

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

HENRIQUE WOBETO DA COSTA MELO  
WILLIAM DOS SANTOS PEDDINGHAUS

**APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DE IMPRESSÃO 3D NO  
PLANEJAMENTO CIRÚRGICO:  
UM ESTUDO DE CASO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
(TCC 2)

CURITIBA

2019

HENRIQUE WOBETO DA COSTA MELO  
WILLIAM DOS SANTOS PEDDINGHAUS

**APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DE IMPRESSÃO 3D NO  
PLANEJAMENTO CIRÚRGICO:  
UM ESTUDO DE CASO**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. João Antonio Palma Setti

Co-orientador: Celso Junio Aguiar Mendonça

CURITIBA

2019

## TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "Aplicação da Tecnologia de Impressão 3D no Planejamento Cirúrgico: Um Estudo de Caso", realizado pelos alunos Henrique Wobeto da Costa Melo e Willian dos Santos Peddinghaus, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. João Antonio Palma Setti  
DAMEC, UTFPR  
Orientador

Prof. Dr. Ivan Moura Belo  
DAMEC, UTFPR  
Avaliador

Prof. Sidney Carlos Gasoto  
DAMEC, UTFPR  
Avaliador

Curitiba, 05 de dezembro de 2019.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família,  
apoiadores pela paciência e suporte.

## **AGRADECIMENTOS**

Manifestamos nossa gratidão primeiramente aos familiares e amigos que deram apoio nesta jornada.

Agradecemos ao nosso orientador Prof. João A. P. Setti e ao coorientador Celso J. A. Mendonça a instrução e paciência para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas de sala.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

*“Só se pode criar valores autênticos quando se consegue o domínio de si mesmo e a técnica que permite sua interpretação e não pelo desperdício da liberdade. Só se tem acesso aos mais altos valores pelo domínio das técnicas mais elaboradas. Conquistamos a verdadeira liberdade quando nos tornamos mestres de nós mesmos. Nisso consiste a dignidade do homem.”*

*(Daisaku Ikeda)*

## RESUMO

Wobeto da Costa Melo, Henrique; Dos Santos Peddinghaus, William. Aplicação da tecnologia de impressão 3D no planejamento cirúrgico: um estudo de caso. 61 f. Trabalho de conclusão de curso – Tcc2, Bacharelado em Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

A manufatura aditiva (impressão 3D) tem sido utilizada em um crescimento exponencial em várias áreas da medicina. Para que lesões ortopédicas possam ser impressas em modelos anatômicos 3D, utiliza-se de imagens providas de tomografia computadorizada (TC), a qual possibilita a reconstrução volumétrica tridimensional do objeto a ser estudado. O objetivo principal deste estudo é documentar o processo do uso da tecnologia de manufatura aditiva na impressão do modelo anatômico de um caso clínico em específico. O presente trabalho segue uma metodologia de quatro passos no processo de impressão 3D, sendo eles: Aquisição da Imagem, Segmentação da Imagem, Modelagem do Objeto 3D e Impressão do Modelo 3D. A impressão 3D é realizada basicamente pela leitura de um código numérico (*G Code*) desenvolvidos através de programas computacionais CAD (*Computer Aided Design*) e CAM (*Computer Aided Manufacturing*), os quais são capazes de segmentar e modelar ossos e implantes. A tecnologia empregada neste tipo de manufatura aditiva é geralmente realizada através de materiais termoplásticos que após a impressão, serão muito úteis tanto para análises relacionadas a Engenharia Mecânica quanto para auxiliar em procedimentos cirúrgicos da área médica. Desta maneira, é possível afirmar que o estudo apontou a importância da implementação da tecnologia de impressão 3D em áreas de relevância para a sociedade, como exemplificado na área médica, a qual pode ser facilmente influenciada positivamente pela existência de um modelo ósseo no planejamento cirúrgico. Conclusão: O modelo anatômico impresso com o material PLA a partir da tecnologia de impressão 3D do tipo FDM mostra-se uma ferramenta eficaz e capaz de auxiliar o planejamento pré-cirúrgico de uma lesão ortopédica complexa.

**Palavras-chave:** Impressão 3D. Biomedicina. Cirurgia. Segmentação de imagem. Simulação Cirúrgica.

## ABSTRACT

Wobeto da Costa Melo, Henrique; Dos Santos Peddinghaus, William. Application of 3D printing technology on surgery's planning: a study's case. 61 p. Undergraduate Thesis, Mechanical Engineering, Academic Department of Mechanical, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

*Additive manufacturing (3D printing) has been used in exponential growth in various areas of medicine. Orthopedic lesions can be printed on 3D anatomical models, so images from computed tomography (CT) enables the three-dimensional volumetric reconstruction of the object to be studied. The main objective of this study is to document the process of using additive manufacturing technology to print the anatomical model of a specific clinical case. The present work follows a fourstep methodology in the 3D printing process, namely: Image Acquisition, Image Segmentation, 3D Object Modeling and 3D Model Printing. The 3D printing was performed basically by reading a numeric code (G Code) developed through computer programs CAD (Computer Aided Design) and CAM (Computer Aided Manufacturing), which are capable of segmenting and modeling bones and implants. The technology involved in this type of additive manufacturing is generally realized through thermoplastic materials which after printing will be very useful for both Mechanical Engineering related analyzes and to assist in medical surgical procedures. Thus, it can be said that the study pointed to the importance of implementing 3D printing technology in areas of relevance to society, as exemplified in the medical field, which can easily be positively influenced by the existence of a bone model in surgical planning. Conclusion: The anatomical model printed with ABS material using FDM-type 3D printing technology proves to be an effective tool and able to assist pre-surgical planning of a complex orthopedic injury.*

**Keywords:** 3D printing. Biomedicine. Surgery. Image segmentation. Surgical Simulation.



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorias ASME de processos AM e discretização do respectivo princípio básico .....	17
Tabela 2 – Parâmetros de impressão .....	26

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama esquemático quanto a relação de afinidade da manufatura aditiva com os três principais tipos de materiais .....	18
Figura 2 - Esquema de funcionamento da tecnologia FDM .....	19
Figura 3 - Esquemático do princípio do SLA .....	20
Figura 4 - Esquemático do princípio do SLS .....	20
Figura 5 - Vista de dois joelhos gerada por TC .....	23
Figura 6 - Interface do InVesalius com Modelo 3D gerado .....	24
Figura 7 - Imagem do programa Meshmixer v3.5.....	24
Figura 8 - Fotografia da impressora 3D.....	25
Figura 9 - Metodologia esquemática dos passos para impressão 3D .....	26
Figura 10 - Corte Axial apresentado no <i>Invesalius</i> .....	29
Figura 11 - Corte Coronal apresentado no <i>Invesalius</i> .....	29
Figura 12 - Segmentação em 3D da imagem no <i>Invesalius</i> .....	30
Figura 13 - Imagem 3D sem qualquer limpeza prévia.....	31
Figura 14 - Imagem 3D depois de uma etapa de limpeza prévia .....	31
Figura 15 - Imagem 3D depois de uma segunda etapa de limpeza prévia .....	32
Figura 16 - Imagem 3D depois de toda limpeza prévia .....	32
Figura 17 – Objeto 3D com a malha gerada .....	33
Figura 18 - Superfície antes do processo de <i>Cleaning</i> .....	34
Figura 19 - Superfície depois do processo de <i>Cleaning</i> .....	34
Figura 20 - Objeto sem <i>Smoothing</i> .....	35
Figura 21 - Objeto com <i>Smoothing</i> .....	35
Figura 22 - Imagem do programa <i>Simplify3D</i> v4.1 .....	37
Figura 23 - Foto do processo de impressão 3D .....	38
Figura 24 - Modelo físico impresso do fêmur direito.....	39
Figura 25 - Modelo físico impresso do fêmur esquerdo .....	39
Figura 26 – Parte superior do fêmur em detalhe .....	40
Figura 27 – Parte inferior do fêmur direito em detalhe .....	40
Figura 28 – Parte inferior do fêmur esquerdo em detalhe .....	41
Figura 29 – Comparação 1 entre o fêmur direito (cinza) e o fêmur esquerdo (verde; modelo espelhado).....	41
Figura 30 – Comparação 2 entre o fêmur direito (cinza) e o fêmur esquerdo (verde; modelo espelhado).....	42
Figura 31 - Comparação 3 entre o fêmur direito(cinza) e o fêmur esquerdo (verde; modelo espelhado).....	42
Figura 32 – Comparação do fêmur direito (a direita) com fêmur esquerdo (a esquerda) .....	43

Figura 33 – Fêmures em posição normal ao corpo humano para fins de comparação (vista frontal).....	43
Figura 34 - Fêmures em posição normal ao corpo humano para fins de comparação(vista inferior) .....	44
Figura 35 – Ilustração da disposição dos femurês no corpo humano .....	44
Figura 36 – Raio-X do caso estudado .....	45
Figura 37 – Marcação de ponto onde será realizada o corte cirúrgico.....	46
Figura 38 - Imagem antes da correção do fêmur esquerdo (em verde) .....	46
Figura 39 - Imagem depois da correção do fêmur esquerdo (em verde), em uma vista inferior .....	47
Figura 40 - - Imagem depois da correção do fêmur esquerdo (em verde), em uma vista frontal.....	47
Figura 41 - Ângulo da base do fêmur esquerdo antes da correção.....	48
Figura 42 - Ângulo da base do fêmur esquerdo depois da correção.....	48
Figura 43 - Comparação entre o fêmur direito e esquerdo antes da simulação cirúrgica.....	49
Figura 44 - Comparação entre o fêmur direito e esquerdo depois da simulação cirúrgica.....	49
Figura 45 - Marcação do ponto de corte cirúrgico .....	50
Figura 46 - Marca do ponto de corte cirúrgico.....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS

Inc. Incorporated (Incorporada – Tipo de entidade legal americana, para companhia ou corporação)

## LISTA DE SIGLAS

3D	Tridimensional
UV	Ultravioleta

## LISTA DE ACRÔNIMOS

AM	<i>Additive Manufacturing</i> (Manufatura Aditiva)
BJ	<i>Binder Jetting</i> (Capeamento por jato)
DAMEC	Departamento Acadêmico de Mecânica
DED	<i>Direct Energy Deposition</i> (Deposição por Energia Direta)
DICOM	<i>Digital Imaging and Communication in Medicine</i> (Imagem e comunicação digital na Medicina)
FDM	<i>Fused Deposition Modelling</i> (Modelagem por Deposição Fundida)
ISS	<i>International Space Station</i> (Estação Espacial Internacional)
ME	<i>Material Extrusion</i> (Extrusão de Material)
MJ	<i>Jetting Material Deposition</i> (Material depositado por jato)
NUFER	Núcleo de Manufatura Aditiva e Ferramental
PBF	<i>Powder Bed Fusion</i> (Fusão de base de Pó)
PLA	<i>Poyilactic Acid</i> (Ácido Polilático)
SL	<i>Sheet Lamination</i> (Laminação de chapa/placa/folha)
SLS	<i>Seletive Laser Sintering</i> (Sinterização Seletiva a Laser)
TC	Tomografia Computadorizada
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VP	<i>Vat Photopolymeration</i> (Fotopolimerização em Cuba/Caixa)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 HISTÓRICO .....	16
1.2 A TECNOLOGIA DE IMPRESSÃO 3D .....	17
1.3 OBJETIVO .....	20
1.3.1 Objetivo Específico .....	21
1.4 JUSTIFICATIVA .....	21
<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
2.1 MATERIAIS.....	22
2.1.1 Revisão Teórica .....	22
2.1.2 Imagens Adquiridas por CT .....	23
2.1.3 Invesalius .....	23
2.1.4 MeshMixer .....	24
2.1.5 Slic3r .....	24
2.1.6 Simplify3D.....	25
2.1.7 Impressora 3D .....	25
2.2 MÉTODOS.....	26
2.2.1 Aquisição da Imagem .....	27
2.2.2 Segmentação da Imagem .....	28
2.2.2.1 Geração da malha.....	33
2.2.2.2 Cleaning.....	33
2.2.2.3 Smoothing.....	35
2.2.3 Modelagem do Objeto 3D .....	36
2.2.4 Impressão 3D do Objeto .....	37
<b>3 RESULTADOS .....</b>	<b>39</b>
<b>4 DISCUSSÕES .....</b>	<b>51</b>
4.1 MODELO ANATÔMICO 3D .....	51
4.2 PLANEJAMENTO PRÉ-OPERATÓRIO.....	51
4.3 SIMULAÇÃO PRÉ-CIRÚRGICA .....	52
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde a década de 1980, a impressão 3D, ou Manufatura Aditiva (AM), vem desbravando limites na indústria de maneira disruptiva, tal como foi com o surgimento do *download* de música pela internet (BERMAN, 2012).

Tecnologia cujo processo consiste no acúmulo de um material que é depositado camada sobre camada, pode ser comparada a uma impressora tradicional, porém com a característica de dar volume ao material impresso (CONNER, 2014 apud PEREIRA; KENNEDY; POTGIETER, 2019; GIBSON, 2014 apud QIN *et al.*, 2019; BERMAN, 2012).

