



Universidade Estadual Paulista
“Julio de Mesquita Filho”

Campus Sorocaba

Instituto de Ciência e Tecnologia

VICTOR PATSDORF MEGA DE OLIVEIRA

**INOVAÇÃO EM CIRURGIAS DE JOELHOS:
IMPLEMENTAÇÃO DE BIOMODELOS 3D PARA PREPARAÇÃO
DO PROCESSO CIRÚRGICO**

Sorocaba

2023

VICTOR PATSDORF MEGA DE OLIVEIRA

INOVAÇÃO EM CIRURGIAS DE JOELHOS: IMPLEMENTAÇÃO
DE BIOMODELOS 3D PARA PREPARAÇÃO DO PROCESSO
CIRÚRGICO

Trabalho de Graduação apresentado ao Instituto de
Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” -
UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia de Controle e
Automação.

Orientador: Prof. Galdenoro Botura Junior

Coorientador: Prof. Eduardo Luis Cruells Vieira

Sorocaba

2023

O48i

Oliveira, Victor Patsdorf Mega de

Inovação em cirurgias de joelhos : implementação de biomodelos 3D para preparação do processo cirúrgico / Victor Patsdorf Mega de Oliveira. -- Sorocaba, 2023

50 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

Orientador: Galdenoro Botura Junior

Coorientador: Eduardo Luis Cruells Vieira

1. Impressão 3D. 2. Biomodelo. 3. Implantes ortopédicos. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



Universidade Estadual Paulista
“Julio de Mesquita Filho”

Campus Sorocaba

Instituto de Ciência e Tecnologia

INOVAÇÃO EM CIRURGIAS DE JOELHOS: IMPLEMENTAÇÃO DE BIOMODELOS
3D PARA PREPARAÇÃO DO PROCESSO CIRÚRGICO

VICTOR PATSDORF MEGA DE OLIVEIRA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Galdenoro Botura Junior
Orientador / UNESP – Campus Sorocaba

Prof. Me. Eduardo Luis Cruells Vieira
Coorientador / Externo

Prof^a. Dr^a. Elidiane Cipriano Rangel
Avaliadora / UNESP – Campus Sorocaba

Sorocaba

2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por estar sempre à frente durante a caminhada.

Agradeço à minha família, por me apoiar nos momentos mais difíceis e nunca deixar de acreditar em mim.

Agradeço aos meus amigos, que foram fonte de inspiração em tempos de dúvidas e acalento para o coração em dias de ansiedade.

Agradeço à Fernanda Diniz Cunha Lopes, que esteve ao meu lado durante todo o desenvolvimento, demonstrando que o cuidado com o trabalho científico sempre gera bons frutos.

Agradeço ao meu orientador Professor Dr. Galdenoro Botura Jr. por todo tempo, toda confiança e toda disposição em mim depositados, que se tornaram indispensáveis para a conclusão desse trabalho.

Agradeço ao meu co-orientador Professor Médico Eduardo Luis Cruells Vieira, que sabiamente me direcionou em questões envolvendo o conhecimento médico, disponibilizou visitas cirúrgicas, entre tantas outras portas abertas que possibilitaram novos conhecimentos a serem agregados de forma concreta.

Agradeço a João Vitor Gazana pelos ensinamentos e auxílios vitais, que ajudaram a direcionar o curso de todo o raciocínio.

Agradeço a Eric Ribeiro Alves e ao grupo PET-ECA pela ajuda com as impressões 3D necessárias para demonstrações técnicas, as quais foram vitais para a visualização de resultados práticos.

Agradeço aos funcionários e professores da Unesp, que depositam diariamente um pouco de si em cada aluno da instituição, ajudando-nos a seguir em frente e colher resultados duradouros.

OLIVEIRA, Victor Patsdorf Mega de. **Inovação em cirurgias de joelhos**: implementação de biomodelos 3D para preparação do processo cirúrgico. 2023. Trabalho de Graduação (Engenharia de Controle e Automação) – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, UNESP – Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2023.

RESUMO

As cirurgias que envolvem a articulação do joelho vêm ganhando praticidades, automações e inovações a cada dia: desde exames de imagem cada vez mais precisos e disponíveis, até eficientes braços robóticos inteligentes que fornecem precisão ao cirurgião no ato da operação. O propósito desses procedimentos é bem variado, visando a correção da articulação após algum tipo de acidente, a devolução do conforto ao paciente devido a problemas crônicos com o objetivo de fornecer à pessoa a função primária da articulação. Algo em comum que todas as áreas do conhecimento têm testemunhado é a influência da indústria 4.0 em seu dia a dia, aprimorando processos, personalizando produções e evitando uma série de possíveis erros humanos. Com base neste cenário, o objetivo deste trabalho é viabilizar a aplicação de biomodelos impressos em 3D nos procedimentos cirúrgico e pré-cirúrgico, que permitam aos profissionais envolvidos desde uma melhor observação do cenário a ser encontrado até uma nova automação em cirurgias delicadas, concedendo ganhos em tempo e precisão. Para isso, propõe-se a aplicação dessa tecnologia em três diferentes tipos de cirurgias: artroplastias, trocleoplastias e as operações corretivas em casos de fraturas articulares. No caso específico da artroplastia, será considerado não apenas a impressão do biomodelo do joelho, mas também a possibilidade da elaboração de um guia de corte personalizado, tornando o procedimento não apenas mais preciso, mas também menos invasivo. Como resultado final, este estudo permite a elaboração de um biomodelo em custos mais acessíveis em comparação a trabalhos similares existentes, possibilitando o acesso a uma operação mais rápida e segura para todos os pacientes e profissionais. Serão detalhados os procedimentos de admissão e elaboração dos biomodelos, além de direcionamentos relacionados à esterilização dos objetos para a sala de cirurgia.

Palavras-chave: cirurgia; joelho; impressão 3D; biomodelos.

OLIVEIRA, Victor Patsdorf Mega de. **Innovation in knee surgeries**: implementation of 3D biomodels for preparation of the surgical process. 2023. Bachelor Work (Control and Automation Engineering) – Institute of Science and Technology of Sorocaba, UNESP – Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2023.

ABSTRACT

Surgeries involving the knee joint are gaining practicality, automation and innovation every day: from increasingly accurate and available imaging exams, to efficient intelligent robotic arms that provide precision to the surgeon during the operation. The purpose of these procedures is very variable, aiming at correcting the joint after some type of accident, restoring comfort to the patient due to chronic problems or even providing the person with the primary function of the joint. Something in common that all areas of knowledge have witnessed is the influence of industry 4.0 in their daily lives, improving processes, customizing production and avoiding a series of possible human errors. Based on this scenario, the objective of this work is to enable the application of 3D printed biomodels in the surgical and pre-surgical procedures, which allow the professionals involved from a better observation of the scenario to be found to a new automation in delicate surgeries, granting gains in time and accuracy. In this regard, it is proposed the application of this technology of this technology in three different types of surgeries: arthroplasties, trochleoplasty and corrective operations in cases of joint fractures. In the specific case of arthroplasty, not only the impression of the biomodel of the knee will be considered, but also the possibility of creating a personalized cutting guide, making the procedure not only more accurate, but also less invasive. As a final result, this study allows the elaboration of a biomodel at more affordable costs compared to similar existing works, allowing access to a faster and safer operation for all patients and professionals. The procedures for admission and preparation of biomodels will be detailed, as well as guidelines related to the sterilization of objects for the operating room.

Keywords: surgery; knee; 3D printing; biomodels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração esquemática do antes e depois de uma artroplastia de joelho.	10
Figura 2 – Eixo vertical, mecânico e anatômico.	12
Figura 3 – Ilustração esquemática dos desvios laterais do joelho.	12
Figura 4 – Radiografia de dois joelhos portadores de desvios laterais, sendo em valgo à direita e em varo à esquerda. Note-se que na radiografia à esquerda há um maior comprometimento da interlinha lateral, no joelho à direita, o comprometimento maior é da interlinha medial devido ao joelho varo.	13
Figura 5 – Ilustrações de um joelho acometido por artrose, esse joelho operado via uma artroplastia total, as próteses utilizadas na operação em perspectiva explodida e essas mesmas próteses na posição que ficarão dentro da articulação, da esquerda para a direita.	14
Figura 6 – Radiografica mostrando dois joelhos A e B, onde (A) é um joelho normal e (B) um joelho com displasia troclear, sendo possível visualizar que o caminho para deslizamento da patela, chamado de tróclea, não apresenta o formato tradicional de cunha.	15
Figura 7 – Ilustração esquemática da pateloplastia (A, B, C) e da trocleoplastia (D, E, F).	16
Figura 8 – Ilustração dos tipos de fraturas articulares da tíbia proximal.	17
Figura 9 – Ilustração esquemática mostrando o funcionamento de uma tomografia computadorizada.	19
Figura 10 – Fábrica com máquinas à vapor em 1880.	20
Figura 11 – Linha de montagem de Henry Ford.	21
Figura 12 – Automação em montadora de automóveis através de braços robóticos.	22
Figura 13 – Impressão 3D através de equipamento da empresa MakerBot.	23
Figura 14 – Slicer em sua página inicial, após upload de uma tomografia de joelho.	25
Figura 15 – Analogia do mostrador do relógio aplicada em biomodelo.	28
Figura 16 – Ilustração esquemática dos guias de corte impressos em 3D fabricados pela Medacta International.	29
Figura 17 – Bobinas de filamentos plásticos utilizados em impressoras 3D.	31
Figura 18 – Impressora 3D CreatBot PEEK-300, capaz de imprimir PEEK e ULTEM.	33
Figura 19 – Upload no software Slicer da tomografia computadorizada solicitada.	35
Figura 20 – Menu de segmentação e calibração do software Slicer.	35
Figura 21 – Tomografia computadorizada inserida no software Slicer passando pelo processo de segmentação do tecido ósseo em um momento de calibragem superdimensionada.	36
Figura 22 – Tomografia computadorizada inserida no software Slicer passando pelo processo de segmentação do tecido ósseo em um momento de calibragem subdimensionada.	36
Figura 23 – Tomografia computadorizada inserida no software Slicer passando pelo processo de segmentação do tecido ósseo em um momento de calibragem ideal para os propósitos da impressão 3D.	37
Figura 24 – Resultado da extração do modelo 3D fornecido pelo Slicer.	38
Figura 25 – Elemento 3D antes da etapa de limpeza da imagem, juntamente com um corte longitudinal que permite visualizar a espessura da parede óssea a ser impressa.	39
Figura 26 – Elemento 3D após a etapa de limpeza da imagem, juntamente com um corte longitudinal que permite visualizar a espessura da parede óssea a ser impressa.	39
Figura 27 – Resultado da impressão do biomodelo completo do joelho disponibilizado.	41
Figura 28 – Resultado da impressão do biomodelo do fêmur do joelho disponibilizado.	42
Figura 29 – Resultado da impressão do biomodelo da tíbia do joelho disponibilizado.	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
1.1	Contexto e justificativa	8
1.2	Objetivo geral.....	9
1.3	Objetivos específicos	9
2	CONCEITUAÇÃO	10
2.1	Artroplastia	10
2.2	Trocleoplastia	15
2.3	Fraturas articulares.....	16
2.4	Esterilização cirúrgica	18
2.5	Tomografia computadorizada	19
2.6	Indústria 4.0	20
2.7	Impressão 3D	22
2.8	Slicer.....	24
3	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO.....	26
3.1	Reproduções tridimensionais para tomada de decisão cirúrgica no tratamento da luxação recorrente da patela.....	26
3.2	MyKnee® MIS Surgical Technique	28
3.3	Impressão tridimensional em cirurgia ortopédica: uma revisão de escopo	30
4	MATERIAL E MÉTODOS	31
4.1	Filamento	31
4.2	Software Slicer	34
4.3	Desenvolvimento	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
6.1	Considerações.....	44
6.2	Trabalhos futuros	44
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e justificativa

As cirurgias de joelho têm uma longa história de desenvolvimento e evolução ao longo dos anos. Segundo Scott (2011) em “Insall & scott surgery of the knee E-book”, o início das intervenções cirúrgicas nessa região remonta a tempos antigos, quando procedimentos rudimentares eram realizados para tratar lesões e doenças no joelho. No entanto, foi no século XX que houve avanços significativos nas técnicas e abordagens cirúrgicas para o joelho, com a engenharia contribuindo significativamente para as inovações surgidas nesse campo (BARCELLOS; BOTURA JÚNIOR, 2019). O surgimento da artroscopia, uma técnica minimamente invasiva que utiliza pequenas incisões e um instrumento óptico chamado artroscópio, revolucionou o campo das cirurgias de joelho. Por meio da artroscopia, os cirurgiões podem diagnosticar e tratar uma variedade de condições, como lesões de cartilagem, rupturas ligamentares e inflamações articulares, com menor trauma e recuperação mais rápida para o paciente. Além disso, houve avanços significativos na reconstrução ligamentar, com técnicas inovadoras como a reconstrução do ligamento cruzado anterior usando enxertos de tendão. Houve também o desenvolvimento das artroplastias, que permitem a substituição de uma articulação desgastada. A incorporação de tecnologias avançadas, como a impressão 3D e a robótica, também tem sido explorada para aprimorar a precisão e os resultados das cirurgias de joelho. À medida que a compreensão da biomecânica e a tecnologia continuam a avançar, espera-se que as cirurgias de joelho continuem a evoluir, proporcionando melhores resultados e maior qualidade de vida para os pacientes (SCOTT, 2011).

As cirurgias ortopédicas são essenciais quando se trata do assunto qualidade de vida. Milhões de pessoas ao redor do mundo têm a possibilidade de recuperar movimentos perdidos ao tratar lesões seríssimas e ter a oportunidade de viver normalmente. Porém, independentemente do progresso científico, o ser humano é falho: um fato que sempre precisa ser observado. Segundo Albuquerque (2019), 55% dos erros em procedimentos cirúrgicos são causados por falhas humanas como distrações e preocupações externas. Com a tecnologia atual, é perfeitamente possível planejar protocolos e criar maneiras de reduzir essa taxa.

Desde que o assunto Indústria 4.0 surgiu em meados de 2010 (MASTER CERTIFICAÇÕES, 2023), todas as áreas de pesquisa científica sofreram influências deste movimento, incluindo a medicina. Dentre os grandes pilares desse ideal, encontra-se a manufatura aditiva, que pode ser definida como a fabricação de peças a partir de um desenho

digital (PORTAL DA INDÚSTRIA, 2022). Isso permite que produtos sejam criados de forma personalizada, com custos mais próximos de uma produção em série ao invés de artesanal.

