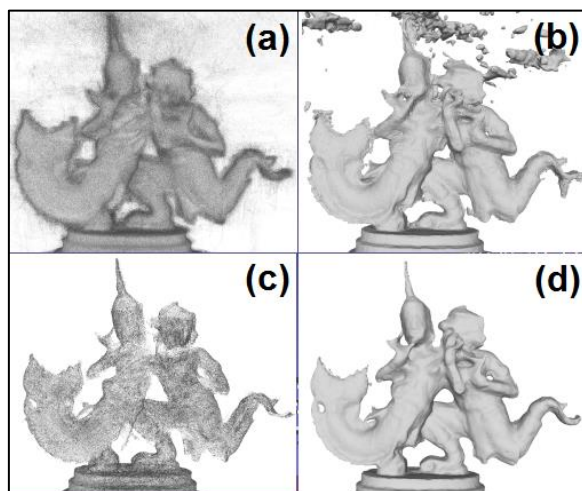
**FONTE:** (ERIKSSON; 2014)

O método de k-medianas se baseia no conhecimento prévio de quantos conjuntos de pontos devem ser criados. A partir desse parâmetro é calculada a distância entre cada conjunto de pontos de forma a não prejudicar a distribuição geométrica da nuvem de pontos capturada pelo método de escaneamento utilizado (KRISHNA e MURTY, 1999).

Todavia, além da possibilidade da produção de nuvem de pontos densa, existe a problemática da presença de ruídos e descontinuidades no modelo digitalizado. Esse fator será tratado na seção que segue.

### 2.3.2. CORREÇÃO DE ERROS E REMOÇÃO DE RUÍDOS

Durante o processo de reconstrução do modelo virtual alguns pontos que estejam fora da geometria do objeto real podem causar descontinuidades e deformações no modelo virtual (Figura 26). Os pontos em questão são denominados ruídos, e aparece a partir de erros na fase de escaneamento do objeto (HYVÄRINEN, 2012).



**Figura 26:** Representação de nuvem de pontos e formação de malha. (a) nuvem de pontos com ruídos. (b) malha formada por uma nuvem de pontos com ruídos. (c) nuvem de pontos filtrada. (d) malha formada por uma nuvem de pontos filtrada

**FONTE:** (WOLF et al.; 2016)

Como pode ser observada na Figura 26 a presença de descontinuidades e ruídos na nuvem de pontos interfere de maneira significativa no modelo final trabalhado. Para a correção dos ruídos nos modelos digitais os algoritmos utilizam, basicamente, uma comparação entre a distância de um ponto isolado  $P$  em relação a um conjunto de pontos  $Q$  através de métodos estatísticos, como o histograma. Se o ponto examinado em questão apresentar uma distância significativa, além de padrão definido, este ponto é então removido da nuvem de pontos (HYVÄRINEN, 2012).

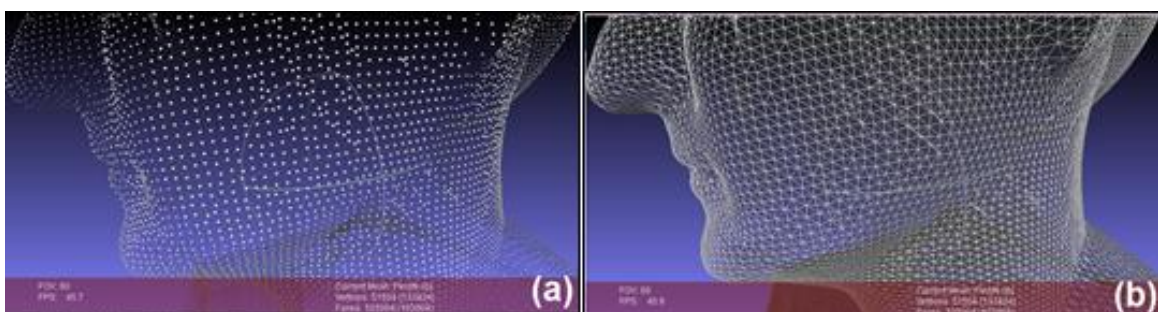
Para a realização da limpeza da nuvem de pontos existem duas técnicas mais comumente utilizadas, que são a função de amostragem e a identificação de primitivas. A função de amostragem é utilizada para minimizar o número de pontos na nuvem a fim de tornar os dados mais fáceis de manipular. A partir de então o algoritmo identifica as curvaturas do modelo geométrico formado pela nuvem de pontos e então exclui os pontos próximos à região de alta curvatura a fim de manter a precisão da mesma. A técnica de identificação de primitivas consiste na identificação de formas geométricas comuns presentes na nuvem de pontos, como esferas, cilindros e cones para, a partir de então, substituir o elemento identificado por um elemento matematicamente perfeito, sem ruídos

(RAJA E FERNANDES, 2008). A saída da fase de remoção de ruídos é uma nuvem de pontos limpa e com custo computacional menor.

### 2.3.3. CONSTRUÇÃO DA SUPERFÍCIE

Após a otimização da nuvem de pontos e a limpeza da mesma, é permitido aos dispositivos computacionais o trabalho com um custo reduzido, possibilitando manipulações mais profundas na nuvem de pontos, como a definição do sólido virtual. A reconstrução da superfície é um tema amplamente discutido no campo da computação gráfica (MITRA *et al*, 2004). As nuvens de pontos desorganizadas com pontos espaçados aleatoriamente (comumente derivadas de escaneamento sem contato) se tornam um problema para a reconstrução. O objetivo dessa etapa é criar uma malha computacional que mais se aproxime da realidade do objeto digitalizado a partir da ligação entre os pontos (PAWAR, 2013).

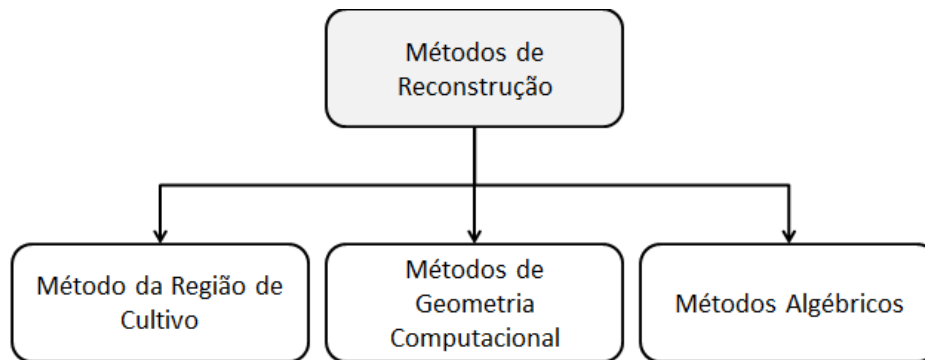
Para realização da reconstrução é definido primeiramente uma amostragem de pontos dentro da nuvem de pontos. Após a definição da amostragem um algoritmo matemático define a distância mínima entre cada ponto a ser ligado, realizando assim a triangulação entre os pontos da nuvem. A Figura 27 apresenta a representação a partir do método de triangulação (RAJA E FERNANDES, 2008).



**Figura 27:** Formação de malha. (a) nuvem de pontos. (b) malha formada a partir da nuvem de pontos.

Existem diversos métodos de formação de malha, considerando a diversidade de possibilidade de apresentação de uma nuvem de pontos derivada de métodos distintos de escaneamento (MEDEROS *et al*, 2005). A

Figura 28 ilustra as categorias de métodos comumente utilizados para a construção da superfície, também denominamos método de reconstrução da malha.



**Figura 28:** Categorização dos métodos de reconstrução da malha.

Para o Método da Região de Cultivo a técnica se baseia na estimativa da ligação entre os pontos a partir da estimativa de uma superfície normal, onde um plano de ligamento é ajustado ao redor da vizinhança de cada ponto da nuvem (HAUSER, 2007). Um algoritmo computacional que utiliza a técnica de MRC é o algoritmo denominado Algoritmo das Bolas Pivô, em que uma malha cresce a partir de um triângulo inicial orientado, então, uma esfera de raio específico é articulada entre as arestas de cada triângulo de pontos. Se a superfície da esfera atinge algum vértice do triângulo, então uma nova triangulação é adicionada.

O Método de Geometria Computacional é baseado na triangulação Delaunay e Diagrama de Voronoi. Algoritmos que utilizam esta técnica são as denominadas Formas Alfa, que combinam métodos de triangulação com técnicas de otimização linear, e os algoritmos denominados algoritmos de custos, que se realizam as triangulações sob técnicas estatísticas (PAWAR, 2013).

Os Métodos Algébricos têm como princípio ajustar uma função matemática às curvaturas das nuvens de pontos. Esse método se caracteriza por evitar a criação de superfícies descontínuas, porém o mesmo é inviável para superfícies muito complexas (PAWAR, 2013).

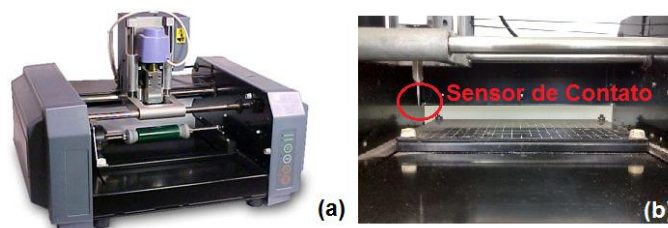
### 3. TRABALHO EXPERIMENTAL

No presente capítulo serão apresentados a descrição dos métodos, técnicas, ferramentas e materiais utilizados para a realização dos experimentos demonstrados nessa dissertação. Serão observados casos de aplicações da Engenharia Reversa e um estudo de análise sobre técnicas de digitalização. Nas seções 3.2.1 e 3.2.2 encontram-se evidenciados os testes experimentais, métodos utilizados e objetivos específicos de cada estudo de caso realizado.

#### 3.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

##### 3.1.1. MÁQUINAS DE DIGITALIZAÇÃO POR CONTATO

Para a realização da etapa de digitalização por processo de escaneamento por contato, o equipamento utilizado foi a máquina de medição de coordenados com configuração cartesiana Modela MDX-20 da fabricante japonesa Roland, como ilustra a Figura 29 (a). A máquina em questão possui um sensor de contato que se movimenta em dois eixos principais de liberdade (Figura 28 (b)). A digitalização do modelo físico foi realizada no Laboratório de Engenharia e Processos Avançados de Manufatura (LEPAM) no Departamento de Engenharia de Produção, na Escola de Engenharia da UFMG.



**Figura 29:** MMC Roland Modela MDX-20.

De acordo com o fabricante a máquina Modela MDX-20 pode ser utilizada como ferramenta de usinagem, com a realização de cortes de superfície e como ferramenta de criação de dados tridimensional, capturando as coordenadas dos pontos no objeto digitalizado. Para o trabalho experimental apresentado a funcionalidade de utilização da máquina será a



captura das coordenadas de superfície do objeto físico. As especificações da Modela MDX-20 são apresentadas na Tabela 3.

<b>Tamanho da Mesa (x,y)</b>	220mm(x) x 160mm(y)
<b>Max. Área de operação</b>	203.2 mm (X) x 152.4 mm (Y) x 60.5 mm (Z)
<b>Nível de ruído acústico</b>	Menos de 35 dB
<b>Peso</b>	13.7 kg
<b>Temperatura de operação</b>	5 a 40°C
<b>Diâmetro do sensor</b>	0,08mm
<b>Método de escaneamento</b>	Contato. Sensor de altura de ponto de superfície
<b>Precisão</b>	0,05 a 5,00mm ajustáveis a passos de 0,05mm
<b>Velocidade de escaneamento</b>	4 a 15mm/ s

**Tabela 3:** descrição das especificações técnicas da MMC Roland Modela MDX-20.  
**FONTE:** (ROLAND; 2000).

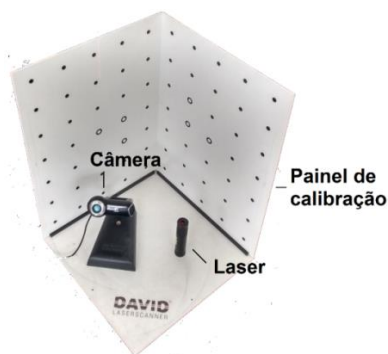
O outro equipamento utilizado para a digitalização por sonda de contato de objetos físicos foi a máquina Micro-Hite 3D da fabricante TESA. O equipamento em questão realiza a digitalização por operação manual da sonda de contato. Segundo o fabricante, a Micro-Hite 3D é adequada para objetos de pequeno a grande porte, sendo estação autônoma para realização de inspeção de peças, configuração de ferramenta ou medidor flexível. As principais especificações do equipamento são apresentadas na Tabela 4.

<b>Modalidades de Utilização</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensor: Optoeletrônicos;</li> <li>• Sonda: sólida com ponta esférica, cônica, chata ou de rubi;</li> <li>• Precisão: 0,003 mm;</li> <li>• Método de escaneamento: contato;</li> <li>• Pontos por segundo: 1 a 10 pontos por segundo e contínuo;</li> <li>• Passo de escaneamento: eixo X/Y/Z 0,04 mm mínimo;</li> </ul>
<b>Área de trabalho</b>	460 x 510 x 420 mm
<b>Tamanho da mesa</b>	970 x 1620 x 930 mm
<b>Painel de controle</b>	<i>Display</i> com 89 x 118 mm, mostrador retroiluminado, sete teclas

**Tabela 4:** Descrição das especificações técnicas da a Micro-Hite 3D

### 3.1.2. EQUIPAMENTO DE ESCANEAMENTO POR FAIXA LASER

Para a realização da digitalização de objetos por faixa laser o equipamento utilizado foi o conjunto de escaneamento *starter kit* do fabricante alemão DAVID-Laserscanner. O conjunto de equipamentos é composto por uma câmera de resolução de 2-megapixel e com auto foco, uma base de suporte para câmera, um modulo laser classe 1 de comprimento de onda de 650nm e ajuste manual de foco e um painel de calibração, conforme ilustrado na Figura 30.



**Figura 30:** Equipamento de digitalização Laser.

### 3.1.3. EQUIPAMENTO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA

O equipamento utilizado para a manufatura do protótipo a partir da técnica de impressão tridimensional foi a máquina de PR ZPrinter modelo 650 (Figura 31), da fabricante norte americana Z Corporation.



**Figura 31:** Equipamento utilizado para PR por 3D Printing.

Outras informações sobre a impressora em questão, como peso, resolução, capacidade volumétrica de impressão, dentre outros, pode ser visualizada na Tabela 5.