Atualmente, ela encontra diversos adeptos que desfrutam das facilidades e liberdades que ela permite em inúmeras áreas da vida humana. Como um exemplo, tem-se o campo da indústria aeroespacial (JOSHI; SHEIKH, 2015), a qual devido a necessidade de customização e baixa produção de seus artefatos, implantou uma impressora 3D na ISS (Estação Espacial Internacional) com o objetivo de reposição de peças únicas (GEBLER; SCHOOT UITERKAMP; VISSER, 2014; MITCHELL *et al.*, 2018)

Mais próximo da realidade cotidiana, a área de educação utiliza da impressão 3D para produzir objetos que venham a gerar maior empoderamento e simplicidade no aprendizado, o que é viabilizado pela disponibilidade de se ter uma visão mais rica em detalhes de um objeto do que uma imagem 2D (SCHELLY *et al.*, 2015; WATSON, 2014)

Aproximando-se do setor biomédico (YAN *et al.*, 2018), vê-se uma grande oportunidade de melhorar a qualidade de vida das pessoas (PRAVIN; SUDHIR, 2018). Nos limites dessa área há a reconstrução de tecidos do corpo humano, buscando assim trazer benefícios para aqueles que sofreram algum tipo de trauma (SINDHU; SOUNDARAPANDIAN, 2019), ou aprimoramento nos meios de fabricação das drogas farmacêuticas (SAVIANO *et al.*, 2019).

Especificamente na área da ortopedia, tal tecnologia vem possibilitando um tratamento mais personalizado e consistente no tratamento de pacientes, tal como a criação de implantes customizados ao esqueleto da pessoa (CHEN; XU; WANG; HAO; *et al.*, 2016), ou na instrução para cuidados de saúde (STAROSOLSKI *et al.*, 2014a).



Em cirurgias ortopédicas, permite que médicos tenham conhecimento prévio da situação do paciente a ser operado através de modelos anatômicos tridimensionais gerados a partir de imagens obtidas por tomografia computadorizada (DA SILVA OLIVEIRA BRITO *et al.*, 2016), o que permite uma visualização muito próxima de um osso real, gerando uma compreensão detalhada do caso tratado, reduzindo a chance de interpretações ambíguas ou distorcidas da realidade devido a uma análise apenas por imagem 2D (STAROSOLSKI *et al.*, 2014; WATSON, 2014).

## 1.1 HISTÓRICO

Em meados dos anos 1980, a aplicação de fabricação aditiva se mantinha reservada apenas ao setor da eletrônica, algo que passou a ser mudado com Charles Hull e a invenção da Estereolitografia, processo no qual há o endurecimento de polímeros líquidos com a aplicação de luz UV. Ele detalhou o procedimento e um equipamento que juntos faziam uma deposição de material camada por camada (HULL; 1984 apud SAVINI; SAVINI; 2015).

Mais próximo do final da mesma década, na Universidade do Texas, criou-se uma outra tecnologia de manufatura aditiva, conhecida por SLS, no qual partículas de pó são fundidas através de um raio laser (DECKARD; 1989 apud SAVINI; SAVINI; 2015).

E por fim, C.S. Crump desenvolveu a tecnologia FDM, onde há a deposição de um material polimérico fundido, camada a camada, assim como na estereolitografia, o qual foi finalmente patenteado em 1992, ano no qual fundou a Stratasys. Inc.

A partir dos anos 2000, iniciativas surgiram com o intuito de reduzir os custos de aquisição de uma impressora 3D, uma das quais, com o nome de Rep Rap, tinha como princípio uma impressora que produzisse os próprios componentes com base no FDM (JACOBSON; 2007 apud SAVINI; SAVINI, 2015).

Desde então, a indústria desenvolve continuamente tal tecnologia devido à grande gama de oportunidades que a mesma fornece, a ponto de ser reconhecida como um marco da atual revolução industrial (BOGUE, 2013).

O contínuo avanço da AM acabou por atingir, devido aos baixos custos de obtenção de um equipamento de AM, em relação a outras máquinas fabris, grupos

que a utilizarão em âmbito pessoal (BOGUE, 2013) ou setores mais restritos do mercado (BERMAN, 2012).

Por tais motivos, áreas de conhecimento externas ao ambiente industrial acabaram por se interessar nas possibilidades permitidas pela AM, tal qual a área biomédica (STAROSOLSKI *et al.*, 2014). Em alguns aspectos dessa, a impressão 3D vem para auxiliar diretamente no rompimento de limites complexos a um custo inferior ao comum (STANSBURY; IDACAVAGE, 2016), tanto que na atualmente é totalmente possível ouvir falar em próteses dedicadas que foram impressas (NICKELS, 2012)

Além disso, tais liberdades permitem atuações mais ambiciosas, como na expansão na área de engenharia de tecidos humanos (STANSBURY; IDACAVAGE, 2016), e também na produção de órgãos, sejam modelos ou reais (YAN *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2018).

## 1.2 A TECNOLOGIA DE IMPRESSÃO 3D

A impressão 3D difere principalmente dos outros métodos de fabricação por focar na adição, e não na remoção, de material para construir o objeto desejado, abarcando bem situações em que se exige elevada complexidade e customização, adicionado a um baixo custo, características contraditórias mas comumente desejadas, algo muito difícil de se obter em outros processos fabris (BERMAN, 2012; PEREIRA; KENNEDY; POTGIETER, 2019).

Na Figura 1, tem-se diagramado as variantes da tecnologia AM e o princípio básico de cada um dos processos encontra-se na Tabela 1 (TOFAIL *et al.*, 2018).

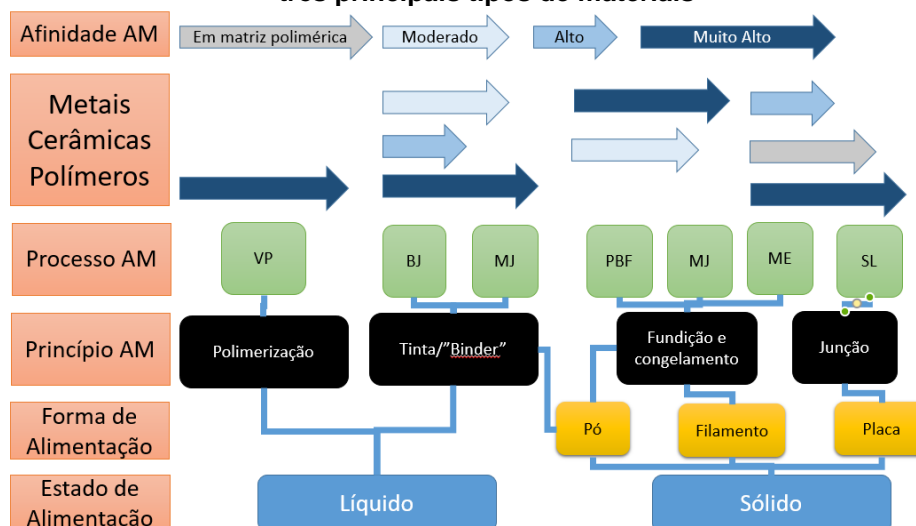
<b>Tabela 1 - Categorias ASME de processos AM e discretização do respectivo princípio básico</b>	
<b>Categoria ASME</b>	<b>Princípio Básico</b>
<i>Binder Jetting</i> (Capeamento por jato)	Jato de líquido colante é impresso em finas camadas de pó sobrepostas
<i>Direct Energy Deposition</i> (Deposição por Energia Direta)	Energia térmica focada funde o material durante a deposição

Continua

<b>Categoria ASME</b>	<b>Princípio Básico</b>
<i>Material Extrusion</i> (Extrusão de Material)	O material é empurrado seletivamente através de um bocal ou orifício
<i>Jetting Material Deposition</i> (Material Depositado por Jato)	Partículas do material de fabricação são depositadas
<i>Powder Bed Fusion</i> (Fusão Base de Pó)	Energia térmica é focada em uma pequena região da base de pó do material de fabricação
<i>Sheet Lamination</i> (Laminação de chapa/placa/folha)	Placas/lâminas do material são juntadas
<i>Vat Photopolymeration</i> (Fotopolimerização em Cuba/ Caixa)	Polímero líquido em uma cuba é curada por luz

Fonte - Adaptado do artigo original (TOFAIL et al., 2018)

Figura 1 - Diagrama esquemático quanto a relação de afinidade da manufatura aditiva com os três principais tipos de materiais

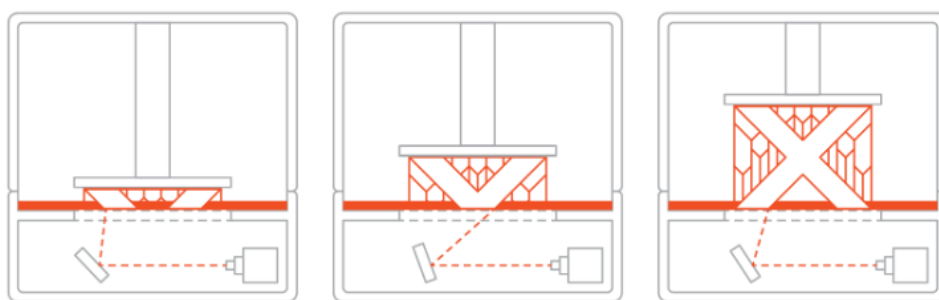


Fonte- Figura adaptada do artigo original(TOFAIL et al., 2018)

Das tecnologias mais utilizadas, tem-se quatro, o FDM (Modelagem por deposição fundida) que se encaixa na categoria de processo ME, a SLA (Estereolitografia) dentro da categoria de VP, o SLS (Sinterização por Laser



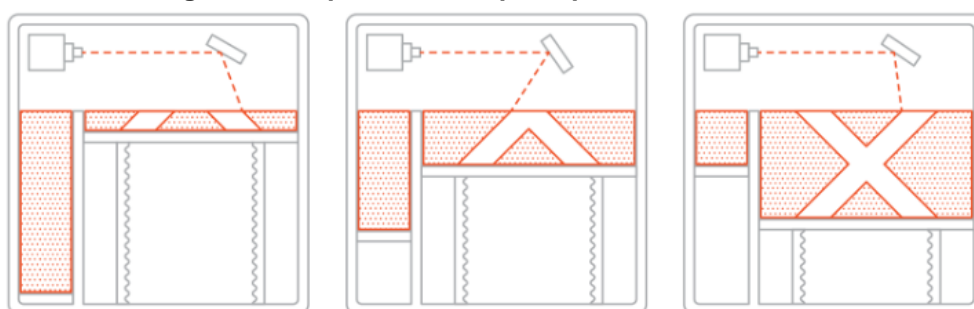
**Figura 3 - Esquemático do princípio do SLA**



Fonte - Imagem do site 3D HUBS (VAROTSIS, [201- a])

O SLS tem um processo similar ao SLA, porém utiliza-se de material particulado e de laser emissores de alta energia, o que torna o processo mais caro que o anterior. Porém, as etapas de execução são similares (GRIFFREY, 2014), o que pode ser visualizado na figura 4.

**Figura 4 - Esquemático do princípio do SLS**



Fonte- Imagem do site 3D HUBS (VAROTSIS, [201- b])

Por fim, o LOM utiliza-se de folhas finas de papel ou plástico, as quais são cortadas em dimensões e geometrias pré-definidas para então serem coladas umas nas outras através de um material adesivo. Após a primeira camada ter sido gerada, repete-se o processo (GRIFFREY, 2014).

### 1.3 OBJETIVO

Com base nas imagens fornecidas pelo Hospital Municipal e Maternidade de São José dos Pinhais, serão impressos os modelos ósseos do fêmur direito e esquerdo de um paciente do Dr. Celso Junio Aguiar Mendonça, que sofreu uma fratura no fêmur esquerdo.

Além disso, será realizada pelo Celso J. A. Mendonça, uma simulação cirúrgica no osso fraturado, no modelo impresso e no virtual, comparando por fim o resultado com os modelos do osso intacto, respectivamente. A partir disso, será feita uma análise dos benefícios e desvantagens de se realizar um pré-planejamento cirúrgico em modelos 3D, para casos de fraturas.

### 1.3.1 *Objetivo Específico*

O principal objetivo do presente estudo é avaliar os benefícios gerados no planejamento cirúrgico, do caso do paciente de Celso J. A. Mendonça, devido a aplicação da tecnologia de impressão 3D.

Dentro das etapas necessárias para a realização da manufatura do modelo, a equipe a executar este trabalho atentou-se às etapas de segmentação de imagens 3D, modelagem do objeto 3D e análise pós simulação cirúrgica no modelo virtual do fêmur esquerdo e planejamento prévio de cirurgia realizada no modelo físico do fêmur esquerdo.

