



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
Instituto de Ciências e Engenharia – Câmpus de Itapeva

**ANA FLÁVIA SAFADY DA GAMA CRUZ**

**Aplicação da Manufatura Aditiva na Fabricação de Próteses Estéticas a Partir do  
Escaneamento 3D Utilizando Dispositivos Móveis**

**Itapeva - SP**  
**2023**

ANA FLÁVIA SAFADY DA GAMA CRUZ

**Aplicação da Manufatura Aditiva na Fabricação de Próteses Estéticas a Partir  
do Escaneamento 3D Utilizando Dispositivos Móveis**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado ao Conselho de Curso de  
Engenharia de Produção, da Universidade  
Estadual Paulista (Unesp), Instituto de  
Ciências e Engenharia, Câmpus de  
Itapeva, como parte dos requisitos para  
obtenção do diploma de Graduação em  
Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Juan Carlos Cebrian  
Amasífen

Itapeva - SP  
2023

C957a

Cruz, Ana Flávia Safady da Gama

Aplicação da Manufatura Aditiva na Fabricação de Próteses Estéticas a Partir do Escaneamento 3D Utilizando Dispositivos Móveis / Ana Flávia Safady da Gama Cruz. -- Itapeva, 2023  
65 f. : il., tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Produção) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva  
Orientador: Juan Carlos Cebrian Amasifen

1. Impressão 3D. 2. Escaneamento 3D. 3. Próteses Estéticas. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciências e Engenharia, Itapeva. Dados fornecidos pelo autor(a).

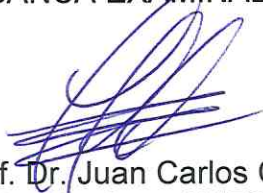
Essa ficha não pode ser modificada.

**ANA FLÁVIA SAFADY DA GAMA CRUZ**

**APLICAÇÃO DA MANUFATURA ADITIVA NA FABRICAÇÃO DE  
PRÓTESES ESTÉTICAS A PARTIR DO ESCANEAMENTO 3D  
UTILIZANDO DISPOSITIVOS MÓVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

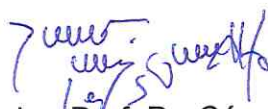
**BANCA EXAMINADORA**



Orientador: Prof. Dr. Juan Carlos Cebrian Amasifen  
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.



2º Examinador: Prof. Dr. Washington Luis Reis Santos  
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.



3º Examinador: Prof. Dr. César Augusto Galvão de Moraes  
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Itapeva.

Itapeva, 21/06/2023.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Professor Dr. Juan Carlos Cebrian Amasifen por sua orientação e apoio ao longo desta pesquisa. Obrigada por compartilhar seus conhecimentos, por acreditar no potencial da pesquisa e por me mostrar como podemos fazer a diferença na vida das pessoas.

À minha mãe, que nunca mediu esforços para que eu pudesse ter a melhor educação possível, mesmo que sozinha por boa parte do tempo, sempre me apoiando, incentivando a realizar meus sonhos e me inspirando como profissional e como mulher.

Ao meu pai, que não pôde estar presente durante minha trajetória acadêmica, mas que sempre me ensinou sobre esforço e determinação, e sei que esteve sempre torcendo por mim e pelas minhas conquistas, de onde estivesse.

Ao meu irmão, por todo o apoio e incentivo durante os anos, se mostrando sempre presente para me ajudar no que fosse necessário, mesmo que do outro lado do país.

Ao restante da minha família por sempre me apoiarem, torcerem por mim, me acompanharem a cada passo meu e vibrarem pelas minhas vitórias.

Ao meu namorado Tiago, por todo o companheirismo nos bons e ruins momentos, por todo o apoio sempre que precisei e por sempre acreditar em mim e me incentivar a acreditar também, mesmo quando parecia impossível.

Aos amigos que a faculdade me deu, que acabaram se tornando minha segunda família.

Ao Tiago, Amanda, Izabela, minha mãe e aos técnicos Thiago e Alex por me auxiliarem na execução deste trabalho.

A UNESP, seus professores e seus funcionários, por toda base e conhecimento compartilhados e por ajudarem a me tornar a pessoa que sou hoje.

## RESUMO

A utilização crescente da manufatura aditiva na área da saúde, especialmente na fabricação de próteses, tem sido evidenciada nos últimos anos. Uma abordagem para garantir próteses personalizadas para cada paciente é o escaneamento de membros de próprio paciente, que possa ser usado para impressão 3D. No entanto, o custo de equipamentos de escaneamento 3D pode ser bastante elevado, variando entre 4 e 10 mil reais. Tendo isso em mente, este estudo foi desenvolvido com o objetivo de tornar o processo de escaneamento e fabricação de próteses estéticas com a aplicação da manufatura aditiva de forma mais acessível, por meio da utilização de dispositivos móveis. Foram avaliados diferentes aplicativos de escaneamento para dispositivos móveis, considerando critérios como a interface, facilidade de escaneamento e geração de modelos 3D de partes do corpo humano. Os modelos gerados foram impressos em 3D utilizando filamentos de ABS e PLA, e submetidos a ensaios mecânicos de compressão para avaliar a resistência de cada material. Os resultados demonstraram que o escaneamento de partes do corpo humano por meio de dispositivos móveis é sim possível, com destaque para o aplicativo Qlone, que se mostrou mais fiel à realidade em relação aos demais aplicativos avaliados. As peças impressas requerem acabamento manual, como lixamento, polimento e pintura, mas foram fiéis aos escaneamentos realizados. Quanto aos filamentos empregados, os ensaios mecânicos revelaram que as próteses fabricadas com PLA apresentam uma maior resistência à compressão em relação às próteses de ABS, indicando que o PLA é mais adequado para os objetivos deste estudo.

Palavras-chave: Escaneamento 3D; Impressão 3D; Próteses Estéticas.

## **ABSTRACT**

The increasing use of additive manufacturing in the healthcare field, particularly in prosthetic manufacturing, has been evident in recent years. One approach to ensure personalized prostheses of each patient is the scanning of the patient's own limbs for 3D printing purposes. However, the cost of a 3D scanning equipment can be quite high, ranging from 4 to 10 thousand Brazilian Reais. With this in mind, this study was developed with the aim of making the scanning and manufacturing process of aesthetic prostheses using additive manufacturing in a more accessible way by using mobile devices. Different scanning apps for mobile devices were evaluated, considering criteria such as app interface, scanning easiness, and the generation of 3D models of human body parts. The generated models were 3D printed using ABS and PLA filaments and subjected to mechanical compression tests to assess the strength of each material. The results showed that scanning human body parts is indeed possible, with particular emphasis on the Qlone app, which proved to be accurate compared to other evaluated apps. The printed objects required manual finishing, such as sanding, polishing, and painting, but remained true to the scanned representations. Regarding the filaments used, the mechanical tests revealed that the prostheses manufactured with PLA exhibited higher compressive strength compared to the ABS prostheses, indicating that PLA is more suitable for the objectives of this study.

**Keywords:** 3D Scanning, 3D Printing, Aesthetic Prostheses

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Processo de escaneamento 3D .....	17
Figura 2 – Processo de manufatura aditiva .....	21
Figura 3 – Deposição de material fundido .....	22
Figura 4 – Prótese de um braço produzido pela Open Bionics .....	25
Figura 5 – Etapas do processo de escaneamento 3D por meio de dispositivos móveis .....	28
Figura 6 – Modelo 3D de um escaneamento realizado pelo KIRI Engine .....	29
Figura 7 – Interface de escaneamento do aplicativo Heges.....	31
Figura 8 – (a) Interface do Scandy Pro: (a) escaneamento; (b) edição do modelo ...	32
Figura 9 – Utilização do marcador fornecido pelo Qlone.....	33
Figura 10 – Modelo 3D do objeto escaneado: (a) com o marcador; (b) sem o marcador .....	34
Figura 11 – Etapas do processo de impressão 3D.....	35
Figura 12 – Configurações de impressão utilizadas .....	39
Figura 13 – Curva de tensão-deformação sob tração de náilon 6,6 .....	40
Figura 14 – Curva de tensão-deformação sob compressão de material polimérico ..	42
Figura 15 – Escaneamento realizado com o aplicativo Heges: (a) parte frontal; (b) parte traseira .....	44
Figura 16 – Escaneamento realizado com o KIRI Engine: (a) parte frontal; (b) parte traseira .....	45
Figura 17 – Posicionamento da mão para escaneamento utilizando papéis cartão pretos .....	46
Figura 18 – Escaneamento de uma mão realizado pelo KIRI Engine .....	46
Figura 19 – Escaneamento de um dedo realizado pelo KIRI Engine .....	47
Figura 20 – Escaneamento de uma mão realizado com o Qlone.....	48
Figura 21 – Escaneamento de uma mão realizado com o Qlone: (a) parte frontal; (b) parte traseira .....	48
Figura 22 – Escaneamento de um dedo realizado com o Qlone: (a) parte frontal; (b) parte traseira .....	49
Figura 24 – Primeiro teste de impressão realizado com ABS .....	50
Figura 25 – Objeto impresso após lixamento e tentativa de corte.....	51



Figura 26 – Modelo da mão escaneada exibido pelo UltiMaker Cura .....	51
Figura 27 – Suportes aplicados pelo UltiMaker Cura para estabilidade da peça .....	52
Figura 28 – Impressões realizadas em PLA e ABS: (a) parte frontal; (b) parte traseira .....	53
Figura 29 – Prótese impressa em ABS com suportes.....	54
Figura 30 – Prótese impressa em ABS após corte e lixamento .....	54
Figura 31 – Comparação entre o membro escaneado e a prótese impressa.....	55
Figura 32 – Prótese de um dedo impressa em ABS .....	55
Figura 33 – Ensaio de compressão realizado na máquina universal .....	56
Figura 34 – Resultados dos ensaios mecânicos de compressão.....	57
Figura 35 – Corpos de prova de PLA após a ruptura .....	58
Figura 36 – Corpos de prova de ABS após a ruptura.....	58