<b>Peso da Impressora</b>	340 kg
<b>Temperatura de funcionamento</b>	10 – 26,6°C
<b>Volume máximo de impressão</b>	254 mm x 381 mm x 203 mm
<b>Velocidade de Impressão</b>	2 – 4 linhas / min
<b>Espessura da linha de impressão</b>	0,089 – 0,102 mm
<b>Material utilizado</b>	Zp131 Powder (pó) e Zb61 Binder (solução aglutinante)

**Tabela 5:** Especificações ZPrint 650.

**FONTE:** (ZCORPORATION; 2008).

### 3.2. FERRAMENTAS DE SOFTWARE

Para a realização da leitura de dados por escaneamento por CMM o software utilizado foi o Dr. Picza, que possibilita, além da leitura de dados direto no processo de digitalização, a definição do passo e da área de escaneamento. O software utilizado para a leitura dos dados capturados pela digitalização por feixe laser foi o software TriAngles, distribuído pela desenvolvedora Intricad. O software em questão realiza a captura da superfície de pontos a partir do escaneamento de circunferência 360° por triangulação laser e câmera, exportando o modelo final em formatos XYZ, RAW, DXF, STL, VRML e OBJ. A estimativa da capacidade de leitura de dados é de 30 pontos por segundo. A velocidade de escaneamento irá depender do tempo de digitalização especificado pelo operador. Para a realização do escaneamento por fotogrametria o software utilizado foi o RemMake, da AutoDesk. Este software, de código aberto e disponível para computador realiza, a partir de uma sequência de imagens sobrepostas a formação da malha do objeto virtual. O princípio de funcionamento deste software é o *Structure for Motion*, técnica que estima estruturas tridimensionais a partir de imagens bidimensionais de associação de coordenadas 2D. Para a realização da comparação de nuvem de pontos o software utilizado foi o Cloud Compare, de código aberto. Este software realiza operações de comparação entre duas nuvens de pontos ou malhas virtuais a partir da estimação da distância entre os pontos das mesmas. Como resultado, é apresentado uma escala de cor que demonstra a disposição das distâncias entre os pontos e vértices dos dois modelos analisados. Para a realização da impressão pelo método 3D Print foi utilizado o software ZPrint, desenvolvido pelo próprio fabricante do equipamento de PR. O ZPrint, assim, permite, além da geração do *G code*, a configuração dos parâmetros de impressão.

Para a geração dos modelos nos estudos de casos foi necessário a utilização de softwares de manipulação tridimensional. Os softwares para esse

fim foram o Blender, Mashmixer, FaceGen e o software de visualização de malhas computacionais MeshLab. Todos os softwares utilizados para manipulação de coordenadas tridimensionais realizam operações como a união, subtração e intersecção de malhas, a realização da solidificação do modelo, reconstrução e manipulação de malhas a partir da nuvem de pontos, dentre outras funcionalidades, que serão descritas nos estudos de caso.

### **3.3. DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS**

Para que os objetivos almejados por essa dissertação sejam efetivamente alcançados, serão apresentados dois estudos de caso que abordam, desde a pertinência dos métodos de aquisição de dados, até a implementação direta da ER na resolução de problemas em situações reais. Os estudos de casos apresentados são:

- Estudo de Caso A: Avaliação de Técnicas de Aquisição de Dados;
- Estudo de Caso B: Método de Projeção Facial 3D a partir de fotografias.

A descrição dos estudos de caso será realizada a partir da especificação dos problemas e objetivos a serem atingidos, descrição dos métodos e metodologia utilizada para o desenvolvimento da solução da situação problema, e, por fim, a apresentação dos resultados obtidos com a pesquisa.

#### **3.3.1. ESTUDO DE CASO A: AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS**

Entender os processos de aquisição, conhecendo suas vantagens, limitações e condições sobre as quais podem ser úteis tornam-se essenciais para garantir bons resultados no processo de ER. Estudos comparativos podem auxiliar na escolha do método adequado, assim como os softwares a serem utilizados em um processo de aquisição. Visando entender melhor os principais casos de digitalização disponíveis comercialmente a baixos custos, este estudo de caso apresenta um comparativo entre os métodos de

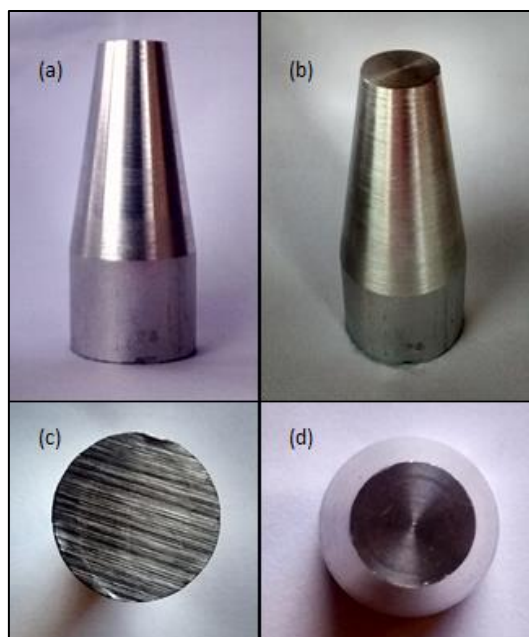
digitalização ótica, por meio da fotogrametria, do escaneamento por feixe laser e do escaneamento por luz estruturada, e por contato, utilizando máquina de Comando Numérico Computadorizado (CNC).

Como ferramental para a execução dessa pesquisa foi utilizada a máquina Roland MDX-20, que funciona com uma sonda controlada via CNC, representando o método de digitalização por contato. O software ReMake da Autodesk, que funciona pelo princípio da Fotogrametria, o equipamento de escaneamento por luz estruturada 3D Sense da fabricante 3D System, e o escaneamento a laser realizado por meio do software de escaneamento por triangulação Intracad, representando o método de escaneamento ótico. As etapas seguidas para a execução do presente estudo de caso podem ser visualizadas na Figura 32.

Etapas	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4
Descrição	Escolha do modelo	Escaneamento modelo	Comparação geométrica/dimensional	Comparação da nuvem de pontos
Softwares/ Equipamentos	–	Modela MDX-20 Software ReMake Software Intracad 3D Sense	Blender Meshlab MeshMixer	Cloud Compare Software Remake

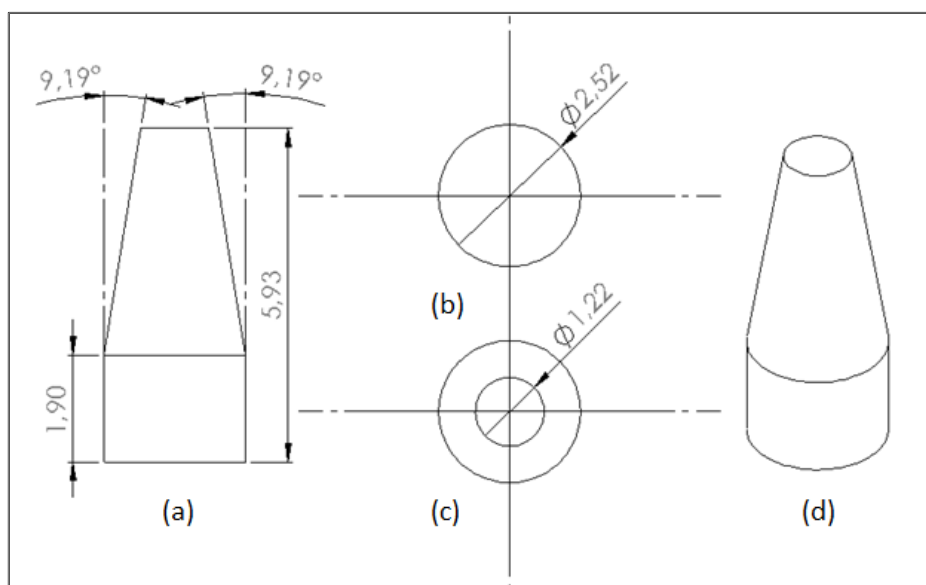
**Figura 32:** Processos de execução do Estudo de Caso A.

Para a realização da metodologia de execução do estudo de caso o objeto foi selecionado com base em suas características geométricas. O objeto apresenta simetria geométrica, com angulações e definições espaciais que permitem a parametrização e comparação de desempenho na fidelidade geométrica e dimensional entre o modelo físico e o modelo digital. O objeto de estudo é apresentado na Figura 33.



**Figura 33:** Ilustração do objeto de estudo analisado. (a) vista frontal. (b) vista isométrica. (c) vista inferior. (d) vista superior.

O objeto analisado possui dimensões de 25,20 mm no eixo X e Y e 59,30 mm no eixo Z. A partir da altura de 19,00 o modelo apresenta angulação de  $9,19^\circ$  até o topo. A base e o topo do objeto são circunferências de diâmetro 25,20 mm e 12,20 mm, respectivamente. As dimensões, em cm, do objeto estão representadas na Figura 34.



**Figura 34:** Representação dimensional do objeto de estudo em centímetros. (a) vista frontal. (b) vista inferior. (c) vista superior. (d) vista isométrica.

O modelo apresenta características superficiais que não limitam a realização dos escaneamentos propostos para este estudo, e os contornos geométricos e detalhes dimensionais do objeto permitem uma avaliação robusta a respeito da capacidade de digitalização das ferramentas dispostas para esta pesquisa.

A etapa de escaneamento do objeto de estudo consistiu da digitalização do modelo através da captura das coordenadas espaciais do objeto a partir de quatro técnicas distintas de escaneamento. O escaneamento por sonda de contato, realizado pela CMM Modela MDX-20, foi efetuado com espaçamentos de 0,05 mm entre a captura das coordenadas dos pontos. O tempo necessário para o escaneamento foi de oito horas seguidas, e a extensão do arquivo gerado foi .STL. O processo de digitalização do modelo a partir da Modela MDX-20 é ilustrado na Figura 35.

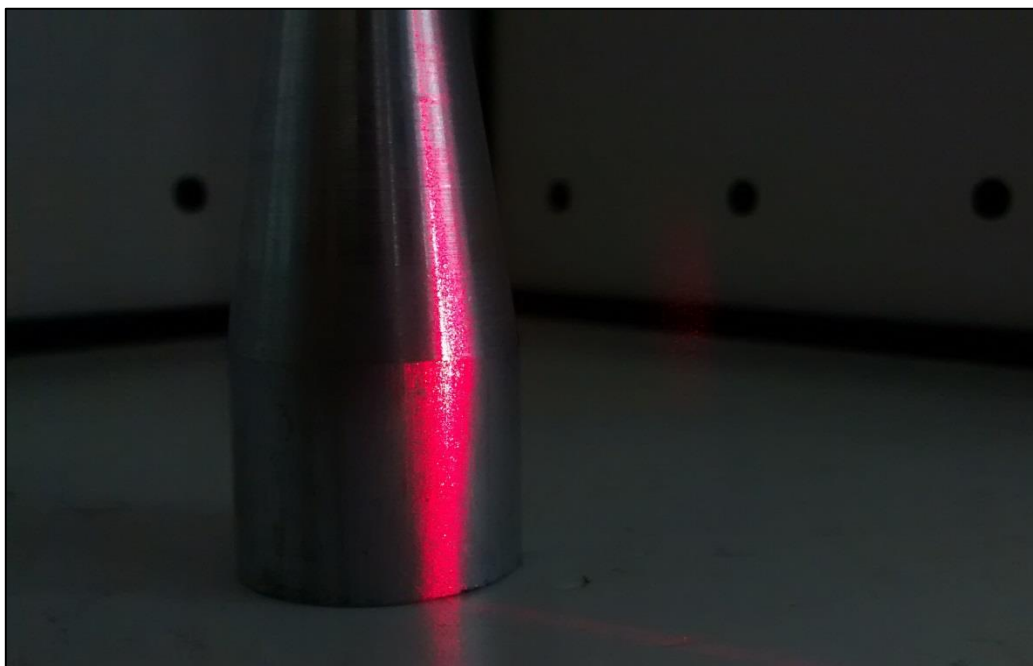


**Figura 35:** Processo de aquisição de pontos por contato.

Para a realização da digitalização pelo equipamento de aquisição de pontos por contato os fatores que foram levados em consideração para a eficiência do escaneamento foram a limpeza da peça e da máquina e a correta fixação da máquina sobre a superfície no ato da digitalização e a fixação da peça sobre a superfície da máquina, evitando vibrações externas.



O mesmo objeto foi submetido a digitalização pelo método de escaneamento por feixe LASER (Figura 36) utilizando uma câmera de 2 megapixels, um módulo LASER de focalização manual e o software de escaneamento de circunferência Intricad. Para essa metodologia o princípio de digitalização é baseado na triangulação, onde uma linha LASER é projetada sobre o objeto realizando sua varredura, que, por sua vez, é capturada por uma câmera disposta defronte ao objeto a ser escaneado.

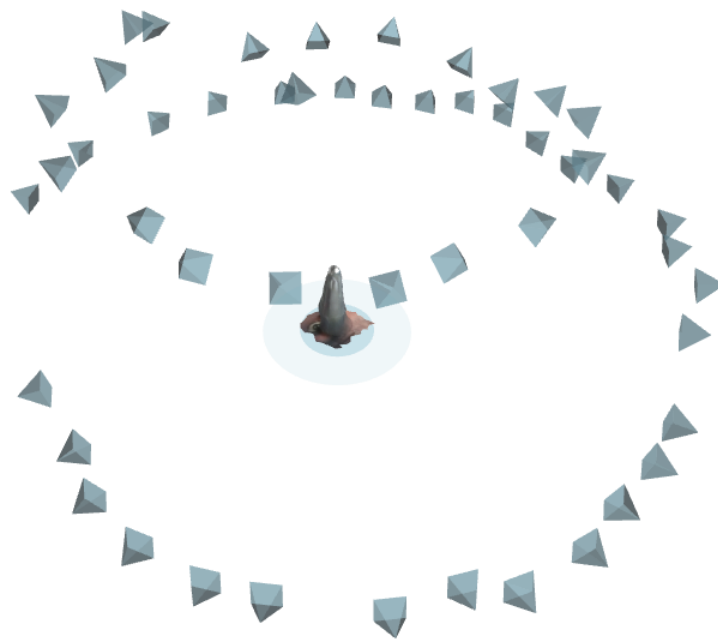


**Figura 36:** Processo de digitalização por escaneamento ótico através do feixe LASER

Para o escaneamento por feixe LASER os fatores levados em consideração com mais importância foram o controle da luminosidade no ambiente de realização da digitalização, o isolamento do conjunto de digitalização de perturbações vibracionais e a conservação do movimento giratório contínuo da peça no decorrer do escaneamento.