Por fim, será realizada a correção angular e torcional da base do fêmur esquerdo via manipulação virtual e marcação do ponto de incisão cirúrgica no modelo físico do mesmo fêmur.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

Com a crescente disseminação da tecnologia 3D e sua variada gama de possibilidades, dominar conhecimentos mais profundos nesta área é de grande valia para contribuir não apenas em âmbito pessoal, mas para uma contribuição social futura, tal qual supracitada.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realizar o trabalho proposto, serão usadas como ferramentas os seguintes itens:

- Imagens adquiridas por tomografia;
- *Invesalious* (Software para segmentação de imagens de tomografia)
- *Meshmixer* (Software de modelagem 3D para impressão 3D);
- *Slic3r*;
- *Simplify3D*
- Polímero PLA;
- Impressora 3D.

### 2.1 MATERIAIS

#### 2.1.1 *Revisão Teórica*

Para a base teórica deste trabalho foi feita uma revisão de documentos da literatura inglesa, em maio de 2019 nas bases de dados *ScienceDirect*, *IEEE*, *PubMed* e *Google Scholar*, utilizando como palavras chaves os seguintes termos: *3D printing*, *Additive Manufacturing*, *FDM*, *Computed Tomography*, *History*, *Review*.

O primeiro critério de exclusão dos artigos foi por parte do título e *Abstract*, o que resultou em 111 artigos. Em uma segunda avaliação para exclusão, agora baseada no conteúdo da seção Conclusão dos artigos, finalizou-se com 70.

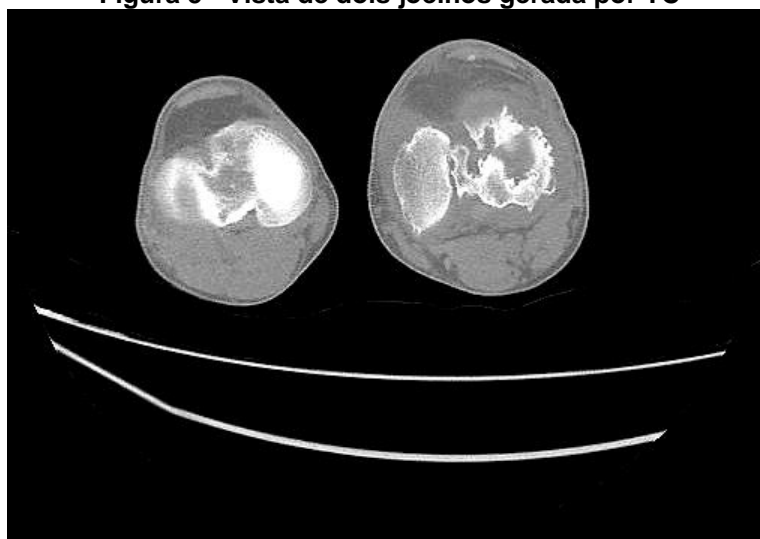
Quanto a temporalidade, em grande maioria focou-se em artigos dos 2 anos, com exceções quanto aos últimos 10 e alguns poucos anterior a 2008.

Por fim, trabalhou-se com 45 artigos, dentro desses 14 sobre AM e 31 sobre AM e biomedicina.

### 2.1.2 Imagens Adquiridas por CT

As imagens que serão convertidas em um objeto virtual 3D são adquiridas a partir da tomografia computadorizada. O formato DICOM é o padrão utilizado no mundo todo relacionado a informações de imagens médicas (DICOM, 2019). Na Figura 5, tem-se uma visão de dois joelhos em uma imagem gerada por TC.

**Figura 5 - Vista de dois joelhos gerada por TC**



**Fonte – Hospital Municipal e Maternidade de São José dos Pinhais(2019)**

Para o presente trabalho, utilizou-se um conjunto de 1465 imagens geradas pelo CT similares à mostrada anteriormente

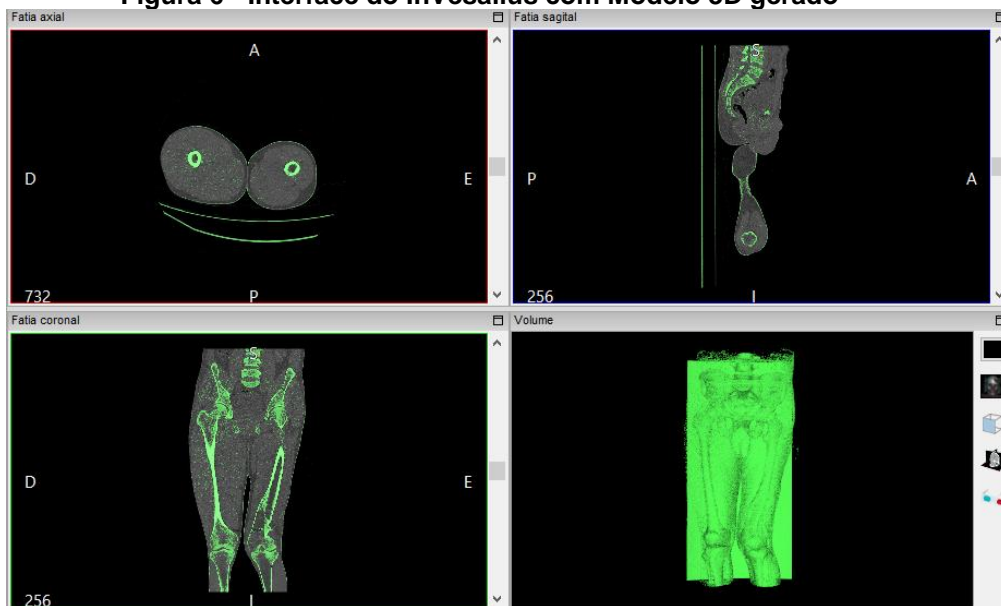
### 2.1.3 *Invesalius*

O *Invesalius* é um *software* voltado para a área médica, o qual possibilita, a partir da importação de imagens no formato DICOM, a segmentação das mesmas para gerar figuras 3D. Tendo sido segmentadas as imagens, forma-se a imagem 3D que será base para a posterior modelagem virtual do objeto desejado.

Na Figura 6 pode-se ver a interface do *Invesalius*, com as imagens em CT e o modelo 3D gerado (Canto inferior direito)



**Figura 6 - Interface do InVesalius com Modelo 3D gerado**

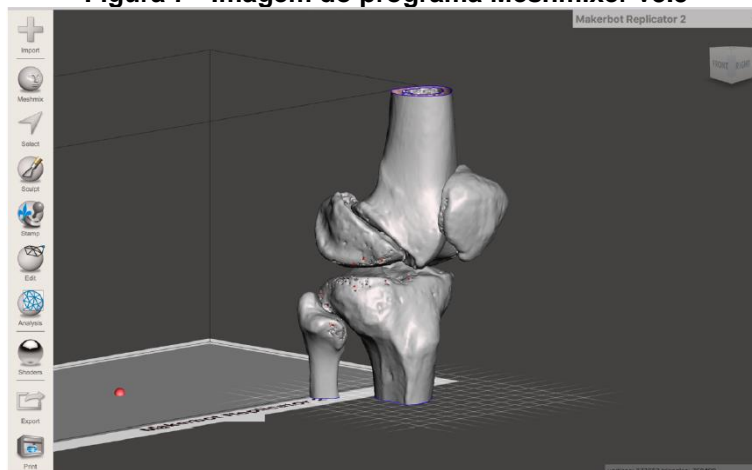


Fonte – Autoria Própria(2019)

#### 2.1.4 MeshMixer

*Software* de renderização 3D que faz a manipulação do modelo virtual 3D, com o objetivo de buscar deixá-lo com a superfície o mais próximo da real.

**Figura 7 - Imagem do programa Meshmixer v3.5**



Fonte – MENDONÇA (2018)

#### 2.1.5 Slic3r

*Software* que gera, com base em um arquivo de modelo 3D, um código CNC que será utilizado pelo equipamento de AM.

### 2.1.6 Simplify3D

*Software* integrado a impressora 3D, o qual define os parâmetros de impressão e faz a comunicação do código CNC com a impressora.

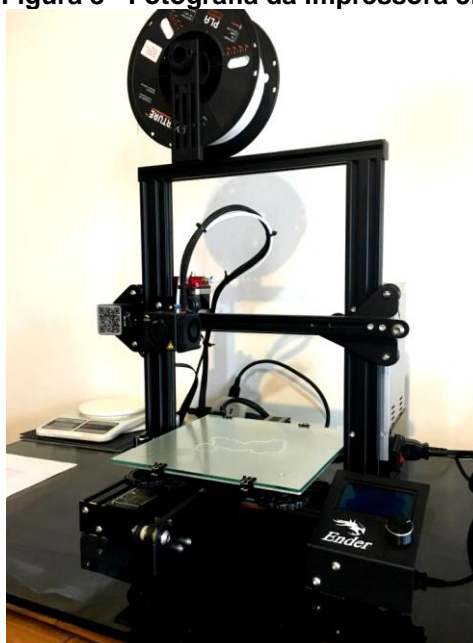
### 2.1.7 Impressora 3D

Para a fabricação futura de um objeto 3D, será utilizado um maquinário de AM, o qual possui as seguintes características:

- Dimensões: 140mm x 180 mm x 170mm (largura, comprimento e profundidade);
- Tecnologia: FDM
- Fabricante: Ender

Tal equipamento é pertencente ao Dr. Celso Mendonça, o qual ficou responsável pela impressão em si. Na Figura 8 tem-se a imagem da máquina.

**Figura 8 - Fotografia da impressora 3D**



**Fonte - Autoria Própria**

Os parâmetros de impressão adotados foram definidos em acordo com Celso J. A. Mendonça. Esses estão discretizados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de impressão

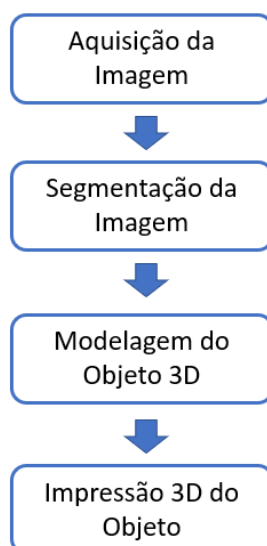
Parâmetro	Valor
Diâmetro do Bico	0,4 mm
Altura de Camada	0,15mm
Preenchimento Interno	25% (Do total)
Temperatura de extrusão	200 °C
Velocidade padrão de impressão	2000 mm/min
Quantidade de filamento usado por fêmur	9139,1mm
Resolução de impressão	0,15mm
Tolerância de impressão	0,075mm

Fonte – Autoria Própria

## 2.2 MÉTODOS

O presente estudo segue a metodologia apresentada na Figura 9, a qual representa um modelo esquemático dos passos necessários para o processo de impressão 3D na área médica.

Figura 9 - Metodologia esquemática dos passos para impressão 3D



Fonte - Autoria Própria

### 2.2.1 Aquisição da Imagem

O passo inicial para a impressão de objetos tridimensionais é a aquisição da imagem. Considera-se esse o passo mais importante, visto que a qualidade dos modelos impressos depende diretamente da qualidade dos dados adquiridos (resolução da imagem) (SHUI et al., 2016). É importante ressaltar que imagens de baixa resolução resultarão em modelos 3D inadequados e com distorções (MARRO; BANDUKWALA; MAK, 2016).

Dentre os tipos de exames que consolidam a aquisição das imagens, a Tomografia Computadorizada (TC) é amplamente utilizada, pois segue alguns parâmetros importantes referente a aquisição de imagens de TC. São eles: Tipo de aquisição, Potencial do Tubo, Corrente do Tubo, *Pitch*, Tempo de aquisição, Velocidade de rotação, Colimação, Filtro de absorção, Resolução da imagem, Espessura de corte, Distância em cada corte, Planos de reconstrução e Artefatos (VAN EIJNATTEN et al., 2018)

A literatura também sugere um protocolo de parâmetros para a aquisição de imagens de TC. Os estudos apontam que a espessura ideal dos cortes (fatias) das imagens influencia a qualidade da reconstrução óssea (MARRO; BANDUKWALA; MAK, 2016). Os cortes devem ter espessura de 0,5 a 2 mm, a depender da região anatômica. Para modelos da região facial, os cortes devem ter de 0,5 a 1 mm de espessura enquanto para ossos longos os cortes podem ter até 2 mm de espessura (RANKIN et al., 2018).

A maioria dos aparelhos de TC se limitam a uma espessura de fatia de 0,625 mm. Apesar disso, as impressoras 3D especificam uma resolução de menos que 0,1 mm para suas máquinas (ELEY, 2017). É importante que se estabeleça uma região de interesse para a segmentação, ou seja, reduzir o trabalho de extração de partes que não agregam valor para a impressão (SHUI et al., 2016).

As máquinas de extração de imagens de TC trabalham de acordo com o formato denominado Comunicação de Imagens Digitais em Medicina (*DICOM – Data Imaging and Communication in Medicine*). Este formato objetiva padronizar a formatação das imagens diagnosticadas, como a Tomografia Computadorizada. O padrão DICOM funciona através de códigos que podem ser trocados entre

equipamentos de diagnóstico médico, os quais interagem entre computadores e equipamentos diferentes (SHUI et al., 2016).