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Comparação entre aplicativos de escaneamento 3D .....	20
Tabela 2 – Comparação entre os softwares estudados .....	35
Tabela 3 – Propriedades dos materiais PLA e ABS .....	36
Tabela 4 – Propriedades de impressão dos materiais PLA e ABS.....	37

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
CAD	Computer Aided Design
CMM	Coordinate measuring machine
FDM	Fused deposition modeling
FFF	Fused filament fabrication
GPa	Gigapascal
LOM	Lamineted objetc manufacturing
MP	Megapixel
MPa	Megapascal
PE	Polietileno
PLA	Ácido polilático
PP	Polipropileo
SLA	Estereolitografia
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Standard Triangle Language

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma$	Tensão
$\varepsilon$	Deformação

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. Relevância.....	14
1.2. Objetivos .....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
2.1. Escaneamento 3D .....	16
2.1.1. Escaneamento 3D por meio de Smartphones.....	18
2.2. Impressão 3D .....	21
2.3. Próteses .....	24
3. METODOLOGIA .....	27
3.1. Escaneamento 3D .....	27
3.1.1. KIRI Engine .....	28
3.1.2. Heges.....	30
3.1.3. Scandy Pro.....	31
3.1.4. Qlone.....	32
3.2. Impressão 3D .....	35
3.2.1. Arquivo .STL .....	35
3.2.2. Filamento .....	36
3.2.3. Configurações de impressão.....	37
3.2.4. Objeto 3D .....	38
3.3. Ensaios mecânicos.....	40
3.3.1. Ensaio de tração .....	40
3.3.2. Ensaio de compressão.....	42
3.3.3. Ensaio de flexão.....	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1. Escaneamento 3D .....	44
4.2. Impressão 3D .....	49
4.3. Ensaios mecânicos.....	56
5. CONCLUSÃO .....	57
5.1. Pesquisas futuras .....	60

## 1. INTRODUÇÃO

A impressão 3D, também conhecida como manufatura aditiva, consiste em um processo para criação de objetos tridimensionais em qualquer formato por meio de processos aditivos. Em outras palavras, camadas de material são sucessivamente postas uma sobre a outra sob controles de computador para elaborar estruturas com geometrias complexas (GOKHARE; RAUT; SHINDE, 2017).

O método de manufatura aditiva tem sido cada vez mais utilizado em diferentes áreas, como nos setores automotivo e aeroespacial na produção de peças e componentes, na indústria têxtil e da moda em joias, roupas e sapatos (SAVINI; SAVINI, 2015), no setor eletrônico na fabricação de peças para circuitos elétricos (READY et al., 2013), na engenharia civil para construção de estruturas e modelos arquitetônicos (TAN, 2018), no setor farmacêutico em tecnologias para *drug delivery* (MATHEW et al., 2020) e até mesmo na indústria alimentícia na fabricação de comidas customizadas (SUN et al., 2015).

No caso da saúde, devido aos menores custos de manufatura e por sua melhoria de precisão de impressão e velocidade, a manufatura aditiva tem permitido grandes avanços em, por exemplo, equipamentos médicos, materiais de implante e impressão celular (YAN et al., 2018). Nesse contexto, uma de suas principais utilizações que vem crescendo ao longo dos anos é a impressão de próteses humanas, uma vez que seu custo de fabricação atinge valores inferiores quando comparados com as tradicionais alternativas de fabricação de próteses. Um estudo realizado por Kate, Smit, Breedveld (2017), mostra que os custos com materiais para fabricação de próteses por meio da impressão 3D podem chegar até no máximo \$500, representando uma redução de custos de aproximadamente 90% em relação à fabricação tradicional, que pode custar entre \$4000 e \$10000. Além disso, existe a possibilidade de customização de acordo com os gostos e preferências dos usuários (DODZIUK, 2016).

Um passo importante na elaboração de próteses é a definição da forma geométrica do objeto. Para isso, uma ferramenta útil e precisa é o scanner 3D. Este equipamento permite obter uma figura tridimensional no formato digital com todas as características do objeto real. O scanner coleta informações exatas de formato e tamanho do objeto e grava esses dados com o auxílio de sensores e câmeras, que tiram diversas fotos do objeto enquanto o mensuram (HALEEM et al., 2022).

A capacidade de reproduzir objetos tridimensionais no formato digital com exatidão e rapidez é uma ferramenta valiosa para a prototipagem rápida, personalização de produtos e criação de peças sob medida. Entretanto, sabe-se que esses scanners podem custar até em torno de 5 a 15 mil reais (avaliado em maio de 2023). Uma alternativa mais acessível para substituir a compra de um scanner é a utilização de aplicativos ou *softwares* que utilizam fotos tiradas por um dispositivo móvel para transformar o objeto em um desenho tridimensional digital.

A utilização de dispositivos móveis, como o celular, para o escaneamento e elaboração da estrutura digital das próteses pode apresentar alguns desafios em seu processo, uma vez que costumam gerar resultados menos exatos quando comparados a equipamentos de melhor desempenho. Alguns fatores que influenciam no desempenho são: o sistema operacional do aparelho; o tempo e o esforço do usuário; a resolução da câmera e; a quantidade e as posições de captura das imagens, isso a fim de se obter um desenho digital nítido e de boa qualidade.

O presente trabalho propõe a avaliação de diferentes aplicativos (tanto pagos quanto gratuitos) que permitam utilizar os recursos existentes nos celulares atuais para a execução do processo de escaneamento de objetos tridimensionais.

A avaliação consistirá nas análises de funcionalidade e dificuldades da interface dos aplicativos, precisão de formato e tamanho dos objetos escaneados e facilidade de impressão 3D a partir dos desenhos obtidos. Os objetos obtidos digitalmente serão posteriormente impressos a partir do escaneamento por aplicativo, avaliados e testados mecanicamente.

### **1.1.Relevância**

A fabricação de próteses estéticas possui uma grande importância na recuperação física e na autoestima dos pacientes. A possibilidade de produzir próteses personalizadas, de alta qualidade através da manufatura aditiva de forma eficiente e precisa, resulta em uma melhoria na qualidade de vida dos pacientes, proporcionando conforto e uma aparência natural.

A aplicação de dispositivos móveis para o escaneamento 3D na fabricação de próteses traz consigo uma vantagem adicional: a acessibilidade. A utilização dos smartphones permite o escaneamento dos pacientes de forma mais rápida, prática, menos invasiva e com um menor custo.

O método de escaneamento 3D por meio de dispositivos móveis ainda é um tema pouco abordado na área médica. A investigação da sua funcionalidade neste trabalho busca fornecer uma base teórica mais sólida e fornecer dados para pesquisas futuras, impulsionando inovações na área de fabricação de próteses estéticas.

## **1.2. Objetivos**

Este trabalho teve como objetivo avaliar diferentes aplicativos de escaneamento 3D por dispositivos móveis com a finalidade de produzir próteses estéticas a partir da manufatura aditiva de forma prática e acessível.

Os objetivos específicos foram:

- Avaliação da facilidade de escaneamento de cada aplicativo testado.
- Avaliação do modelo digital criado por cada um dos aplicativos.
- Impressão 3D dos modelos digitais de partes do corpo humano criados para análise de viabilidade da utilização das próteses por pacientes
- Ensaios mecânicos para análise da resistência dos diferentes materiais utilizados como filamento para a fabricação das próteses



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Escaneamento 3D

O escaneamento 3D é um processo de captura de informações tridimensionais de objetos ou espaços físicos usando tecnologias de digitalização avançadas, que incluem scanners a laser, câmeras 3D, scanners de luz estruturada, raios-x, entre outras técnicas. O scanner 3D é utilizado para digitalizar um objeto físico em três dimensões e fornecer os dados de digitalização para um arquivo digital. O arquivo CAD (*computer aided design*)<sup>1</sup> pode ser exportado em diversos formatos, inclusive em STL (*Standard Triangulate Language*), acrônimo para estereolitografia<sup>2</sup>, produzindo protótipos a partir da impressora 3D (JAVAIID et al., 2021).

Dentre as diferentes tecnologias existentes de escaneamento 3D, podemos destacar as seguintes:

- O scanner 3D de luz estruturada funciona pela projeção de uma grade de luz ou padrão de linhas no objeto, utilizando uma câmera para captar a superfície desse objeto. Este método é rápido, de alta resolução e versátil (PEIRAVI; TAABBODI, 2010).
- O scanner 3D a laser utiliza um feixe de luz para medir a distância entre o scanner e o objeto, criando uma nuvem de pontos que representa a superfície do objeto. Essa tecnologia de escaneamento possui um baixo custo, uma captura precisa e é simples e portátil (LIU; WANG, 2021).
- O escaneamento por fotogrametria utiliza câmeras para capturar imagens de um objeto ou espaço em diversos ângulos e posições diferentes, que serão convertidas em um modelo 3D, garantindo uma captura da realidade (KOHTALA et al., 2021).
- A máquina de medição por coordenadas (CMM), que se trata de um processo de medição por varredura, utiliza uma ponta de medição para tocar a superfície do objeto e medir sua forma e dimensões. Esse processo

---

<sup>1</sup> CAD, ou desenho assistido por computador, é a tecnologia utilizada para realizar designs e documentações em um ambiente virtual.