A digitalização realizada pela técnica de fotogrametria a partir do software ReMake foi realizada com base em imagens capturadas por uma câmera de 13 megapixels e resolução de 4128x3096 pixels. Foram utilizadas 50 fotografias, número máximo que o software permite utilizar, tomadas em

ângulos diferentes, sendo que a disposição das fotos podem ser observados na Figura 37. O aplicativo tem como saída de resultados um arquivo tridimensional em formato .OBJ, apresentado a malha do objeto juntamente com a textura capturada pelas fotografias. Devido à grande quantidade de informações apresentadas como resultado do aplicativo, o modelo final foi submetido à uma filtragem de malha com o objetivo de extrair somente a região de interesse, o objeto a ser digitalizado.

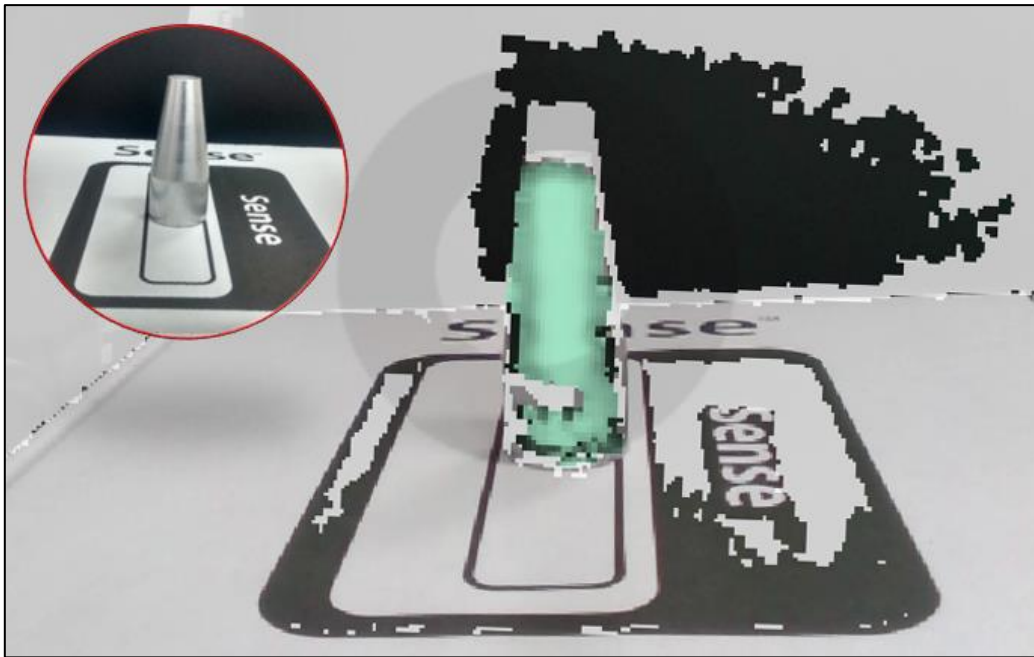


**Figura 37:** Processo de digitalização por escaneamento óptico através de fotogrametria.

Para o processo de fotogrametria foram tomados como fatores limitantes a intensidade luminosa no ambiente de desenvolvimento do escaneamento, a estabilidade do corpo de prova e as propriedades reflexivas da superfície do material a ser escaneado.

Por fim, o modelo de estudo foi submetido ao escaneamento por luz estruturada a partir do equipamento de digitalização 3D Sense. Para que a digitalização ocorresse de forma eficiente e o padrão infravermelho de luz estruturada conseguisse alcançar a geometria do objeto, os parâmetros utilizados para a digitalização foram definidos para objetos pequenos, com

faixa dimensional entre 20 a 500 mm<sup>3</sup>. A representação do processo durante a digitalização por luz estruturada pode é demonstrado na Figura 38.

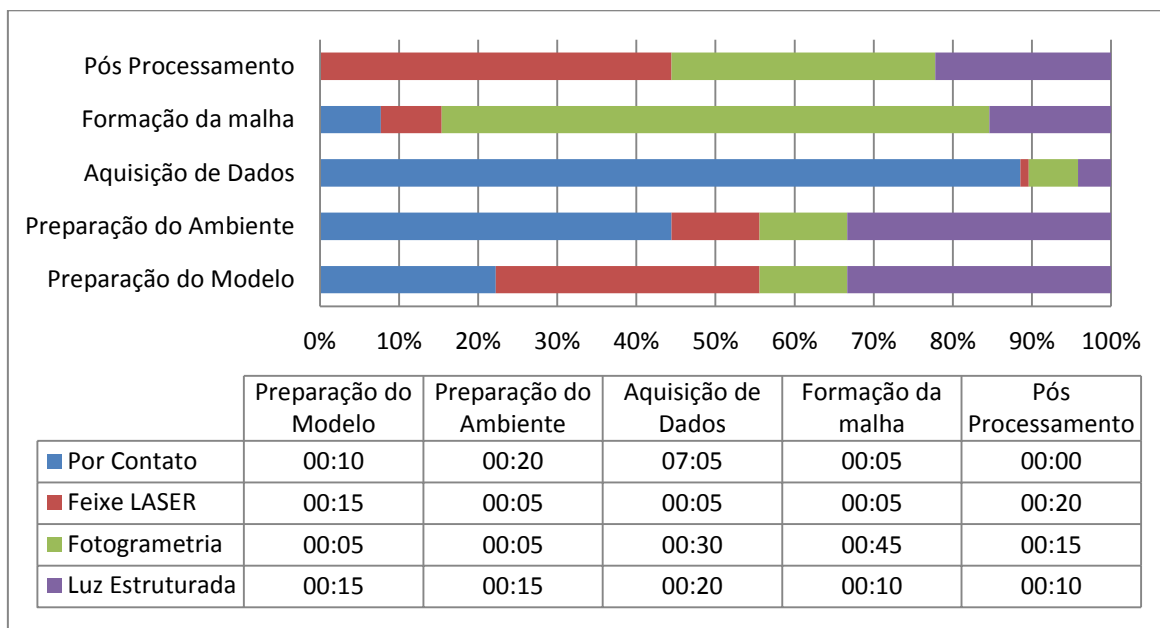


**Figura 38:** Processo de digitalização por escaneamento ótico através de luz estruturada.

Como fatores mais importantes observados para a digitalização do objeto, estão a definição da cor do objeto, com limitação para cores mais escuras, visto que neste caso o padrão infravermelho não é refletido para a câmera do aparelho, a estabilidade da peça a ser digitalizada e a incidência luminosa no ambiente de escaneamento.

Considerando os processos de captura de dados apresentados neste estudo de caso as etapas observadas mais relevantes para a eficiência do processo, bem como o tempo de execução de cada digitalização, são a preparação do modelo, que diz respeito ao posicionamento e limpeza da peça a ser digitalizada, a preparação do ambiente de escaneamento, que é a adequação do local onde ocorrerá o processo de digitalização, o processo de aquisição de dados, onde ocorre a captura das coordenadas virtuais do objeto, a formação da nuvem de pontos e malha virtual, que se refere à organização das coordenadas adquiridas e a etapa de pós processamento do modelo, onde ocorre a remoção de ruídos e a definição da área de interesse da digitalização. Cada uma destas etapas apresenta uma ordem temporal de grandeza distinta

em cada caso de digitalização. A descrição dos tempos decorridos em cada etapa, para este estudo de caso, pode ser visualizada na Tabela 6.



**Tabela 6:** Tempos decorridos em cada etapa dos processos de digitalização.

A apresentação dos resultados para o presente estudo de caso consiste na avaliação da fidelidade geométrica e dimensional dos modelos virtuais obtidos pelas técnicas de escaneamento e na comparação das coordenadas das nuvens de pontos dos modelos virtuais. Os resultados serão apresentados posteriormente na seção de resultados desta dissertação.

### 3.3.2. ESTUDO DE CADO B: MÉTODO DE PROJEÇÃO FACIAL 3D A PARTIR DE FOTOGRAFIAS

Com a finalidade de permitir a interatividade entre a percepção humana dos objetos e a digitalização de modelos virtuais, o desenvolvimento das técnicas de perspectiva 3D tem sido um campo de pesquisa vital para o progresso dos processos de manufatura aditiva, visto que a evolução das tecnologias de digitalização tridimensional permite maior precisão dos modelos virtuais digitalizados. Para FRASER (2015) o conceito de aquisição de dados

geométricos ou digitalização abrange principalmente o aspecto de capturar informações com base em pontos em um espaço tridimensional.

Nesse cenário de processos de formação de objetos virtuais, a criação de modelos de faces tridimensional é uma demanda de entrada para aplicações na área de visão computacional, reconhecimento de padrões e computação gráfica. As ferramentas de criação de faces virtuais são diversas, e devem ser escolhidas de acordo com a peculiaridade de cada aplicação, ou de cada limitação de processo de aquisição de dados.

O objetivo central deste estudo de caso é abordar em dimensão prática a fundamentação técnica do processo de fotogrametria para reconstrução facial. Será analisado por essa pesquisa o processo de reconstrução tridimensional de modelo facial a partir de fotografias bidimensionais, desde o processo de aquisição de dados até ao passo de formação da malha virtual. Serão apresentados os conceitos fundamentais da técnica utilizada, e por fim, será apresentado como resultado o modelo virtual desenvolvido e o modelo físico desenvolvido a partir de PR.

Ainda como resultados para este estudo de caso, a técnica utilizada para criação do modelo facial 3D foi validada através da comparação entre um modelo gerado a partir de fotografias e de escaneamento do busto prototipado. O contraste entre os dois modelos virtuais tem por objetivo observar se existem grandes variações nas dimensões e geometria do objeto modelado pelo método utilizado por esta pesquisa. Por fim será realizado um estudo que visa estabelecer um parâmetro e um ponto ótimo entre a simplificação da nuvem de pontos e os erros dimensionais observados por esta simplificação.

O modelo de estudo foi a criação do busto virtual do Professor Marcos Pinotti Barbosa, que lecionou na Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais entre o período de 1999 a 2016, ano de seu falecimento. Os equipamentos utilizados para esse trabalho foram a máquina de PR ZPrinter modelo 650 e os softwares Blender, MeshMixer e FaceGen para a formação e manipulação do modelo digital. O presente estudo de caso está estruturado de acordo com a Tabela 7.

Etapas	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Etapa 5	Etapa 6
Descrição	Escolha das fotos	Desenvolvimento da malha – marcos faciais	Modelagem e adequação	Manufatura do modelo	Validação da técnica	Comparativo de pontos
Softwares/ Equip.	—	Blender/ FaceShop	Blender/ MeshMixer	ZPrint 650	CMM TESA Micro-Hit 3D/ Cloud compare	MeshLab/ Cloud compare

**Tabela 7:** Processos de execução do Estudo de Caso B.

A Tabela 8 mostra, para cada etapa do processo de execução do Estudo de Caso B, a estimativa de tempo gasto, em horas, e as operações geométricas necessárias para a execução de cada etapa. Vale ressaltar que a estimativa em horas foi mensurada após o processo de aquisição do conhecimento demandado para a realização deste estudo.

Processo	Tempo (horas)	Operações
Escolha parametrizada das fotografias	1 h.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metodologia empírica a partir de critérios de posicionamento facial.</li> </ul>
Desenvolvimento da malha a partir de marcos faciais	5 h.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Indicação dos padrões faciais e formação da nuvem de pontos – FaceGen;</li> <li>• Tratamento da malha e subdivisão de superfícies – Blender;</li> </ul>
Modelagem e adequação da malha virtual	12 h.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operações geométricas com sólidos base. Interseção, união, subtração, correção de iluminação e suavização de superfície. – Blender;</li> <li>• Solidificação do modelo. - MeshMixer</li> </ul>
Manufatura do modelo	4 h.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PR do modelo. – Zprint 650</li> </ul>
Validação da técnica	72 h.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escaneamento do busto prototipagem por CMM e comparação entre o modelo escaneamento e o modelo gerado pela técnica de fotografias – Cloud compare.</li> </ul>
Comparativo e pontos	18 h.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução da continua da nuvem de pontos – MeshLab</li> <li>• Comparação entre os erros observados a partir da redução da nuvem de pontos.</li> </ul>

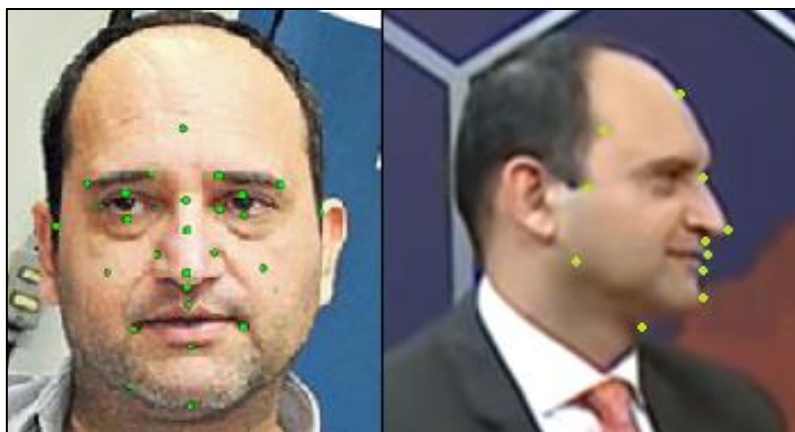
**Tabela 8:** Tempos e operações no processo de desenvolvimento do Estudo de Caso B.

O desenvolvimento do Estudo de Caso B foi composto por seis etapas. O primeiro passo foi a escolha das fotografias utilizadas para a construção do modelo virtual. Foram escolhidas, de acordo com parâmetros pré-estabelecidos, duas fotografias do Professor Marcos Pinotti. A parametrização das fotografias segue o padrão de reconhecimento de padrões faciais, onde a imagem de estudo deve ser centrada de acordo com as coordenadas cartesianas. As fotos utilizadas para a criação do modelo podem ser visualizadas na Figura 39.