Após a extração das imagens, é de fundamental importância verificar se as imagens possuem ruído aleatório. Se houver, é necessário fazer a limpeza dos ruídos para se evitar artefatos nos modelos. Um dos métodos a ser empregado é o de suavização espacial, o qual consiste em um algoritmo de computador que reduz o ruído sem perder informações anatômicas (BAGARIA; CHAUDHARY, 2017).

Para a o presente trabalho, utilizou-se imagens fornecidas pelo Hospital Municipal e Maternidade de São José dos Pinhais de um caso de fratura no fêmur esquerdo.

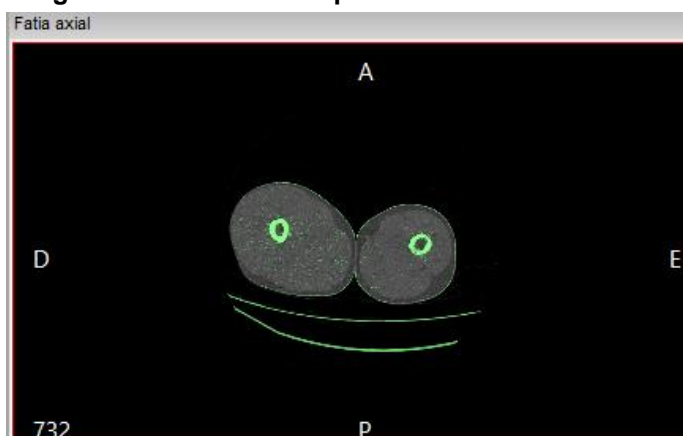
### 2.2.2 Segmentação da Imagem

A segmentação da imagem é a fase mais crítica e importante no processo de impressão 3D, pois é necessário que a imagem tenha alta resolução para que não haja impressão inadequada dos objetos (VAN EIJNATTEN *et al.*, 2018).

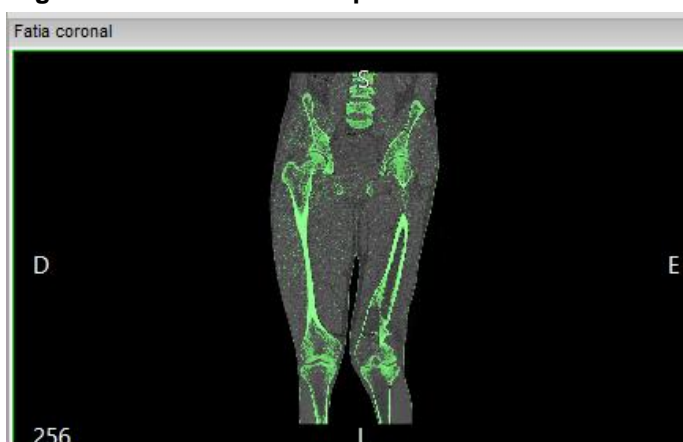
A importância da segmentação está na delimitação da área de interesse do estudo, podendo assim, determinar qual região de interesse será estudado. Para a determinação da região de interesse, deve-se levar em considerações alguns aspectos, tais como: área anatômica e tipos de tecidos a ser estudado. É de suma importância que se estabeleça um limiar de atenuação do tecido escolhido. Tal limiar é definido de acordo com a escala de *Hounsfield* (HU), a qual transforma a medida original do coeficiente de atenuação linear para uma escala adimensional, em imagens de exames de RX e TC. Para estudos similares ao que contempla este trabalho, a escala de HU é comumente utilizada entre -1000 HU e 3000 HU (CHEN; XU; WANG; LI; *et al.*, 2016).

Na segmentação feita no *Invesalius*, utilizou-se uma escala HU entre 226 e 3000. Tal escala é sugerida pelo próprio *software* no que ele estabelece como sendo a faixa que abrange, genericamente, o tecido ósseo.

Na Figura 10 e Figura 11, pode-se ver nos cortes axial (corte que divide o corpo em cima e baixo) e coronal (divide o corpo em frente e trás) regiões na cor verde. Essas regiões são aquelas abarcadas pela faixa de escala HU selecionada e que envolvem também os ossos.

**Figura 10 - Corte Axial apresentado no *Invesalius***

Fonte - Autoria Própria

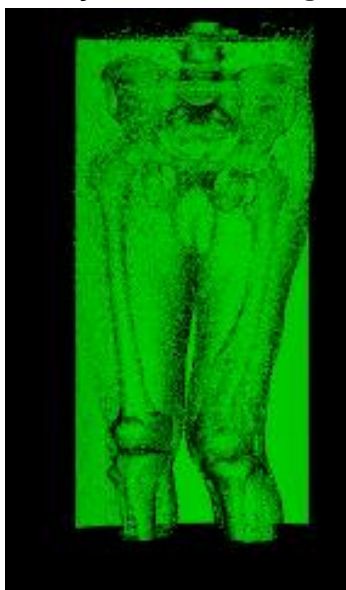
**Figura 11 - Corte Coronal apresentado no *Invesalius***

Fonte - Autoria Própria

Nota-se a presença de pontos dispersos e riscos que não são referentes aos ossos. Esses ruídos são posteriormente removidos na etapa de *Cleaning*.

Após a segmentação, a imagem 2D é convertida em 3D para a possibilidade de edição do objeto tridimensional. Isto é feito através da superfície extraída dos dados volumétricos e convertidos em uma malha formada por várias facetas triangulares (MARRO; BANDUKWALA; MAK, 2016). Desta forma, com a reconstrução tridimensional das imagens, é possível a realização de ajustes antes da edição final da geometria a ser impressa. Estes dados são convertidos no formato STL. O resultado de tal imagem em 3D pode ser visto na Figura 12.

**Figura 12 - Segmentação em 3D da imagem no *Invesalio***



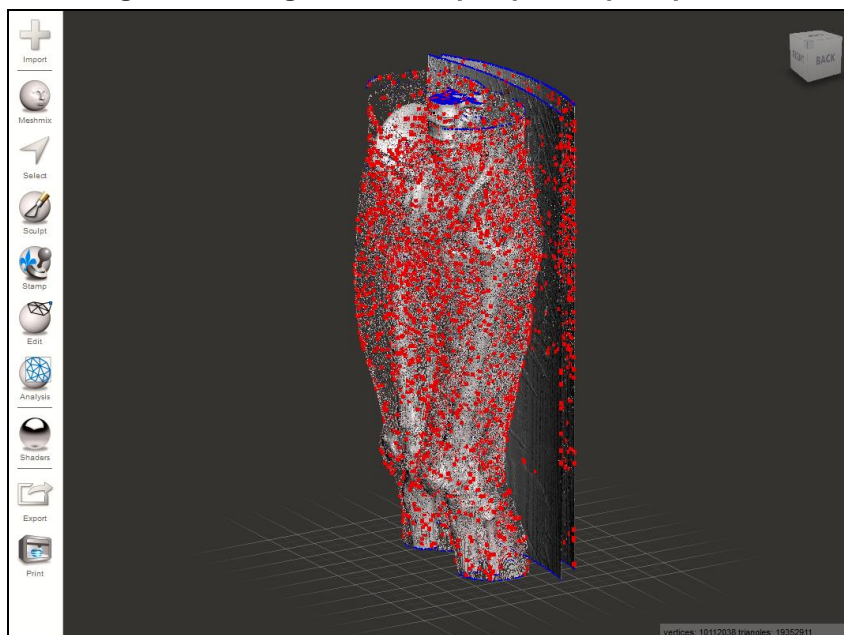
**Fonte - Autoria Própria**

Após a segmentação, o objeto foi modelado e renderizado através do programa *Meshmixer*. Como já citado anteriormente, um dos objetivos da construção do modelo 3D é que a impressão fique o mais similar possível do objeto real. Desta forma, este programa permite com que ajuste e correções sejam feitos no modelo a fim de reduzir defeitos na superfície e no interior das imagens.

Durante o processo de renderização, 3 passos devem ser levados à risca para que o processo seja realizado da melhor forma possível: Geração da Malha, *Cleaning* e *Smoothing*.

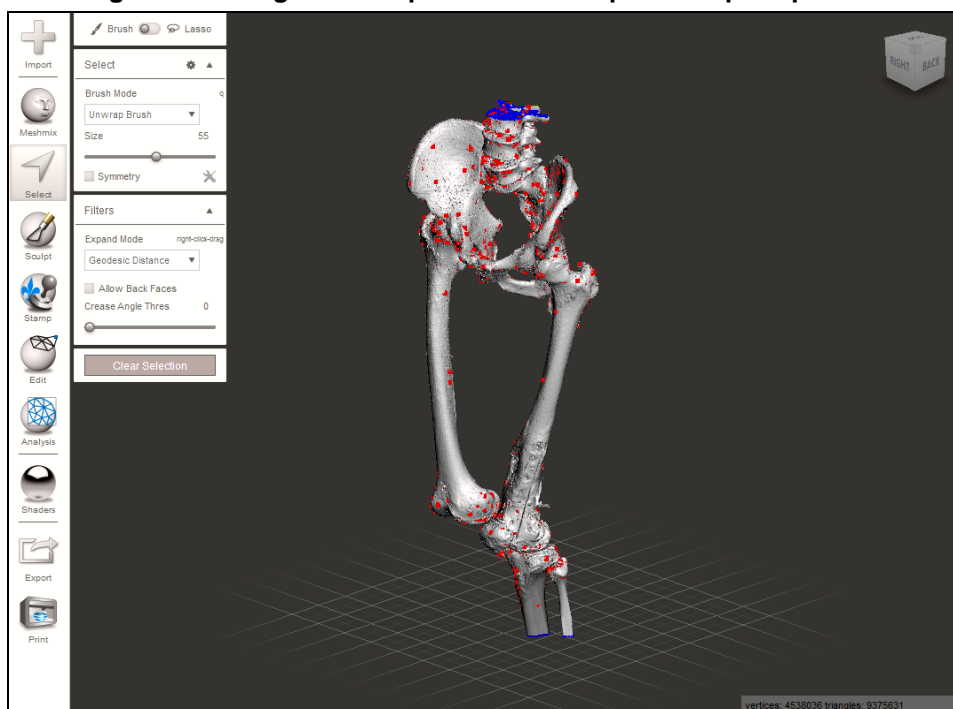
Porém, devido às características da imagem segmentada, foi necessário realizar inicialmente um processo de limpeza e remoção grosseira no arquivo 3D. Essa limpeza visa remover todos os artefatos que não serão úteis para a impressão, como resíduos de outros tecidos ou outros ossos. No presente caso, tudo, exceto os dois fêmures, foi removido do arquivo 3D. Nas Figuras 13 a 15, vê-se o processo para a realização dessa limpeza.

Figura 13 - Imagem 3D sem qualquer limpeza prévia



Fonte - Autoria Própria

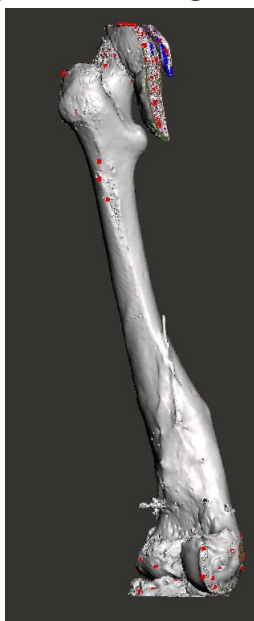
Figura 14 - Imagem 3D depois de uma etapa de limpeza prévia



Fonte - Autoria Própria



**Figura 15 - Imagem 3D depois de uma segunda etapa de limpeza prévia**



**Fonte - Autoria Própria**

Também se fez uma redução do número de triângulos que vão gerar a malha nesta parte inicial. Isso é realizado com o objetivo de tornar o arquivo de edição mais leve, tornando mais rápido o processamento no *Meshmixer*. Em termos numéricos, isso significa que, de 9.375.631 triângulos que compunham a malha em dado momento, reduziu-se para, 4.687.825, o que torna todo o processamento mais rápido. A redução de 50% foi escolhida livremente.

Feita a limpeza inicial, o modelo fica como exemplificado na Figura 16.