<sup>2</sup> A estereolitografia é o processo de criação de objetos tridimensionais pela solidificação de polímeros através de luz violeta (SAVINI; SAVINI, 2017).

é utilizado para medir objetos complexos e possui uma menor incerteza (STOJKIC; CULJAK; SARAVANJA, 2020).

Independente da tecnologia utilizada, o processo de escaneamento 3D geralmente envolve as mesmas etapas, como mostradas na Figura 1.

Figura 1 – Processo de escaneamento 3D



Fonte: Autoria própria (2023)

A primeira etapa do processo consiste no escaneamento 3D, em que um objeto já existente é transformado em um desenho digital por meio de aparelhos scanners.

O arquivo digital CAD então é exportado em diferentes formatos, como o STL, que após passar por um *software* fatiador<sup>3</sup>, é levado à impressão 3D (JAVAID et al., 2021).

#### 2.1.1. Escaneamento 3D por meio de smartphones

A tecnologia dos smartphones tem se tornado importante e essencial no cotidiano das pessoas, com sua ampla variedade de recursos e funcionalidades, câmeras de alta resolução e acesso fácil à internet e diversos aplicativos, além de poderem ser facilmente levados a qualquer lugar e utilizados a qualquer momento. Levando em consideração esses pontos e o alto custo de um scanner 3D, que normalmente varia entre cinco mil e quinze mil reais (avaliado em maio de 2023), os smartphones têm sido cada vez mais utilizados para fins dessa prática, podendo ser utilizados na área médica de reconstrução de partes do corpo humano.

No escaneamento 3D por smartphone, a câmera do celular é utilizada para capturar diferentes imagens em diferentes ângulos de um objeto. Com essas imagens capturadas, o *software* de escaneamento 3D as combina criando um modelo 3D. Esse modelo 3D criado pode ser exportado em diferentes formatos, como OBJ ou STL, podendo ser utilizados posteriormente para impressão 3D.

O uso dos smartphones no escaneamento 3D de partes do corpo humano vem sendo cada vez mais abordado e pesquisado. Em Alazzam et al. (2021), o autor realizou um estudo sobre a reconstrução de uma orelha com microtia utilizando um smartphone para fazer o escaneamento 3D da cabeça do paciente, comprovando a eficácia a baixo custo desse método. Um outro exemplo dessa prática foi dado por Yamashita et al. (2021), em que vídeos gravados em um celular foram utilizados para a construção do modelo 3D de um pé para análises de sua estrutura óssea a fim de se prevenir a joanete.

Entretanto, apesar da utilização dos recursos dos smartphones ser um processo vantajoso em relação à praticidade e ao baixo custo, eles apresentam algumas limitações. Embora os aparelhos modernos tenham se tornado cada vez melhores em termos de processamento, sua capacidade ainda pode se mostrar insuficiente para realizar tarefas se comparado a computadores de alto desempenho.

---

<sup>3</sup> O *software* fatiador é utilizado para converter o modelo 3D em uma série de camadas finas, produzindo um arquivo G-code a partir do arquivo STL contendo instruções para a impressora 3D.

Isso pode resultar em tempos mais longos de processamento e na redução da qualidade do escaneamento, gerando um modelo 3D que não capture corretamente todas as formas do objeto real. Assim, para tentar se alcançar os resultados desejados, são necessárias câmeras de maior resolução, como de 12 MP ou mais (quanto maior a resolução da câmera, mais detalhes serão capturados durante o processo de escaneamento), boas condições de iluminação e a captura de uma quantidade relativamente alta de imagens diferentes (MURATOV et al., 2016).

Existem diversos aplicativos para smartphones que permitem criar imagens digitais em 3D, incluindo opções pagas ou gratuitas, disponíveis para dispositivos Android ou iOS. Alguns deles são:

1. Qlone;
2. Scandy Pro;
3. Trnio Plus 3D Scanner;
4. Scann3d;
5. ItSeez3D;
6. Heges;
7. KIRI Engine;
8. Widar;
9. Polycam;
10. 3D Scanner App.

Uma comparação dos aplicativos citados é feita na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação entre aplicativos de escaneamento 3D

<b>Aplicativo</b>	<b>Compatibilidade</b>	<b>Preço</b>	<b>Aplicações</b>	<b>Exportação</b>
<b>Qlone</b>	Android, iOS	iOS: Gratuito (oferece compras dentro do app) Android: US\$ 19,99	Objetos e partes do corpo humano	OBJ, STL, FBX, USDZ, GLB, PLY, X3D
<b>Scandy Pro</b>	iOS	Gratuito (oferece compras dentro do app)	Objetos e partes do corpo humano	OBJ, STL, USDZ, GLB, PLY
<b>Trnio Plus 3D Scanner</b>	iOS	Gratuito (oferece compras dentro do app)	Objetos de qualquer tamanho e ambientes	OBJ, STL, USDZ
<b>Scann3d</b>	Android	Gratuito (oferece compras dentro do app)	Objetos de qualquer tamanho	OBJ, STL, PLY
<b>ItSeez3D</b>	iOS (apenas iPad)	Gratuito (oferece compras dentro do app)	Objetos e partes do corpo humano	OBJ, PLY, WRL
<b>Heges</b>	iOS	Gratuito (oferece compras dentro do app)	Objetos e partes do corpo humano	OBJ, STL, GLB, PLY
<b>KIRI Engine</b>	Android, iOS	Gratuito (oferece compras dentro do app)	Objetos, partes do corpo humano e ambientes	OBJ, STL, FBX, PLY
<b>Widar</b>	Android, iOS	Gratuito (oferece compras dentro do app)	Objetos de qualquer tamanho	OBJ, STL, FBX
<b>Polycam</b>	Android, iOS	Gratuito (oferece compras dentro do app)	Objetos e ambientes	OBJ, STL, FBX, GLTF, DAE
<b>3D Scanner App</b>	iOS	Gratuito	Objetos e ambientes	OBJ, STL, GLB, GLTF, DAE

Fonte: Autoria própria (2023)

O uso desses e outros aplicativos no escaneamento 3D com a finalidade de elaborar próteses representa uma ferramenta interessante, já que esses aplicativos podem processar imagens de alta qualidade e de forma acessível (ALAZZAM et al., 2021).

## 2.2. Impressão 3D

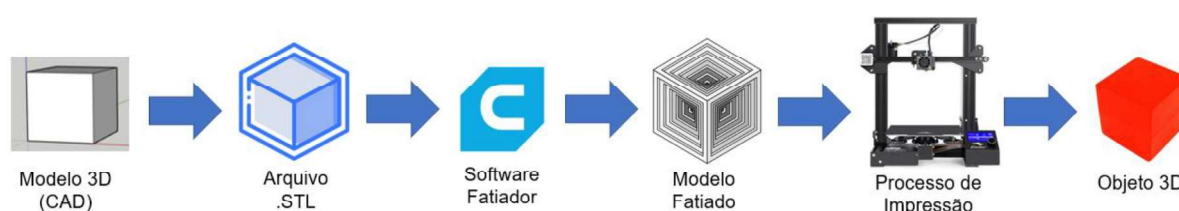
A tecnologia de impressão 3D, também conhecida como manufatura aditiva, teve início na década de 1980 com a invenção da estereolitografia (SLA) por Charles Hull. Esse processo permitia a criação de objetos tridimensionais por meio da solidificação de polímeros líquidos sob luz ultravioleta, criando camadas sucessivas que formavam o objeto (SAVINI; SAVINI, 2015).

O primeiro objeto sólido impresso a partir de um desenho digital foi patenteado por Hideo Kodama, do Instituto Nacional de Pesquisa do Japão, em 1981. Entretanto, em 1986, Hull registrou a patente para a estereolitografia (GOKHARE; RAUT; SHINDE, 2017).

Nos anos seguintes, foram desenvolvidas outras técnicas de impressão 3D, como a fabricação de objetos laminados (LOM), em que as seções transversais de um objeto são cortadas de um papel utilizando-se um laser e, em seguida, um revestimento plástico é derretido no lado inferior da camada de papel; a sinterização seletiva a laser (SLS), que consiste na fusão de partículas de pó por um feixe de laser; e a deposição de material fundido (FDM), tecnologia baseada na deposição de material termoplástico camada por camada (SAVINI; SAVINI, 2015).

Os processos de impressão 3D atuais são realizados a partir de um modelo 3D de um objeto, normalmente criado por *softwares* de desenho assistido por computador (CAD) ou escaneamento de um objeto já existente. Programas especializados fatiam o modelo em camadas transversais, criando um arquivo que é enviado à máquina de impressão. A máquina então cria o objeto adicionando camada por camada do material. A Figura 2 exemplifica de forma generalizada todos os passos realizados durante o processo da manufatura aditiva.

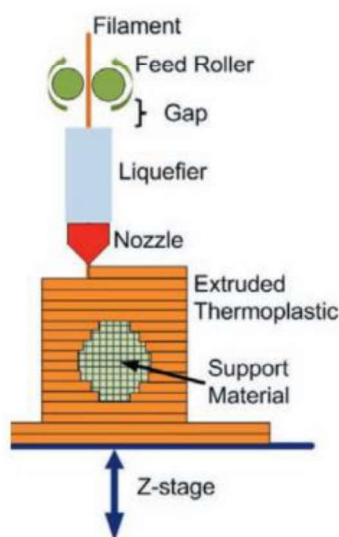
Figura 2 – Processo de manufatura aditiva



Fonte: Autoria própria (2023)

Os diversos processos de impressão são diferenciados pela forma em que as camadas dos objetos são criadas. Um dos métodos mais utilizados é o de extrusão, através da técnica conhecida como *Fused Filament Fabrication* (FFF) ou deposição de material fundido. Nesse método, um filamento termoplástico é guiado por um rolo a um liquefator, onde é aquecido até uma temperatura acima do seu ponto de fusão. O material líquido então é extrudado através dos bicos aquecidos da máquina para formar as camadas transversais dos objetos. Quando o material atinge a superfície de impressão da máquina, ele é esfriado e endurece. Depois de finalizar uma camada, o bico avança para o próximo nível de profundidade, iniciando a deposição da camada seguinte. A Figura 3 mostra o funcionamento desse processo (CAMPBELL et al., 2011).