A inovação na área médica tem sido um fator crucial para o seu avanço e o aprimoramento dos cuidados de saúde. Novas tecnologias, técnicas cirúrgicas e abordagens terapêuticas estão constantemente surgindo, proporcionando diagnósticos mais precisos, tratamentos mais eficazes e melhores resultados para os pacientes. A inovação médica abrange desde a descoberta de novas drogas e dispositivos médicos até o desenvolvimento de terapias genéticas e medicina regenerativa. Além disso, a aplicação de inteligência artificial, aprendizado de máquina e big data tem revolucionado a maneira como os médicos interpretam dados e tomam decisões clínicas. A inovação na área médica está transformando a forma como a medicina é praticada, trazendo benefícios significativos para pacientes, profissionais de saúde e sociedade como um todo (BARCELLOS; BOTURA JÚNIOR, 2019).

Considerando essa possibilidade, esse trabalho consiste em trazer tecnologias geradas pelo desenvolvimento da indústria 4.0 para procedimentos cirúrgicos ortopédicos envolvendo a articulação do joelho. Primeiramente, no aspecto de reduzir erros humanos, por meio do fornecimento de ferramentas auxiliaadoras, tornando as cirurgias mais rápidas, mais precisas e menos sujeitas a erros. Além disso, as impressões 3D podem aproximar a relação médico-paciente, facilitando ao profissional o ato de explicar os detalhes do procedimento a ser realizado e sua importância ao paciente.

1.2 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver maneiras de utilizar biomodelos impressos em 3D em procedimentos cirúrgicos e pré-cirúrgicos, com o intuito de reduzir erros humanos e tornar métodos operatórios mais seguros, menos invasivos e com custos viáveis, utilizando tecnologias atuais desbravadas pela indústria 4.0.

1.3 Objetivos específicos

- Inserir o biomodelo como um guia prático para a cirurgia de artroplastia, permitindo ao cirurgião uma facilitação de processos, uma diminuição de passos no procedimento e uma redução de possibilidades de erros.
- Apresentar maneiras de utilizar o biomodelo do joelho para auxiliar o cirurgião no processo de preparação da cirurgia de trocleoplastia.
- Discutir a respeito do uso das impressões 3D para melhores observações das condições pré-operatórias de fraturas articulares do joelho.

2 CONCEITUAÇÃO

A seção de “Conceituação” em um trabalho científico tem como objetivo fornecer uma base teórica e conceitual para o tema abordado. Nessa seção, serão apresentadas definições, conceitos-chave e informações relevantes que são fundamentais para o entendimento do assunto em questão.

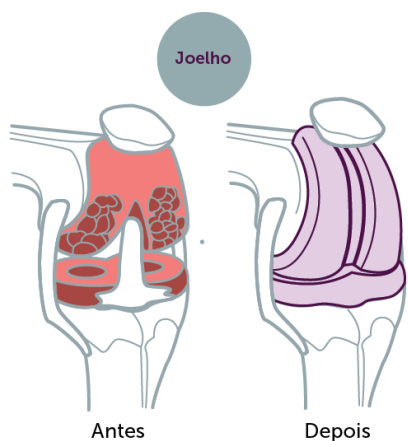
Esta seção serve para contextualizar o leitor, estabelecendo uma fundamentação teórica sólida para o trabalho. Nela, serão explorados conceitos, teorias e modelos relacionados ao tema, com o intuito de embasar e sustentar a argumentação ao longo do trabalho. Serão apresentados eventuais termos técnicos e jargões específicos da área de estudo, esclarecendo o significado e o contexto de cada um. Essa clareza conceitual é importante para garantir que o leitor compreenda corretamente os termos utilizados ao longo do trabalho e possa acompanhar o raciocínio.

No geral, a seção de Conceituação desempenha um papel fundamental na construção do conhecimento científico, fornecendo a base teórica necessária para que o trabalho avance em direção aos seus objetivos e contribua para o desenvolvimento da área de estudo.

2.1 Artroplastia

A artroplastia é a substituição da parte desgastada de uma articulação por partes metálicas associadas a plásticos específicos, assim como mostrado na Figura 1 (HOSPITAL DO CORAÇÃO, 2017). A ideia central é restaurar ao paciente sua mobilidade e integridade de movimentos.

Figura 1 – Ilustração esquemática do antes e depois de uma artroplastia de joelho.



Fonte: Hospital do Coração (2017)

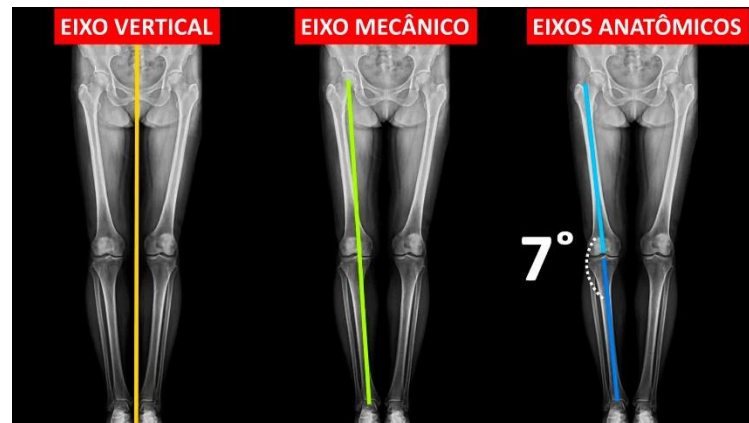
O desgaste geralmente ocorre devido à osteoartrite, também conhecida como artrose. Segundo a Sociedade Brasileira de Reumatologia (2019), é uma doença que se caracteriza pelo desgaste da cartilagem articular e por alterações ósseas. Esse desgaste é causado por fatores que variam de genéticos a metabólicos.

O surgimento da artroplastia remonta ao início do século XX, quando os primeiros implantes foram desenvolvidos para substituir as articulações do quadril e do joelho. Inicialmente, as próteses eram de metal e apresentavam resultados limitados. Com o avanço da tecnologia e dos materiais, foram introduzidas próteses de polietileno e cerâmica, que melhoraram a durabilidade e a função das articulações artificiais. Ao longo das décadas, a cirurgia de artroplastia tem evoluído significativamente. Novas técnicas e abordagens cirúrgicas foram desenvolvidas para minimizar a invasão, reduzir a perda de sangue e acelerar a recuperação pós-operatória. Além disso, as próteses se tornaram mais avançadas, com designs personalizados e materiais de alta performance que proporcionam maior estabilidade, mobilidade e longevidade (KURTZ *et al.*, 2007).

Existem diferentes tipos de artroplastia, dependendo da articulação afetada. Os procedimentos mais comuns incluem artroplastia do quadril, do joelho, do ombro e do tornozelo. Cada um desses procedimentos possui características específicas, exigindo técnicas cirúrgicas e próteses adaptadas à anatomia da articulação em questão. Hoje, essa operação pode ser realizada em quase todas as articulações do corpo humano. Além das citadas anteriormente, pode-se incluir cotovelos e dedos das mãos. Observando mais a fundo a artroplastia do joelho, existem duas razões principais pelas quais ocorre a artrose nesta articulação, fazendo-se necessária a operação: fatores metabólicos e desvios de eixo com deformidades angulares (HOSPITAL DO CORAÇÃO, 2017).

Os desvios do joelho são divididos em dois grupos: o joelho valgo e o joelho varo. São caracterizados pelo desvio do eixo anatômico do membro inferior. De acordo com a Figura 2, o eixo anatômico é a linha traçada ao longo da diáfise (ou extensão) do fêmur e da tíbia. Essa linha cruza o encontro entre esses dois ossos exatamente no centro do joelho. Para pessoas com estrutura óssea e ligamentar saudável, exatamente nesse encontro deve existir um ângulo de 7° devido à inclinação no fêmur para ocorrer o encaixe correto no quadril.

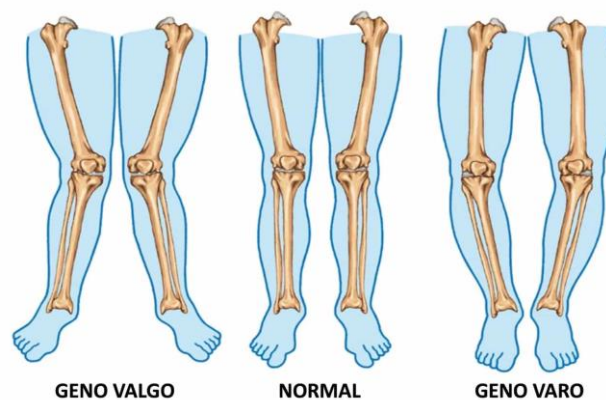
Figura 2 – Eixo vertical, mecânico e anatômico.



Fonte: Clínica do Joelho ([201-?a])

Nos casos dos desvios laterais do joelho, esse ângulo é comprometido, seja para um valor menor ou maior. Quando menor que 7° , o joelho é chamado de varo, que resulta fisicamente no afastamento entre as duas articulações observando por meio de vista frontal. Enquanto que o ângulo maior que 7° resulta no joelho valgo, que resulta numa aproximação entre as duas articulações através da mesma observação. A Figura 3 ilustra e classifica os desvios laterais.

Figura 3 – Ilustração esquemática dos desvios laterais do joelho.

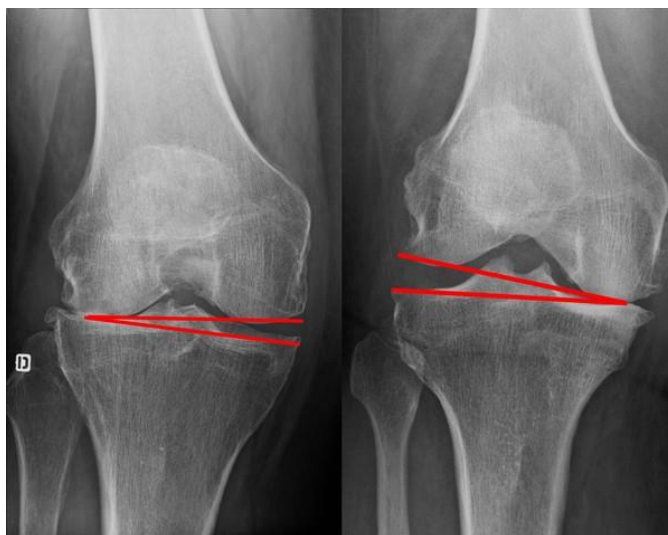


Fonte: Clínica do Joelho ([201-?a])

No caso de o desvio ser de 5° acima do natural, seja para a direção de valgo ou varo, o paciente pode começar a sofrer algumas consequências. Dentre elas, podem ser destacadas dor, assimetria visual, sensação de frouxidão da articulação e a progressão paulatina do desvio (CENTRO DE PRESERVAÇÃO ARTICULAR DR. MÁRCIO RUBIN, [201-?]).

Cada um dos desvios laterais causará um atrito excessivo em um ponto da estrutura articular não preparada para isso. A Figura 4 demonstra quais são esses locais para os joelhos valgo (à esquerda) e varo (à direita).

Figura 4 – Radiografia de dois joelhos portadores de desvios laterais, sendo em valgo à direita e em varo à esquerda. Note-se que na radiografia à esquerda há um maior comprometimento da interlinha lateral, no joelho à direita, o comprometimento maior é da interlinha medial devido ao joelho varo.



Fonte: Centro de Preservação Articular Dr. Márcio Rubin ([201-?])

Para que esta cirurgia possa acontecer, é necessário planejar como será realizado o alinhamento do eixo anatômico. Para isso, deve-se decidir entre executar um alinhamento mecânico ou um alinhamento cinemático.

O alinhamento mecânico consiste em inserir próteses para que o joelho do paciente seja alinhado numa posição média, de acordo com o padrão ordinário de 7° de desvio no eixo anatômico do fêmur. O alinhamento cinemático é uma técnica mais recente, criada em 2005, que busca personalizar a operação, posicionando o joelho numa posição mais natural, conforme a anatomia do paciente, gerando mais conforto (IAMAGUCHI, 2018).

É atestado que após 10 anos de uso, apenas 2,5% dos pacientes que receberam próteses medidas por meio de alinhamento cinemático precisam de alguma manutenção ou troca de componentes, contra 7% do alinhamento mecânico. (IAMAGUCHI, 2018). Porém, é inegável que a personalização sempre gerará uma maior demanda de trabalho pré-operatório, além de profissionais qualificados para esse tipo de operação, o que acarreta num custo mais elevado.

Além das variações de alinhamentos possíveis, existem diferentes tipos de operações de artroplastias de joelho, cada uma com suas características distintas.

Na artroplastia total do joelho, tanto a superfície do fêmur quanto a da tíbia são substituídas por componentes metálicos, interpostos por um componente tibial de polietileno, enquanto a patela pode ou não ser revestida com uma prótese de polietileno. A Figura 5 mostra cada uma das partes da prótese utilizada nessa operação. Essa abordagem é indicada para casos de desgaste grave da articulação do joelho, oferecendo alívio da dor e melhora da função articular. Ela proporciona alívio significativo da dor e restauração da função articular, permitindo ao paciente retornar a atividades normais do dia a dia. Porém, requer uma cirurgia invasiva, com maior tempo de recuperação e reabilitação. Além disso, pode apresentar riscos associados à anestesia, infecção e complicações pós-operatórias (BOURNE *et al.*, 2010).

Figura 5 – Ilustrações de um joelho acometido por artrose, esse joelho operado via uma artroplastia total, as próteses utilizadas na operação em perspectiva explodida e essas mesmas próteses na posição que ficarão dentro da articulação, da esquerda para a direita.



Fonte: Clínica do Joelho ([201-?a])

Na artroplastia unicompartmental do joelho, apenas um dos compartimentos do joelho é substituído por uma prótese, preservando as demais partes saudáveis do joelho. Essa abordagem é indicada quando o desgaste e a degeneração da cartilagem são limitados a um compartimento específico. Possui uma menor invasão cirúrgica, tempo de recuperação mais rápido e menor perda óssea em comparação com a artroplastia total, além de resultar em uma sensação mais natural e preservação da função do joelho. Entretanto, sua aplicação é limitada a casos em que apenas um compartimento do joelho está afetado. Pode haver a necessidade de uma futura conversão para uma artroplastia total se o desgaste se espalhar para outros compartimentos (BOURNE *et al.*, 2010).

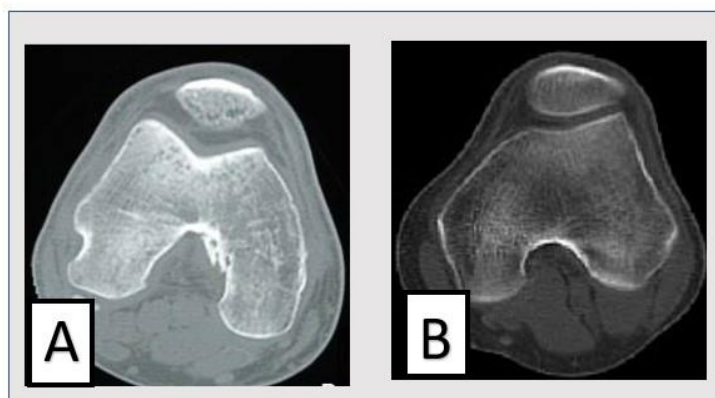
É importante ressaltar que a escolha do tipo de artroplastia depende da avaliação do médico especialista, levando em consideração o grau de desgaste articular, a extensão do

comprometimento, a idade e a condição geral do paciente. Cada caso é único e requer uma abordagem personalizada.