**Figura 16 - Imagem 3D depois de toda limpeza prévia**



**Fonte - Autoria Própria**

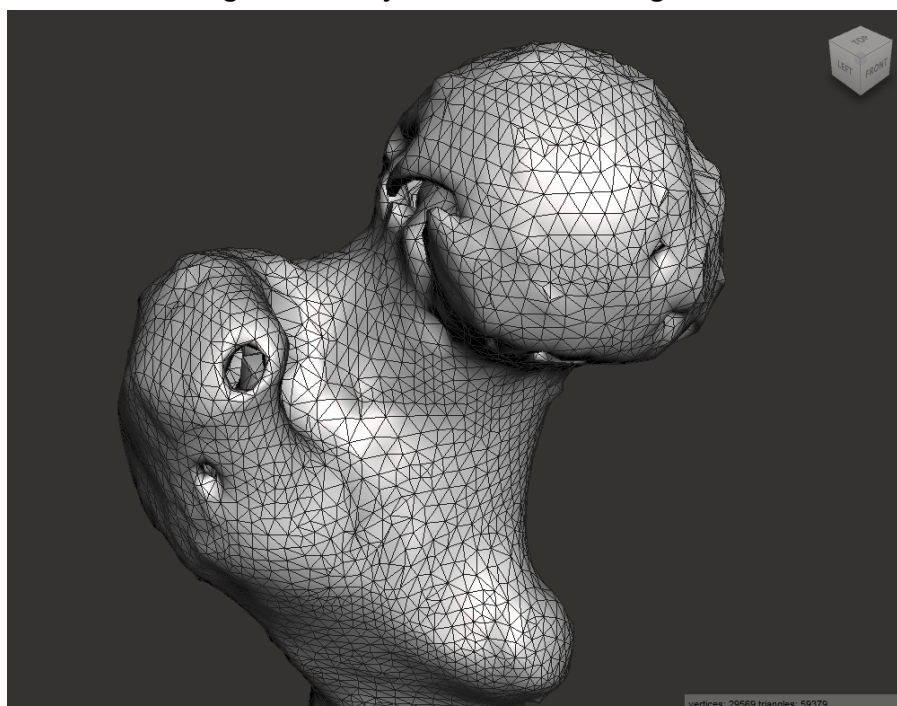
Em seguida, passou-se para as 3 etapas citadas anteriormente.

### 2.2.2.1 Geração da malha

A definição de uma malha consistente é fundamental para localizar os locais onde há falhas e assim poder corrigi-las, tornando assim, a superfície do objeto o mais regular possível (BAGARIA; CHAUDHARY, 2017). Tal processo é realizado automaticamente por uma das ferramentas do *Meshmixer*.

Na Figura 17, pode-se ver o resultado dessa geração.

**Figura 17 – Objeto 3D com a malha gerada**



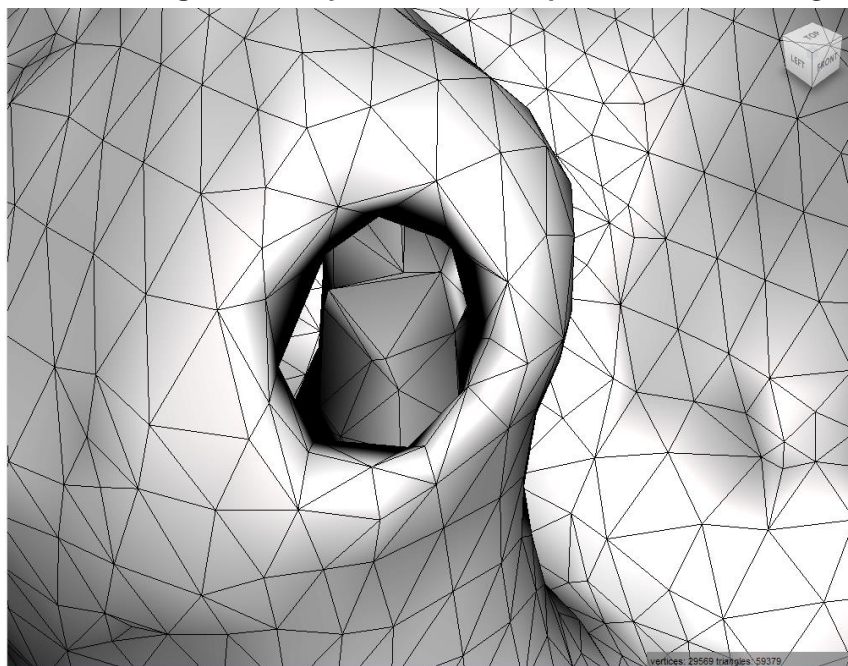
**Fonte - Autoria Própria**

### 2.2.2.2 Cleaning

As deformações e irregularidades na superfície das imagens na maioria das vezes são prejudiciais, pois tornam o modelo menos preciso. Este fato, na maioria das vezes ocorre, devido a materiais metálicos implantados no corpo do paciente. Para inibir esse efeito, geralmente se usa um algoritmo para reduzir o ruído sem que haja perda das informações anatômicas (BAGARIA; CHAUDHARY, 2017).

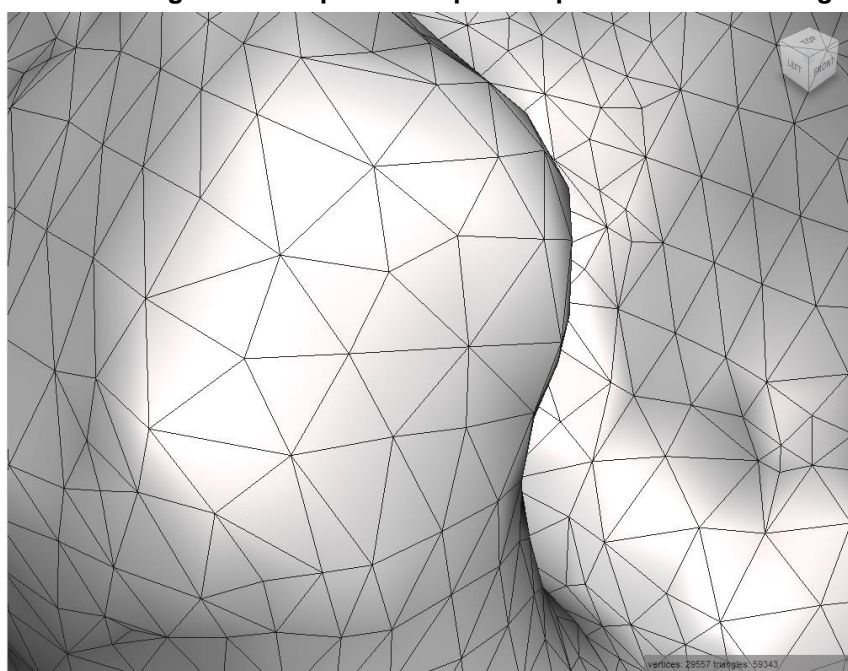
Nas Figuras 18 e 19, tem-se, respectivamente, um exemplo de uma deformidade antes e depois do processo de *Cleaning*.

**Figura 18 - Superfície antes do processo de *Cleaning***



**Fonte - Autoria Própria**

**Figura 19 - Superfície depois do processo de *Cleaning***



**Fonte - Autoria Própria**

### 2.2.2.3 Smoothing

Regular e alisar a superfície da imagem são importantes para melhorar a qualidade e a definição da imagem tridimensional a ser impressa (BAGARIA; CHAUDHARY, 2017).

Nas Figuras 20 e 21 vê-se o antes e depois do processo de *Smoothing*.

**Figura 20 - Objeto sem *Smoothing***



**Fonte - Autoria Própria**

**Figura 21 - Objeto com *Smoothing***



**Fonte - Autoria Própria**

### 2.2.3 Modelagem do Objeto 3D

Na atual tecnologia de impressão 3D, várias tecnologias CAM podem ser empregadas na fabricação de modelos tridimensionais entre elas: FDM, SLA, SLS, SLM, EBM e Inkjet (HOANG *et al.*, 2016; MARRO; BANDUKWALA; MAK, 2016; MOK *et al.*, 2016)(CHEN; XU; WANG; LI; *et al.*, 2016).

A tecnologia escolhida para este trabalho, devido a máquina disponível para uso, será a FDM. A impressão 3D funciona da seguinte forma: camadas de um polímero são depositadas através de um bico extrusor. Após camada por camada ser depositada, estas endurecem e formam camadas sólidas, com a ajuda de objetos tridimensionais com alta definição geométrica. O cabeçote do bico extrusor é alimentado por um filamento de material geralmente termoplástico. O material então aquece o filamento e o expulsa, formando as sucessivas camadas (BAGARIA; BHANSALI; PAWAR, 2018). A tecnologia FDM tem uma baixa velocidade de impressão e uma resolução da impressão não tão boa quanto outras técnicas como a SLS, por exemplo (MALIK *et al.*, 2015; WONG *et al.*, 2017).

Outro ponto relevante a se considerar sobre a tecnologia FDM é que a quantidade de retração na qual os plásticos são submetidos é de cerca de 0,5%. Essa imperfeição pode ser regularizada pelo dimensionamento preventivo do modelo (ELEY, 2017).

As principais vantagens do método FDM para impressão de materiais médicos são a alta porosidade, principalmente devido ao padrão de deposição e boa resistência mecânica. Já como ponto negativo da tecnologia FDM pode-se considerar a limitação para materiais termoplásticos com boas propriedades de viscosidade de fusão (CHIA; WU, 2015). Os materiais mais utilizados para o método FDM são: ABS, PLA, Poliamida, Policarbonato, Polipropileno, Poliéster entre outros (HOANG *et al.*, 2016).

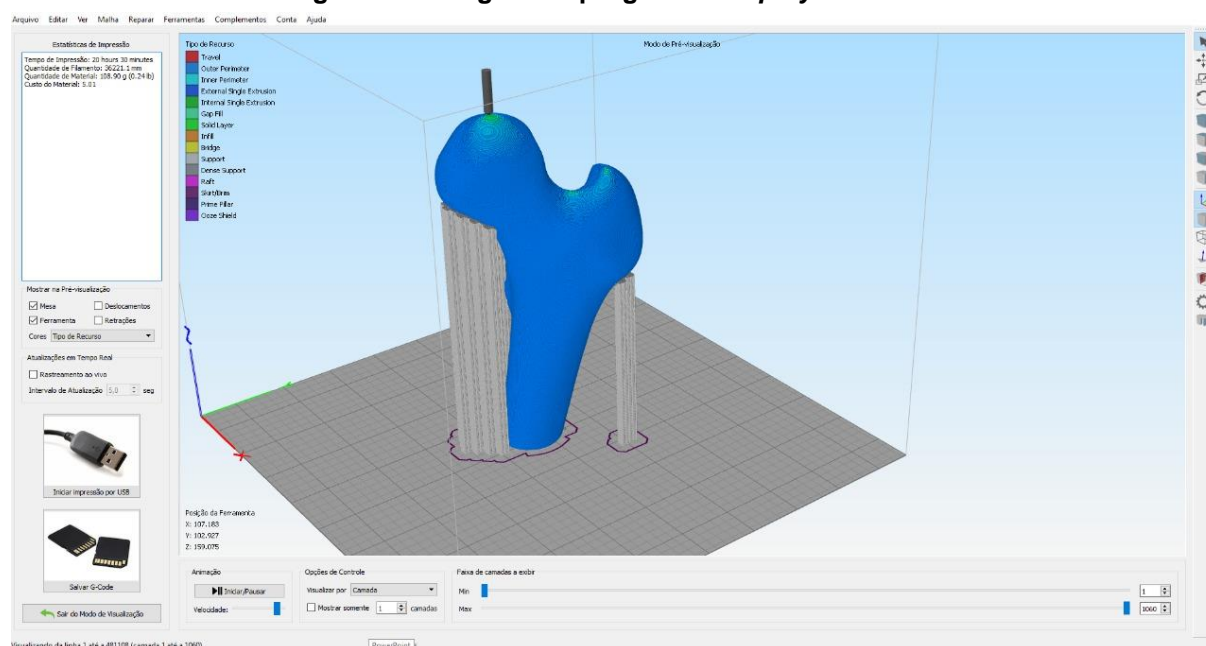
Após a criação do arquivo do formato STL, o programa *Simplify3D* é uma das opções para a geração do código *GCode* (código G). Esta linguagem numérica é utilizada na leitura dos programas CAM (*Computer Aided Manufacturing*) para a confecção dos objetos 3D. Outros programas que funcionam similarmente ao *Simplify3D* são: *Slic3r*, *Makerbot Desktop*, *Cura*, *Repetier-Host*.

O código G funciona como um comando universal que envia faixas de posição e de extrusão para impressoras 3D (RANKIN *et al.*, 2018).

### 2.2.4 Impressão 3D do Objeto

As informações obtidas através do *GCode* são exportadas para um ambiente CAM, para a realização da manufatura aditiva do modelo anatômico. Nesta parte do processo, o *Simplify3D* será utilizado para tal função. Alguns parâmetros são de suma importância para que a impressão seja feita da melhor maneira possível, tais como: Material termoplástico utilizado, densidade do polímero, diâmetro do filamento, temperatura de extrusão, velocidade de extrusão, velocidade de impressão, altura (espessura da camada), resolução (distância entre os pontos de extrusão), preenchimento da estrutura e suporte da peça.

**Figura 22 - Imagem do programa *Simplify3D* v4.1**



**Fonte – Autoria Própria (2019)**

O material escolhido para a manufatura aditiva deste presente trabalho será o polímero termoplástico Ácido Polilático (PLA), com filamentos de 1,75 mm de diâmetro, densidade 1,24 g/cm<sup>3</sup>, cor branca utilizando um equipamento de impressão pertencente ao Dr. Mendonça, o qual apresenta volume igual a 140 mm x 180 mm x 170 mm (largura, comprimento e profundidade), usando tecnologia de impressão 3D do tipo FDM.

Na Figura 23, vê-se uma parte do processo de impressão de um dos fêmures.