Figura 3 – Deposição de material fundido



Fonte: Campbell et al., 2011

A impressão 3D possui capacidade de produzir objetos a partir de diversos materiais, incluindo metálicos, cerâmicos, polímeros, compósitos ou materiais com classificação funcional.

Os metais, dadas as suas propriedades como as altas resistências físicas e mecânicas, são altamente utilizados nas indústrias aeronáutica, automobilística, médica e de manufatura. Os principais materiais metálicos utilizados para impressão são as ligas de alumínio, as ligas à base de cobalto, ligas à base de níquel, aços inoxidáveis e ligas de titânio. Tais materiais permitem a criação de objetos desde

aplicação dentária até componentes aeroespaciais devido à sua resistência e durabilidade.

Os principais materiais cerâmicos utilizados na impressão 3D são alumina, vidros bioativos e zircônio. Utilizando-se a tecnologia de impressão 3D, as peças de alumina de formatos complexos, que possuem uma alta densidade de sinterização, podem ser impressas, sendo aplicadas em catalisadores, microeletrônica, química e indústrias de alta tecnologia. Além disso, o vidro-cerâmica e o vidro bioativo podem ser utilizados em aplicações clínicas, como andaimes e ossos.

Atualmente, os materiais poliméricos são os mais utilizados nos filamentos de aplicações 3D, devido ao seu baixo custo, baixo peso e flexibilidade de processamento. Fabricados para protótipos, dispositivos médicos e objetos funcionais com geometrias complexas, os polímeros são utilizados na impressão 3D nos modelos de deposição de material fundido (chamados também de FDM) a partir da extrusão dos materiais termoplásticos. Os principais materiais utilizados são o ácido polilático (PLA), a acrilonitrila butadieno estireno (ABS), o polipropileno (PP) e o polietileno (PE).

Os materiais compósitos, que são formados pela união de dois materiais diferentes com propriedade complementares, vêm ganhando destaque nos processos de impressão 3D nos últimos anos, como os compósitos poliméricos reforçados com fibra de carbono e os compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro.

Alguns materiais especiais, como alimentos ou tecidos, também podem ser utilizados para impressão 3D e seus processos têm sido cada vez mais estudados ao longo dos anos (SHAH RUBUDIN; LEE; RAMLAN, 2019).

A utilização médica para a impressão 3D já traz e possui potencial para trazer ainda mais mudanças disruptivas na área, englobando a tecnologia de fabricação de órgãos, tecidos e até mesmo vasos em estudos recentes (YAN et al., 2018). Além da possibilidade de personalização de produtos, medicamentos e equipamentos, suas vantagens incluem também um maior custo-benefício, o aumento da produtividade e a democratização do design e da manufatura.

Dentre as aplicações na área médica, estão a fabricação de tecidos orgânicos, fabricação de equipamentos hospitalares especializados, pesquisas farmacêuticas e fabricação de medicamentos e criação de próteses personalizadas, implantes e modelos atômicos (DODZIUK, 2016).



### 2.3. Próteses

O design e a utilização de próteses tiveram início no final do século passado com os soldados que perdiam seus membros durante a guerra. Com o passar dos anos, essa técnica foi se desenvolvendo cada vez mais com o avanço da ciência, da medicina e da tecnologia, tornando-se uma área de constantes inovações.

Apesar do contínuo crescimento na área de próteses médicas, uma grande parcela da população que sofreu a perda de algum membro do corpo não utiliza nenhum dispositivo médico de substituição, o que pode ser resultado da falta de design estético, disponibilidade de segurança e cuidados com a saúde, e custos elevados. Grande parte das pesquisas realizadas busca encontrar, além de soluções para esses desafios, um equilíbrio entre a estética e a funcionalidade das próteses (MANERO et al., 2019).

As próteses operacionais, conhecidas como próteses biônicas, possuem controles elétricos ou mecânicos que possibilitam sua mobilidade. Já as próteses estéticas, também chamadas de próteses cosméticas, possuem uma funcionalidade apenas visual, tendo a necessidade de alcançar uma aparência realista, personalização para atender às necessidades dos clientes e a busca por materiais seguros e duráveis. Uma pesquisa realizada mostrou que suas prioridades em relação a uma prótese cosmética são o ajuste, a aparência realista, o custo e a cor (CABIBIHAN; ABUBASHA; THAKOR et al., 2018).

O processo de criação de próteses estéticas padrão normalmente é realizado pela criação de um molde feito de gesso calcinado do membro e o aquecimento de um material termoplástico dentro do molde, onde é solidificado e retirado do molde para a finalização. Como tentativa de facilitar esse tradicional processo e diminuir seu custo de fabricação, a utilização da impressão 3D tem sido utilizada e estudada para a fabricação de próteses estéticas nos últimos anos (RADOSH et al., 2017).

As vantagens da utilização da impressão 3D na criação de próteses são inúmeras, como a possibilidade de fabricar produtos em uma só peça, a viabilidade de se obter geometrias complexas, a personalização e customização dos modelos, a facilidade e rapidez do processo e seu baixo custo. Enquanto o custo de uma prótese tradicional de um membro superior pode variar entre 4 mil e 50 mil dólares, por meio da impressão 3D essa produção pode custar entre 300 e 2 mil dólares (KATE; SMIT; BREEDVELD, 2017).

Uma das primeiras e mais notórias criações de próteses por meio da impressão 3D foi realizada por um estudante de 17 anos que desejava ajudar uma criança de 9 anos que não tinha condições financeiras de adquirir uma prótese de mão por \$80.000,00. O membro impresso por ele em 3D era controlado eletricamente através de ondas cerebrais e custou em torno de \$500,00. Um segundo caso de destaque na área é o de Eric Monger, um paciente curado de um câncer no rosto que recebeu uma prótese impressa em 3D para substituir uma parte de seu rosto que havia sido removida (DODZIUK, 2016).

Uma pesquisa feita por Joel Gibbard, CEO da Open Bionics, sobre as demandas de pessoas que tiveram seus membros amputados mostrou que além do peso leve e da praticidade de uso, grande parte dos jovens não desejava que suas próteses se parecessem com uma mão real, mas sim de super-heróis. Assim, a Open Bionics passou a produzir próteses de braços com base em personagens da Disney ou da Marvel realizadas a partir da impressão 3D, comprovando sua alta possibilidade de customização. Uma de suas criações mais populares é mostrada na Figura 4 (DODZIUK, 2016).

Figura 4 – Prótese de um braço produzido pela Open Bionics



Fonte: Open Bionics (<https://openbionics.com/>)

Segundo Radosh et al. (2017), ainda existem alguns desafios no campo da fabricação de próteses cosméticas por meio da manufatura aditiva que devem ser tratados em pesquisas futuras. Um exemplo é a dificuldade em se obter o design

correto do produto, mas que possui potencial para ser pesquisado e aperfeiçoado, como pela utilização de modelos CAD inteligentes para padronizar e automatizar as operações de design. Apesar de se tratar de um campo recente na área médica, a fabricação de próteses por impressão 3D tem mostrado um grande crescimento e altas perspectivas futuras devido a suas inúmeras vantagens.

### 3. METODOLOGIA

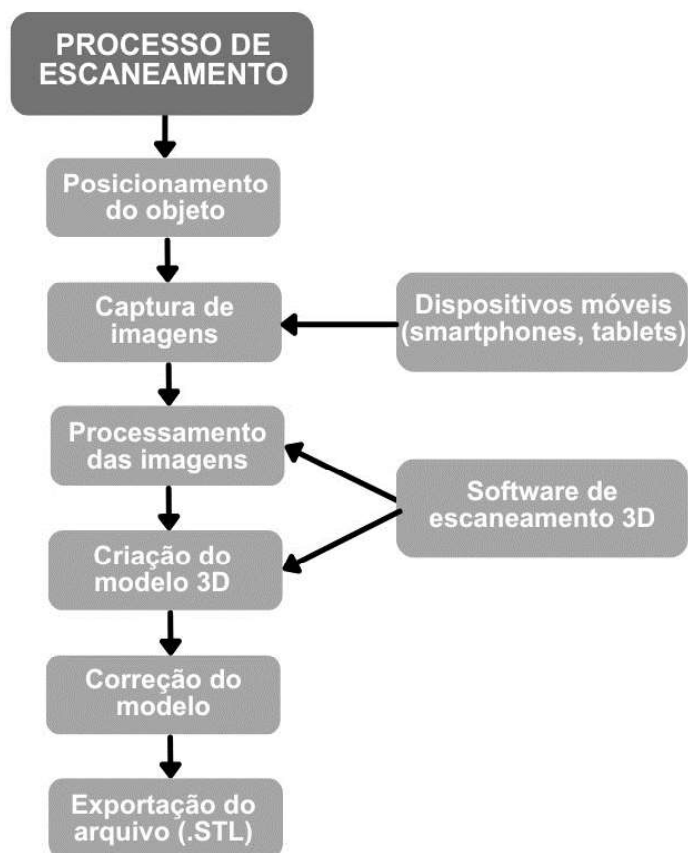
Neste estudo, foram realizadas avaliações de aplicativos para dispositivos móveis de escaneamento 3D para capturar detalhes de partes do corpo humano, como mãos e dedos. Os valores de custos de licença para uso dos *softwares* foram cotados em janeiro de 2023. Os modelos resultantes desses escaneamentos foram exportados e utilizados para imprimir próteses estéticas por meio da tecnologia de impressão 3D. A etapa subsequente consistiu em submeter as próteses impressas a ensaios mecânicos de compressão, a fim de se observar as resistências dos materiais empregados em sua fabricação.