2.2 Trocleoplastia

A displasia troclear, também conhecida como displasia da tróclea femoral, é uma condição ortopédica que afeta o joelho. Ela é caracterizada por uma anormalidade na estrutura óssea da tróclea femoral, que é a parte do fêmur que se encaixa com a patela (rótula), geralmente deixando-a rasa. Essa anormalidade pode levar a um mau alinhamento da patela, resultando em instabilidade e dor no joelho. A displasia troclear pode ser congênita, ou seja, presente desde o nascimento, ou adquirida ao longo do tempo devido a fatores como traumatismos ou desgaste excessivo das articulações (CLÍNICA DO JOELHO, [201-?b]).

Figura 6 – Radiografica mostrando dois joelhos A e B, onde (A) é um joelho normal e (B) um joelho com displasia troclear, sendo possível visualizar que o caminho para deslizamento da patela, chamado de tróclea, não apresenta o formato tradicional de cunha.



Fonte: Hollanda ([2022?])

O surgimento da trocleoplastia remonta ao início do século XX, com as primeiras descrições de técnicas para remodelar a tróclea femoral a fim de evitar o deslocamento da patela. Ao longo do tempo, o procedimento evoluiu com o desenvolvimento de novas técnicas e abordagens. Existem diferentes tipos de trocleoplastia, que podem ser classificados com base na extensão da reconstrução e no objetivo do procedimento. Dentre elas, é possível destacar alguns tipos (BIEDERT; ALBRECHT, 2006).

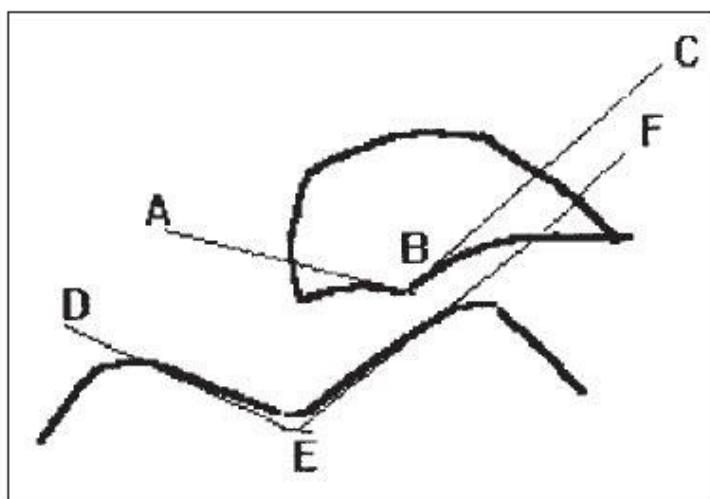
Na trocleoplastia de aplainamento, as irregularidades da tróclea são niveladas para proporcionar uma superfície mais regular e congruente para a patela. Na trocleoplastia em cunha, uma cunha é removida ou adicionada na tróclea para corrigir a inclinação e a forma da tróclea. Na trocleoplastia com sulco profundo, é realizada a criação de um sulco profundo na

tróclea para ajudar a manter a patela alinhada corretamente. Na trocleoplastia osteocondral, além do remodelamento da tróclea, também é realizada uma reconstrução da cartilagem danificada na área (LIPPACHER *et al.*, 2012).

A escolha do tipo de trocleoplastia depende da avaliação do médico especialista, levando em consideração a gravidade da instabilidade patelar, a anatomia do joelho do paciente e outros fatores individuais.

O tratamento pode envolver medidas conservadoras, como fisioterapia e uso de medicamentos, ou, em casos mais graves, um dos tipos de cirurgias destacados anteriormente. A operação de trocleoplastia tem como objetivo criar uma nova forma mais adequada para melhorar o encaixe da patela e restaurar a estabilidade articular. (CHAMBAT; LEMOS, 1997).

Figura 7 – Ilustração esquemática da pateloplastia (A, B, C) e da trocleoplastia (D, E, F).

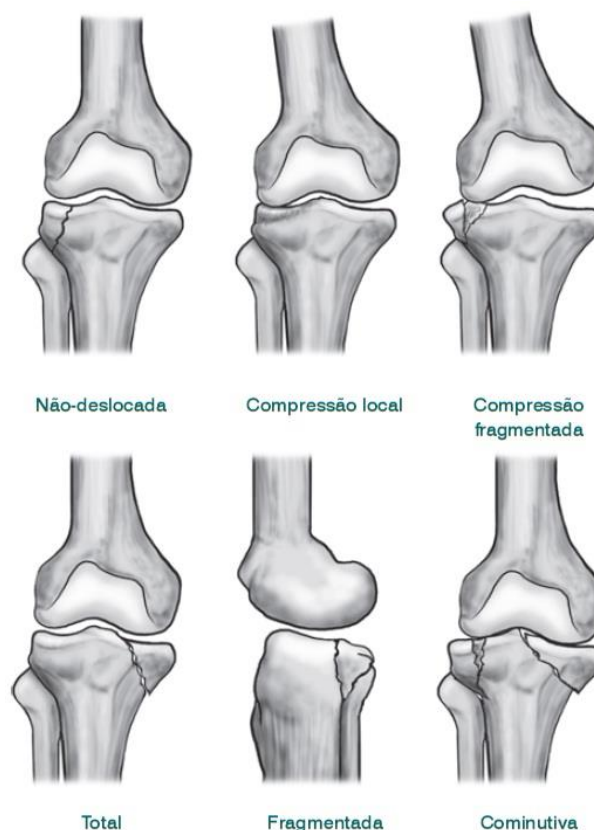


Fonte: Chambat e Lemos (1997)

2.3 Fraturas articulares

As fraturas articulares ocorrem quando há uma quebra ou interrupção do osso que compõe uma articulação. Essas fraturas podem afetar diversas articulações do corpo, como o joelho, ombro, cotovelo, tornozelo, entre outras. As fraturas articulares no joelho são lesões graves que podem ocorrer devido a trauma direto, como acidentes, quedas, ou devido a forças excessivas aplicadas à articulação durante atividades esportivas intensas. Essas fraturas podem afetar diferentes partes do joelho, incluindo a patela, o fêmur e a tíbia (EGOL *et al.*, 2004).

Figura 8 – Ilustração dos tipos de fraturas articulares da tíbia proximal.



Fonte: Camanho e Hernandez (2003)

Uma das fraturas articulares mais comuns no joelho é a fratura da patela. A patela pode ser quebrada em diferentes partes, como a porção superior, média ou inferior. Essas fraturas geralmente causam dor intensa, inchaço, incapacidade de movimentar o joelho e deformidade visível na região da rótula (FROSCH; SCHMELING, 2016).

Outro tipo de fratura articular no joelho é a fratura da extremidade distal do fêmur. Essa fratura ocorre na parte inferior do osso da coxa, onde ele se articula com a tíbia. Essas fraturas são frequentemente causadas por quedas de altura significativa ou por traumas de alta energia e podem resultar em dor intensa, inchaço, incapacidade de suportar peso e instabilidade no joelho (COURT-BROWN; CAESAR, 2006).

O tratamento das fraturas articulares no joelho pode variar dependendo do tipo, gravidade e localização da fratura. Em alguns casos, a redução da fratura (realinhamento ósseo) pode ser necessária, seguida de imobilização com uma tala, órtese ou gesso. Em casos mais complexos, a cirurgia pode ser necessária para fixar as partes quebradas do osso com o uso de placas, parafusos ou hastes intramedulares (EGOL *et al.*, 2004).

2.4 Esterilização cirúrgica

Existem diversos métodos de esterilização cirúrgica utilizados para garantir a eliminação de microrganismos, como bactérias, vírus e fungos, de materiais utilizados em procedimentos médicos. A escolha do método de esterilização depende do tipo de material, sua resistência ao processo, a eficácia desejada e as restrições operacionais. A seguir, serão apresentados alguns dos principais métodos de esterilização cirúrgica:

Esterilização por calor seco: Nesse método, o material é exposto a altas temperaturas, geralmente entre 160°C e 180°C, por um determinado período de tempo. O calor seco provoca a desnaturação de proteínas e a destruição dos microrganismos. É adequado para instrumentos metálicos e vidrarias, mas pode causar danos em materiais sensíveis ao calor (RUTALA; WEBER, 2008).

Esterilização por calor úmido ou autoclave: é um método amplamente utilizado. O material é exposto a vapor saturado sob pressão em temperaturas superiores a 121°C por um determinado tempo. O calor úmido penetra mais facilmente em materiais porosos e é eficaz na eliminação de microrganismos, incluindo esporos bacterianos. É um método rápido e eficiente, sendo utilizado em instrumentos cirúrgicos, tecidos e materiais resistentes ao calor (RUTALA; WEBER, 2008).

Esterilização por óxido de etileno: É um método adequado para materiais sensíveis ao calor e à umidade. O óxido de etileno é um gás que penetra em materiais porosos, destruindo microrganismos e esporos. O processo é realizado em câmaras específicas, geralmente em temperaturas entre 30°C e 60°C, por várias horas. Após a esterilização, é necessária a aeração para remover o gás residual, pois ele pode ser tóxico (RUTALA; WEBER, 2008).

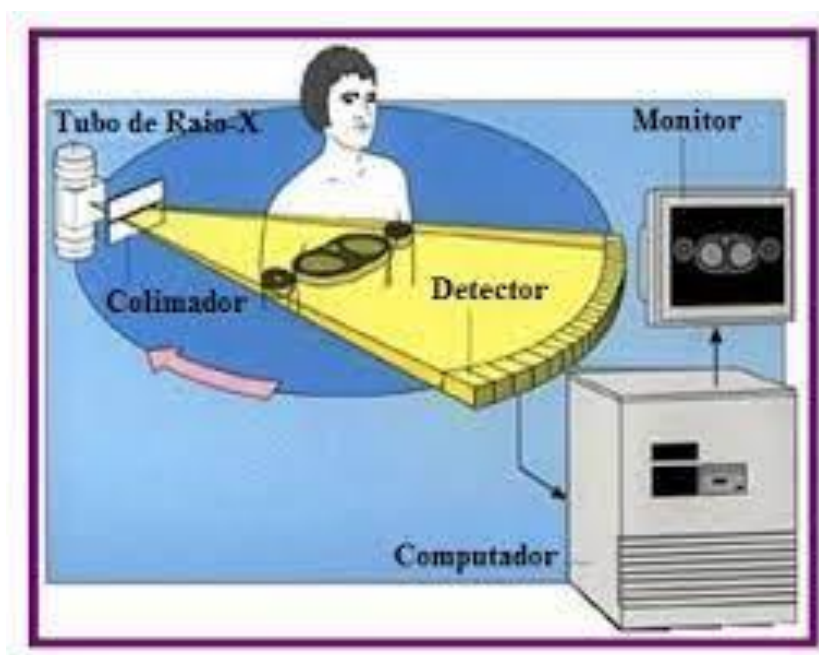
Esterilização por radiação ionizante: Utiliza radiação gama ou feixe de elétrons para destruir os microrganismos. A radiação penetra no material e danifica o DNA dos microrganismos, impedindo sua reprodução. É um método utilizado principalmente para materiais sensíveis ao calor, como dispositivos médicos descartáveis, luvas e seringas (RUTALA; WEBER, 2008).

Esterilização por plasma de peróxido de hidrogênio: É um método de baixa temperatura que utiliza peróxido de hidrogênio ativado por plasma para esterilização. O plasma de peróxido de hidrogênio é eficaz na destruição de microrganismos e é adequado para materiais sensíveis ao calor e à umidade, como dispositivos médicos eletrônicos (RUTALA; WEBER, 2008).

2.5 Tomografia computadorizada

A tomografia computadorizada (TC) é um exame de imagem que utiliza tecnologia de raios-X para produzir imagens transversais detalhadas do corpo humano ou de objetos. Ao contrário da radiografia convencional, que produz uma imagem bidimensional, a TC gera imagens em cortes transversais em alta resolução, proporcionando uma visualização mais precisa e detalhada das estruturas internas do corpo (WEBB; BRANT; MAJOR, 2019).

Figura 9 – Ilustração esquemática mostrando o funcionamento de uma tomografia computadorizada.



Fonte: Campelo (2019)

O funcionamento básico de um aparelho de tomografia computadorizada envolve o uso de um tubo de raios-X que gira em torno do paciente, emitindo feixes de raios-X em diferentes ângulos. Esses feixes passam pelo corpo e são detectados por um conjunto de detectores opostos ao tubo de raios-X. As informações capturadas pelos detectores são enviadas a um computador, que reconstrói as informações em forma de imagem tridimensional. Uma das principais diferenças entre a tomografia computadorizada e a tomografia convencional é a capacidade da TC de produzir imagens transversais de alta resolução em múltiplos planos. Além disso, a TC é capaz de capturar imagens em uma velocidade mais rápida, permitindo a visualização de órgãos e estruturas em movimento, como o coração durante um exame cardíaco (WEBB; BRANT; MAJOR, 2019).