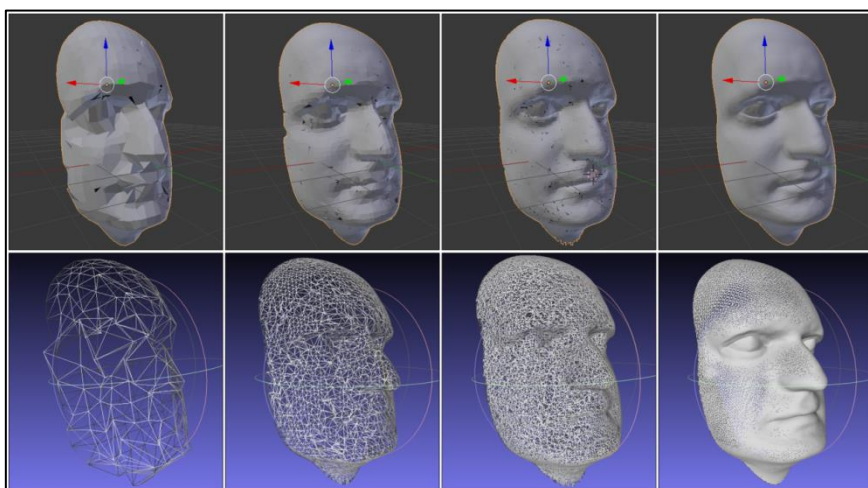
**Figura 39:** Fotografias utilizadas para execução do modelo virtual.

O segundo passo executado foi o desenvolvimento do modelo virtual a partir de técnicas de marco facial e reconhecimento de padrão. O princípio da técnica é estabelecer marcos facial em coordenadas bidimensionais distintas da fotografia em análise (Figura 40). Esses pontos indicam a localização e o padrão geométrico dos olhos, nariz, boca, dentre outros. A partir de então, com o objeto de evidenciar as regiões da face, bem como contornos e detalhes específicos, são traçados vértices que irão determinar a formação da malha bidimensional do modelo. A estimação da coordenada de profundidade é dada por intermédio da indicação de pontos de localização na fotografia de perfil.



**Figura 40:** Indicadores de padrão facial.

A partir da indicação dos padrões faciais foi possível determinar as coordenadas tridimensionais do modelo virtual por intermédio do algoritmo de registro do software FaceGen. A definição das coordenadas possibilita a criação da nuvem de pontos do modelo, e, posteriormente, a definição dos vértices e criação da malha do objeto virtual. O próximo passo foi o desenvolvimento da suavização da superfície do modelo, que foi desenvolvido a partir da técnica denominada *Subdivision Surface*, criada na década de 1970. O objetivo da técnica em questão é ampliar o número de vértices de um modelo seguindo o padrão de contornos gerados pelos vértices pré-definidos. A ilustração dos passos da etapa de desenvolvimento da malha pode ser visualizada na Figura 41.



**Figura 41:** Desenvolvimento da malha a partir da técnica Subdivision Surface.



Como pode ser observado na Figura 41, o desenvolvimento da face virtual do modelo foi executado a partir da subdivisão geométrica dos triângulos componentes do objeto a partir dos vértices iniciais definidos pelos indicadores de padrão facial. A subdivisão da superfície segue distribuição exponencial, sendo que o sólido gênese apresenta 1.253 vértices, a realização da primeira subdivisão gerou um sólido de 5.145 vértices, a terceira subdivisão apresentou 20.812 vértices e, por fim, a última subdivisão realizada apresentou 77.656 vértices. Vale ressaltar que quanto maior a subdivisão de vértices, tanto maior a qualidade na superfície do modelo virtual, e maior a complexidade computacional para o processamento da nuvem de pontos e criação do objeto virtual a ser gerado. As próximas etapas do Estudo de Caso B são descritas na seção de resultados.

## **4. RESULTADOS E COMENTÁRIOS**

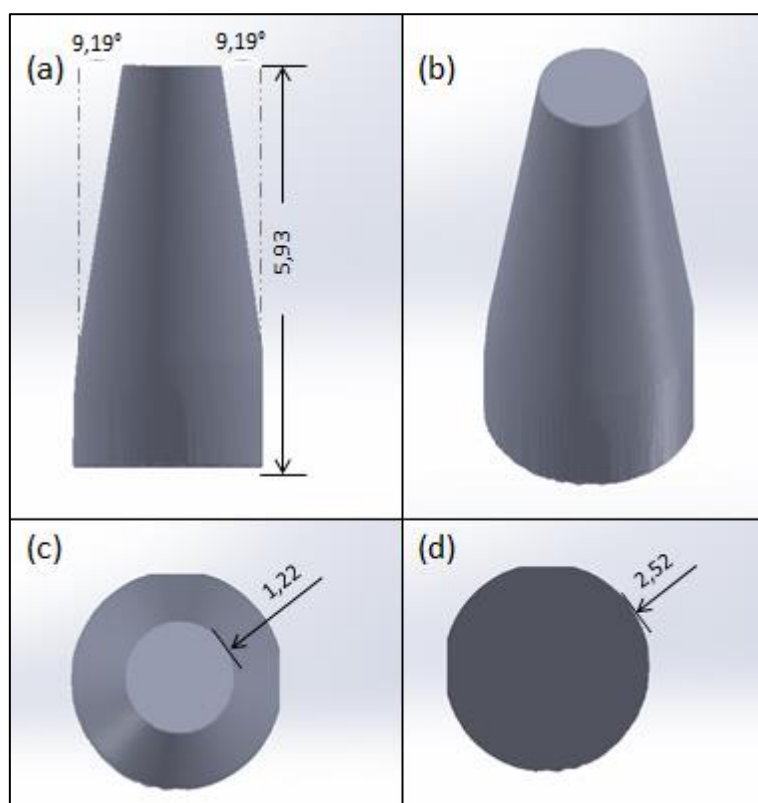
Na presente seção será discutido e analisado as saídas do processo de ER para cada Estudo de Caso apresentado. Inicialmente será apresentado o resultado da análise comparativa entre os métodos de escaneamento demonstrado. Os resultados seguem com a apresentação das considerações a respeito da saída de processo do Estudo de Caso B, referente a criação de faces a partir de fotografias. Será demonstrado o objeto final texturizado, o protótipo manufaturado, a validação da técnica em estudo e a uma relação entre a redução da nuvem de pontos e precisão observada para o modelo virtual gerado.

### **4.1. RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO A**

A partir da execução das quatro digitalizações descritas para este Estudo de Caso, foram gerados quatro modelos virtuais distintos, cada modelo apresentando características inerentes ao processo de digitalização ao qual foi submetido. O objeto gerado pela aquisição por contato, como já era esperado, apresentou maior qualidade dimensional e de captura de detalhes. A principal limitação observada foi o tempo demandado para completar a digitalização do objeto. A digitalização por fotogrametria, executada através do software ReMake foi capaz de reproduzir detalhes geométricos de contorno e profundidade além da captura da textura do objeto escaneado. Por se tratar de um método de estimativa de coordenadas, o modelo virtual apresentou perda de detalhes geométricos. O modelo gerado por escaneamento por feixe laser apresentou grande quantidade de captura de detalhes geométricos e pequenas distorções dimensionais se comparado com o objeto original. O pós-processamento do modelo teve maior importância de execução no modelo gerado por feixe laser, visto a presença de grande quantidade de ruídos. O modelo gerado pelo método de luz estruturada apresentou significativo índice de distorções na malha superficial do objeto, fator este que pode ser justificado pela característica da reprodução do padrão de luz estruturada, constituído para reproduzir objetos de dimensões maiores.

O parâmetro utilizado para a comparação dimensional entre os modelos obtidos e o objeto real foi a medida da base, do topo, da altura e da angulação da superfície do modelo se comparado com o objeto físico.

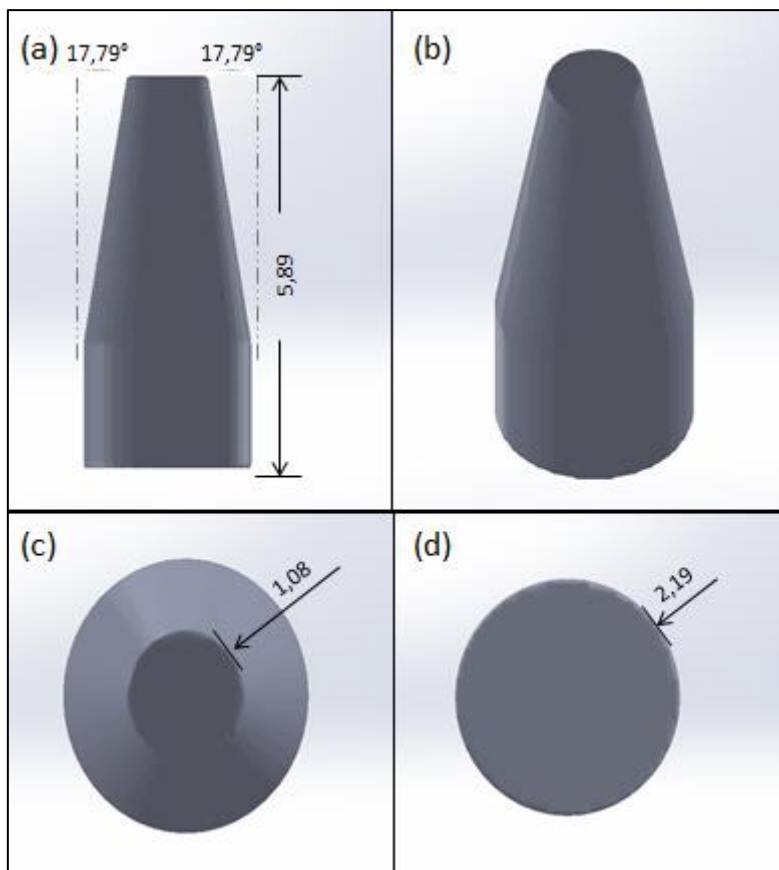
O modelo gerado por digitalização por contato apresentou dimensões exatas comparando-se com o objeto físico. As dimensões observadas foram 2,52 mm de diâmetro da base, 12,20 mm de diâmetro do topo, 59,30 mm para a altura do objeto e  $9,19^\circ$  de angulação entre a base e o topo. O modelo gerado, bem as dimensões observadas como parâmetros, pode ser visualizado na Figura 42.



**Figura 42:** Representação dimensional do modelo digital gerado por digitalização por contato. (a) vista frontal. (b) vista isométrica. (c) vista inferior. (d) vista superior.

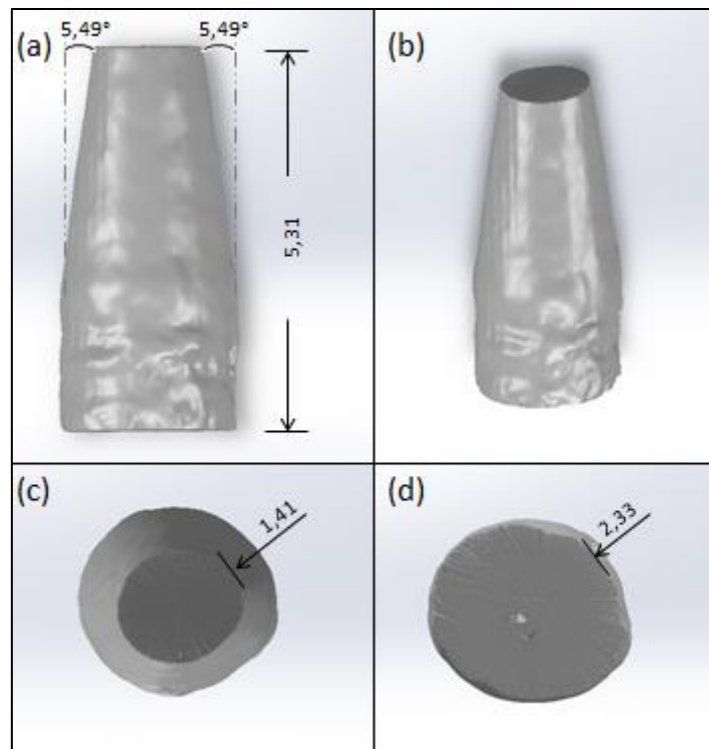
O modelo gerado por digitalização por feixe LASER demonstrou distorções dimensionais se comparado com as dimensões observadas no modelo físico. As dimensões verificadas foram 21,90 mm de diâmetro da base, 10,80 mm de diâmetro do topo, 58,90 mm de altura e angulação de  $17,79^\circ$  entre

a base e o topo. As dimensões e o modelo gerado são observados na Figura 43.



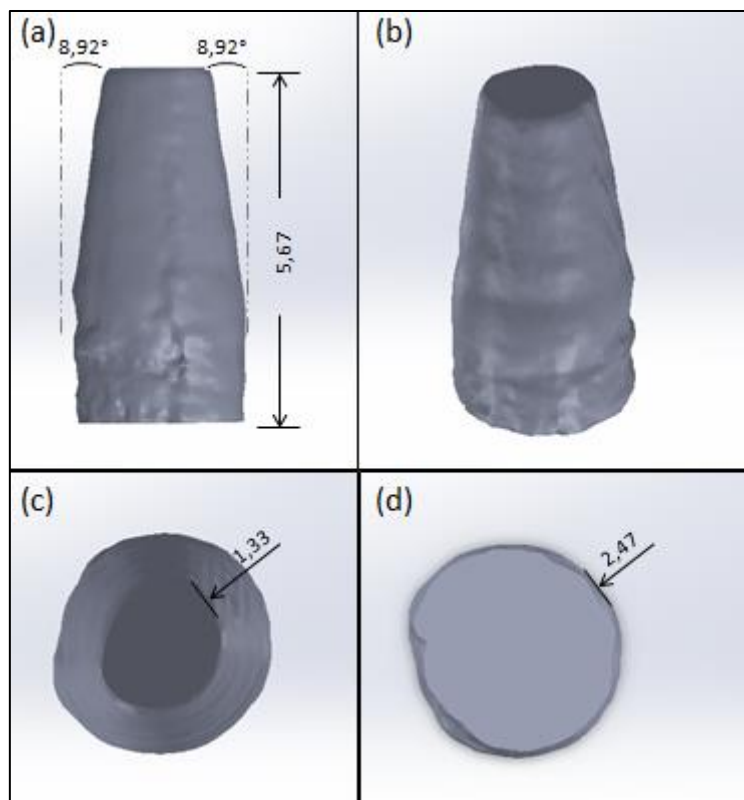
**Figura 43:** Representação dimensional do modelo digital gerado por digitalização por feixe LASER. (a) vista frontal. (b) vista isométrica. (c) vista inferior. (d) vista superior.