#### 3.1. Escaneamento 3D

No processo de escaneamento 3D através de dispositivos móveis, a câmera do dispositivo é utilizada para capturar múltiplas imagens do objeto a ser escaneado de diferentes ângulos e posições, permitindo que o aplicativo capture uma visão completa e detalhada do objeto em três dimensões. O *software* irá então processar essas imagens, utilizando algoritmos para combinar e construir o modelo 3D do objeto.

Grande parte dos aplicativos de escaneamento apresenta ferramentas de edição dos modelos, como ajustes de cores e texturas, recortes, remoção de partes indesejadas e preenchimentos de imperfeições no objeto escaneado. Uma vez que o escaneamento é concluído e o modelo é refinado, é possível exportá-lo em diferentes formatos, como .OBJ ou .STL, para impressão 3D. A Figura 5 ilustra de forma abrangente os passos envolvidos na obtenção de um escaneamento 3D por meio de aplicativos móveis.

Figura 5 – Etapas do processo de escaneamento 3D por meio de dispositivos móveis



Fonte: Autoria própria (2023)

Neste trabalho foram realizadas avaliações de quatro aplicativos de escaneamento 3D para smartphones: KIRI Engine, Heges, Scandy Pro e Qlone. A escolha desses aplicativos foi baseada em critérios como a disponibilidade para iOS, sistema operacional do dispositivo utilizado nos testes (iPhone 11), a capacidade de exportar os modelos em formatos .OBJ ou .STL e a alegação de serem adequados para escaneamento de pessoas ou partes do corpo humano. O iPhone 11 utilizado nos testes possui uma câmera de 12 MP.

### 3.1.1. KIRI Engine

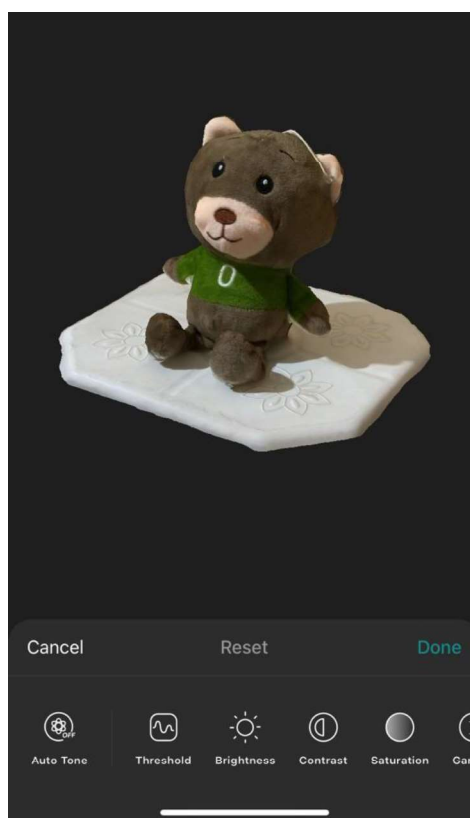
O Kiri Engine é um aplicativo de escaneamento 3D disponível gratuitamente tanto para dispositivos Android quanto para dispositivos iOS. Ele utiliza algoritmos avançados de fotogrametria e tecnologia de visão computacional para capturar modelos 3D com exatidão e detalhados de objetos e ambientes. Os modelos resultantes podem ser exportados em formatos .OBJ, .FBX, .STL ou .PLY.

No processo de escaneamento com o KIRI Engine, múltiplas fotos do objeto são capturadas a partir de diferentes ângulos. Essas imagens são então processadas nos servidores em nuvem do aplicativo, gerando o modelo 3D. No próprio aplicativo é possível realizar edições no modelo, como recortes, refinamentos e ajustes de cores e texturas.

Na versão gratuita do aplicativo, é necessário capturar no mínimo 20 fotos do objeto para a criação do modelo 3D, podendo chegar a 70. Por outro lado, na versão paga, é possível capturar até 200 fotos para o processamento do *software*. Essa versão paga oferece benefícios adicionais, como processamento mais rápido, exportações ilimitadas e a funcionalidade de escaneamento pela WEB. Seu custo é de R\$55,90 por mês ou R\$279,90 por ano. Para os propósitos deste trabalho, foi utilizada a versão gratuita do aplicativo.

A Figura 6 mostra o resultado do escaneamento realizado com o KIRI Engine a partir da captura de 70 fotos do objeto, juntamente com algumas das ferramentas de edição disponíveis no aplicativo.

Figura 6 – Modelo 3D de um escaneamento realizado pelo KIRI Engine



Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.1.2. Heges

O aplicativo de escaneamento 3D Heges está disponível gratuitamente para download e é compatível apenas com dispositivos iOS, especificamente iPhones a partir do modelo X e iPad Pro. Embora o download seja gratuito, a funcionalidade do escaneamento 3D requer um pagamento único de R\$39,90.

O Heges utiliza a câmera frontal *TrueDepth*, que é conhecida pela tecnologia de reconhecimento facial, ou o sensor LiDAR - sensor de profundidade que realiza mapeamento 3D com precisão – presentes nos dispositivos móveis da Apple lançados nos últimos anos para realizar o escaneamento 3D de objetos. Ao posicionar corretamente a câmera frontal, o processo de escaneamento deve ser iniciado, movendo-a lentamente ao redor do objeto enquanto o modelo 3D é criado.

O arquivo do modelo 3D criado pode ser exportado em formatos .OBJ, .STL, .PLY ou .GLB. Embora o aplicativo permita visualizar os modelos em realidade aumentada, não oferece ferramentas para sua edição.

É possível observar na Figura 7 a interface inicial do Heges, em que o objeto posicionado diante da câmera frontal do dispositivo é capturado para que o processo de escaneamento seja realizado. Durante esse processo, é possível ajustar a precisão e o alcance do escaneamento de acordo com as necessidades específicas, permitindo adaptar o escaneamento às características do objeto.

Figura 7 – Interface de escaneamento do aplicativo Heges



Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.1.3. Scandy Pro

O Scandy Pro pode ser baixado gratuitamente em dispositivos iOS, sendo compatível apenas com iPhones a partir do modelo X e iPad Pros mais recentes, devido a utilização do sensor de fronteira *TrueDepth*. O processo de escaneamento é realizado movendo-se lentamente a câmera frontal do dispositivo ao redor do objeto. O modelo 3D resultante pode ser exportado em formatos de arquivo .STL, .PLY, .OBJ, .GLB e .USDZ. Todas as renderizações são feitas no próprio dispositivo, eliminando a necessidade de armazenar ou registrar arquivos na nuvem.

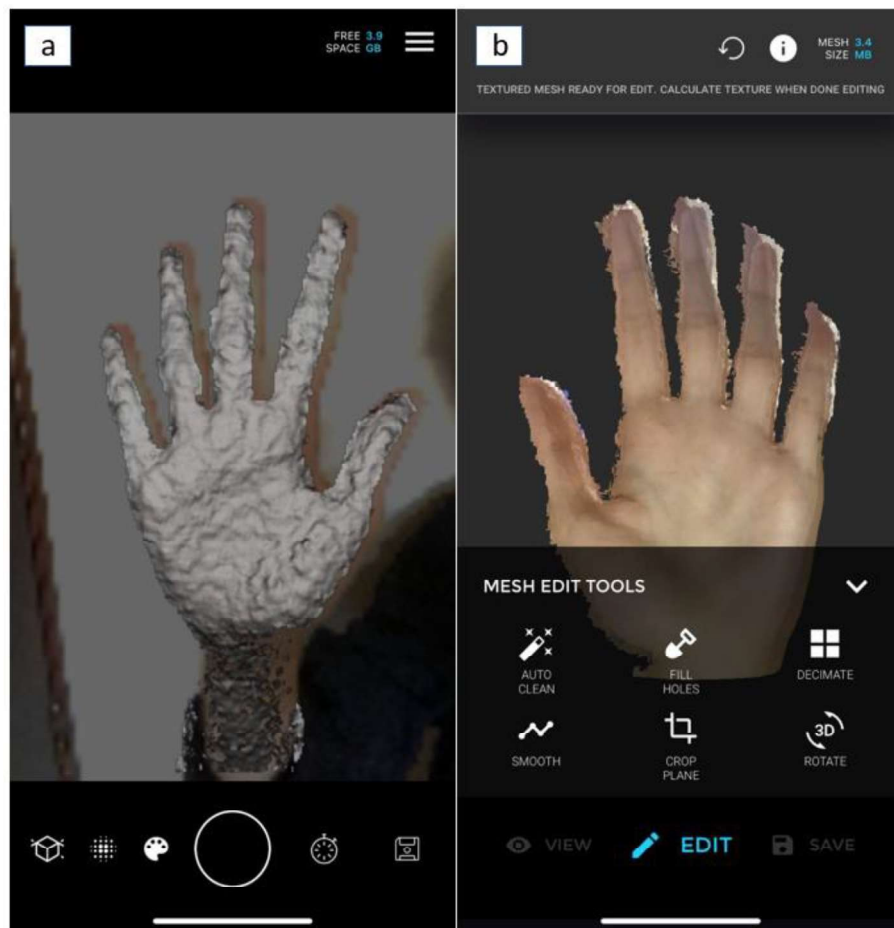
O Scandy Pro oferece diversas ferramentas de edição dos modelos diretamente no aplicativo. Isso inclui correção automática de informações indesejadas, preenchimento automático de furos pequenos no objeto, suavização de contornos e recorte.