**Figura 23 - Foto do processo de impressão 3D**



**Fonte - Autoria Própria**

### 3 RESULTADOS

A impressão de cada um dos modelos teve em torno de 50 horas de duração, com um consumo total aproximado de 0,280 kg de PLA também para cada objeto impresso.

Nas Figuras 24 e 25, vê-se o resultado final do processo.

**Figura 24 - Modelo físico impresso do fêmur direito**



Fonte - Autorial Própria

**Figura 25 - Modelo físico impresso do fêmur esquerdo**



Fonte - Autorial Própria

As Figuras 26 a 28 mostra detalhes do resultado da impressão em pontos mais específicos, como as partes superior e inferior do fêmur.



**Figura 26 – Parte superior do fêmur em detalhe**



**Fonte - Autoria Própria**

**Figura 27 – Parte inferior do fêmur direito em detalhe**



**Fonte - Autoria Própria**

**Figura 28 – Parte inferior do fêmur esquerdo em detalhe**

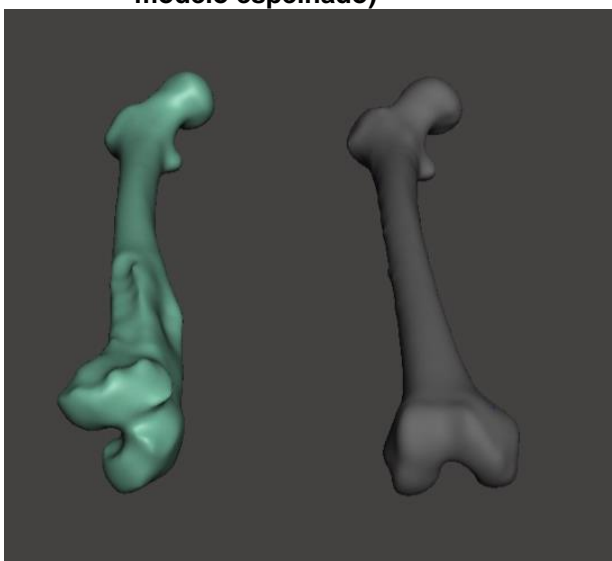


**Fonte - Autoria Própria**

Aproveitando-se dos modelos virtuais, fez-se uma análise nos mesmos onde se percebeu o quanto o fêmur esquerdo se encontra torcionado, em comparação com o direito. Para realizar tal comparação de forma mais adequada, utilizou-se o *Meshmixer*.

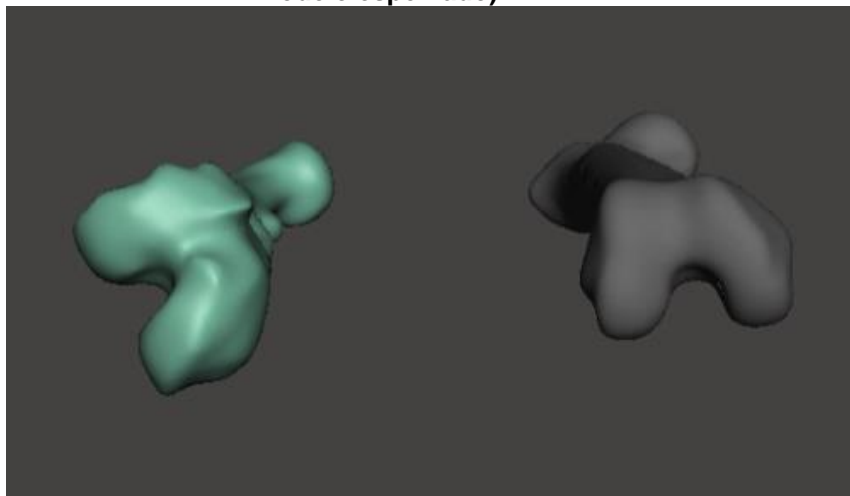
Nas Figuras 29 a 31 se pode enxergar a situação descrita acima.

**Figura 29 – Comparação 1 entre o fêmur direito (cinza) e o fêmur esquerdo (verde; modelo espelhado)**



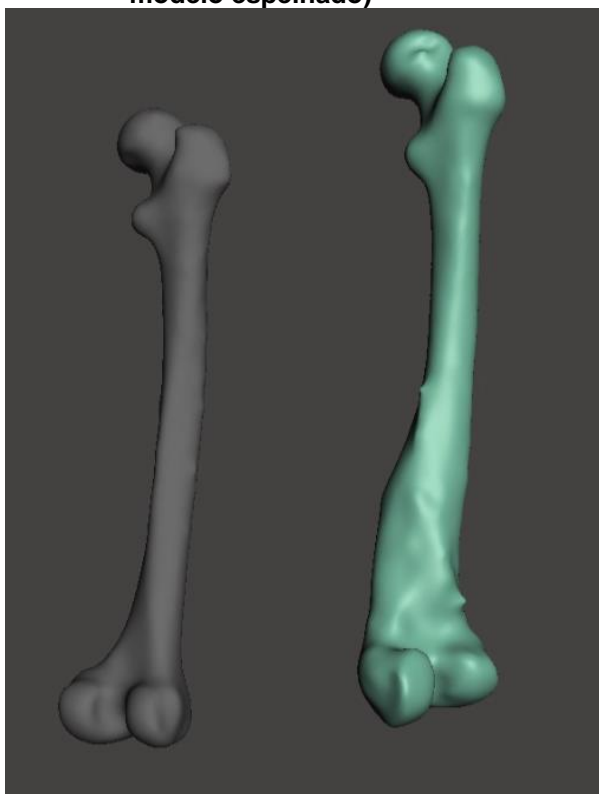
**Fonte - Autoria Própria**

**Figura 30 – Comparação 2 entre o fêmur direito (cinza) e o fêmur esquerdo (verde; modelo espelhado)**



**Fonte - Autoria Própria**

**Figura 31 - Comparação 3 entre o fêmur direito(cinza) e o fêmur esquerdo (verde; modelo espelhado)**



**Fonte - Autoria Própria**

Através de uma análise dos modelos físicos vê-se a mesma distorção, com uma riqueza de detalhes tão grande, e até maior, do que nos modelos virtuais. Isso é apresentado nas Figuras 32 a 34. Onde encontra-se indicado em vermelho, mostra as diferenças entre o fêmur direito (não afetado) e o esquerdo(afetado).

**Figura 32 – Comparação do fêmur direito (a direita) com fêmur esquerdo (a esquerda)**



**Fonte - Autoria Própria**

Na Figura 34, os fêmures foram posicionados no que seria a posição normal em relação ao corpo humano. A indicação em vermelho ressalta o ponto em que se diferencia o fêmur intacto do distorcido, situação que fica mais explícita na figura 35.

**Figura 33 – Fêmures em posição normal ao corpo humano para fins de comparação (vista frontal)**



**Fonte - Autoria Própria**

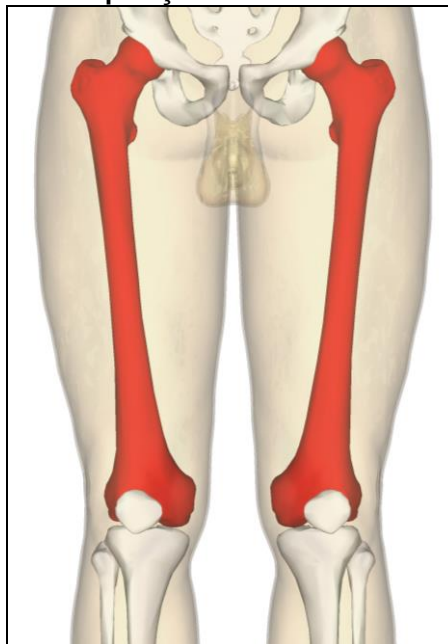
**Figura 34 - Fêmures em posição normal ao corpo humano para fins de comparação (vista inferior)**



Fonte - Autoria Própria

Para comparação, a Figura 35 mostra o posicionamento dos fêmures em uma situação comum e a Figura 36 o raio-X do caso estudado.

**Figura 35 – Ilustração da disposição dos fêmures no corpo humano**



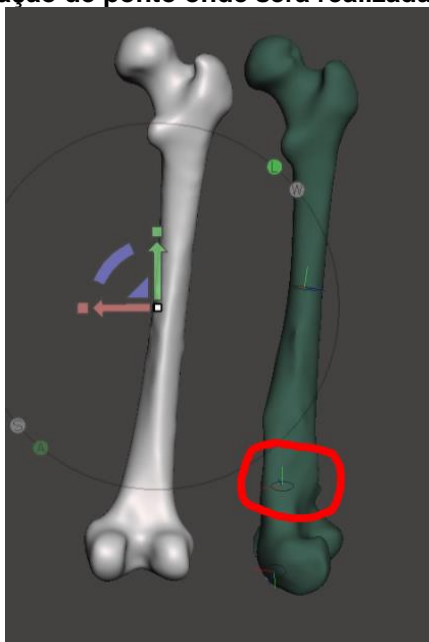
Fonte - Wikipedia (2019)

**Figura 36 – Raio-X do caso estudado**

**Fonte – Hospital Municipal e Maternidade de São José dos Pinhais (2019)**

Tendo sido realizada uma primeira avaliação visual, passou-se então à simulação virtual com o material gerado neste trabalho. Nela, o Dr. Mendonça selecionou o ponto onde comumente se faz o corte do osso para reposicionar a parte que irá se conectar com o osso da Tíbia (na região do corpo onde encontra-se o joelho). Tal ponto é o que se encontra dentro do círculo vermelho na Figura 37.

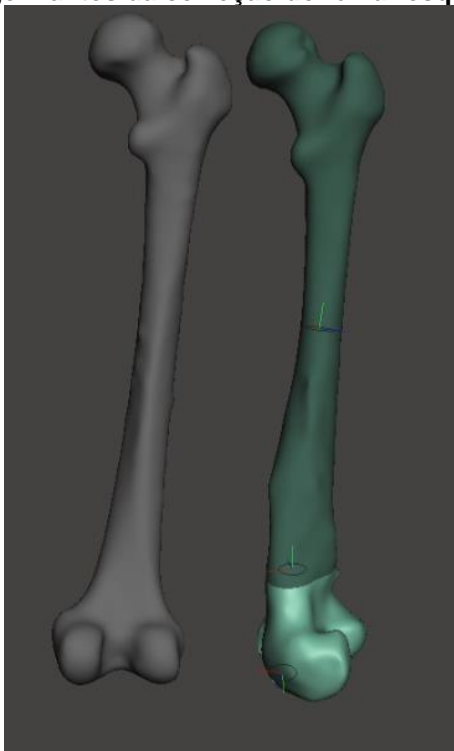
**Figura 37 – Marcação de ponto onde será realizada o corte cirúrgico.**



**Fonte - Autoria Própria**

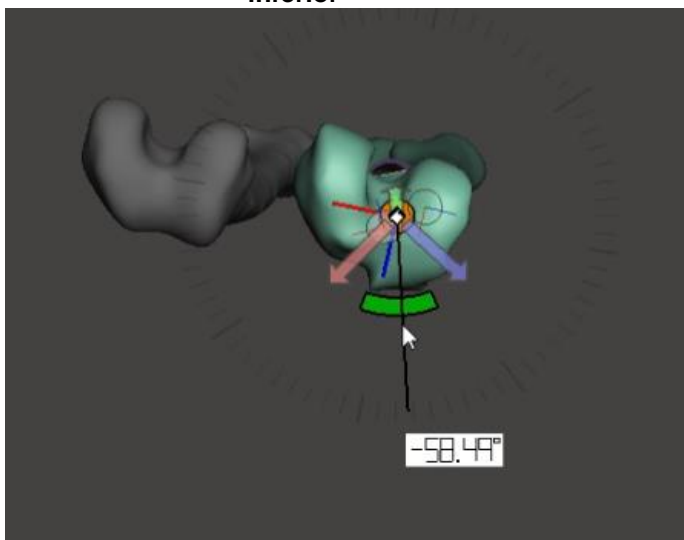
Então fez-se um corte no plano transversal do osso passando pelo ponto de corte e rotaciona-se a parte inferior (em verde claro), passos indicados nas Figuras 38 e 39.

**Figura 38 - Imagem antes da correção do fêmur esquerdo (em verde)**



**Fonte - Autoria Própria**

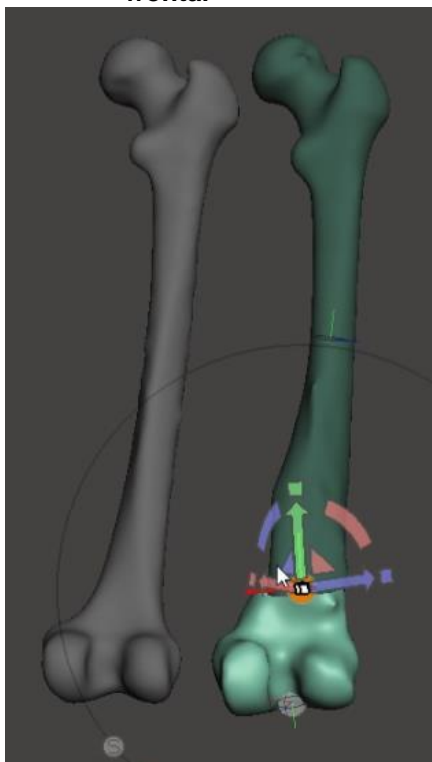
**Figura 39 - Imagem depois da correção do fêmur esquerdo (em verde), em uma vista inferior**



**Fonte - Autoria Própria**

Na Figura 40 vê-se o resultado dessa correção.