O escaneamento gerado pela técnica de fotogrametria formou um modelo com discontinuidades na malha computacional um relevo inconstante na superfície do objeto. As dimensões médias observadas foram de 23,30 mm na base, 14,10 mm no topo, 53,10 mm de altura e angulação de 5,49° entre a base e o topo, como demonstrado na Figura 44.



**Figura 44:** Representação dimensional do modelo digital gerado por digitalização por fotogrametria. (a) vista frontal. (b) vista isométrica. (c) vista inferior. (d) vista superior.

Por fim, o modelo gerado por escaneamento por luz estruturada demonstrou, assim como o modelo gerado por fotogrametria, alto índice de descontinuidades na superfície do modelo virtual assim como diversos pontos de inconstância superficial na malha. As dimensões médias do modelo foram 54,70 mm na circunferência base, 13,30 mm na circunferência do topo, 56,70 mm de altura angulação de  $8,92^\circ$  entre a base e o topo. As dimensões do modelo gerado por fotogrametria são apresentadas na Figura 45.



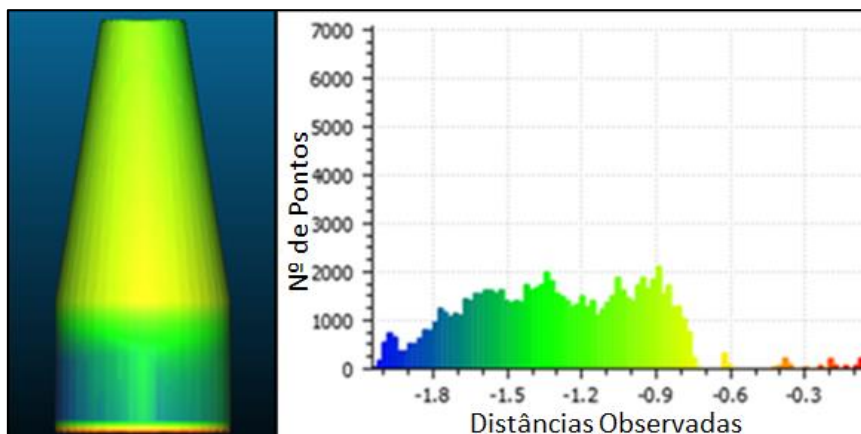
**Figura 45:** Representação dimensional do modelo digital gerado por digitalização por luz estruturada. (a) vista frontal. (b) vista isométrica. (c) vista inferior. (d) vista superior.

Conforme já era esperado, as análises dimensionais observadas neste estudo de caso levam a conclusão de que o modelo que representa com mais fidelidade as dimensões do objeto físico escaneado foi o modelo gerado por escaneamento por contato.

Para uma melhor comparação a respeito dos erros geométricos observados nos modelos gerados pelos diferentes tipos de escaneamento apresentados por este estudo de caso, será apresentado no que segue uma escala de cor comparativa que representa a diferença de distância entre todos os pontos dos modelos comparados. Como a diferença proporcional entre as medidas parametrizadas do objeto físico e o modelo gerado pelo escaneamento por contato não foram significativas, este modelo será utilizado como parâmetro de referencia para a comparação entre os erros geométricos apresentados pelos métodos de feixe LASER, fotogrametria e luz estruturada.

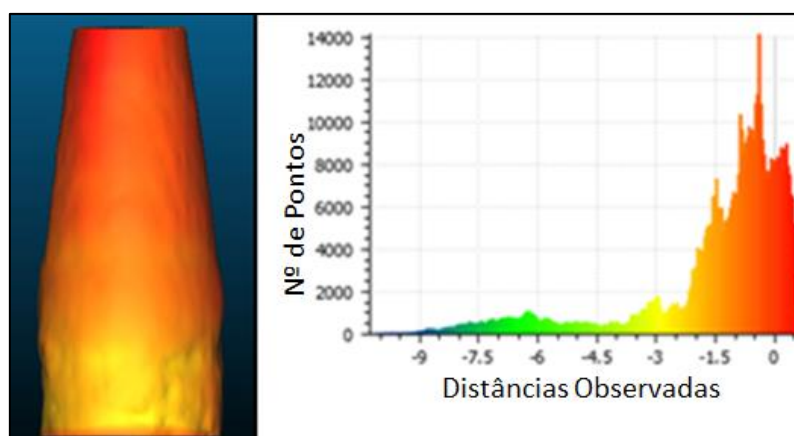
Inicialmente foi realizado uma comparação entre o modelo gerado por feixe LASER e o modelo gerado por escaneamento por contato. Através da

comparação realizada observa-se um erro médio de 1,05 mm com um erro máximo observado de 2,14 mm. A escala de cores, em milímetros, que representa o erro geométrico do modelo gerado pelo escaneamento LASER é apresentada na Figura 46.



**Figura 46:** Análise geometria em escala de cores para o modelo gerado por feixe LASER.

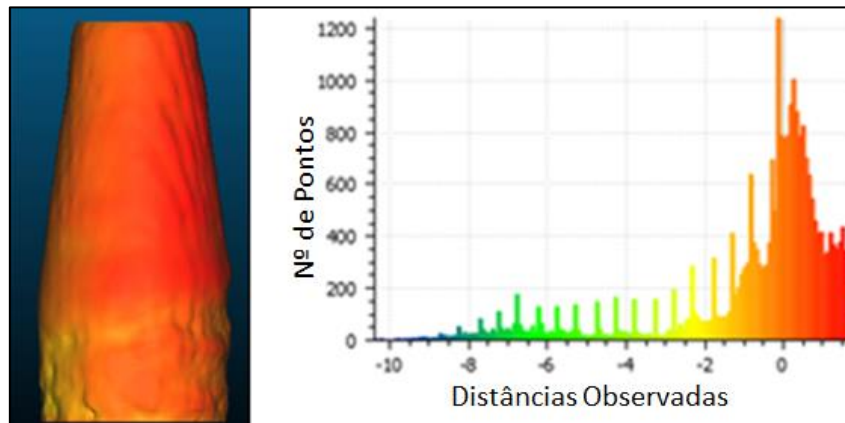
A comparação criada entre o modelo gerado por fotogrametria e o modelo parâmetro apresentou erro médio de 1,47 mm e distancia máxima entre pontos de 10,31 mm. Os resultados são apresentados na Figura 47.



**Figura 47:** Análise geometria em escala de cores para o modelo gerado por fotogrametria.

Por fim, a comparação entre o método gerado por contato e o método gerado por luz estruturada apresentou erro médio de 1,34 mm com distância

máxima de 10,19 mm. A escala de cores em função da distância pode ser observada na Figura 48.



**Figura 48:** Análise geometria em escala de cores para o modelo gerado por luz estruturada.

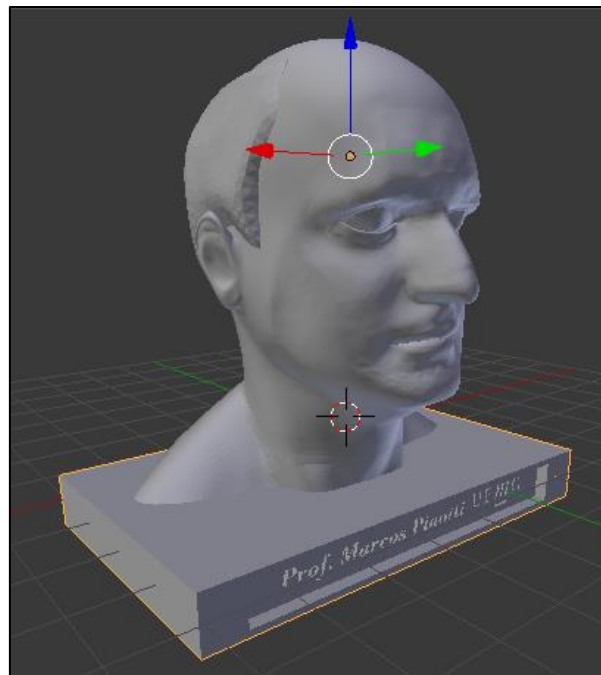
No âmbito da caracterização das diferenças observadas nos modelos virtuais, pode-se destacar a variação na precisão dimensional, necessidade pós-tratamento do modelo e a precisão geométrica. Para a precisão dimensional foi observado uma maior fidelidade no modelo gerado pela Roland Modeladora MDX-20, pelo fato da captura de pontos apresentar um desvio máximo de 0,05 mm, alcançando maior assertividade na dimensão do objeto. A necessidade de pós-tratamento do modelo virtual se apresentou com maior latência no escaneamento por varredura laser, visto que tal procedimento demonstrou maior quantidade de ruídos. Essa peculiaridade do método pode ser explicada pela característica refletiva do objeto, que pode ter influenciado na captura de pontos. A precisão geométrica se demonstrou mais fiel no modelo gerado pela Roland Modeladora MDX-20, que apresentou os detalhes geométricos com maior exatidão, reproduzindo com precisão os contornos e detalhes do objeto. A Tabela 1 apresenta as características mais relevantes observadas nos métodos de escaneamento realizados por esse estudo de caso.



## 4.2. RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO B

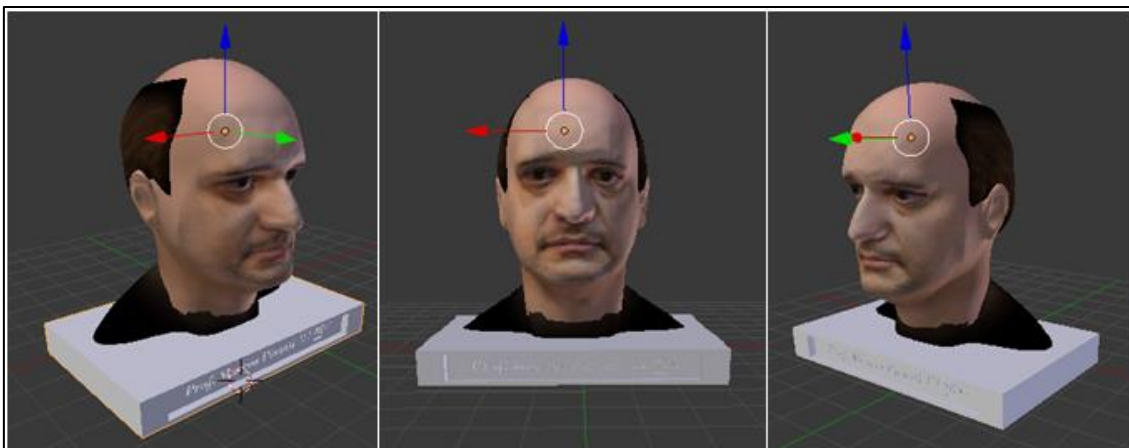
Inicialmente, para este estudo de caso foi desenvolvido os parâmetros para a criação do modelo virtual da face a partir da definição de padrões faciais em duas fotografias e modelagem geométrica de sólido virtual base. O padrão facial gerado foi requisito principal para a criação do busto virtual proposto por este estudo. Será abordado nesta seção o processo de criação do modelo virtual esperado, a metodologia utilizada no processo de Prototipagem Rápida e os resultados obtidos com a validação da técnica e com a quantificação dos erros observados no processo de simplificação da nuvem de pontos.

A etapa de modelagem e adequação da malha virtual do modelo consistiu na criação do modelo virtual a ser impresso. Essa etapa foi desenvolvida a partir da inclusão da textura e desenvolvimento dos detalhes e aspectos comuns para a formação da cabeça e busto do objeto de estudo, como introdução do cabelo, orelhas, pescoço e suporte. Os objetos virtuais inseridos para essa etapa não foram diretamente desenvolvidos a partir das informações iniciais dos padrões faciais indicados, foram gerados por intermédio de manipulações e operações geométricas realizadas em sólidos base. O modelo virtual gerado com os sólidos inseridos para essa etapa pode ser visualizado na Figura 49.



**Figura 49:** Solido virtual gerado

O próximo passo seguido foi a introdução de textura ao modelo virtual. Para a realização deste passo as informações de textura foram adquiridas nas fotografias utilizadas para a construção do modelo. A expansão da textura foi realizada considerando os padrões faciais inseridos na etapa de desenvolvimento da malha da face. O suporte do busto foi desenvolvido a partir de sólidos base e operações de subtração e interseção para a criação do baixo relevo das letras contidas no busto. O busto com a textura indexada pode ser visualizado na Figura 50.



**Figura 50:** Modelo final com textura aplicada.

O processo de desenvolvimento físico do busto foi realizado por intermédio de técnica de Prototipagem Rápida. O processo consistiu em transformar a extensão do modelo virtual para a extensão de leitura da máquina, formato .WRL, e posteriormente realizar a impressão do modelo. O modelo físico foi gerado pela aglutinação de material colante em camadas finas de pó de sulfato de cálcio através da técnica de PR 3D printing. A ilustração da fase de impressão do protótipo, imerso em sulfato de cálcio pode ser visualizada na Figura 51.



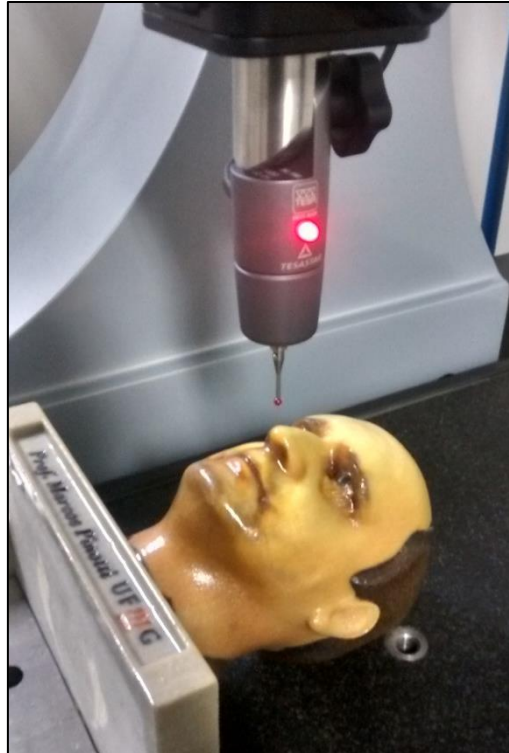
**Figura 51:** Impressão do modelo físico imerso em sulfato de cálcio

A impressão do modelo foi realizada em um tempo estimado de 4 horas, e após a impressão o modelo foi submetido à limpeza e à uma resina infiltrante. O modelo físico do busto impresso pode ser visualizado na Figura 52.