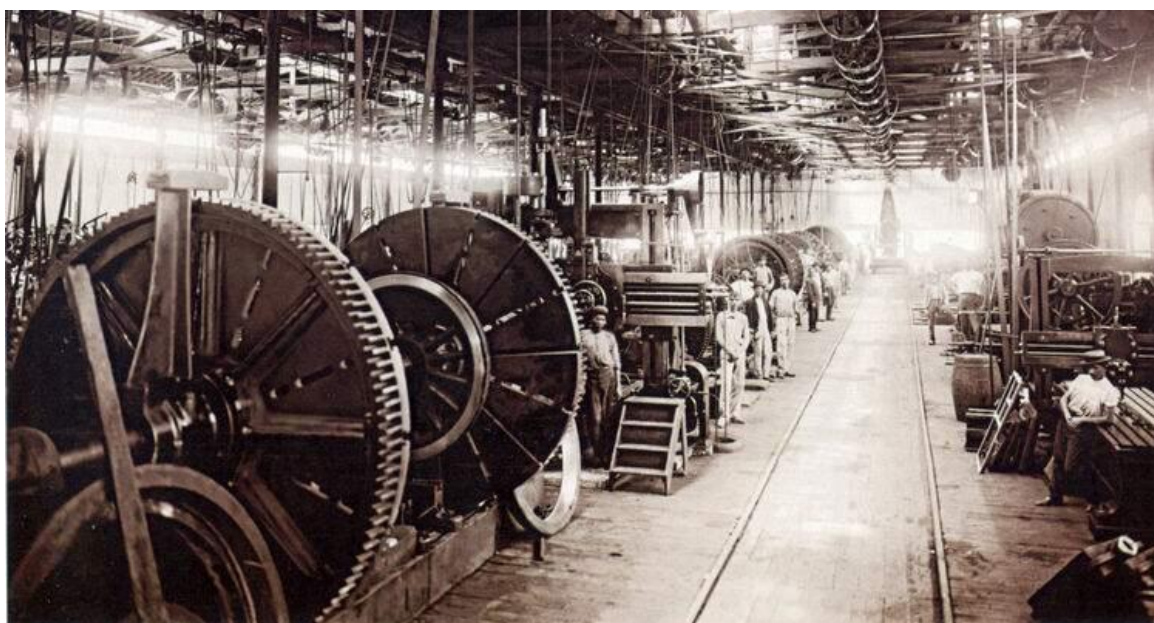
Outra diferença significativa é a capacidade da TC de diferenciar os tecidos com base em sua densidade, fornecendo informações mais detalhadas sobre a composição e a característica dos tecidos, como ossos, músculos, órgãos e vasos sanguíneos. Isso é possível devido à utilização de algoritmos complexos de reconstrução de imagem, que processam as informações coletadas pelos detectores e as transformam em uma imagem digitalizada (JIANG, 2009).

A tomografia computadorizada é amplamente utilizada em diversas áreas da medicina, como diagnóstico de doenças, planejamento cirúrgico, monitoramento de tratamentos e estudos de pesquisa. Seus principais benefícios incluem a capacidade de detectar lesões e anormalidades em estágios iniciais, a obtenção de imagens tridimensionais para uma melhor compreensão das estruturas anatômicas e a possibilidade de realizar exames rápidos e não invasivos (JIANG, 2009).

2.6 Indústria 4.0

A indústria 4.0 é um termo que surgiu para descrever a quarta revolução industrial, marcada pelo avanço tecnológico e digitalização na indústria. A revolução industrial teve início no século XVIII, na Inglaterra, e trouxe consigo a transição da produção manual para a produção mecanizada (MOKYR, 2018). A Figura 10 mostra um exemplo de uma fábrica posterior a esse marco.

Figura 10 – Fábrica com máquinas à vapor em 1880.



Fonte: Mendes (2018)

A utilização de máquinas a vapor, como a máquina a vapor de James Watt, permitiu o surgimento das fábricas e uma maior produção em massa. Essa primeira revolução industrial teve um impacto significativo na sociedade, na economia e nas condições de trabalho (MOKYR, 2018).

A segunda revolução industrial ocorreu no final do século XIX e início do século XX, impulsionada pela eletrificação, pela produção em larga escala e pelo desenvolvimento de novas tecnologias, como o motor a combustão interna e a linha de montagem. Isso resultou em uma produção industrial mais eficiente e em um aumento da produção em massa (LANDES, 2003). A Figura 11 mostra a primeira linha de montagem criada na história, na fábrica de automóveis de Henry Ford, dando origem a esse novo período.

Figura 11 – Linha de montagem de Henry Ford.



Fonte: Instituto Claro (2018)

A terceira revolução industrial, também conhecida como revolução digital, começou nas décadas de 1950 e 1960, com a introdução da eletrônica e dos computadores. A automação industrial e a informatização dos processos produtivos desempenharam um papel fundamental nessa revolução, permitindo a otimização e a integração dos sistemas de produção (DESCOMPLICA, 2015). A Figura 12 mostra uma linha de montagem automatizada da fábrica da montadora japonesa Toyota[®], que aplica esses conceitos.

Figura 12 – Automação em montadora de automóveis através de braços robóticos.



Fonte: Descomplica (2015)

A quarta revolução industrial busca a integração completa de sistemas físicos e cibernéticos, internet das coisas, inteligência artificial, computação em nuvem, big data, manufatura aditiva e outras tecnologias avançadas. A ideia central da indústria 4.0 é conectar máquinas, processos e pessoas em uma rede inteligente, permitindo a automação avançada, a tomada de decisões baseada em dados em tempo real e a personalização da produção (KAGERMANN *et al.*, 2013).

Na indústria 4.0, as fábricas se tornam mais inteligentes e autônomas, com máquinas que se comunicam entre si, otimizam a produção e se adaptam a mudanças no ambiente de forma autônoma. Os sistemas de produção podem ser monitorados e controlados remotamente, permitindo uma maior eficiência e flexibilidade. Além disso, a análise de dados em tempo real possibilita a identificação de padrões, a previsão de falhas e a otimização dos processos produtivos (KAGERMANN *et al.*, 2013).

A indústria 4.0 promete transformar radicalmente os modelos de negócios e as cadeias de valor, proporcionando maior eficiência, qualidade e personalização. No entanto, também traz desafios, como questões de segurança cibernética, privacidade de dados e impactos socioeconômicos (KAGERMANN *et al.*, 2013).

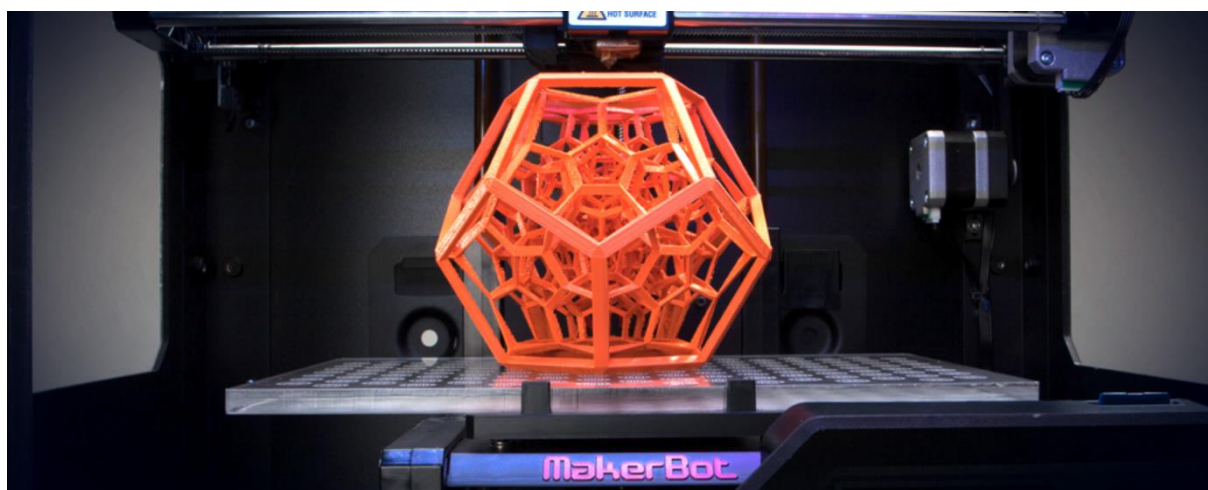
2.7 Impressão 3D

A impressão 3D, também conhecida como manufatura aditiva, é uma tecnologia que permite criar objetos tridimensionais a partir de modelos digitais, adicionando camadas

sucessivas de material até que a forma desejada seja alcançada. Essa tecnologia revolucionou a maneira como os objetos são produzidos, oferecendo vantagens como personalização, prototipagem rápida e redução de desperdícios (GIBSON *et al.*, 2021).

A impressão 3D utiliza diversos materiais, como plástico, metal, cerâmica e até mesmo tecidos biológicos, para criar objetos com diferentes formas, tamanhos e níveis de complexidade. A Figura 13 mostra um exemplo de impressão de plástico, como a que será utilizada neste estudo. Essa tecnologia tem sido aplicada em diversos setores, como medicina, arquitetura, manufatura, automotivo e aeroespacial, impulsionando a inovação e transformando processos de produção (GIBSON *et al.*, 2021).

Figura 13 – Impressão 3D através de equipamento da empresa MakerBot.



Fonte: Oaloo (2021)

O processo de impressão 3D envolve diversas etapas, desde o funcionamento da impressora até as escolhas de parâmetros no software que controla a impressora. De forma geral, esse processo precisa passar por cada uma destas etapas:

- Modelagem 3D: o primeiro passo é criar ou obter um modelo 3D digital do objeto que se deseja imprimir. Isso pode ser feito por meio de softwares de modelagem 3D ou por meio de escaneamento 3D de um objeto físico existente (GIBSON *et al.*, 2021).
- Preparação do modelo: o modelo 3D é então preparado para a impressão. Isso pode envolver a orientação correta do objeto, a geração de suportes para partes salientes ou em balanço, a definição da resolução de impressão e outras configurações específicas (GIBSON *et al.*, 2021).

- Preparação do filamento: o filamento, que é o material de alimentação da impressora 3D, deve ser inserido na extrusora da impressora e aquecido até a temperatura adequada para fusão. Isso geralmente é feito por meio de um sistema de alimentação de filamento e um sistema de aquecimento na impressora (GIBSON *et al.*, 2021).
- Impressão camada por camada: a impressora 3D começa a imprimir o objeto camada por camada. O filamento é alimentado na extrusora, onde é aquecido até o ponto de fusão e, em seguida, depositado em uma plataforma de impressão ou em camadas já impressas. Isso é repetido até que todas as camadas sejam impressas, formando o objeto desejado (GIBSON *et al.*, 2021).
- Controle dos parâmetros: durante o processo de impressão, é possível controlar diversos parâmetros da impressora por meio do software. Isso inclui a velocidade de impressão, a temperatura do bico e da plataforma de impressão, a densidade de preenchimento, a espessura das camadas, entre outros. Esses parâmetros podem ser ajustados para otimizar a qualidade da impressão e o tempo de impressão (GIBSON *et al.*, 2021).
- Resfriamento e remoção: após a conclusão da impressão, o objeto impresso deve ser resfriado antes de ser removido da plataforma de impressão. Isso permite que o material solidifique completamente e evita deformações. Em seguida, o objeto pode ser removido da plataforma e os suportes, se utilizados, podem ser removidos (GIBSON *et al.*, 2021).

Os parâmetros de impressão no software podem variar dependendo do software específico utilizado para controlar a impressora 3D. É necessário explorar as opções disponíveis no software e ajustá-las de acordo com as necessidades do projeto e as características do filamento utilizado (GIBSON *et al.*, 2021).

2.8 Slicer

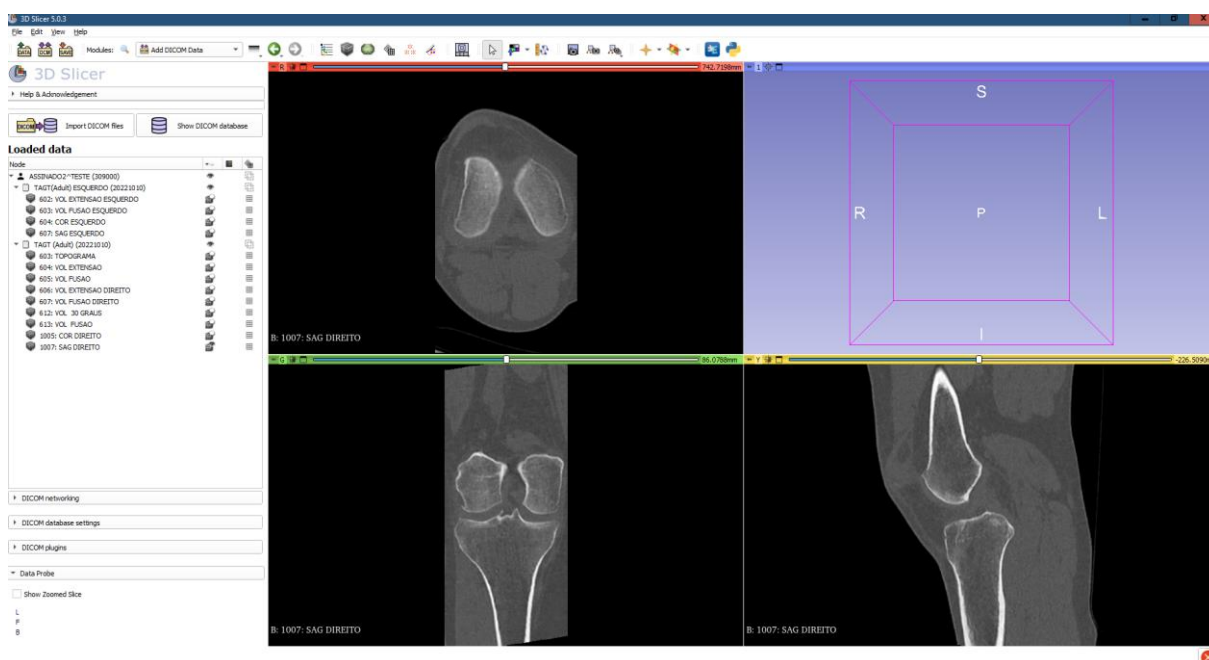
O software Slicer é uma poderosa ferramenta de processamento de imagens médicas amplamente utilizada para análise, visualização e segmentação de dados em medicina e pesquisa. Também conhecido como 3D Slicer, esse software de código aberto oferece uma plataforma flexível e extensível para a manipulação de dados médicos e o planejamento de procedimentos clínicos (FEDOROV *et al.*, 2012).

O Slicer possui recursos avançados que permitem a importação e visualização de várias modalidades de imagens médicas, como tomografia computadorizada, ressonância magnética

e ultrassonografia. Além disso, ele oferece ferramentas para segmentação, permitindo a identificação e o isolamento de estruturas de interesse, como órgãos ou tumores, em um volume de imagem (ZHANG *et al.*, 2020).

Uma das principais características do Slicer é sua capacidade de realizar visualizações tridimensionais interativas dos dados médicos, possibilitando a exploração e a análise detalhada das estruturas anatômicas. Ele também oferece uma ampla gama de módulos e extensões que expandem suas funcionalidades, como módulos para análise de difusão, registro de imagens e simulação cirúrgica (ZHANG *et al.*, 2020).

Figura 14 – Slicer em sua página inicial, após upload de uma tomografia de joelho.



Fonte: Elaborado pelo autor

O Slicer é amplamente utilizado em diversas áreas da medicina e da pesquisa, incluindo radiologia, oncologia, neurologia, cirurgia guiada por imagem e desenvolvimento de dispositivos médicos. Sua natureza de código aberto e sua comunidade ativa de desenvolvedores garantem sua contínua evolução e melhoria, proporcionando uma ferramenta valiosa para a comunidade médica e científica (KIKINIS; PIEPER; VOSBURGH, 2013).