Além da versão gratuita, o aplicativo também oferece uma versão paga que permite exportar escaneamentos de forma ilimitada. Essa versão paga está disponível por R\$21,90 por mês ou R\$199,90 por ano. Para essa pesquisa, foi utilizada a versão gratuita do aplicativo.

Assim como o aplicativo Heges, o Scandy Pro captura o objeto perante a câmera frontal do dispositivo, sendo possível ajustar a precisão de escaneamento. A Figura 8a mostra essa captura do aplicativo, enquanto a Figura 8b mostra as ferramentas de edição presentes nele.

Figura 8 – (a) Interface do Scandy Pro: (a) escaneamento; (b) edição do modelo



Fonte: Autoria própria (2023)

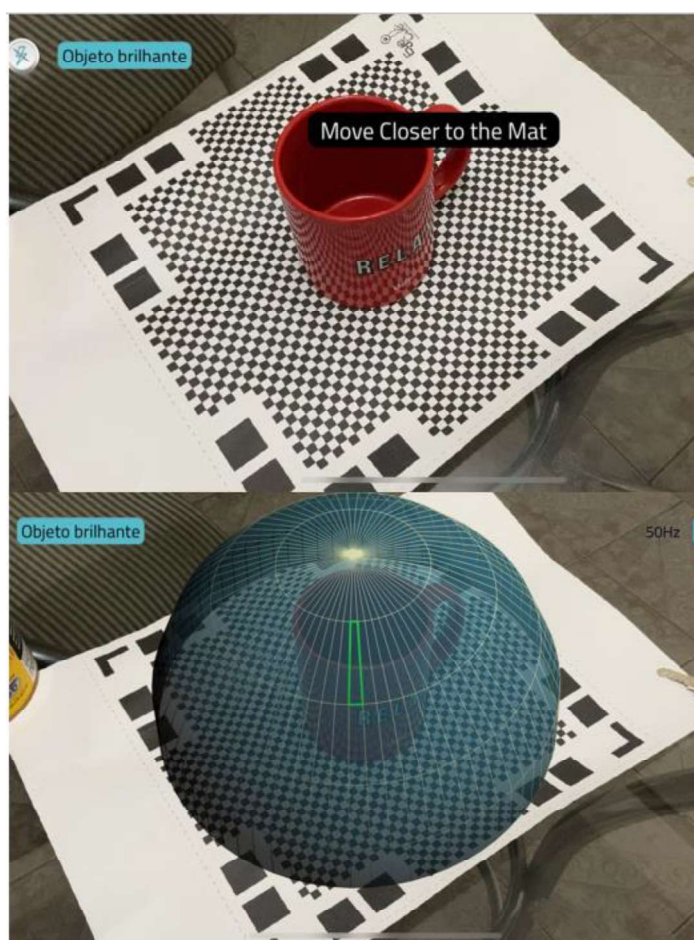
#### 3.1.4. Qlone

O aplicativo Qlone, desenvolvido pela EyeCue Vision Tech, pode ser baixado de forma gratuita em dispositivos iOS e por US\$19,99 em dispositivos Android. No

entanto, para realizar os escaneamentos em dispositivos iOS, é necessário adquirir uma licença única no valor de R\$99,90.

O Qlone utiliza um marcador exclusivo em que o objeto a ser escaneado deve ser colocado. Esse marcador cria uma cúpula de realidade aumentada no aplicativo, que serve como guia durante o processo de escaneamento, como mostra a Figura 9. A captura do objeto é realizada utilizando a câmera traseira do dispositivo, movendo-o gradualmente ao redor do objeto para obter um modelo 3D detalhado.

Figura 9 – Utilização do marcador fornecido pelo Qlone



Fonte: Autoria própria (2023)

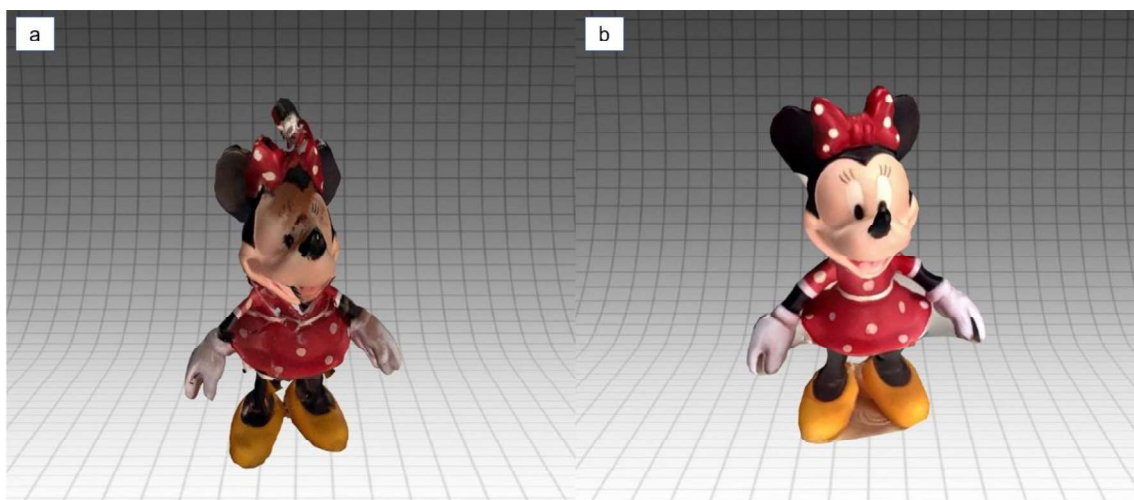
Além disso, o Qlone oferece a opção de escanear objetos sem a necessidade do marcador, permitindo escaneamentos de objetos ou espaços maiores e processados de forma mais rápida. Mesmo sem o marcador, esse método também utiliza a cúpula de realidade aumentada em torno do objeto durante o escaneamento. Esses escaneamentos são processados na nuvem, e o usuário possui um saldo inicial

de 20 créditos em nuvem após adquirir a licença de R\$99,90. É possível adquirir créditos adicionais na nuvem por R\$0,50 cada.

Os modelos 3D podem ser exportados em diversos formatos, incluindo .OBJ, .STL, .FBX, .USDZ, .GLB, .PLY e .X3D. Além disso, o Qlone oferece ferramentas de edição para ajustes e melhorias no modelo, como a remoção de partes indesejadas ou a aplicação de texturas.

A Figura 10a apresenta o modelo 3D gerado pelo Qlone a partir do escaneamento com o uso do marcador, enquanto a Figura 10b mostra o resultado do escaneamento realizado sem a utilização do marcador. Essa análise comparativa permite avaliar o desempenho e a qualidade dos modelos gerados em ambos os cenários.

Figura 10 – Modelo 3D do objeto escaneado: (a) com o marcador; (b) sem o marcador



Fonte: Autoria própria (2023)

Uma comparação entre as vantagens e desvantagens dos quatro *softwares* estudados é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Comparação entre os *softwares* estudados

Aplicativo	Preço	Compatibilidade	Possui ferramentas de edição	Escaneamento com a câmera traseira
<b>KIRI Engine</b>	Gratuito (versão paga com benefícios adicionais)	iOS e Android	Sim	Sim
<b>Heges</b>	R\$39,90	Apenas iOS	Não	Não
<b>Scandy Pro</b>	Gratuito (versão paga com benefícios adicionais)	Apenas iOS	Sim	Não
<b>Qlone</b>	R\$99,90	iOS e Android	Sim	Sim

Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.2. Impressão 3D

Após a conclusão do escaneamento 3D, o modelo escaneado é exportado no formato .STL ou .OBJ para ser, em seguida, impresso na impressora 3D. O diagrama apresentado na Figura 11 mostra as principais etapas desse processo, desde a exportação do arquivo para impressão até a criação do objeto 3D final.

Figura 11 – Etapas do processo de impressão 3D



Fonte: Autoria própria (2023)

#### 3.2.1. Arquivo .STL

Após a criação do modelo 3D do objeto a ser impresso, ele é convertido em um arquivo no formato .STL. Esse tipo de arquivo contém os dados geométricos necessários para a fabricação do objeto pela impressora 3D (JANDYAL et. al, 2022).

O formato .STL divide a superfície do objeto em uma série de triângulos interligados que representam a sua geometria tridimensional. Essa estrutura triangular é posteriormente utilizada pelos algoritmos de fatiamento para dividir o modelo em finas camadas transversais. O arquivo .STL funciona como um guia para que a impressora 3D construa o objeto camada por camada, seguindo a sequência de fatias definidas pelo arquivo (KAMRAN; SAXENA, 2016).

### 3.2.2. Filamento

Na técnica de disposição de material fundido aplicada neste estudo, a impressão 3D utiliza materiais termoplásticos em forma de filamento contínuo. Esses materiais apresentam uma variedade de propriedades e características desejáveis, como resistência à radiação UV, tenacidade e resistência, boa resistência química, entre outras (JANDYAL et al., 2022).

No presente trabalho, dois tipos de materiais foram utilizados como filamento para a impressão 3D: PLA (ácido polilático) e ABS (acrilonitrila butadieno estireno). A Tabela 3 apresenta uma comparação das propriedades desses dois materiais, enquanto a Tabela 4 fornece uma comparação das características de impressão 3D entre eles.