**Figura 40 - - Imagem depois da correção do fêmur esquerdo (em verde), em uma vista frontal**

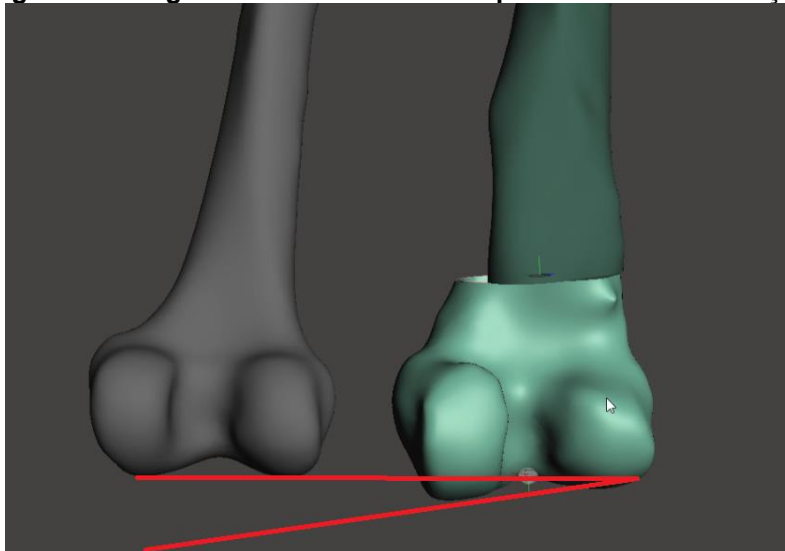


**Fonte - Autoria Própria**

Por fim, fez um pequeno ajuste de inclinação para que a base do fêmur atingisse o ângulo adequado para se encaixar com a Tíbia. A comparação do antes e depois da correção de inclinação encontra-se indicada pelas Figuras 41 e 42.

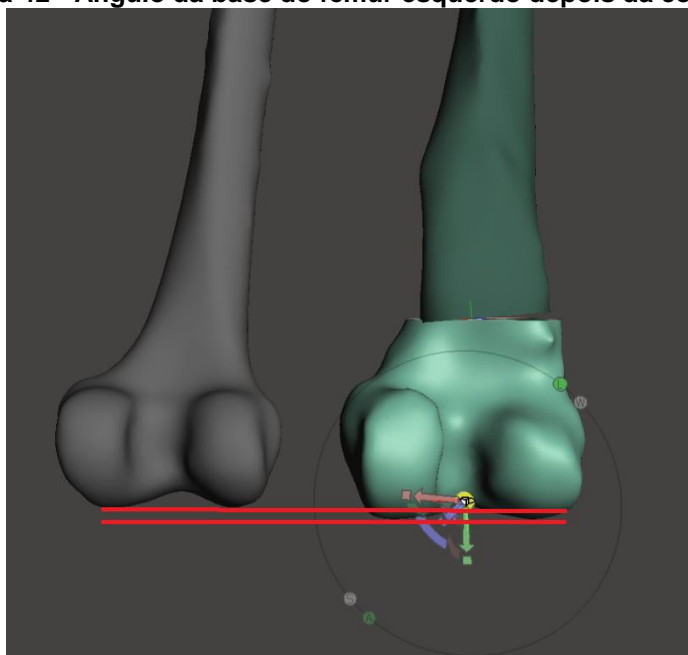


**Figura 41 - Ângulo da base do fêmur esquerdo antes da correção**



**Fonte - Autoria Própria**

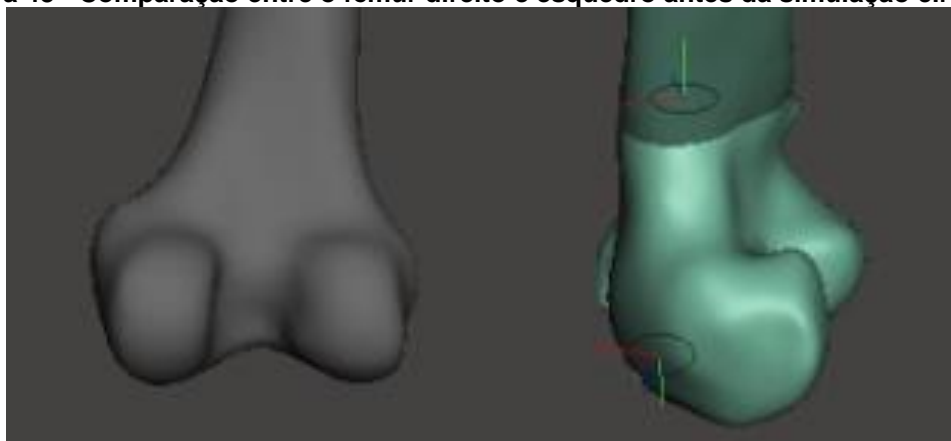
**Figura 42 - Ângulo da base do fêmur esquerdo depois da correção**



**Fonte - Autoria Própria**

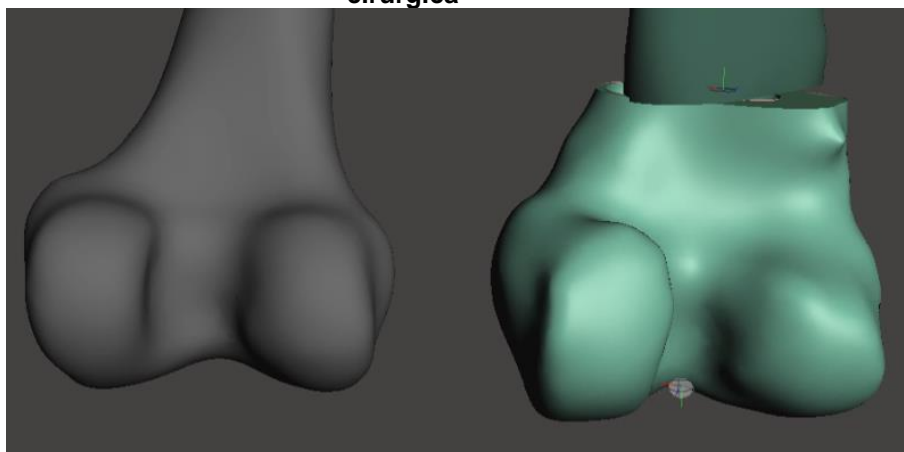
Nas Figuras 43 e 44 se pode ver o antes e o depois da cirurgia virtual.

**Figura 43 - Comparação entre o fêmur direito e esquerdo antes da simulação cirúrgica**



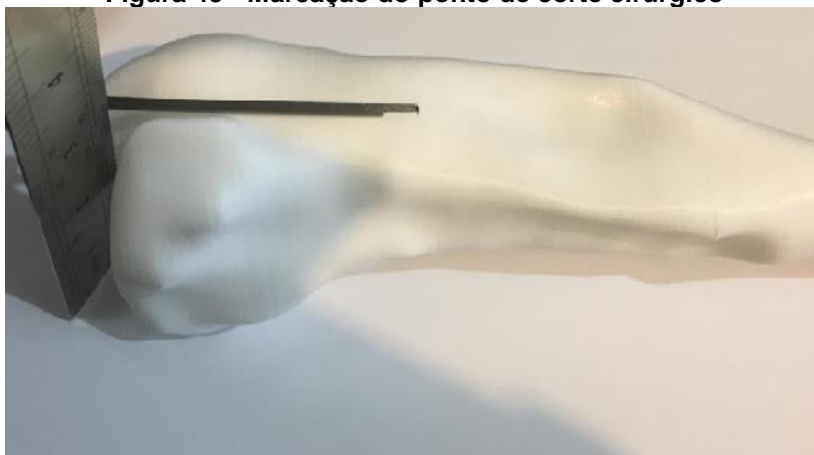
**Fonte - Autoria Própria**

**Figura 44 - Comparação entre o fêmur direito e esquerdo depois da simulação cirúrgica**



**Fonte - Autoria Própria**

Medindo-se a distância entre a base do fêmur e o ponto de corte no *Meshmixer*, definiu-se onde será feito o corte na cirurgia real. Com tal medida, marcou-se no modelo impresso onde virá a ser a incisão, como indicado nas figuras 45 e 46

**Figura 45 - Marcação do ponto de corte cirúrgico**

Fonte - Autoria Própria

**Figura 46 - Marca do ponto de corte cirúrgico**

Fonte - Autoria Própria

A partir desse ponto, seria realizada a simulação cirúrgica no modelo físico do fêmur afetado, a qual teve que ser adiada, pois os materiais a serem utilizados para fazer tal procedimento não se encontram ainda disponíveis. Com tal situação, essa etapa do projeto será realizada posteriormente em conjunto com uma continuação do presente trabalho.

## 4 DISCUSSÕES

### 4.1 MODELO ANATÔMICO 3D

A fabricação de modelos anatômicos através da manufatura aditiva é uma aplicação muito adequada deste tipo de tecnologia, tendo ampla aplicação em várias áreas da medicina ortopédica.

Um grande benefício da aplicação desta tecnologia encontra-se também na comunicação da equipe médica com paciente e com os familiares, pois alguns estudos demonstram que a utilização de modelos anatômicos para informar sobre o tipo de tratamento cirúrgico proposto promove um melhor entendimento da condição clínica do paciente, da programação cirúrgica, da reabilitação e maior adesão ao tratamento, contribuindo para melhora na relação médico-paciente (BIZZOTTO et al., 2016; TACK et al., 2016; WILCOX et al., 2017; ZHENG, WENHAO et al., 2018).

### 4.2 PLANEJAMENTO PRÉ-OPERATÓRIO

A análise pré-operatória pode ser considerada uma das aplicações mais úteis da tecnologia de impressão 3D. Procedimentos cirúrgicos em áreas de anatomia complexa com alto risco de lesão de estruturas nobres são beneficiadas com a prototipagem rápida dos modelos 3D (RANKIN et al., 2018).

Vários programas CAD permitem atualmente a realização de planejamento cirúrgico virtual (Virtual Surgical Planning – VSP) com um entendimento melhor da geometria espacial, das relações anatômicas, e da possibilidade de se programar acessos cirúrgicos menos invasivos e no caso de cirurgias de trauma ortopédico a prévia redução dos fragmentos ósseos (FADERO; SHAH, 2014; EGGER et al., 2017).

Alguns trabalhos demonstram que a tecnologia de impressão 3D em planejamento e realização de procedimentos cirúrgicos leva: a diminuição do tempo cirúrgico, diminuição de perda de sangue no intra-operatório, diminuição do tempo de exposição à radiação ionizante durante o procedimento cirúrgico, redução de

complicações e a provável melhora nos resultados cirúrgicos (BAGARIA; CHAUDHARY, 2017; MOBBS et al., 2018).

Com relação a diminuição do tempo cirúrgico, a literatura descreve que a redução do é de 15 a 20% relatada em vários estudos e em vários cenários de tais procedimentos. Os principais motivos apresentados para redução do tempo de cirurgia incluíram um entendimento mais profundo da patologia, como localização e abordagem do processo, e a facilitação das decisões de instrumentação pré-operatória (WILCOX et al., 2017).

#### 4.3 SIMULAÇÃO PRÉ-CIRÚRGICA

A simulação pré-operatória de uma cirurgia ortopédica permite a pré-avaliação e a reprodução de complexas etapas operatórias, pois não sofre as restrições de tempo de um procedimento real. A simulação cirúrgica eficaz requer que a anatomia seja fiel à real e também deve se comportar de maneira semelhante ao tecido do paciente (RANKIN et al., 2018). Desta forma, a impressão 3D ajuda nos seguintes aspectos: simulação cirúrgica, planejamento cirúrgico, referenciamento das estruturas anatômicas no intra-operatório, escolha pré-operatória dos implantes e guias a serem utilizados principalmente com relação ao entendimento da geometria (distancias, escalas, formas) e identificação de anatomia complexa (SHUI et al., 2016) (MARRO; BANDUKWALA; MAK, 2016).

Outras vantagens estão relacionadas a melhor escolha do acesso a defeitos ósseos, melhor entendimento do padrão da fratura e a melhor escolha no posicionamento de implantes ósseos (BAGARIA; CHAUDHARY, 2017).

Alguns autores ainda elencam as vantagens da cirurgia assistida com a técnica de impressão 3D quando comparada com os métodos de cirurgia tradicional (YANG et al., 2016):

1. Modelos anatômicos impressos em escala real melhoram o entendimento sobre a anatomia e a morfologia da deformidade.
2. Planejamento cirúrgico individualizado, com a vantagem de evitar danos a partes moles, pela escolha precisa do acesso cirúrgico.
3. Eficácia na redução da deformidade com menor tempo cirúrgico.