3 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

A utilização de biomodelos em 3D tem se mostrado uma ferramenta valiosa para aprimorar o planejamento cirúrgico e a tomada de decisão em procedimentos relacionados ao joelho. No artigo "Three-Dimensional Reproductions for Surgical Decision-Making in the Treatment of Recurrent Patella Dislocation", Yu *et al.*, (2023) exploraram o uso de modelos impressos em 3D para auxiliar no tratamento da luxação recorrente da patela. O estudo demonstrou que os biomodelos 3D forneceram informações anatômicas detalhadas, permitindo aos cirurgiões planejar estratégias personalizadas de reconstrução e correção da patela.

Outra abordagem inovadora é apresentada no trabalho "My Knee MIS Minimally Invasive Cutting Blocks", que propõe o uso de blocos de corte personalizados fabricados por impressão 3D para procedimentos de artroplastia do joelho minimamente invasiva. Neste estudo, a equipe desenvolveu uma técnica que permite a criação de guias de corte específicos para cada paciente, baseados em dados de imagem pré-operatórios. Esses guias auxiliam o cirurgião na realização precisa de incisões ósseas, facilitando a colocação de implantes e melhorando a eficiência e os resultados da cirurgia.

Esses trabalhos destacam a crescente importância e aplicação dos biomodelos em 3D no campo da cirurgia de joelho. Os modelos impressos em 3D fornecem uma representação física precisa da anatomia do paciente, permitindo uma visualização mais detalhada e uma melhor compreensão das estruturas envolvidas. Isso pode levar a um planejamento mais preciso, redução de erros cirúrgicos, melhor ajuste de implantes e, em última instância, resultados clínicos aprimorados.

3.1 Reproduções tridimensionais para tomada de decisão cirúrgica no tratamento da luxação recorrente da patela

O artigo "Reproduções tridimensionais para tomada de decisão cirúrgica no tratamento da luxação recorrente da patela", ou em seu idioma original, "Three-Dimensional Reproductions for Surgical Decision-Making in the Treatment of Recurrent Patella Dislocation", explora um método inovador para auxiliar na tomada de decisões cirúrgicas no tratamento da luxação recorrente da patela. O estudo propõe o uso de tecnologias de impressão 3D para criar reproduções tridimensionais altamente detalhadas e personalizadas do joelho afetado. Para isso, são utilizadas imagens de tomografia computadorizada ou ressonância magnética do paciente, que são processadas e convertidas em modelos digitais tridimensionais do joelho (YU *et al.*, 2023).

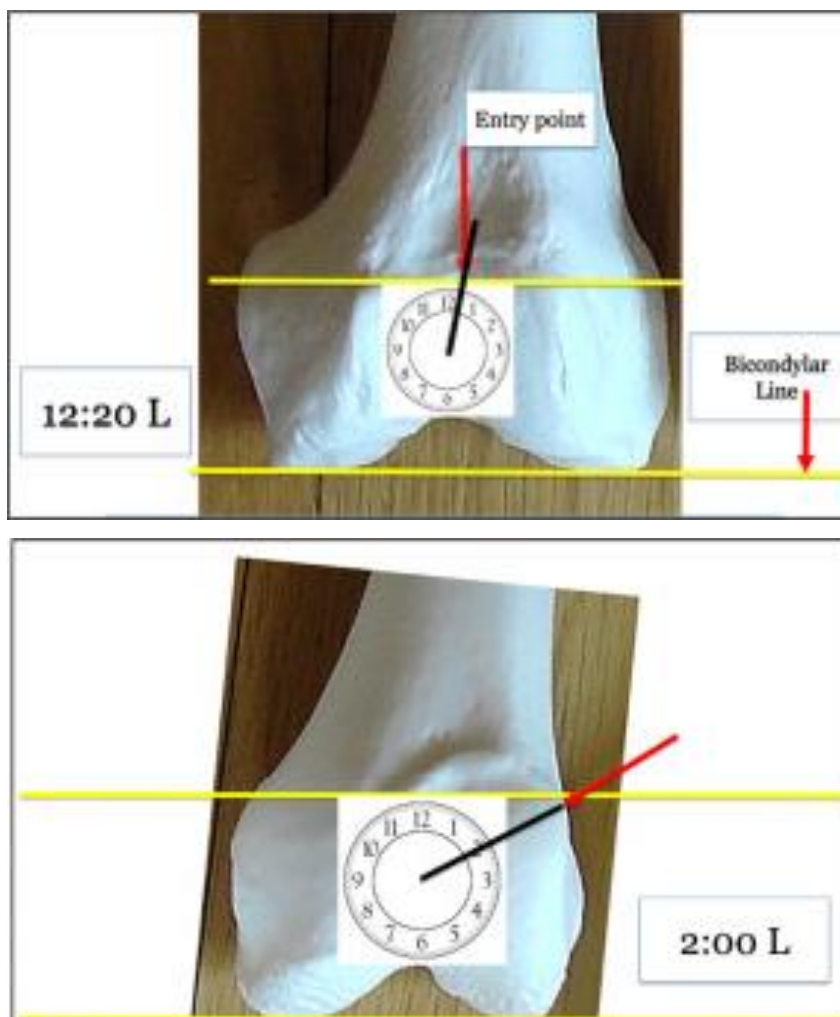
Esses modelos são então impressos em uma impressora 3D, resultando em uma réplica física exata da anatomia do paciente. Essas reproduções tridimensionais proporcionam uma visualização e compreensão aprimoradas das estruturas ósseas, articulares e dos tecidos moles envolvidos na luxação recorrente da patela. Com base nessas reproduções, os cirurgiões podem realizar um planejamento pré-operatório mais preciso. Eles podem avaliar a posição anatômica da patela, identificar possíveis lesões ligamentares ou cartilaginosas e simular diferentes abordagens cirúrgicas, como a reconstrução ligamentar ou realinhamento ósseo (YU *et al.*, 2023).

A analogia do mostrador do relógio é proposta como método alegórico para apontar a posição do curso entre patela e tróclea femoral. Baseia-se na ideia de que a posição da patela em relação à tróclea femoral pode ser descrita utilizando-se referências de horas em um relógio. Em vez de usar termos complexos e técnicos para descrever a posição angular da patela, essa analogia simplifica a comunicação visualizando a posição em termos mais intuitivos. No método, a patela é dividida em doze setores, semelhantes às horas de um mostrador de relógio. O centro da patela é considerado o "meio-dia", e os setores são numerados em sentido horário, como 1h, 2h, 3h e assim por diante até 12h (YU *et al.*, 2023).

Ao descrever a posição da patela sobre a tróclea, usando essa analogia, os cirurgiões podem facilmente se referir a um determinado setor em termos de horas em um relógio. Por exemplo, se a patela estiver deslocada em direção ao setor das 3h, isso indica que ela está lateralizada em relação à tróclea femoral. Essa abordagem simplificada e visualmente intuitiva facilita a comunicação entre os membros da equipe cirúrgica, permitindo que todos tenham uma compreensão clara da posição da patela. Isso é especialmente útil durante as discussões pré-operatórias e durante o planejamento da cirurgia, ajudando os cirurgiões a determinar a abordagem mais adequada para corrigir a luxação recorrente da patela, que pode incluir a trocleoplastia (YU *et al.*, 2023).

Ao ter acesso a modelos físicos do joelho do paciente, os cirurgiões podem manipular e examinar diretamente as estruturas, avaliar a estabilidade articular e prever o resultado da cirurgia com mais confiança. Isso permite uma abordagem mais personalizada e adaptada a cada caso específico, resultando em melhores resultados cirúrgicos e uma maior satisfação dos pacientes (YU *et al.*, 2023).

Figura 15 – Analogia do mostrador do relógio aplicada em biomodelo.



Fonte: Yu *et al.* (2023)

3.2 MyKnee® MIS Surgical Technique

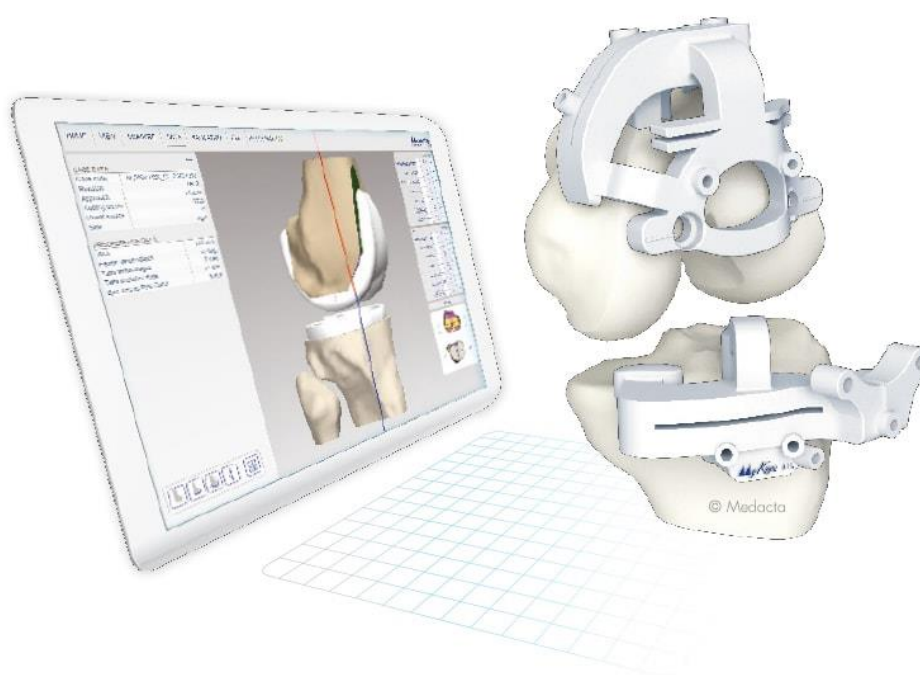
A empresa MyKnee® é conhecida por seu método inovador de "minimally invasive surgery" (cirurgia minimamente invasiva) no tratamento de problemas relacionados ao joelho. Esse método utiliza tecnologias avançadas, como a impressão 3D, para melhorar a precisão e os resultados das cirurgias. São criados modelos personalizados do joelho do paciente a partir de imagens médicas, como tomografia computadorizada ou ressonância magnética, que fornecem uma representação precisa da anatomia da articulação afetada (MEDACTA INTERNATIONAL, [2012]).

Com base nessas imagens, os especialistas da MyKnee® são capazes de desenvolver modelos virtuais do joelho em um ambiente de software. Em seguida, esses modelos são convertidos em arquivos adequados para impressão 3D, que são enviados para uma impressora especializada. A impressão 3D permite que a empresa crie modelos físicos tridimensionais do

joelho do paciente, com detalhes precisos das estruturas ósseas, articulares e dos tecidos moles envolvidos. Esses modelos são impressos em materiais de alta qualidade, como resinas ou polímeros, que têm características semelhantes aos tecidos humanos (MEDACTA INTERNATIONAL, [2012]).

Esses modelos impressos em 3D são usados como ferramentas durante a cirurgia minimamente invasiva. Eles auxiliam os cirurgiões a planejar e praticar a intervenção antes mesmo de entrar no ambiente operatório, permitindo uma abordagem mais precisa e personalizada. Durante a cirurgia, os modelos impressos em 3D são guias para orientar o cirurgião na colocação correta dos instrumentos de corte e implantes, bem como para avaliar a anatomia do paciente em tempo real. Essa abordagem proporciona um maior nível de precisão e permite que o cirurgião tome decisões informadas com base em dados específicos do paciente (MEDACTA INTERNATIONAL, [2012]).

Figura 16 – Ilustração esquemática dos guias de corte impressos em 3D fabricados pela Medacta International.



Fonte: Medacta International ([2012])

Ao utilizar a impressão 3D como parte integrante de seu método de cirurgia minimamente invasiva, a MyKnee® oferece uma abordagem avançada e personalizada para o tratamento de problemas no joelho. Essa tecnologia permite uma melhor compreensão da

anatomia do paciente, facilita o planejamento pré-operatório e melhora os resultados cirúrgicos (MEDACTA INTERNATIONAL, [2012]).

3.3 Impressão tridimensional em cirurgia ortopédica: uma revisão de escopo

A impressão 3D tem desempenhado um papel crucial no aprimoramento do planejamento operatório para fraturas articulares do joelho. Através dessa tecnologia, é possível criar modelos tridimensionais precisos dos ossos afetados, permitindo uma melhor compreensão da lesão e uma visualização mais clara das estruturas anatômicas envolvidas. Esses modelos impressos em 3D fornecem aos cirurgiões uma representação física e tangível da fratura, permitindo uma análise mais detalhada e uma melhor avaliação pré-operatória. Com isso, os cirurgiões podem planejar a abordagem cirúrgica de forma mais precisa, identificando a melhor estratégia de redução e fixação da fratura (LEVESQUE *et al.*, 2020).

Além disso, os modelos impressos em 3D também auxiliam na comunicação entre a equipe cirúrgica e o paciente, permitindo uma explicação mais clara e visual dos procedimentos planejados. Isso ajuda a aumentar a compreensão do paciente sobre a lesão e o processo de tratamento, o que pode contribuir para uma melhor adesão e satisfação do paciente (LEVESQUE *et al.*, 2020).

Ainda de acordo com Levesque *et al.*, (2020), os benefícios da impressão 3D no planejamento operatório de fraturas articulares do joelho incluem a redução do tempo cirúrgico, a melhoria da precisão na colocação de implantes e a minimização de complicações pós-operatórias.

Dentro do conjunto da literatura referente ao assunto, o artigo “Impressão tridimensional em cirurgia ortopédica: uma revisão de escopo”, ou em seu idioma original, “Three-dimensional printing in orthopaedic surgery: a scoping review” realizou uma revisão abrangente sobre a utilização da impressão 3D no campo da ortopedia. No artigo, os autores exploram diversas aplicações da impressão 3D na cirurgia ortopédica, incluindo a fabricação de modelos anatômicos personalizados para o planejamento pré-operatório, a produção de implantes e próteses sob medida, a criação de guias cirúrgicos e instrumentos personalizados, e até mesmo a bioimpressão de tecidos e órgãos (LEVESQUE *et al.*, 2020).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Filamento

A impressão 3D tem sido amplamente utilizada na fabricação de peças e dispositivos médicos personalizados, incluindo materiais utilizados em procedimentos cirúrgicos. A base da impressão consiste num material polimérico em formato de filamento, como os apresentados na Figura 17, ou numa liga metálica. No entanto, é importante destacar que nem todos os materiais impressos em 3D são adequados para esterilização cirúrgica. Ao escolher um material, é essencial considerar sua capacidade de resistir ao processo de esterilização e manter suas propriedades físicas e mecânicas. Nem todos são resistentes à altas temperaturas ou aos produtos químicos utilizados nesse processo (VENTOLA, 2014).

Figura 17 – Bobinas de filamentos plásticos utilizados em impressoras 3D.