Tabela 3 – Propriedades dos materiais PLA e ABS

<b>Material</b>	<b>Densidade</b>	<b>Módulo de elasticidade</b>	<b>Módulo de flexão</b>	<b>Resistência à flexão</b>	<b>Resistência à tensão</b>
<b>PLA</b>	1,3 g/cm <sup>3</sup>	2-2,6 GPa	4 GPa	80 MPa	50 MPa
<b>ABS</b>	1-1,4 g/cm <sup>3</sup>	2-2,6 GPa	2,1-7,6 GPa	72-97 MPa	37-110 MPa

Fonte: Gokhare; Raut; Shinde, 2017

Tabela 4 – Propriedades de impressão dos materiais PLA e ABS

<b>Material</b>	<b>Temperatura de Extrusão</b>	<b>Temperatura da mesa</b>	<b>Ajuste de fluxo</b>
<b>PLA</b>	180 °C	60 °C	0,95
<b>ABS</b>	225 °C	90 °C	0,93

Fonte: Gokhare; Raut; Shinde, 2017

### 3.2.3. Configurações de impressão

Uma vez obtido o arquivo .STL do objeto a ser impresso, ele deve ser importado em um *software* fatiador, que será responsável por transformar o modelo tridimensional em instruções específicas para a impressora 3D seguir durante o processo de fabricação.

O modelo STL é dividido em camadas horizontais finas, onde cada fatia representa uma camada do objeto que será impressa individualmente. A espessura dessas camadas varia de acordo com o modelo da impressora e os requisitos de resolução e precisão da impressão (PAGAC et al., 2021).

Além disso, é possível definir diferentes configurações pelo *software*, que podem ser ajustadas para otimizar a impressão de acordo com as necessidades específicas do objeto. O *software* utilizado neste estudo foi o Ultimaker Cura. Algumas de suas principais configurações oferecidas são:

- Espessura da camada: afeta na qualidade do acabamento e no tempo de impressão. Quanto mais espessa a camada, maior o tempo de impressão e a resistência do objeto.
- Velocidade de impressão: controla a velocidade da cabeça de impressão, influenciando na velocidade geral de impressão e na qualidade do resultado. Quanto maior a velocidade, menor a qualidade do objeto impresso.
- Preenchimento: define a densidade pelo padrão de preenchimento interno do objeto, equilibrando sua resistência e a quantidade de material utilizado.
- Suportes: possibilidade de habilitar ou desabilitar suportes para áreas suspensas do objeto, garantindo sua estabilidade.

- Temperatura de extrusão e da mesa: permite ajustar as temperaturas de acordo com o material utilizado.
- Resfriamento: controla a velocidade e a intensidade do fluxo de ar para resfriar as camadas impressas, aumentando a qualidade da impressão.

Após definidas todas as configurações, o *software* gera um arquivo G-code, que contém todas as informações necessárias para a impressora 3D.

#### 3.2.4. Objeto 3D

Para realizar a impressão do objeto 3D, o arquivo G-code gerado pelo *software* fatiador deve ser importado na impressora. A impressora utilizada neste trabalho é a Sethi3D do modelo S3, que utiliza a tecnologia de impressão FDM (deposição de material fundido), um dos métodos mais comuns e acessíveis de impressão 3D. Antes de iniciar o processo de impressão, é importante verificar a quantidade de filamento disponível e garantir que a mesa de impressão esteja limpa e nivelada.

No método de deposição de material fundido, a cabeça do extrusor e a mesa de impressão são aquecidas de acordo com as configurações prévias até atingirem a temperatura adequada para a fusão do filamento. O objeto então é construído camada por camada, de baixo para cima, por meio da extrusão do filamento termoplástico aquecido. A cabeça de impressão se movimenta em direções específicas, depositando o material de forma precisa, e a cada camada concluída, ela é ligeiramente elevada para iniciar a impressão da camada seguinte.

Após a conclusão da impressão, o objeto pode passar por processos adicionais de refinamento, como a remoção dos suportes adicionados pelo *software* fatiador, bem como o lixamento, polimento ou pintura, a fim de aprimorar sua aparência estética ou ajustá-lo às especificações desejadas.

#### 3.2.5. Testes de impressão

Os testes de impressão 3D foram conduzidos a partir da impressão de peças de diferentes tamanhos e com dois tipos de filamentos: ABS e PLA, a fim de se observar e avaliar as propriedades de cada filamento no contexto específico do estudo.

Em todos os casos, parte do objeto de apoio do membro e o restante da superfície escaneada foram cortadas utilizando as ferramentas do próprio aplicativo de escaneamento, para que apenas o membro e o restante do objeto de apoio fossem impressos. Os tamanhos do modelo foram definidos posteriormente pelo *software* de fatiamento UltiMaker Cura, juntamente com as demais configurações de impressão, como a aplicação de suportes para garantir estabilidade necessária em determinadas áreas e as temperaturas de impressão. Esses suportes podem ser removidos ou destacados manualmente do objeto impresso final.

As configurações utilizadas para as impressões para as peças de ABS estão apresentadas na Figura 12. Para as peças de PLA, foram utilizadas as mesmas configurações, com exceção das temperaturas. A temperatura de extrusão utilizada para o PLA foi de 210 °C e a da mesa, de 60 °C. As temperaturas para os dois tipos de filamento foram definidas de acordo com as recomendações do fabricante.

Figura 12 – Configurações de impressão utilizadas

The image shows the 'Print settings' window in Ultimaker Cura. The interface is divided into two main panels. The left panel contains a search bar and several expandable sections: 'Quality' (Layer Height: 0.1 mm), 'Walls' (Wall Thickness: 0.8 mm, Wall Line Count: 2, Horizontal Expansion: 0.0 mm), and 'Top/Bottom' (Top/Bottom Thickness: 0.8 mm, Top Thickness: 0.8 mm, Top Layers: 8, Bottom Thickness: 0.8 mm, Bottom Layers: 8). The right panel contains more expandable sections: 'Infill' (Infill Density: 20.0 %, Infill Pattern: Grid), 'Material' (Printing Temperature: 235.0 °C, Build Plate Temperature: 110.0 °C), 'Speed' (Print Speed: 60.0 mm/s), 'Travel' (Enable Retraction: checked, Z Hop When Retracted: unchecked), 'Cooling' (Enable Print Cooling: checked, Fan Speed: 0.0 %), 'Support' (Generate Support: checked, Support Placement: Everywhere, Support Overhang Angle: 50.0 °), and 'Build Plate Adhesion' (Build Plate Adhesion Type: Brim).

Section	Parameter	Value	Unit
Quality	Layer Height	0.1	mm
	Wall Thickness	0.8	mm
	Wall Line Count	2	
	Horizontal Expansion	0.0	mm
Top/Bottom	Top/Bottom Thickness	0.8	mm
	Top Thickness	0.8	mm
	Top Layers	8	
	Bottom Thickness	0.8	mm
	Bottom Layers	8	
Infill	Infill Density	20.0	%
	Infill Pattern	Grid	
Material	Printing Temperature	235.0	°C
	Build Plate Temperature	110.0	°C
Speed	Print Speed	60.0	mm/s
Travel	Enable Retraction	checked	
	Z Hop When Retracted	unchecked	
Cooling	Enable Print Cooling	checked	
	Fan Speed	0.0	%
Support	Generate Support	checked	
	Support Placement	Everywhere	
	Support Overhang Angle	50.0	°
Build Plate Adhesion	Build Plate Adhesion Type	Brim	

Fonte: Autoria própria (2023)



### 3.3. Ensaio mecânicos

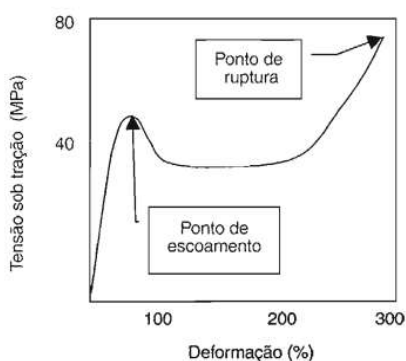
As próteses impressas nos dois tipos de materiais termoplásticos (PLA e ABS) foram submetidas a ensaios mecânicos a fim de se analisar as propriedades mecânicas dos materiais quando submetidos a esforços. Os ensaios necessários para a avaliação são de tração, compressão e flexão, que produzem esforços unidimensionais (solicitações simples).

#### 3.3.1. Ensaio de tração

O ensaio de tração consiste na solicitação de um provete de uma geometria adequada – podendo apresentar seção circular, retangular, quadrada ou anelar – com uma força de tração uniaxial continuamente crescente. Simultaneamente, é realizado o registro da força e do alongamento sofrido do provete. Os resultados do ensaio são apresentados por meio de um gráfico de tensão por deformação (DAVIM; MAGALHÃES, 2010).

A força de tração axial deve ser aplicada no corpo de prova com uma velocidade constante, fazendo com que o material se deforme na direção do esforço, alongando-se até a ruptura. A partir do gráfico de tensão e deformação gerado pelo ensaio de tração, é possível determinar as propriedades de Resistência à Tração, Módulo de Elasticidade, Tensão e Deformação no Escoamento, Tensão e Deformação na Ruptura. A Figura 13 representa a curva de tensão-deformação sob tração de um polímero (CANEVAROLO JÚNIOR, 2006).

Figura 13 – Curva de tensão-deformação sob tração de náilon 6,6



Fonte: Canevarolo Júnior, 2006

As tensões em cada região da curva são definidas pela razão entre a força aplicada e a área da seção transversal do corpo de prova:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

onde  $\sigma$  significa tensão,  $F$  representa a força e  $A$  representa a área.