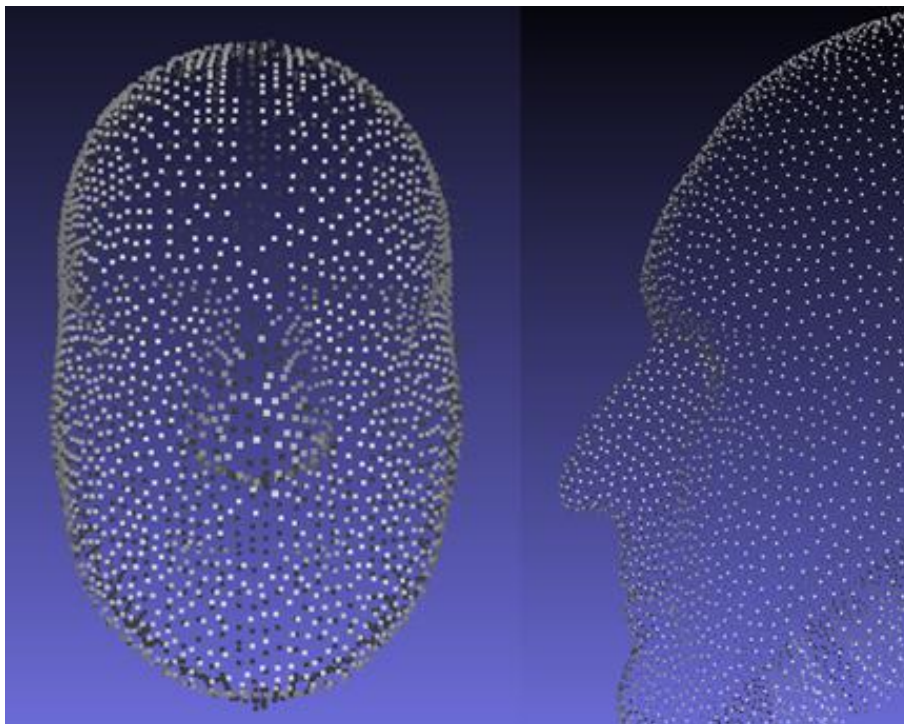
**Figura 52:** Modelo físico do busto desenvolvido com a técnica em estudo.

Para a validação da técnica demonstrada por este estudo de caso o modelo físico desenvolvido por PR foi, em um primeiro momento, foi digitalizado a partir de escaneamento por contato. O escaneamento foi realizado pela CMM TESA Micro-Hite 3D na modalidade de medidor tridimensional, com uma precisão de 0,003 mm na captura de coordenadas tridimensionais. O método de manipulação da sonda foi manual e, ao todo, foram capturados 2.750 pontos coordenados na superfície facial do modelo, região de interesse para a realização do estudo comparativo. O processo total de digitalização durou 70 horas, sendo realizado em quatro períodos. A demarcação da localização da peça nos períodos de digitalização foi realizada a partir da criação de um espaço vetorial padrão, definido como parâmetro no início de todos os períodos. As condições estabelecidas de isolamento de vibrações, condições térmicas e limpeza da peça e do ambiente foram atendidas em todos os períodos de digitalização realizados, a fim de garantir a fidelidade na captura de dados. A imagem representativa do processo de captura de dados a partir do escaneamento por contato realizado pode ser observado na Figura 53.



**Figura 53:** Processo de digitalização do busto.

O processo de aquisição de dados por contato gerou um conjunto de 2.750 dados representando as coordenadas tridimensionais exatas de pontos estratégicos da região facial do busto. Os pontos mais destacados pelo escaneamento foram as proeminências presentes no relevo da superfície do modelo, os contornos geométricos de detalhes, como as narinas, a boca e os olhos e os pontos extremos da face no eixo X, e Y. O formato de apresentação das coordenadas do modelo escaneamento foi em forma de texto, portanto, se fez necessária a manipulação de dados para a transformação das coordenadas de texto em coordenadas de pontos tridimensionais nos softwares de manipulação CAD. A representação da nuvem de pontos obtida com o processo de escaneamento é observada na Figura 54.



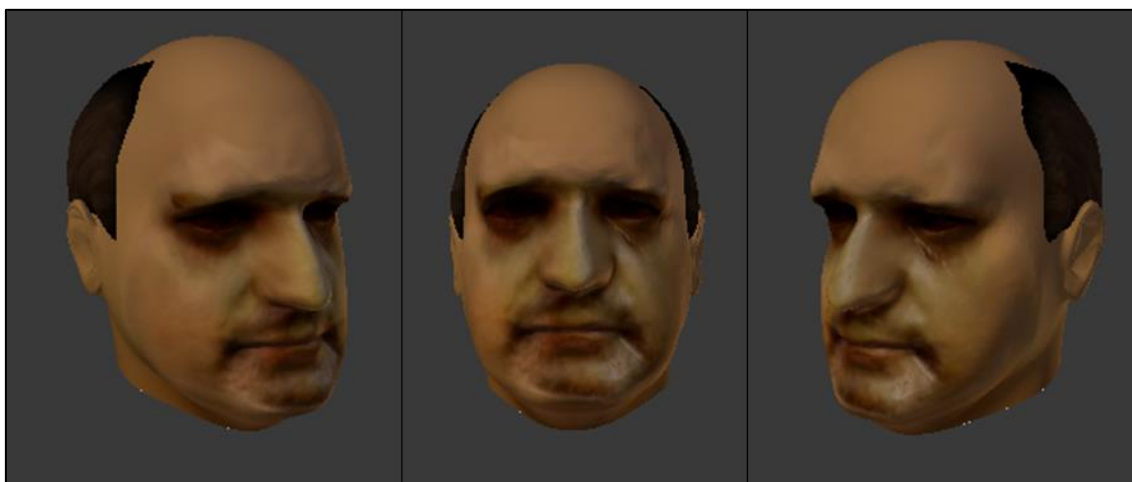
**Figura 54:** Nuvem de pontos adquirida com o processo de escaneamento

O objeto de comparação entre a técnica de fotografias e o modelo escaneado foi o modelo virtual do busto prototipado gerado a partir da técnica em estudo. A metodologia de desenvolvimento do modelo foi a mesma aplicada para a execução do busto a partir das fotografias originais, os marcos faciais do modelo foram tomadas baseados nos mesmos parâmetros demonstrados no início desse estudo de caso. Os marcos faciais tomados para a execução do modelo virtual do busto são demonstrados na Figura 55.



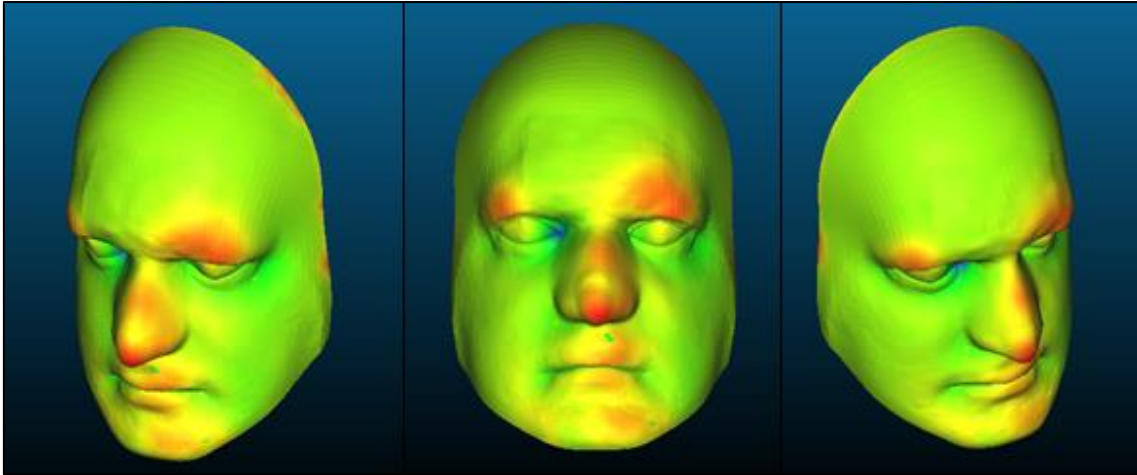
**Figura 55:** Marcos faciais utilizados para geração do modelo virtual do busto.

A execução dos marcos faciais frontais definiu as delimitações necessárias para a formação dos contornos bidimensionais do modelo. Os contornos de profundidade foram definidos pelas definições dos marcos faciais laterais. O modelo foi gerado a partir da mesma metodologia e condições iniciais observadas para a execução do modelo digital a partir das fotos originais do professor. O sólido virtual gerado pode ser visualizado na Figura 56.



**Figura 56:** Modelo virtual do busto prototipado.

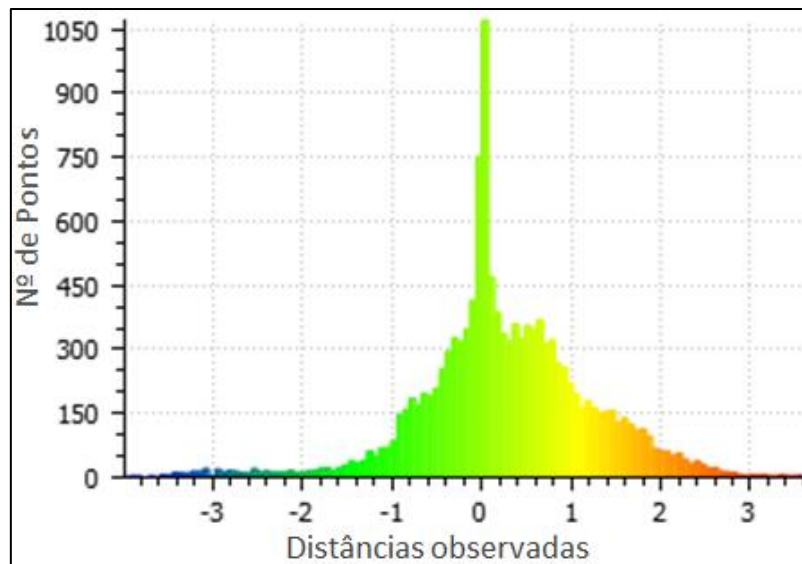
A partir da organização da nuvem de pontos do busto físico escaneado e do desenvolvimento do modelo virtual do busto o próximo pode-se realizar a comparação entre as coordenadas tridimensionais dos dois modelos. A comparação foi realizada com área de interesse na região da face dos modelos e os parâmetros utilizados para a comparação foram as distâncias entre os pontos referenciais tomados a partir do escaneamento com relação à malha computacional do modelo gerado a partir das fotografias do busto. O estudo comparativo busca identificar distorções superficiais dimensionais e geométricas que podem causar o comprometimento da fidelidade na precisão do método de criação de superfície facial tridimensional observada por este estudo. O mapeamento de cores ilustrado na Figura 57 representa as distâncias observadas na comparação entre os dois modelos virtuais.



**Figura 57:** Mapa de cores representativo das distâncias obtidas na comparação dos modelos.

A partir da comparação de distâncias entre a nuvem de pontos gerada pelo escaneamento e a malha computacional gerada pela técnica de fotografias observa-se que o contraste entre os dois modelos apresenta regiões de relevo distinto na superfície nos dois objetos virtuais. Tal distanciamento entre a nuvem de pontos e a malha computacional se justifica pela característica da técnica de criação de modelos faciais por imagens bidimensionais, visto que a geração da topografia do modelo é desenvolvida a partir de marcos faciais definidos manualmente pelo usuário do software. Como as fotografias utilizadas para a confecção do busto comemorativo e a confecção do objeto de comparação eram distintas, os marcos faciais referenciais foram alocados em posições diferentes na confecção do modelo a ser desenvolvido, por esta razão as coordenadas de superfície correspondentes aos pontos mais próximos dos marcos faciais alocados apresentaram valores diferentes. Vale ressaltar que as regiões de maior distância entre os dois modelos comparados representam as regiões onde os marcos faciais foram atribuídos. A Figura 58 apresenta o histograma entre as distâncias médias observadas e o número de pontos atribuídos a estas distâncias.





**Figura 58:** Histograma relativo às distâncias, em mm, observadas na comparação entre os dois modelos.

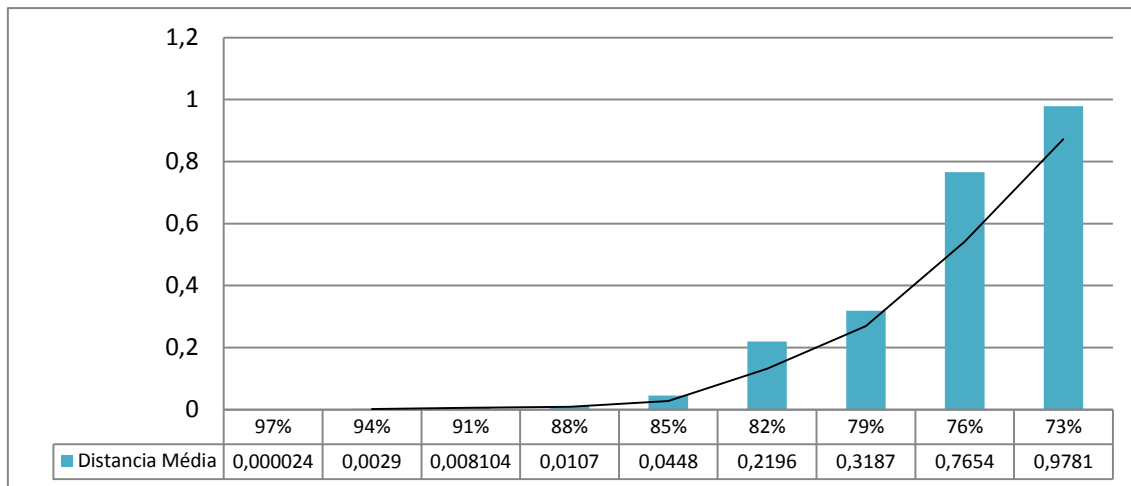
Como é observado na Figura 58 a comparação entre a distância entre os dois modelos é, na maior parte dos pontos, próxima de zero. A distância máxima observada foi de 3,86 mm, o erro máximo observado foi de 0,38 mm e distância média entre os pontos foi de 0,54 mm.