Fonte: Oaloo (2021)

Os materiais mais comumente usados na impressão 3D para aplicações médicas incluem polímeros como o poliuretano, o polietileno, o polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE), o polipropileno e o nylon. Além disso, existem também materiais metálicos, como ligas de titânio, que podem ser utilizados para imprimir implantes e dispositivos médicos. No entanto, alguns polímeros podem sofrer deformação, perda de propriedades mecânicas ou

liberação de substâncias tóxicas durante o processo. Os metálicos, por outro lado, são mais resistentes a esses processos, mas podem exigir tratamentos adicionais para garantir sua esterilidade (AHN *et al.*, 2010).

É importante que os fabricantes de dispositivos médicos impressos em 3D levem em consideração essas limitações e realizem estudos de compatibilidade de materiais para garantir que os dispositivos sejam seguros e eficazes após a esterilização. Testes específicos, como testes de envelhecimento acelerado e testes de resistência química, podem ser conduzidos para avaliar a capacidade do material de suportar o processo de esterilização sem comprometer suas propriedades, observando com atenção o detalhamento técnico fornecido pelo fabricante e os protocolos de segurança dos procedimentos envolvidos (AHN *et al.*, 2010).

A seguir, serão expostos alguns dos materiais disponíveis em formato de filamento para impressão 3D, discutindo a respeito da viabilidade do material para ser utilizado neste estudo.

PLA (ácido polilático): o PLA é um material popular para impressão 3D, mas pode sofrer deformação durante o processo de esterilização devido à sua baixa temperatura de amolecimento. Além disso, a liberação de ácido lático durante a esterilização pode ser um problema em alguns casos (ASHIMA *et al.*, 2021).

ABS (acrilonitrila butadieno estireno): o ABS é outro polímero comumente usado, mas sua resistência à esterilização é limitada. O ABS tende a amolecer em temperaturas mais altas e pode sofrer deformação ou perda de propriedades mecânicas durante a esterilização (ASHIMA *et al.*, 2021).

PEEK (polieteretercetona): o PEEK é um polímero de alta performance amplamente utilizado em aplicações médicas. Ele possui excelente resistência térmica e química, o que o torna adequado para esterilização em altas temperaturas, como autoclave (ASHIMA *et al.*, 2021).

ULTEM (polieterimida): o ULTEM é outro polímero resistente que pode ser utilizado em aplicações médicas. Ele é capaz de suportar temperaturas de esterilização mais elevadas e não tende a sofrer deformação significativa ou perda de propriedades mecânicas durante o processo de esterilização (ASHIMA *et al.*, 2021).

Segundo Diment, Thompson e Bergmann (2017), os materiais PEEK e ULTEM são física e quimicamente capazes de suportar as esterilizações autoclave, óxido de etileno e radiação gama: não tenderão a derreter sob altas temperaturas e pressões nem tender a produzir ou eliminar compostos químicos durante estes procedimentos. Essas condições os tornam viáveis a participar deste estudo.

Apesar de toda essa viabilidade, esses materiais tendem a ser mais caros e a precisar de impressoras mais caras para serem impressos, como o equipamento mostrado na Figura 18. Nesse ponto, as técnicas relacionadas à impressão 3D farão a diferença. Como em todo este estudo, a parte relevante do biomodelo será sempre a casca, ou parte externa, o preenchimento interno pode ser testado utilizando diferentes estruturas pré-definidas. Essas técnicas são vitais para definir os principais parâmetros que farão diferença no preço para o destinatário final, como tempo de impressão e peso do protótipo impresso.

Figura 18 – Impressora 3D CreatBot PEEK-300, capaz de imprimir PEEK e ULTEM.



Fonte: Topink3D ([202-?])

Essas questões vão variar entre cada impressão, o que não implica em nenhuma mudança no material necessário, que continuam a ser o PEEK ou o ULTEM. Preferencialmente, o último costuma custar metade do preço do PEEK. Isso não o torna barato, porém deixa-o mais acessível. Além do mais, caso não seja necessário adentrar com o protótipo no ambiente cirúrgico, é possível utilizar um filamento mais simples como o ABS.

4.2 Software Slicer

Para obter uma imagem 3D de um joelho utilizando o software Slicer a partir de uma tomografia computadorizada, é possível seguinte passo a passo:

- Importar os dados da tomografia computadorizada (TC) para o software Slicer, verificando a qualidade dos dados e fazendo os ajustes necessários.
- Utilizar as ferramentas de segmentação do Slicer para segmentar as estruturas de interesse do joelho, como ossos, cartilagem e tecidos moles através de técnicas manuais ou algoritmos de segmentação automática disponíveis no software.
- Definir as segmentações conforme necessárias, garantindo que as estruturas estejam corretamente delineadas.
- Com base nas segmentações, criar modelos 3D das estruturas segmentadas, utilizando as ferramentas de modelagem do Slicer para criar superfícies 3D suaves e realistas.
- Verificar a qualidade e precisão do modelo 3D e fazer ajustes, se necessário, explorando-o em diferentes ângulos e perspectivas para uma visualização mais completa.
- Exportar o modelo 3D do joelho e as análises realizadas em formato STL para prosseguir com a impressão.

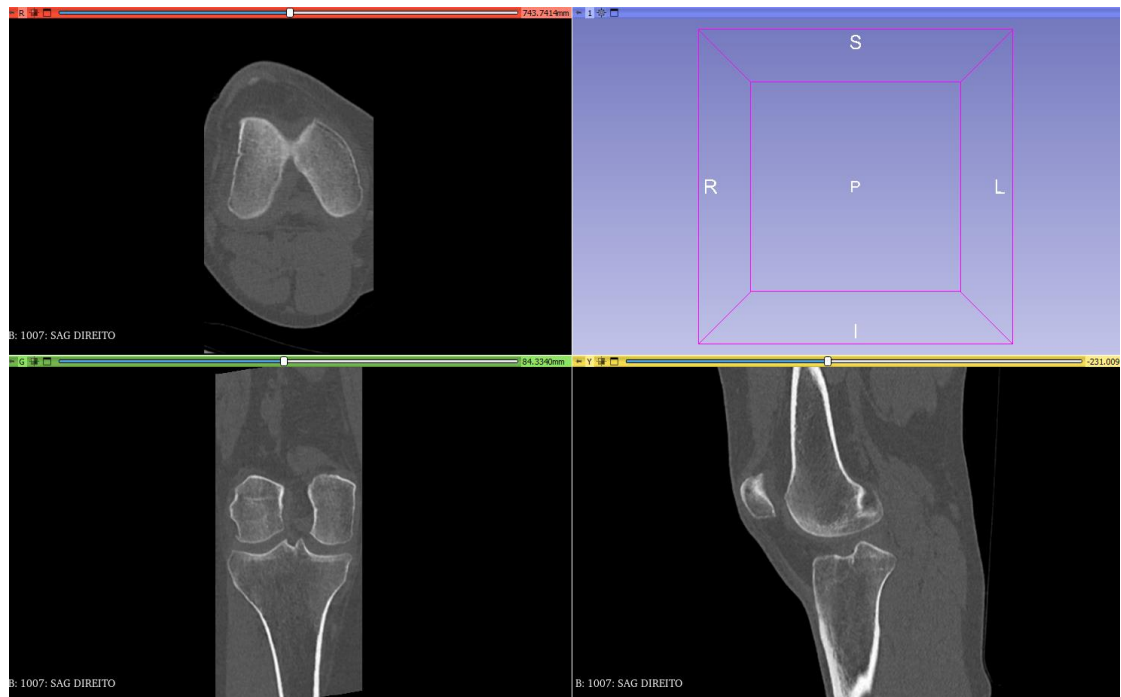
É importante ressaltar que o processo de criação de um modelo 3D a partir de uma tomografia computadorizada pode variar dependendo da complexidade do caso, das características dos dados de imagem e do objetivo da análise (FEDOROV *et al.*, 2012).

4.3 Desenvolvimento

A partir das ideias e definições já apresentadas, segue abaixo o passo a passo para desenvolver um biomodelo em impressão 3D, utilizando preferencialmente o filamento em polímero ULTEM em casos de artroplastia e filamento ABS nas outras situações.

Uma tomografia foi obtida em parceria com um centro de exames da cidade de Sorocaba. O paciente não foi identificado por motivos de privacidade e a solicitação ao centro deixou claro que os propósitos de obter um exemplar deste exame eram puramente acadêmicos. Essa tomografia foi inserida no software Slicer:

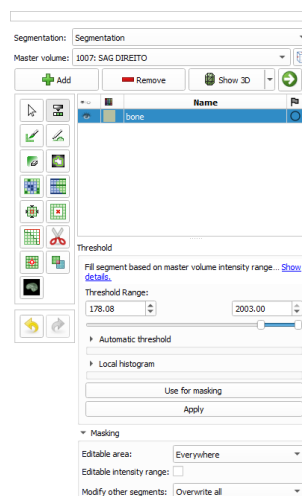
Figura 19 – Upload no software Slicer da tomografia computadorizada solicitada.



Fonte: Elaborado pelo autor

Observando a figura acima, nota-se a presença de barras de rolagem sobre cada uma das vistas. Elas existem para correr entre as imagens existentes no exame tiradas a partir do mesmo ponto de vista. Foi informado através do centro de exames que este joelho sofre de artrose. Para esse exemplo, seria necessária uma operação de artroplastia.

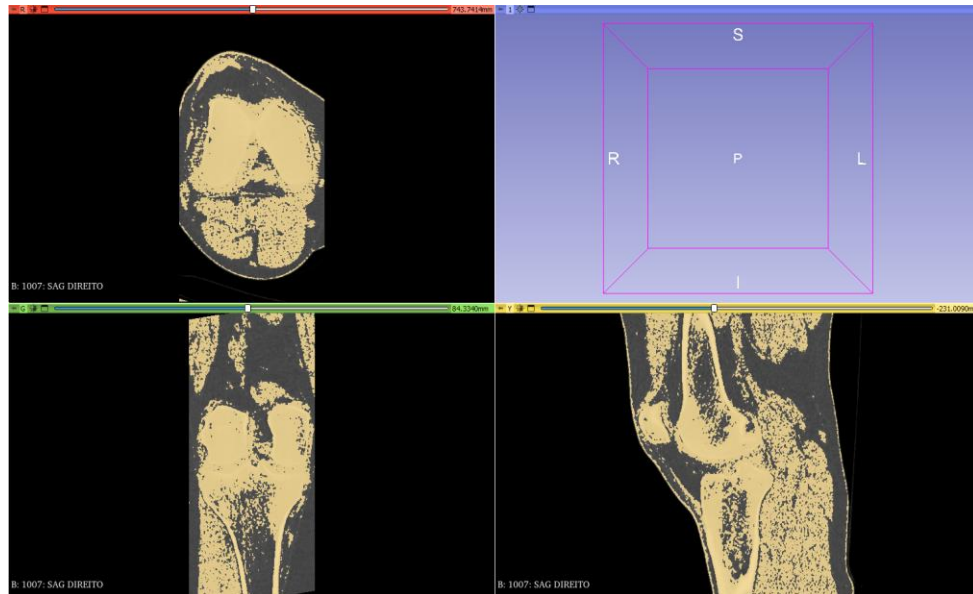
Figura 20 – Menu de segmentação e calibração do software Slicer.



Fonte: Elaborado pelo autor

Feito isso, é necessário realizar a segmentação. A figura abaixo mostra as configurações desta etapa. Além de adicionar o segmento que o software reconhece como tecido ósseo, é necessário calibrar a captação através da movimentação da barra *threshold range*. A calibração é realizada até o momento de obter algo ligeiramente além da camada óssea.

Figura 21 – Tomografia computadorizada inserida no software Slicer passando pelo processo de segmentação do tecido ósseo em um momento de calibragem superdimensionada.



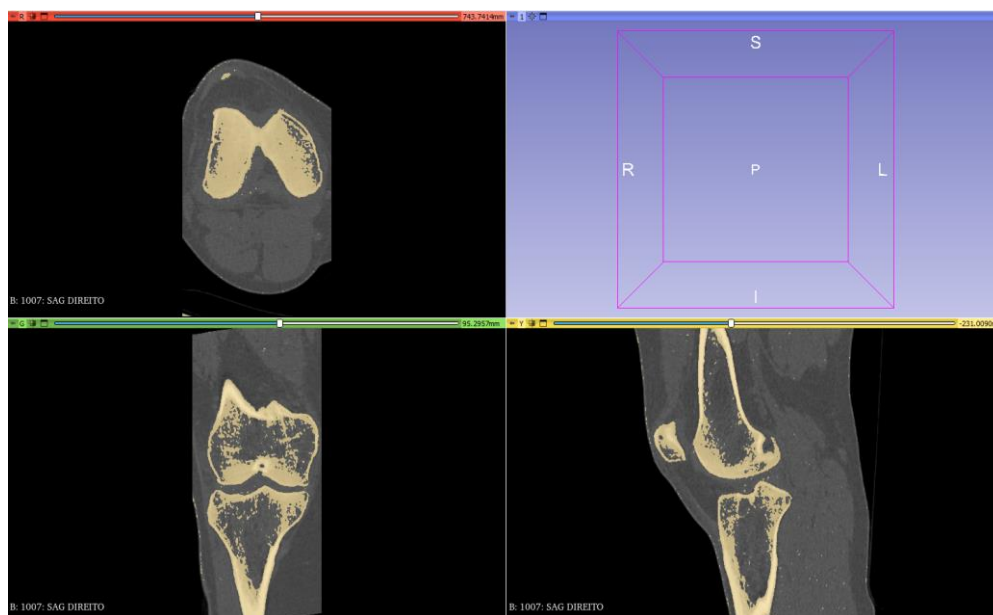
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 22 – Tomografia computadorizada inserida no software Slicer passando pelo processo de segmentação do tecido ósseo em um momento de calibragem subdimensionada.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 23 – Tomografia computadorizada inserida no software Slicer passando pelo processo de segmentação do tecido ósseo em um momento de calibragem ideal para os propósitos da impressão 3D.



Fonte: Elaborado pelo autor

As ferramentas para segmentação dentro do Slicer diferenciam a grande variedade de tecidos captados pela tomografia. Separar os ossos, parte necessária para prosseguimento do estudo, é um dos parâmetros pré-estabelecidos pelo programa. Após selecioná-la, é importante graduar a captação para o exame específico do momento, visto que é algo que pode variar de um exame para outro da mesma máquina, ou de duas máquinas diferentes avaliando o mesmo joelho.