4. A impressão do modelo anatômico 3D é uma técnica que não necessita de instrumentos sofisticados com custo relativamente baixo.

## 5 CONCLUSÕES

A utilização da tecnologia de impressão 3D na área de cirurgia ortopédica é um exemplo do auxílio da tecnologia na área médica, e esta, associada ao uso de programas CAD, acabam permitindo um melhor entendimento da anatomia de lesões ortopédicas, principalmente em regiões de anatomia complexa. A realização do planejamento cirúrgico combinada a simulação cirúrgica física, no modelo 3D em escala real, auxilia significativamente a equipe médica no planejamento e treinamento cirúrgico, tornando a cirurgia real mais rápida, prevendo dificuldades no posicionamento do material de implante e assim, simplificando os passos cirúrgicos.

Além disso, a partir do modelo anatômico impresso se tem a facilitação da referência da anatomia e do posicionamento do material a ser implantado, devido ao conhecimento gerado a partir de uma análise detalhada de particularidades as quais não costumam ficar explicitadas em imagens 2D ou 3D virtuais, algo evidenciado ao se comparar as imagens de tomografia, o modelo 3D em software e o modelo físico do caso. Isso é possível devido ao alto nível de reprodutibilidade resultante através da combinação das etapas para se gerar tais objetos. Em casos mais complicados, isso se torna uma vantagem ainda mais expressiva.

Além da área biomédica, uma análise detalhada com modelos tridimensionais de casos reais, como nas áreas de engenharia, arquitetura e geologia, podem vir a gerar conhecimento que impactem em tomadas de decisões críticas, algo a ser avaliado em futuros estudos.

A continuidade do presente trabalho, ao realizar a simulação cirúrgica real, tem como perspectiva confirmar ainda mais o impacto da tecnologia 3D na área da saúde.

## REFERÊNCIAS

BAGARIA, V.; BHANSALI, R.; PAWAR, P. **3D printing- creating a blueprint for the future of orthopedics: Current concept review and the road ahead!** *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, v. 9, n. 3, p. 207–212, 2018. Elsevier Ltd.

BAGARIA, V.; CHAUDHARY, K. **A paradigm shift in surgical planning and simulation using 3Dgraphy: Experience of first 50 surgeries done using 3D-printed biomodels.** *Injury*, v. 48, n. 11, p. 2501–2508, 2017. Elsevier Ltd.

BERMAN, B. **3-D printing: The new industrial revolution.** *Business Horizons*, v. 55, n. 2, p. 155–162, 2012. “Kelley School of Business, Indiana University”.

BIZZOTTO, N *et al.* **3D Printed models of distal radius fractures.** *Injury*, v. 47, n. 4, p. 976–978, 2016.

BOGUE, R. **3D printing: The dawn of a new era in manufacturing?.** *Assembly Automation*, v. 33, n. 4, p. 307–311, 2013.

CHEN, X.; XU, L.; WANG, W.; *et al.* **Computer-aided design and manufacturing of surgical templates and their clinical applications: a review.** *Expert Review of Medical Devices*, v. 13, n. 9, p. 853–864, 2016.

CHEN, X.; XU, L.; WANG, Y.; HAO, Y.; WANG, L. **Image-guided installation of 3D-printed patient-specific implant and its application in pelvic tumor resection and reconstruction surgery.** *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, v. 125, p. 66–78, 2016.

CHIA, H. N.; WU, B. M. **Recent advances in 3D printing of biomaterials.** *Journal of Biological Engineering*, v. 9, n. 1, p. 1–14, 2015.

DA SILVA OLIVEIRA BRITO, N. M. *et al.* **Additive Manufacturing for Surgical Planning of Mandibular Fracture.** *Acta Stomatologica Croatica*, v. 50, n. 4, p. 348–353, 2016.

DICOM. **DICOM.** [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.dicomstandard.org/>. Acesso em: 22 maio 2019.



FADERO, Patrick Eniola; SHAH, Mahir. **Three dimensional (3D) modelling and surgical planning in trauma and orthopaedics.** *The Surgeon*, v. 12, p. 328–333, 2014

ELEY, K. A. **Centralised 3D printing in the NHS: a radiological review.** *Clinical Radiology*, v. 72, n. 4, p. 269–275, 2017. The Royal College of Radiologists.

FADERO, Patrick Eniola; SHAH, Mahir. **Three dimensional (3D) modelling and surgical planning in trauma and orthopaedics.** *The Surgeon*, v. 12, p. 328–333, 2014.

GEBLER, M.; SCHOOT UITERKAMP, A. J. M.; VISSER, C. **A global sustainability perspective on 3D printing technologies.** *Energy Policy*, v. 74, n. C, p. 158–167, 2014.

GRIFFREY, Jason. **Chapter 2: The Types of 3-D Printing.** [S. l.], Julho 2014. Disponível em: <https://www.journals.ala.org/index.php/ltr/article/view/4796/5747>. Acesso em: 29 maio 2019.

HOANG, D.; PERRAULT, D.; STEVANOVIC, M.; GHIASSI, A. **Surgical applications of three-dimensional printing: a review of the current literature & how to get started.** *Annals of Translational Medicine*, v. 4, n. 23, p. 456–456, 2016.

HUYGUE, R., IKEDA, D. **A Noite clama pela Alvorada: Um diálogo do Oriente com o Ocidente sobre a Crise Contemporânea.** Rio de Janeiro, RJ: Editora Record, 1980.

JOSHI, S. C.; SHEIKH, A. A. **3D printing in aerospace and its long-term sustainability.** *Virtual and Physical Prototyping*, v. 10, n. 4, p. 175–185, 2015.

LIU, F.; CHEN, Q.; LIU, C.; et al. **Natural Polymers for Organ 3D Bioprinting.** *Polymers*, v. 10, n. 11, p. 1278, 2018.

MALIK, H. H.; DARWOOD, A. R. J.; SHAUNAK, S.; et al. **Three-dimensional printing in surgery: a review of current surgical applications.** *Journal of Surgical*

Research, v. 199, n. 2, p. 512–522, 2015. Elsevier Ltd.

MARRO, A.; BANDUKWALA, T.; MAK, W. **Three-Dimensional Printing and Medical Imaging: A Review of the Methods and Applications**. *Current Problems in Diagnostic Radiology*, v. 45, n. 1, p. 2–9, 2016.

MENDONÇA, C. J. A.; **APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DE IMPRESSÃO 3D NO TRATAMENTO DE PSEUDOARTROSE DA FRATURA CORONAL DO CÔNDILO FEMORAL**. 2018. 134 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Biomédica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

MANUFACTURING GUIDE. **Fused Deposition Modelling**. [S. l.], [201-]. Disponível em: <https://www.manufacturingguide.com/en/fused-deposition-modeling-fdm>. Acesso em: 29 maio 2019.

MITCHELL, A. *et al.* **Additive manufacturing — A review of 4D printing and future applications**. *Additive Manufacturing*, v. 24, p. 606–626, 2018.

MOBBS, Ralph J. *et al.* **L5 En-Bloc Vertebrectomy with CustomizedReconstructive Implant: Comparison of Patient-Specific Versus Off-theShelf Implant**. *World Neurosurgery*, 2018.

MOK, S. W.; NIZAK, R.; FU, S. C.; *et al.* **From the printer: Potential of three-dimensional printing for orthopaedic applications**. *Journal of Orthopaedic Translation*, v. 6, p. 42–49, 2016.

NGO, T. D.; KASHANI, A.; IMBALZANO, G.; NGUYEN, K. T. Q.; HUI, D. **Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges**. *Composites Part B: Engineering*, v. 143, n. December 2017, p. 172–196, 2018. Elsevier.

NICKELS, L. **World's first patient-specific jaw implant**. *Metal Powder Report*, v. 67, n. 2, p. 12–14, 2012. Elsevier Ltd.

PEREIRA, T.; KENNEDY, J. V; POTGIETER, J. **A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job**. *Procedia Manufacturing*, v. 30, p. 11–18, 2019.

PRAVIN, S.; SUDHIR, A. **Integration of 3D printing with dosage forms: A new perspective for modern healthcare.** *Biomedicine and Pharmacotherapy*, v. 107, n. July, p. 146–154, 2018.

QIN, Y. *et al.* **Status, comparison, and future of the representations of additive manufacturing data.** *CAD Computer Aided Design*, v. 111, p. 44–64, 2019

RANKIN, T. M.; WORMER, B. A.; MILLER, J. D.; *et al.* **Image once, print thrice? Three-dimensional printing of replacement parts.** *The British Journal of Radiology*, , n. September 2017, p. 20170374, 2018.

SAVIANO, M.; AQUINO, R. P.; DEL GAUDIO, P.; SANSONE, F.; RUSSO, P. **Poly(vinyl alcohol) 3D printed tablets: The effect of polymer particle size on drug loading and process efficiency.** *International Journal of Pharmaceutics*, v. 561, n. February, p. 1–8, 2019.

SAVINI, A.; SAVINI, G. G. **A short history of 3D printing, a technological revolution just started.** *Proceedings of the 2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference, HISTELCON 2015: The 4th IEEE Region 8 Conference on the History of Electrotechnologies*, 2015.

SCHELLY, C.; ANZALONE, G.; WIJNEN, B.; PEARCE, J. M. **Open-source 3-D printing technologies for education: Bringing additive manufacturing to the classroom.** *Journal of Visual Languages and Computing*, v. 28, p. 226–237, 2015. Elsevier.

DA SILVA OLIVEIRA BRITO, N. M.; DE SOUZA COELHO SOARES, R.; LAFITT TAVARES MONTEIRO, E.; *et al.* **Additive Manufacturing for Surgical Planning of Mandibular Fracture.** *Acta Stomatologica Croatica*, v. 50, n. 4, p. 348–353, 2016.

SHUI, Wuyang *et al.* **The production of digital and printed resources from multiple modalities using visualization and three-dimensional printing.** *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, p.1-11, 2016.

SINDHU, V.; SOUNDARAPANDIAN, S. **Three-dimensional modelling of femur bone using various scanning systems for modelling of knee implant and virtual aid of surgical planning.** *Measurement*, 2019. Elsevier Ltd..

STANSBURY, J. W.; IDACAVAGE, M. J. **3D printing with polymers: Challenges**

**among expanding options and opportunities.** *Dental Materials*, v. 32, n. 1, p. 54–64, 2016. The Academy of Dental Materials..

STAROSOLSKI, Z. A.; KAN, J. H.; ROSENFELD, S. D.; KRISHNAMURTHY, R.; ANNAPRAGADA, A. **Application of 3-D printing (rapid prototyping) for creating physical models of pediatric orthopedic disorders.** *Pediatric Radiology*, v. 44, n. 2, p. 216–221, 2014.

TACK, Philip *et al.* **3D-printing techniques in a medical setting: A systematic literature review.** *BioMedical Engineering Online*, v. 15, n. 1, p. 1–21, 2016.

TOFAIL, S. A. M. *et al.* **Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities.** *Materials Today*, v. 21, n. 1, p. 22–37, 2018.

VAN EIJNATTEN, M.; VAN DIJK, R.; DOBBE, J.; *et al.* **CT image segmentation methods for bone used in medical additive manufacturing.** *Medical Engineering and Physics*, v. 51, p. 6–16, 2018. Elsevier Ltd.

VAROTSIS, Alkaios Bournias. **Introduction SLA 3D Printing.** [S. l.], [201- a]. Disponível em: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing>. Acesso em: 29 maio 2019.

VAROTSIS, Alkaios Bournias. **Introduction to SLS Printing.** [S. l.], [201- b]. Disponível em: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sls-3d-printing>. Acesso em: 29 maio 2019.

WATSON, R. A. **A low-cost surgical application of additive fabrication.** *Journal of Surgical Education*, v. 71, n. 1, p. 14–17, 2014

Wikipedia; Fêmur; **Wikipedia.** Disponível em :<  
<https://pt.wikipedia.org/wiki/F%C3%AAmur>>. Acesso em: 02 de dez. de 2019.

WILCOX, Ben *et al.* **Systematic review of 3D printing in spinal surgery: the current state of play.** *Journal of Spine Surgery*, v. 3, n. 3, p. 433–443, 2017.

WONG, T. M.; JIN, J.; LAU, T. W.; *et al.* **The use of three-dimensional printing technology in orthopaedic surgery: A review.** *Journal of Orthopaedic Surgery*, v.

25, n. 1, p. 1–7, 2017.

YAN, Q.; DONG, H.; SU, J.; et al. **A Review of 3D Printing Technology for Medical Applications**. *Engineering*, v. 4, n. 5, p. 729–742, 2018. Chinese Academy of Engineering.

YANG, Peng *et al.* **3D printing-assisted osteotomy treatment for the malunion of lateral tibial plateau fracture**. *Injury*, v. 47, p. 2816–2821, 2016.

ZHENG, Wenhao *et al.* **The Feasibility of 3D Printing Technology on the Treatment of Pilon Fracture and Its Effect on Doctor-Patient Communication**. *BioMed Research International*, p. 1–10, 2018.