Outro resultado deste Estudo de Caso visa demonstrar o real potencial do método de redução de pontos para representar com fidelidade a geometria do modelo estudado. Para a realização deste estudo o modelo virtual obtido com o escaneamento do busto será submetido a uma simplificação de pontos percentual. Os dois modelos, original e de nuvem de pontos reduzida, foram comparados até que a margem parametrizada de erro médio entre as distâncias seja atingida. Como parâmetro, arbitrado de referência na comparação, foi utilizada a margem de 1 mm. A redução da nuvem de pontos seguiu um passo percentual de decréscimo de 3% a partir do modelo original.

Foi observado que conforme a nuvem de pontos aumentava em seu percentual de variação decrescente a distancia média entre os pontos dos dois modelos virtuais analisados demonstravam um crescimento exponencial.

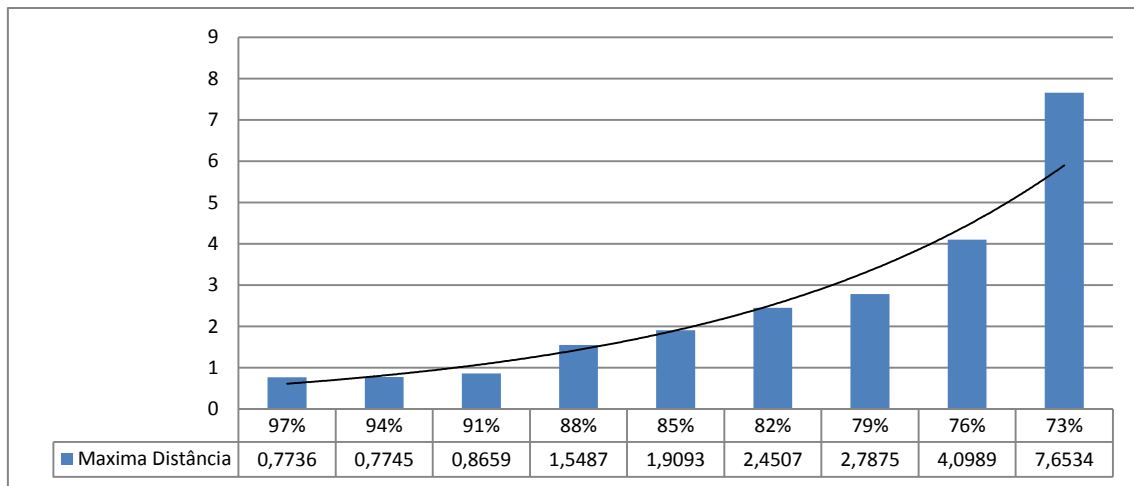
Foi aferido que até o ponto de redução em 27% da malha original, o objeto apresentou distancia média entre os pontos menos que o parâmetro estabelecido de 1 mm.

O gráfico que demonstra a variação das distancias em função da redução da nuvem de pontos, em milímetros, é apresentado na Figura 59.



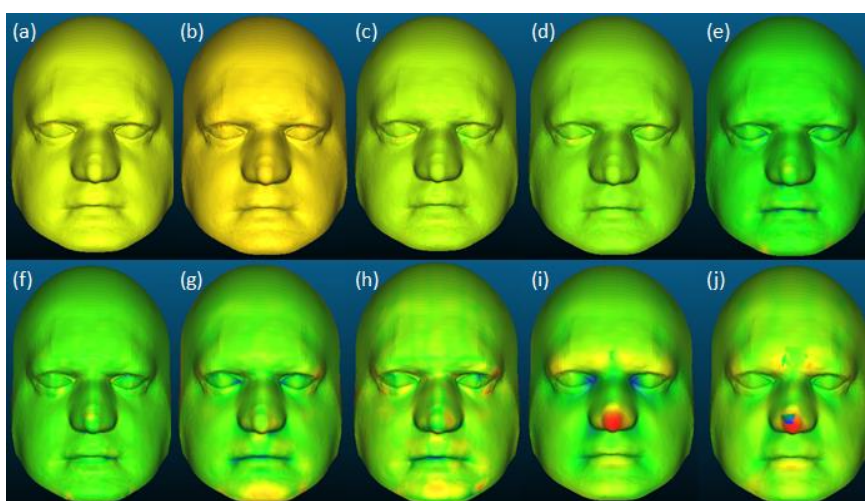
**Figura 59:** Gráfico de variação das distancias médias entre os dois modelos de estudo.

Em conjunto com a tendência exponencial de variação observada na comparação entre as distâncias médias dos modelos analisados, percebeu-se uma variação crescente nas distâncias máximas observadas na análise dos modelos em função da redução da nuvem de pontos. Esta variação é demonstrada, em milímetros, na Figura 60.



**Figura 60:** Gráfico de variação das distâncias máximas entre os dois modelos de estudo.

O impacto da variação na nuvem de pontos foi observado, em sua maior escala nos detalhes superficiais do modelo, como as regiões da boca, olhos e nariz. Embora a quantificação da perda de detalhes é mensurada em um valor inferior a 1 milímetro, é importante salientar que no processo de redução da nuvem de pontos as regiões de maior perda de geometria são as regiões que detêm a maior complexidade do modelo de estudo. A Figura 61 demonstra o mapa de cores representativo da perda de detalhes em cada percentual de redução da nuvem de pontos.



**Figura 61:** Mapa de cores representativo da perda de detalhes para as reduções de, respectivamente, 0%, 3%, 6%, 9%, 12%, 15%, 18%, 21%, 24% e 27%

Nota-se com as variações dimensionais apresentadas que conforme a nuvem de pontos é reduzida a distância média entre os pontos do modelo original e do modelo reduzido não segue a mesma proporção, apresentando variação exponencial. A distância máxima observada entre os dois modelos comparados também não segue linearidade de variação, demonstrando, ainda que em menor módulo se comparado com a variação de distância média, variação exponencial.

Observa-se ainda com este estudo de caso a viabilidade dimensional da técnica de geração de faces por duas fotografias. Os erros observados (de 0,54 mm de distância média) na comparação entre o escaneamento do objeto físico e o modelo em análise não alteram a topografia da superfície modelo digital gerado pela técnica em estudo nesta pesquisa.

É importante ressaltar que as variações dimensionais mais expressivas observadas neste estudo são provenientes da alocação dos marcos faciais determinados no momento de parametrização da entrada de dados para a execução do desenvolvimento do modelo.

## 5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou a fundamentação e a evidenciação do uso e dos princípios base das ferramentas computacionais mais usuais para implementação da Engenharia Reversa.

No âmbito das técnicas de digitalização apresentadas pode-se perceber a valoração do processo integrado de manufatura nos ganhos de fabricação, simulações computacionais e desenvolvimento de novos produtos, tanto no quesito da efetivação e validação das técnicas de digitalização, quanto na facilidade de manipulação dos sólidos virtuais.

Por outro lado, a Engenharia Reversa na etapa de aquisição de dados virtuais requer melhor integração dos softwares CAD comerciais, além de um ambiente propício para o desenvolvimento correto do processo de escaneamento, metrologia do sólido formado, e definição de melhores práticas de digitalização. É importante ressaltar que a efetivação da qualidade do modelo virtual digitalizado está diretamente correlacionada ao princípio de captura de dados utilizados.

Do ponto de vista específico, a metodologia de cada técnica de escaneamento discutida para os processos de aquisição de dados, escaneamento por contato, feixe LASER, fotogrametria e luz estruturada, apresenta aspectos relevantes a serem ressaltados.

Foi observado para todos os processo de escaneamento a importância do controle da temperatura, da limpeza do ambiente e da peça e do isolamento de vibrações externas para que se atingisse a eficiência no processo de digitalização.

O processo de escaneamento por sonda de contato demonstrou maior eficiência observada na fidelidade dimensional e geométrica da captura de dados. A maior limitação do processo foi no quesito tempo de digitalização e alcance da sonda de contato, o que poderia inviabilizar o método em peças de maiores dimensões e alta complexidade.

Os escaneamento por feixe LASER demonstrou relativa facilidade operacional na captura de pontos alta capacidade na captura da geometria do objeto físico, todavia, as dimensões do modelo virtual apresentaram desvios dimensionais nos tamanhos extremos do objeto.

O escaneamento realizado por intermédio de fotogrametria apresentou diversas áreas de discordância dimensional e geométrica se comparado com o modelo físico. A disponibilidade do método, a captura de textura e o baixo custo oracional são os fatores de vantagem da técnica.

O método realizado por luz estruturada apresentou um modelo com alto índice de ruídos e com descontinuidades na superfície, embora demande um tempo menor de escaneamento.

Com relação ao método apresentado de criação de faces a partir de fotografias bidimensionais, pode-se ressaltar a viabilidade observada da metodologia na representação das dimensões e geometrias do objeto estudado. Quanto a precisão do método, pode-se constatar que as variáveis de maior influencia na formação da geometria do modelo computacional são a alocação dos marcos de referência para a parametrização da entrada de dados no algoritmo de registro. A capacidade de reprodução das faces modeladas pode ser estendida com a definição de referenciais ótimos de imagens a serem escolhidas para a criação do modelo e com a alocação de marcos faciais em pixels específicos de maior impacto na confecção da geometria do objeto.

Com relação à perda de detalhes da malha computacional relacionada a diminuição da nuvem de pontos do modelo original pode-se constatar, no sólido estudado, que a redução percentual da nuvem de pontos apresenta uma tendência exponencial no que diz respeito à distancia, ou perda de detalhes geométricos, na superfície do modelo.

Por fim, os resultados deste trabalho permitem a análise e desenvolvimento de uma parcela de significância no ambiente integrado de manufatura assistida por tecnologias de digitalização tridimensional, com utilização de softwares CAD de código aberto e equipamentos auxiliares de Engenharia Reversa.

Mediante a proposta deste trabalho e as possibilidades de ampliação da pesquisa, evidencia-se a necessidade de aprofundamento em alguns pontos-chaves e a realização de novos estudos e pesquisas. As sugestões para continuação dos trabalhos seguem nos parágrafos abaixo.

Com relação a comparação das técnicas de digitalização o estudo apresentado abre as possibilidades de realização de novos trabalhos que evidenciem a potencialidade dos métodos de digitalização em diferentes condições e com equipamentos de mesmo princípio de funcionamento. Ainda para a comparação dos métodos de escaneamento um estudo a respeito da precisão de outros métodos de escaneamento, não apresentados por este trabalho, traria importantes contribuições para a metrologia de precisão na Engenharia Reversa.

Com relação a metodologia de criação de face a partir de duas fotografias este trabalho sugere a modificação do algoritmo para a criação de sólidos virtuais diversos a partir de duas fotografias e marcações referenciais. Também se é estimulado a validação do novo método por intermédio da comparação entre o modelo gerado e um modelo referencia.

Por fim, com relação a comparação entre a redução da nuvem de pontos e a perda de precisão geométrica, demanda-se a validação da tendência esperada a partir da realização de um estudo estatístico que busca, ou não, padronizar a quantificação da perda de detalhes de um objeto virtual base a partir da redução percentual de sua nuvem de pontos.

## **6. BIBLIOGRAFIA**

AHRENS, C.; VELLWOCK, A.; PFEIFER, D.; PISTORELLO, R. **Engenharia reversa por meio de fotogrametria: Estudo Comparativo da técnica de digitalização tridimensional visando aplicação na manufatura aditiva.** 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Penedo, 2013.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B.89.4.22- 2004 – Methods for Performance Evaluation of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines,** 2004.

AVIS, D. **Estudo da técnica de engenharia reversa para construção de geometrias complexas focando erros de forma e métodos de digitalização geométrica.** Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Tupy. Departamento de Engenharia Mecânica. Santa Catarina, 2010.

BEHZAD, Z. **Reverse Engineering of Pump Impeller Utilizing Rapid Prototyping Technology.** Thesis (M.S.), Eastern Mediterranean University, Institute of Graduate Studies and Research, Dept. of Mechanical Engineering, Famagusta: North Cyprus, 2015

BENKO P., HOS G., VARADY T., ANDOR L., MARTIN R. Constrained Fitting in Reverse Engineering. *Computer Aided Geometric Design.* V. 19. pp. 175-205. 2002.

BITS-FROM-BYTES, **RapMan 3.1 Build Manual.** [on-line]. Disponível em: <[http://cubify.s3.amazonaws.com/public/bfb/bfbrobm\\_145623\\_1764.pdf](http://cubify.s3.amazonaws.com/public/bfb/bfbrobm_145623_1764.pdf)> Acessado em Agosto de 2016.

BOEHLER, W.; HEINZ, H.; MARBZ, A. **The Potencial of Non – Contact Close Range Laser for Cultural Heritage Recording.** *Journal of Measurement,* v. 30, pp 424 – 444, 2001

BOSCH, J. A. **Coordinate Measuring Machines and Systems.** Ed. Marcel Decker, 1995.

BOURELL, D. L.; MARCUS, H. L.; BARLOW, J. W. and BEAMAN, J. J. **Selective laser sintering of metais and ceramics.** *The International Journal of Powder Metallurgy,* Vol 28, No. 4, pp. 369-381, 1992.

BUTLER C., An investigation into the performance of probes on coordinate measuring machines, *Industrial Metrology,* V.2, pp. 59-70. 1991

CHEN, J.; WU, X. WANG, M.; LI, X. **3D shape modeling using a self-developed hand-held 3D laser scanner and an efficient HT-ICP point cloud registration algorithm.** *Optics & Laser Technology.* Vol. 45 pp. 414–423; 2013.

CHINN, T. **Strain Measurement Validation Using 3D Photogrammetry Techniques.** Master's Theses. San Jose State University. 2013.



CHUA, C. K., Chou, S.M., Lin S.C., Eu, K.H. Lew, K.F., 1998, **Rapid Prototyping Assisted Surgery Planning**. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 14, No. 9, 1998

CustonPart.net. **Additive Fabrication**. Disponível em: <<http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>>. Acessado em 11 de janeiro de 2017.

DAVID C. GRACE S., JUDITH A. Ultrasound Training during ATLS: An Early Start for Surgical Interns. *Journal of Trauma-Injury Infection & Critical Care*. v. 41. pp. 208 – 2013. 1996

DORF R., KUSIAK A., BIDANDA B., NARAYANAN V., BILLO R. Reverse Engineering and Rapid Prototyping. *Handbook of Design, Manufacturing and Automation*. V.14. 2007

DUBRAVTHI, M.; KENDER, S. **Application of reverse engineering techniques in mechanics system services**. *Procedia Engineering* V. 48 pp. 96 – 104. ELSEVIER, 2012.