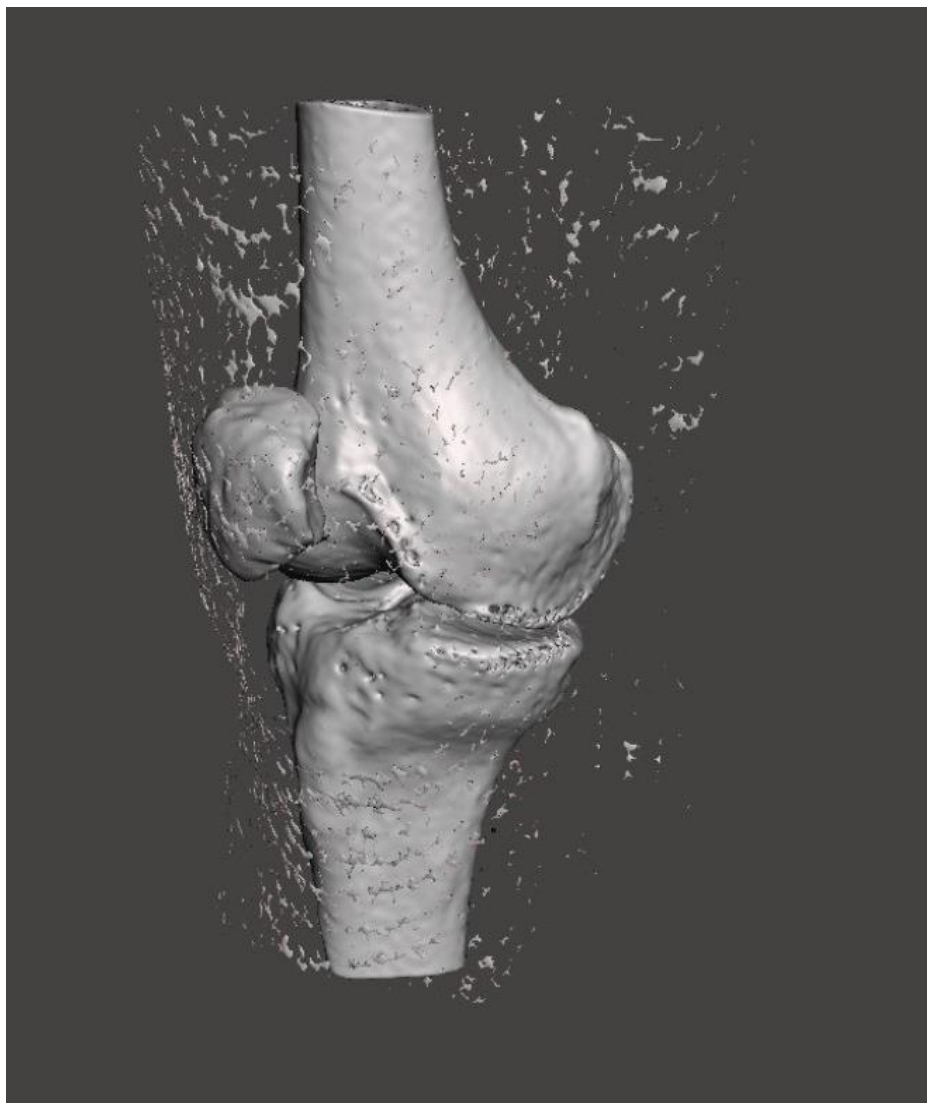
Aqui entra um ponto importante: para que o resultado seja fidedigno ao nível de qualidade de um biomodelo, ou seja, uma impressão fiel ao estado físico atual, é necessário que a espessura da casca do osso apresentado tenha uma certa espessura. Para isso, a captação precisa avançar além do necessário, a ponto de trazer conteúdos além dos ossos, dando um aspecto sujo ao elemento 3D. Porém, ele será lapidado posteriormente.

Por meio da imagem já calibrada, extrai-se o primeiro modelo 3D. Esse processo é facilitado pelo próprio software, tendo a montagem de sólidos tridimensionais a partir de exames de imagem como seu principal propósito.

Após extrair arquivo STL contendo a imagem 3D, inseri-lo em um software para impressão 3D. Nesse ponto, além de imputar parâmetros que reduzam custos e tempo de impressão mantendo a qualidade do produto final, será realizada a limpeza mencionada

anteriormente, retirando da imagem fragmentos extras que não compõe tecido ósseo. São facilmente identificáveis observando a tomografia computadorizada original.

Figura 24 – Resultado da extração do modelo 3D fornecido pelo Slicer.

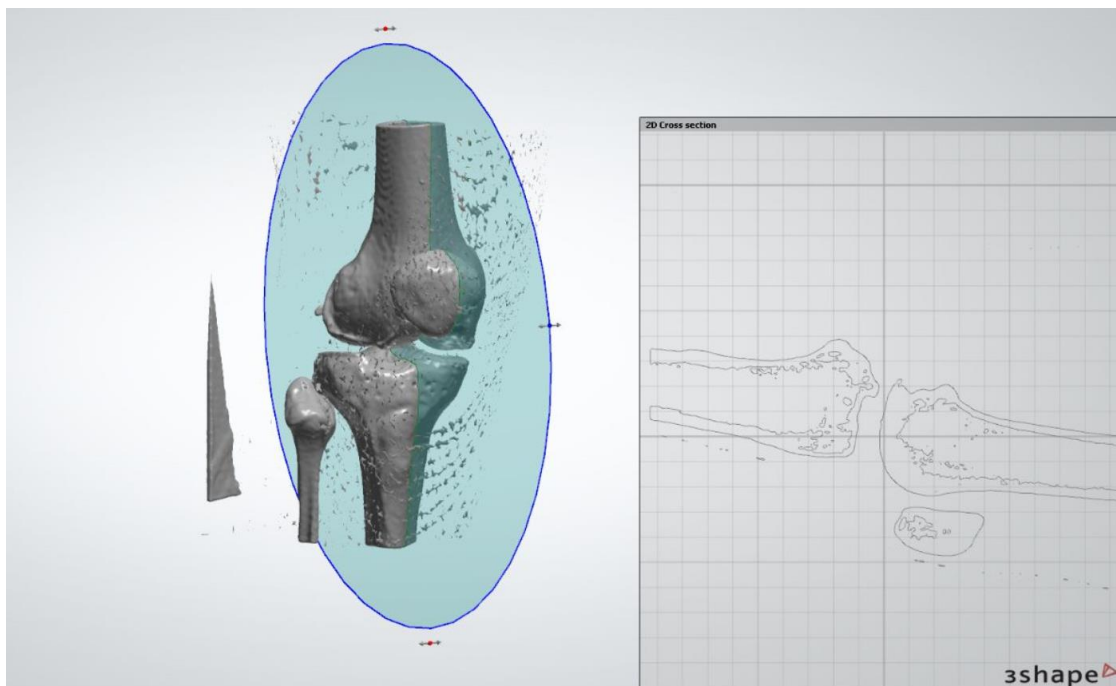


Fonte: Elaborado pelo autor

Mesmo que ainda não tratado, é possível já observar nesse modelo 3D a presença da artrose. A porosidade localizada nos cantos superior esquerdo da tibia e inferior esquerdo do fêmur em relação à visão frontal, confere com o diagnóstico fornecido.

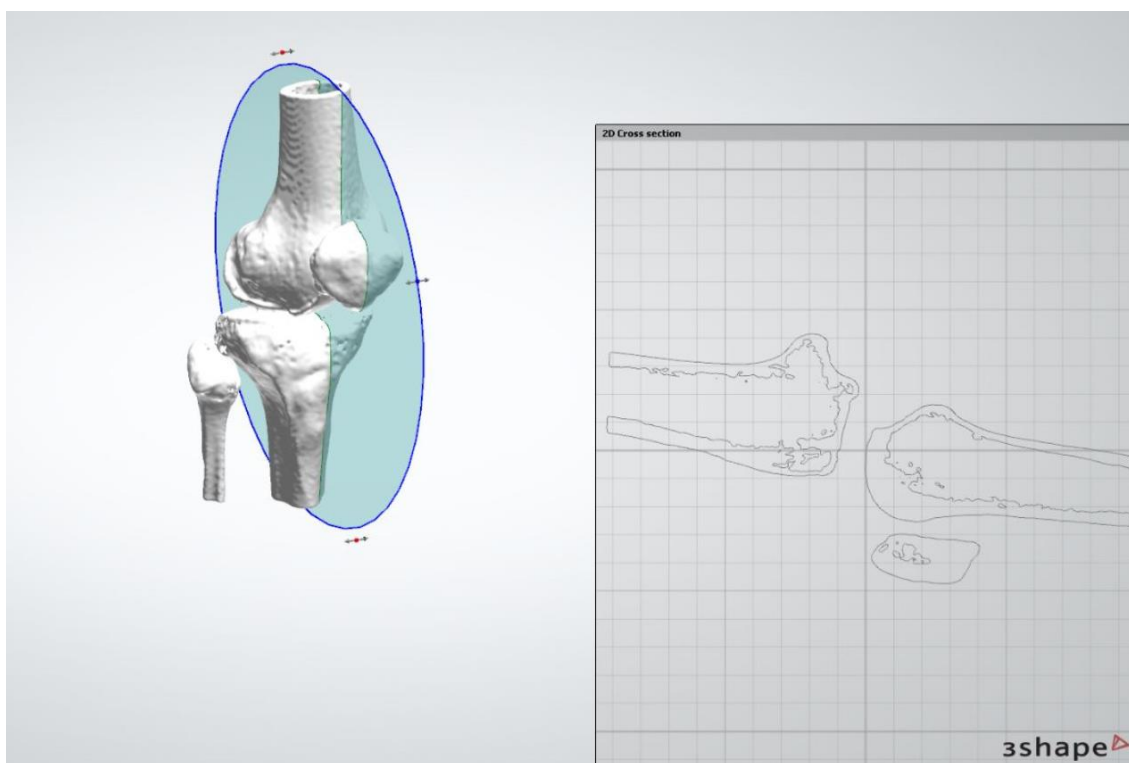
O próximo passo é realizar a limpeza da imagem. Essa etapa pode ser feita diretamente no software de impressão 3D, afinal, o arquivo da imagem acima já possui a extensão correta para tal procedimento.

Figura 25 – Elemento 3D antes da etapa de limpeza da imagem, juntamente com um corte longitudinal que permite visualizar a espessura da parede óssea a ser impressa.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 26 – Elemento 3D após a etapa de limpeza da imagem, juntamente com um corte longitudinal que permite visualizar a espessura da parede óssea a ser impressa.



Fonte: Elaborado pelo autor

Antes de enviar para a impressão, existe um passo extra caso esteja sendo feito o planejamento para uma artroplastia: o elemento 3D deve ser enviado a um software de desenho 3D, juntamente com o resultado do escaneamento 3D do guia de corte planejado. Dentre os disponíveis no mercado, é comprovadamente mais eficiente o trabalho através do Solid Works[®], porém existe a liberdade de escolha e a disponibilidade do software como pontos importantes nessa etapa. O guia de corte consiste em duas peças que posicionam a serra cirúrgica a cortar nos locais corretos: uma peça fixada na base femoral e outra no platô tibial.

Neste software devem ser criadas pequenas superfícies em negativo localizadas nas regiões de apoio do guia de corte no joelho. Essas superfícies recém-criadas são conectadas no desenho do guia ao redor dos pontos de fixação, segundo a orientação do ortopedista responsável. Essa combinação do guia com as superfícies deve ser extraída em STL para ser enviada a impressão 3D. O propósito dessa peça criada é fazer com que o guia de corte tenha apenas uma posição possível de fixação.

Nessa parte do processo, uma decisão deveria ser tomada. O tempo disponível para imprimir protótipos, o material presente e a impressora acessível permitiram a impressão física de apenas um protótipo, em filamento ABS, que não pode ser esterilizado para ambiente cirúrgico.

Em termos já apresentados, para casos de artrose, é necessário levar o protótipo para software de desenho 3D e criar uma superfície do joelho em formato negativo em torno dos pontos de fixação do guia de corte. Porém, não possuindo filamento de polímero ULTEM à disposição, a direção tomada foi a de testar a eficiência da impressão do biomodelo.

Tendo agora um arquivo preparado para impressão 3D, no software adequado, com o filamento correto disponível para a máquina, é iniciada a impressão. O produto final deve estar disponível em uma questão de horas. É importante salientar que o técnico responsável pela impressora pode escolher dividir a impressão em várias impressões a serem coladas uma a outra no final do processo. Este procedimento é válido, desde que feito com cuidado para evitar perdas de medidas e falhas no aspecto visual final.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A impressão foi realizada em algumas horas com o apoio do Programa de Educação Tutorial, ou PET, da Unesp Sorocaba. A qualidade do material se mostrou acima do esperado, mostrando detalhes de uma artrose de maneira clara.

Figura 27 – Resultado da impressão do biomodelo completo do joelho disponibilizado.



Fonte: Elaborado pelo autor

É importante ressaltar que a impressora utilizada é um equipamento artesanal, criado a partir de um projeto de código aberto e peças compradas separadamente. O filamento utilizado foi um ABS. Considerando essas características, alguns pontos puderam ser analisados:

- Foi possível utilizar um dos conjuntos mais baratos possíveis disponíveis no mercado, montado em laboratório, para realizar uma impressão com qualidade significativa.
- O filamento ABS se mostrou capaz de sustentar pequenos detalhes de artroses sem partir ou fragilizar.

Considerando essas premissas, compreende-se que uma eventual aplicação comercial renderia um produto consideravelmente mais em conta do que os concorrentes estrangeiros. Isso permitiria ao ortopedista qualidades similares, em um tempo menor e com um contato muito mais próximo, devido a sobrepor barreiras monetárias, geográficas e até mesmo linguísticas, dependendo do profissional.

Figura 28 – Resultado da impressão do biomodelo do fêmur do joelho disponibilizado.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 29 – Resultado da impressão do biomodelo da tíbia do joelho disponibilizado.



Fonte: Elaborado pelo autor

O processo completo depende basicamente de três, quatro ou cinco expertises: primeiramente, o médico ortopedista precisa direcionar o caso para o técnico responsável juntamente com o laudo médico e a tomografia computadorizada, informando o tipo de problema e qual será a operação a ser realizada. Em segundo lugar, o técnico responsável coleta as informações, insere a tomografia no software Slicer e produz a imagem 3D limpa do biomodelo a ser impresso. O terceiro e último profissional envolvido é o responsável pela impressão 3D, que precisa considerar a escolha da máquina utilizada, o filamento escolhido e as configurações de impressão. No caso de uma artroplastia, são necessários mais dois profissionais: o técnico em modelagem 3D que realiza o procedimento das superfícies de contato nos guias de corte, que pode ser a mesma pessoa que extraiu o modelo 3D, dependendo de sua extensão de habilidades, e a empresa de esterilização cirúrgica.

Foi testada a aplicação de tinta branca no biomodelo impresso. O resultado demonstrou que essa cor realça o desgaste causado por artrose, o que pode indicar que em casos de necessidade de visualização de pequenos detalhes, a escolha de um filamento branco é indicada.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Considerações

O estudo em questão demonstrou força em pontos importantes em relação ao que se faz necessário ao cirurgião que vive fora dos grandes centros de abundância econômica mundiais: facilitação de processos e redução de custos. Mesmo não sendo possível imprimir um guia de corte com os parâmetros planejados, o biomodelo obtido mostrou-se cumpridor de sua função. Sendo assim, a parte mais complexa já se mostrou possível.

Adicionando apenas um guia de corte escaneado em 3D e o biomodelo já confeccionado em um software de desenho, além de obter o filamento correto, serão suficientes para executar o plano até o fim. Isso no caso da operação cirúrgica de artroplastia, pois para as operações de trocleoplastia e fraturas articulares, o procedimento já se mostra eficaz.

Ressalta-se também a importância de não apenas fornecer a solução a um problema profissional, mas também o estudo dos impactos indiretos e quais as possíveis intempéries causadas por ela. Neste trabalho, é possível concluir que mesmo com as necessidades de adaptação do dia a dia a novidades, o procedimento tem boas chances ser aplicado com sucesso, vide as operações parecidas já existentes e a maneira como os problemas delas são explorados, sempre equilibrando a questão medicinal com a parte técnica. Desta forma, é possível blindar as brechas para problemas simples de resolver como comunicação entre profissionais de diferentes áreas. Além disso, disponibilidade em tempo ágil de forma personalizada e redução de custos sempre estarão em voga no assunto inovações tecnológicas e Indústria 4.0.

A possibilidade de o ortopedista responsável pela operação acompanhar a confecção do biomodelo do início ao fim, permitindo-o direcionar o resultado final, o que entra como um feedback retroalimentado. Desta forma, com especialistas da área técnica e área médica aperfeiçoando o passo a passo sempre que executado, a excelência acompanhará o desenvolvimento constantemente.

6.2 Trabalhos futuros

A partir do que já foi realizado, é possível planejar os próximos passos. A indústria 4.0 promove diversos meios de aproximar a tecnologia com a vida cotidiana, e observando seus pilares e o ritmo de evolução da tecnologia, claramente a medicina será uma grande beneficiária.

O guia de corte impresso em 3D é um grande avanço na questão de personalização. Um processo que pode ser adicionado antes deste é a criação de um software simulador de operações

cirúrgicas. Esse software seria disponibilizado ao cirurgião, que através de um *front end* preparado para tal, simularia o que deseja como resultado final da cirurgia. Isso seria feito através do upload da tomografia computadorizada e o resultado final pode ser enviado diretamente ao laboratório de impressão 3D.

Além disso, na realidade da artroplastia, assim como na vida cotidiana, é possível imaginar soluções como as propostas neste trabalho sendo barateadas e simplificadas devido ao avanço de tecnologias de materiais e impressão 3D. O barateamento está sempre diretamente ligado a acessibilidade, o que será sempre bem-vindo tratando-se de melhorar a qualidade de vida de pessoas através de operações cirúrgicas comprovadamente mais assertivas.

Nos casos de trocleoplastias e das fraturas articulares, métodos de impressão 3D permitirão cirurgias mais precisas e melhor planejadas com uma constância maior. Isso leva a diversos fatores. Não apenas a um aumento na taxa da satisfação dos pacientes, mas também um tempo de recuperação menor, principalmente no caso das fraturas.

Este cruzamento de conhecimentos entre engenharia e medicina, mais especificamente tratando de benefícios da impressão 3D não deve focar apenas em cirurgias de joelho, mas sim ser expandido para todas as articulações do corpo. Este conhecimento sempre pode ser considerado quando houver a necessidade do estudo específico e preparação cirúrgica envolvendo articulações em geral.

REFERÊNCIAS

AHN, SeungHyun *et al.* Designed three-dimensional collagen scaffolds for skin tissue regeneration. **Tissue Engineering Part C: Methods**, Larchmont, v. 16, n. 5, p. 813-820, 2010.

ALBUQUERQUE, Cátia. **55% dos erros em cirurgia são causados por falhas humanas: preocupações, pressão e distrações.** 2019. Disponível em: <https://www.cqconsultoria.com.br/post/erros-em-cirurgia-55-s%C3%A3o-causados-por-falhas-humanas-preocupa%C3%A7%C3%B5es-estresse-press%C3%A3o-e-distra%C3%A7%C3%B5es#:~:text=Pesquisadores%20americanos%20revelaram%20que%20falhas,n%C3%B3s%20podemos%20ter%20esses%20lapsos>. Acesso em 30/05/2023.

ASHIMA, Reem *et al.* Automation and manufacturing of smart materials in Additive Manufacturing technologies using Internet of Things towards the adoption of Industry 4.0. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdam, v. 45, p. 5081-5088, 2021.

BARCELLOS, Ekaterina Emmanuil Inglesis; BOTURA JÚNIOR, Galdenoro. DESIGN PROCESS: metodologia de interação entre design e engenharia como vetor de inovação. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 65-74, 2019.

BIEDERT, Roland M.; ALBRECHT, Silvia. The patellotrochlear index: a new index for assessing patellar height. **Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy**, Berlin, v. 14, p. 707-712, 2006.

BOURNE, Robert B. *et al.* Patient satisfaction after total knee arthroplasty: who is satisfied and who is not?. **Clinical Orthopaedics and Related Research®**, Berlin, v. 468, p. 57-63, 2010.

CAMANHO, Gilberto Luiz; HERNANDEZ, Arnaldo José. Lesões traumáticas do joelho. In: HERBERT, Sizínio *et al.* **Ortopedia e traumatologia: princípios e prática**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. p. 1436.

CAMPELO, Danilo de Albuquerque Melo. **Estimativa da dose em pacientes adultos submetidos a exames de tórax e abdômen em tomografia computadorizada no Brasil**. 2019. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

CENTRO DE PRESERVAÇÃO ARTICULAR DR. MÁRCIO RUBIN. **Joelho valgo, varo, recurvatum**. [201-?]. Disponível em <https://marciorubin.com.br/joelho/joelho-valgo-varo-recurvatum/>. Acesso em 02/06/2023.

CHAMBAT, Pierre; LEMOS, Wagner G. Pateloplastia e trocleoplastia no tratamento da osteoartrose femoropatelar. **Revista Brasileira de ortopedia e Traumatologia**, Rio de Janeiro, v. 5, 1997.

CLÍNICA DO JOELHO. **Joelho varo e joelho valgo**. [201-?a]. Disponível em <https://www.clinicadojoelho.med.br/joelho-varo-e-joelho-valgo/>. Acesso em 02/06/2023.

CLÍNICA DO JOELHO. **Displasia da tróclea**. [201-?b]. Disponível em <https://www.clinicadojoelho.med.br/displasia-da-troclea/>. Acesso em 03/06/2023.

COURT-BROWN, Charles M.; CAESAR, Ben. Epidemiology of adult fractures: a review. **Injury**, v. 37, n. 8, p. 691-697, 2006.

DESCOMPLICA. **O que o Toyotismo tem a ver com a terceira revolução industrial**. 2015. Disponível em: <https://descomplica.com.br/blog/o-que-o-toyotismo-tem-ver-com-terceira-revolucao-industrial-2/>. Acesso em 06/06/2023.

DIMENT, Laura E.; THOMPSON, Mark S.; BERGMANN, Jeroen HM. Clinical efficacy and effectiveness of 3D printing: a systematic review. **BMJ open**, Londres, v. 7, n. 12, p. e016891, 2017.

EGOL, Kenneth A. *et al.* Biomechanics of locked plates and screws. **Journal of orthopaedic trauma**, Philadelphia, v. 18, n. 8, p. 488-493, 2004.

FEDOROV, Andriy *et al.* 3D Slicer as an image computing platform for the Quantitative Imaging Network. **Magnetic resonance imaging**, Amsterdam, v. 30, n. 9, p. 1323-1341, 2012.

FROSCH, K.-H.; SCHMELING, A. A new classification system of patellar instability and patellar maltracking. **Archives of orthopaedic and trauma surgery**, Berlin, v. 136, n. 4, p. 485-497, 2016.

GIBSON, Ian *et al.* **Additive manufacturing technologies**. 3. ed. Cham: Springer, 2021.

HOLLANDA, João. **Displasia da tróclea (Tróclea rasa)**. [2022?]. Disponível em: <https://ortopedistadojoelho.com.br/displasia-da-troclea-troclea-rasa/>. Acesso em 03/06/2023.

HOSPITAL DO CORAÇÃO. **Artroplastia: o fim das dores nas articulações**. 2017. Disponível em: <https://www.hcor.com.br/hcor-explica/ortopedia/artroplastia-o-fim-das-dores-nas-articulacoes/>. Acesso em 02/06/2023.

HSIEH, Jiang. **Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances**. 1. ed. Bellingham: SPIE, 2009.

IAMAGUCHI, Masafumi. **Prótese Total do Joelho**. 2018. Disponível em <https://www.iamaguchi.com/artroplastia-total-de-joelho>. Acesso em 03/06/2023.

INSTITUTO CLARO. **A segunda revolução industrial**. 2018. Disponível em: <https://www.institutoclaro.org.br/educacao/para-ensinar/planos-de-aula/a-segunda-revolucao-industrial/>. Acesso em 06/06/2023.

KAGERMANN, Henning *et al.* **Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0**: Final report of the Industrie 4.0 Working Group. 1. ed. Berlin: Forschungsunion, 2013.

KIKINIS, Ron; PIEPER, Steve D.; VOSBURGH, Kirby G. 3D Slicer: a platform for subject-specific image analysis, visualization, and clinical support. *In*: JOLESZ, Ferenc. **Intraoperative imaging and image-guided therapy**. 1. ed. Nova York: Springer New York, 2013. p. 277-289.

KURTZ, Steven *et al.* Projections of primary and revision hip and knee arthroplasty in the United States from 2005 to 2030. **J Bone Joint Surg Am.**, Needham, v. 89, n. 4, p. 780-785, 2007.

LANDES, David S. **The unbound Prometheus**: technological change and industrial development in Western Europe from 1750 to the present. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

LEVESQUE, Jasmine N. *et al.* Three-dimensional printing in orthopaedic surgery: a scoping review. **EFORT open reviews**, [S.l.], v. 5, n. 7, p. 430, 2020.

LIPPACHER, Sabine *et al.* Observer agreement on the Dejour trochlear dysplasia classification: a comparison of true lateral radiographs and axial magnetic resonance images. **The American Journal of Sports Medicine**, Thousand Oaks, v. 40, n. 4, p. 837-843, 2012.

MASTER CERTIFICAÇÕES. **Indústria 4.0 no Brasil**: O que é, Tecnologias e Benefícios. 2023. Disponível em: <https://master.org.br/noticias/industria-4-0-brasil/#:~:text=Quando%20surgiu%20a%20Ind%C3%BAstria%204.0,a%20digitaliza%C3%A7%C3%A3o%20de%20suas%20atividades>. Acesso em 30/05/2023.

MEDACTA INTERNATIONAL. **MyKnee MIS Surgical Technique**. [2012]. Disponível em: <https://media.medacta.com/media/to-myknee-99my2612misus-rev09.pdf>. Acesso em 05/06/2023.

MENDES, M. **Primeira revolução industrial**. 2018. Disponível em: <https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/historia/primeira-revolucao-industrial>. Acesso em 06/06/2023.

MOKYR, Joel. **The British industrial revolution**: an economic perspective. 2. ed. Abingdon: Routledge, 2018.

NISHIMURA, Paula Lumi Goulart *et al.* Proceso, complejidad y calidad: comparación entre objetos similares producidos por diferentes tecnologías de Prototipado Rápido. **Revista de Ciencia y Tecnología**, Posadas, n. 29, p. 50-56, 2018.

NISHIMURA, Paula Lumi Goulart *et al.* Prototipagem rápida: um comparativo entre uma tecnologia aditiva e uma subtrativa. **Blucher Design Proceedings**, São Paulo, v. 2, n. 9, p. 4481-4491, 2016.

OALOO. **O Que é Impressão 3D? Para Que Serve a Impressora 3D?:** Guia Definitivo 2021. 2021. Disponível em: <https://www.oaloo.com.br/impressao-3d-vantagens-desvantagens/>. Acesso em 06/06/2023.

PORTAL DA INDÚSTRIA. **Indústria 4.0: Entenda seus conceitos e fundamentos.** 2022. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/industria-4-0/>. Acesso em 30/05/2023.

RUTALA, William Anthony; WEBER, David Jay; HEALTHCARE INFECTION CONTROL PRACTICES ADVISORY COMMITTEE. **Guideline for disinfection and sterilization in healthcare facilities, 2008.** Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services, 2008.

SCOTT, W. Norman. **Insall & scott surgery of the knee.** Amsterdam: Elsevier Health Sciences, 2011. *E-book*.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE REUMATOLOGIA. **Osteoartrite (artrose).** 2019. Disponível em: [https://www.reumatologia.org.br/doencas-reumaticas/osteoartrite-artrose/#:~:text=A%20osteoartrite%20\(artrose\)%20%C3%A9%20uma,causa%20conhecida%20\(dita%20secund%C3%A1ria\)](https://www.reumatologia.org.br/doencas-reumaticas/osteoartrite-artrose/#:~:text=A%20osteoartrite%20(artrose)%20%C3%A9%20uma,causa%20conhecida%20(dita%20secund%C3%A1ria).). Acesso em 02/06/2023.

TOPINK3D. **Impressora 3D Creatbot PEEK-300.** [202-?]. Disponível em: <https://www.topink3d.com.br/impressora-3d-creatbot-peek-300>. Acesso em 07/06/2023.

VENTOLA, C. Lee. Medical applications for 3D printing: current and projected uses. **Pharmacy and Therapeutics**, Hoboken, v. 39, n. 10, p. 704, 2014.

VIEIRA, Eduardo Álvaro; VIEIRA, Eduardo Luis Cruells. Uma visão atual da osteoartrose. **Revista da Faculdade de Ciências Médicas de Sorocaba**, Sorocaba, v. 14, n. 4, p. 166-167, 2012.

WEBB, W. Richard; BRANT, Wiliam E.; MAJOR, Nancy M. **Fundamentals of Body CT.** Amsterdam: Elsevier Health Sciences, 2019. *E-book*.

YU, Kristin E. *et al.* Three-Dimensional Reproductions for Surgical Decision-Making in the Treatment of Recurrent Patella Dislocation. **Arthroscopy Techniques**, New Haven, v. 12, n. 6, p. 807-811, 2023.

ZHANG, Fan *et al.* SlicerDMRI: diffusion MRI and tractography research software for brain cancer surgery planning and visualization. Philadelphia, **JCO clinical cancer informatics**, v. 4, p. 299-309, 2020.