ERIKSSON, D. **Point Cloud Simplification and Processing for Path-Planning**. Master's Theses. Chalmers University of Technology, 2014.

FARO. **Faro Arm User Guide**. [on-line] Disponível em <<ftp://ftp.faro.com/Products/Arm/Manuals/FaroArm%20Serial%20User%20Guide/08m45e00%20-%20FaroArm%20-%20May%202005.pdf>> Acessado em Janeiro de 2017

FRANCA J., GAZZIRO M., IDE A., SAITO J.; A 3D scanning system based on laser triangulation and variable field of view. *Browse Conferences*. Genova, 2005

FRANK, D. and FADEL, G. **Expert system based selection of the preferred direction of build for rapid prototyping processes**. *Proceedings of the Fifth International Conference on Rapid Prototyping*, Dayton-OH, USA, 1994.

FRASER, C. **What Is Photogrammetry?**. *Previewing CMSC*. University of Leicester. 2015.

GALANTUCCI, L. M.; PIPEN, E. **Semi-automatic low cost 3D Laser Scanning System for Reverse Engineering**. *Procedia CIRP*. V. 28: 94-99, 2015.

GENEST D.; "Coordinate Measuring Machines (CMMS), *Quality in Manufacturing*; pp. 21-23; 1994

GENG, J. **Structured-light 3D surface imaging: a tutorial**. *Advances in Optics and Photonics*. V. 3, pp. 128 – 160, 2011.

GEORGOPOULOS, A.; IOANNIDIS, C.; VALANIS, A. **Assessing the performance of a structured light scanner**. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V. 38. Greece. 2010.

GERBINO, S.; MARTORELLI, M.; RENNO, F.; SPERANZA, D. **Cheap Photogrammetry Versus Expansive Reverse Engineering Techniques in 3D Model Acquisition and Shape Reconstruction.** International Design Conference. Dubrovnic, 2004.

GERONÈS, C. M. **Hand-Helm 3D-Scanner form large surface registration.** PhD Thesis. Universitat de Girona, 2007.

GESTEL, N. V.; CUYPERS, S., BLEYS, P.; KRUTH, J.P. **A Performance Evaluation Test For Laser Nite Scanners on CMMs.** Journal of Opticas and Lasers in Engineering, v. 21, pp. 100 – 107, 2008.

GIBSON, I. **Advanced Manufacturing Technology for Medical Applications: Reverse Engineering, Software Conversion and Rapid Prototyping.** V1. Wiley. London. 2005

GIRI,F., MITCHELL, A., SPENCER, H., HILL, I, **Technical of Drawing.** Upper Saddle River. NJ, USA, 2003;

GONÇALVES, C. R. **Um estudo comparativo de sistemas de medição aplicáveis ao controle dimensional de superfícies livres em peças de médio e grande porte,** 91p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

GORE, J., RANADE, M., MARYANSKI, M. SCHULZ, R. Radiation dose distributions in three dimensions from tomographic optical density scanning of polymer gels: I. Development of an optical scanner. Physics in Medicine & Biology. V. 41.

HAUSER R., **Trust Region Methods for Unconstrained Optimisation.** Numerical Linear Algebra and Optimisation Oxford University Computing Laboratory. 2007

HERMAN, G.; SÁNTHA, C. **Design of Tactile Measuring Probes for Coordinate Measuring Machines.** Acta Polytechnica Hungarica. Vol. 6, No. 1, 2009.

HOKEN, R.J; PEREIRA, P. H.. **Coordinate Measuring Machines and Systems.** London: CRC Press; 2016.

HSIEH, J. **Computed Tomography: principles, design, artifacts and recent advances.** 1 ed. Spie Press. Washington, 2003

HYVÄRINEN, J. **Surface reconstruction of point clouds captured with microsoft Kinect.** Bachelor's Thesis. Oulu University of Applied Sciences. 2012.

JACOBS, P. F. **Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography,** Society of Manufacturing Engineers, Michigan, USA, 1992;

JAIN, S.; NIGUDKAR, N; HASAN, F.; KUMAR, A. (2016). **An Integrated Reverse Engineering and rapid prototyping approach towards reconstruction of damaged impeller.** International Journal of Industrial and Systems Engineering 23(4):393-404;

JECIĆ, S.; DRVAR, N. **The assessment of structured light and laser scanning methods in 3d shape measurements.** 4th International Congress of Croatian Society of Mechanics. Bizovac, Croatia. 2003

JONES, J. **Investigation of Laser Printing for 3D Printing and Additive Manufacturing.** Phd Thesis. The University of Warwick. 2013.

JÚNIOR, L. S.; **Sistemática Para Garantia da Qualidade na Medição de Peças com Geometria Complexa e Superfícies com Forma Livre Utilizando Máquina de Medir Por Coordenadas.** Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba, 2010;

KARBOWSKI, K.; CHRZAN, R.; MOSKAŁA, M.; POLAK, J.; URBANIK, A.; SUJKA, W. **Reverse engineering in cranioplasty.** 2015.

KIM, H. ; ZHAO, W.; ZHAO, L. **Process-Level Modeling and Simulation for HP's Multi Jet Fusion 3D Printing Technology.** 1<sup>st</sup> International Workshop on Cyber Physical Production System. Vienna, 2016.

KRISHNA, K., MURTY, M. Genetic K-means algorithm. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. v. 29. pp. 433 – 439. 1999

LARTIGUE, C.; CONTRI, A.; BOURDET, P. **Digitised point quality in relation with point exploitation.** Journal of Measurement, v. 32, p. 193-203, 2002.

LEE, S.; CHO, H.; YOON, K. J.; LEE, J; **Intelligente Autonomus Systems.** V:1 London: Springer–Verlag, 2012.

LUHMANN, T.; ROBSON, S.; KYLE, S.; HARLEY I. **Close Range Photogrammetry Principles: techniques and applications.** V.1. London: Whittles Publishing, 2006.

MANSON, A. Making 3D Models with Photogrammetry. Getting Started with Agisoft PhotoScan. Carleton College. 2013

MAYER, J. R.; GHAZZAR, A.; ROSSY, O. **3D characterisation, modelling and compensation of the pre-travel of a knematic touch trigger probe,** Measurement, Vol 19, pp.83- 94. 1996

MEDEROS, B.; AMENTA, N.; VELHO, L.; FIGUEIREDO, L. **Surface Reconstruction from Noisy Point Clouds.** Eurographics Symposium on Geometry Processing, 2005.

MEDICAL IMAGING IN CANADA (MIC), **Canadian Institute for Health Information,** Ottawa, 2003.

MILES H.; SEUNGKYU L.; OUK C.; RADU H. **Time of Flight Cameras: Principles, Methods, and Applications.** Springer, pp.95, 2012;

MITRA N., GELFAND N., POTTMAN H., GUIBAS L. **Registration of point cloud data from a geometric optimization perspective.** ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing. pp. 22 – 33. 2004

NOORANI, R., 2006. **Rapid prototyping: Principles and applications**. John Wiley & Sons Incorporated.

OTTO, K., WOOD, K.; Techniques in Reverse Engineering and New Product Development. Pearson. London. 2003

PAVLIDIS G., KOUTSOUDIS A., ARNAOUTOGLOU F., TSIUKAS V., CHAMZAS C., **Methods for 3D digitization of Cultural Heritage** Journal of Cultural Heritage. V. 8; pp. 93-98; 2007

PAWAR, **Surface Reconstruction from Point Clouds**. Master Thesis. Bournemouth University. 2013.

PEARS N., Optical Triangulation Range Sensors. Department of Engineering Science, University of Oxford. 2014

PEAT, D. **Magnetic resonance relaxation at ultra low temperatures. PhD thesis, University of Nottingham**. Phd Thesis. University of Nottingham, 2015.

PESHKO, O. **Surface reconstruction from structured-light images for radiation therapy**. Master's Theses. McMaster University, 2005.

PHAM, D. T.; GAULT, R. S. **A Comparasion of Rapid Prototyping Technologies**. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1998;

PUNTAMBEKAR, N. V.; JABLOKOW, A. G., Sommer III, H. J, **Unified review of 3D model generation for Reverse Engineering**. Computer Integrated Manufacturing Systems. Vol. 7, pp. 259-268, 1994.

PUYBASSET, L. CLUZEL, P., CHAO C, SLUTSKY, A., CORIAT P., ROUBY, P. A **Computed Tomography Scan Assessment of Regional Lung Volume in Acute Lung Injury**. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine. V. 158. N. 5. 1998.

RAJA, I.; FERNANDES, V.J. **Reverse engineering: an industrial perspective**. London: Springer–Verlag, 2008;

RATHNAYAKA, K.; MOMOT, K.I.; NOSER, H.; VOLP, A.; SCHUETZ, M.A.; SAHAMA, T.; SCHMUTZ, B. **Quantification of the accuracy of MRI generated 3D models of long bones compared to CT generated 3D models**. Medical Engineering & Physics 34 p.357– 363, 2012.

REID, C. **Performance characteristics of touch trigger probes**, Quality Today. Buyers Guide, pp. 152-155, 1995

REMONDINO, F., STOPPA, D. TOF Range Imaging Cameras. 1 ed. Springer. London. 2013

ROLAND. **Modela 3d Ploter, MDX-20, MDX-15. User's manual**. [on-line]. Disponível em: <<http://support.rolanddga.com>> Acessado em agosto de 2016.

SALMAN, N. **From 3D point clouds to feature preserving meshes.** Phd Thesis. Ecole Doctorale Stic. 2010.

SALVI, J.; MATABOSCH C.; FOVI, D.; FOREST, J. **A review of recente range image registration methods with accuracy evalution.** Image and Vision Computing V. 25, p. 578-596, 2007.

SALVI, J.; PAGES, J.; BATLLE, J. **Pattern codification strategies in structured light systems,** Pattern Recognition, 37 (2004), pp. 827–849.

SANSONI, G.; DOCCHIO, F. **Three – Dimensional Optical Measurements and Reverse Engineering for Automove Applications.** Journal of Robotics and Computer Integrated Manufacturing. V. 20, pp. 359 – 367, 2004.

SCHWENKE, H.; RUBE, U.N.; PFEIFER, T.; KUNZMANN, H. **Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering.** Journal of Optics and Lasers in Engineering, v. 45, pp. 1534-1554, 2007

SELLITTO, M.; MORAIS, R. **Aplicação do ensaio por ultrassom no controle de qualidade de processo de soldagem a ponto em operação industrial.** E-Tech, V. 7, nº2. 2011.

SILVA, A. C. **Uma Sistemática para Garantia da Qualidade Metrológica Aplicada em Ambiente Industrial.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SILVA, **Análise de materiais e dimensionamento de peças metálicas utilizando tomografia computadorizada de raios x.** Congresso da Qualidade em Metrologia, 2013.

SOKOVIC, M.; KOPAC, J. **RE (Reverse Engineering) as Necessary Phase By Rapid Product Development.** Journal of Material Processing Technology. V. 175, pp 398 – 403, 2006.

SOKOVIC, M.; KOPAC, J. **RE (Reverse Engineering) as Necessary Phase By Rapid Product Development.** Journal of Material Processing Technology. V. 175, pp 398 – 403, 2006.

SPILLMANN, L. (1993). **The perception of movement and depth in moire patterns.** *Perception*, 22, 287-308.

TAGUCHI, G. **Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes.** Asian Productivity Organization. Tokyo; 1986.

TAMAS V, RALPH RM, JORDAN C (1997), **Reverse engineering of geometric models – na introduction.** *Comput Aided Des* 9 (4): 255 – 268

THOMAS, L.; KENNEDY, A., JAMES. E.; **High-intensity Focused Ultrasound Principles, Current Uses, and Potential for the Future.** *Ultrasound Quarterly*, v.22. pp. 263 – 272. 2006

VOLPATO, N.; AHRENS, C. H.; FERREIRA, C. V.; PETRUSH, G.; CARVALHO, J.; SANTOS, J. R. L.; SILVA, J. V. L. **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 2007.

WANG, W. **Reverse Engineering Technology of Reinvention**. V1. London: CRC Press. 2011.

WASSERMANN, F. **Magnetic Resonance Imaging Techniques for Thermofluid Applications**. Master's Theses. Technischen Universität Darmstadt, 2015.

WENZEL. **3D coordinate measuring machine LH 54 specifications**. [on-line] Disponível em: < [http://www.wenzel-group.com/praezision/en/products/cmm/lh-54-small-3d-coordinate-measuring-machine.php?we\\_ID=754](http://www.wenzel-group.com/praezision/en/products/cmm/lh-54-small-3d-coordinate-measuring-machine.php?we_ID=754) > Acessado em Janeiro de 2017.

WHOLERS, T., ***Rapid prototyping and manufacturing: State of the industry - Annual World Wide Progress Report; 2006***.

WOLF, K; KIM, C.; ZIMMER, H.; SCHROERS, C. BOTSCH, M.; SORKINE-HORNUNG, O.; SORKINE-HORNUNG, A. **Point Cloud Noise and Outlier Removal for Image-Based 3D Reconstruction**. International Conference on 3D Vision, 2016.

XIUZI, Y. HONGZHENG L. **Reverse Innovative Design – an integrated product design methodology**. Journal of Computer Aided Design, v. 40, pp 812 – 827, 2010

YAU, H; Hanque; Meng, C. (1993). **Reverse Engineering in The Design of Engine Intake and Exhausts Ports**. Manuf Sci Eng, 64: 139 – 148;

ZCORPORATION. **ZPrinter® 650 Hardware Manual**. [on-line] Disponível em < [http://www.bibus.hu/fileadmin/editors/countries/bihun/product\\_data/zcorp/documents/zcorp\\_series\\_zprinter\\_650\\_hardware\\_manual\\_en.pdf](http://www.bibus.hu/fileadmin/editors/countries/bihun/product_data/zcorp/documents/zcorp_series_zprinter_650_hardware_manual_en.pdf) > Acessado em Janeiro de 2017.

ZHOU, E.P.; HARRISON, D.K.; LINK, D. **Effecting in-cycle measurement with pretec CNC machine tools**, Computers in Industry, pp. 95-102. 1996.