Já a deformação é calculada pela razão entre a variação de comprimento sofrida pela aplicação da força e o comprimento inicial de referência:

$$\varepsilon = 100 \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

onde  $\varepsilon$  significa deformação,  $l$  representa o comprimento do corpo de prova no momento a ser medida a deformação e  $l_0$  é o comprimento inicial de referência.

O limite de escoamento representa a transição entre a deformação elástica e a deformação plástica do material. A deformação elástica é temporária e é totalmente recuperada quando a carga é removida. Já a deformação plástica não é recuperada com a remoção da carga. Pela curva de tensão-deformação, podem ser observadas a tensão e a deformação no ponto de escoamento.

O último ponto da curva representa o ponto de ruptura do corpo de prova, onde também é possível observar seus valores de tensão e deformação que causaram essa ruptura.

O módulo de elasticidade do material ( $E$ ), também chamado de módulo de Young, é definido pela inclinação da porção linear da curva de tensão-deformação, ou seja, pela razão entre a tensão e a deformação na região elástica da curva, representada pela Lei de Hooke:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

Por fim, o limite de resistência à tração é definido pela tensão máxima aplicada ao corpo até sua falha (SHACKELFORD, 2014).

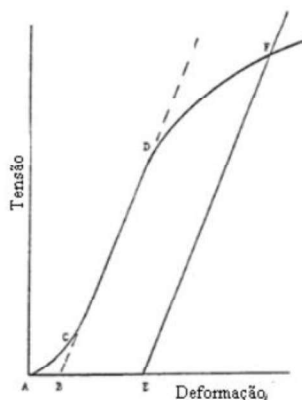
### 3.3.2. Ensaio de compressão

O ensaio de compressão é realizado submetendo o corpo de prova a uma carga compressiva, que tende a reduzir o tamanho ou volume da amostra, a fim de se determinar as propriedades mecânicas dos materiais submetidos a esse tipo de carga. Assim como no ensaio de tração, os eixos são deslocados com uma força uniaxial e velocidade constante, porém na direção de compressão da amostra, gerando a curva de tensão e deformação de onde as propriedades mecânicas serão extraídas (CARUSO, 2015).

Em materiais frágeis, a zona elástica é muito pequena, fazendo com que não seja possível analisar as propriedades mecânicas do material relativas a essa área, como o módulo de elasticidade. Em contrapartida, pela compressão dos materiais dúcteis, a aplicação da Lei de Hooke é válida. O módulo de elasticidade e a resistência à compressão são as propriedades mais usualmente extraídas desse tipo de ensaio (DAVIM; MAGALHÃES, 2010).

A Figura 14 mostra uma curva de tensão-deformação sob compressão típica para materiais poliméricos.

Figura 14 – Curva de tensão-deformação sob compressão de material polimérico



Fonte: ASTM D695-02, 2002

### 3.3.3. Ensaio de flexão

O ensaio de flexão é utilizado para determinar a resistência à flexão de um material, bem como a tensão e a deformação na flexão. Além disso, pode-se definir

também por esse ensaio outras propriedades mecânicas dos materiais, como o módulo de elasticidade à flexão. Nesse tipo de ensaio, uma força de flexão é aplicada no centro do corpo de prova até sua ruptura (DAVIM; MAGALHÃES, 2010).

A tensão de flexão representa o valor máximo de tensão aplicado no corpo de prova e é calculado pela seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{MY}{I} \quad (4)$$

onde M representa o momento máximo de flexão, Y a distância do eixo neutro à fibra externa e I o momento de inércia da seção transversal do corpo de prova em relação ao seu eixo. Para calcular o momento máximo de flexão (M) e o momento de inércia para provetes de seção retangular temos as seguintes equações:

$$M = \frac{F_{\text{máx}}L}{2} \quad (5)$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (6)$$

onde  $F_{\text{máx}}$  é a força máxima de flexão e L, b e h representam o comprimento, a largura e a altura do provete retangular.

O módulo de elasticidade à flexão (E) pode ser obtido pela equação:

$$E = \frac{FL^3}{48yI} \quad (7)$$

em que y é a flecha medida para a força (F) aplicada. Pela medida das flechas em relação às forças aplicadas, é possível traçar uma curva tensão-deformação, em que a tensão para provetes retangulares é dada pela expressão:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (8)$$

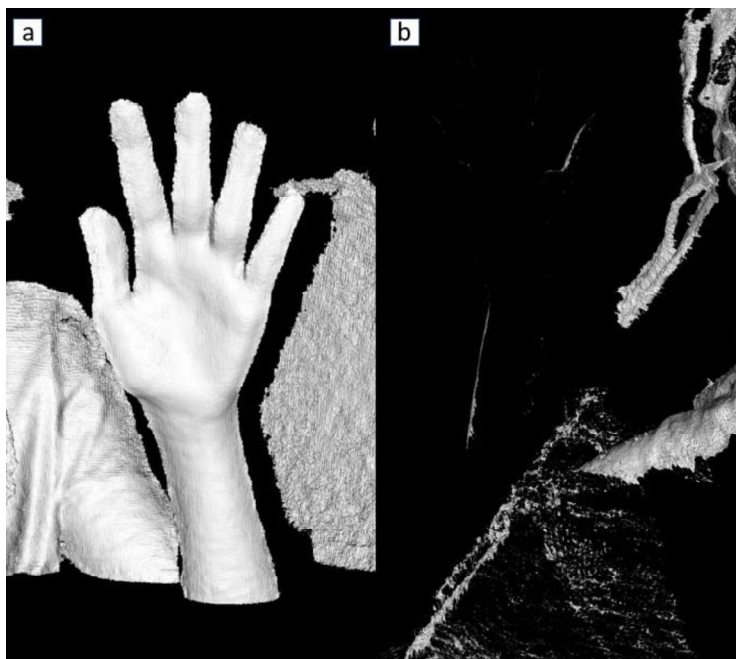
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados obtidos para a avaliação dos *softwares* de escaneamento, a impressão dos modelos 3D gerados e os testes mecânicos realizados com as próteses impressas.

### 4.1. Escaneamento 3D

Durante a seleção dos aplicativos de escaneamento 3D para o estudo, verificou-se que os aplicativos Heges e Scandy Pro não atenderam aos critérios de utilização, gerando resultados de escaneamento insatisfatórios. Esses aplicativos permitem apenas a realização do escaneamento utilizando a câmera frontal do dispositivo, o que acaba por dificultar o processo, uma vez que o usuário que está realizando o escaneamento não consegue visualizar adequadamente a tela do dispositivo ao rotacionar o celular em torno do membro. Essa limitação de visualização faz com que haja uma dificuldade ao alinhar corretamente o membro com a área de escaneamento, levando a modelos tridimensionais incompletos, como mostra a Figura 15.

Figura 15 – Escaneamento realizado com o aplicativo Heges: (a) parte frontal; (b) parte traseira

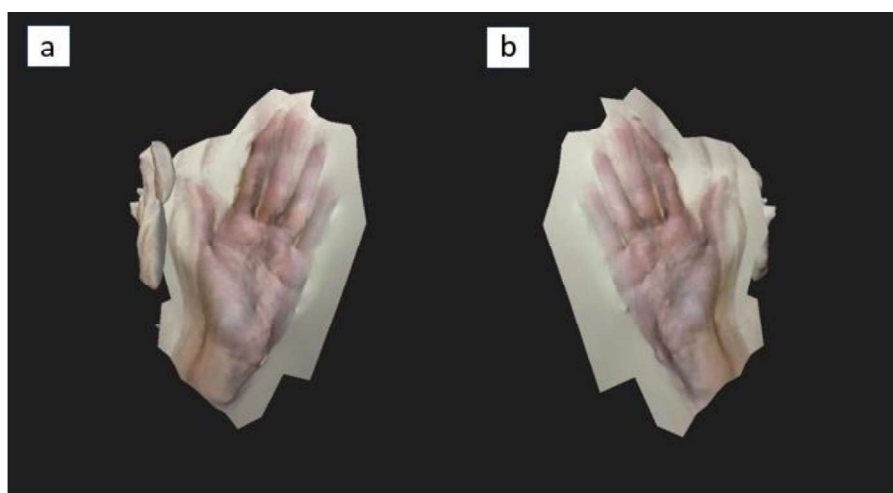


Fonte: Autoria própria (2023)

Para dar continuidade ao estudo, foram utilizados os aplicativos KIRI Engine e Qlone como ferramentas principais para a realização de escaneamentos.

Com o aplicativo KIRI Engine, foram realizados alguns testes de escaneamento de mãos e dedos. A primeira tentativa foi feita posicionando uma mão em pé em diante de uma parede clara, capturando um total de 47 fotos. Os algoritmos de escaneamento são projetados para identificar o objeto com base em sua forma, tamanho, textura e cor. No entanto, devido ao membro e a parede possuírem tons muito próximos, o algoritmo interpretou erroneamente a parede como uma extensão da mão, como ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Escaneamento realizado com o KIRI Engine: (a) parte frontal; (b) parte traseira



Fonte: Autoria própria (2023)

Com o objetivo de aumentar o contraste entre a mão e a superfície, permitindo que o algoritmo diferencie o objeto de forma precisa, foram utilizados papéis cartão pretos estrategicamente posicionados, como mostra a Figura 17. Esses papéis foram colocados sob a mão, criando uma base escura que contrasta com a cor da pele, facilitando a distinção dos contornos da mão pelo aplicativo. Além disso, um papel cartão preto adicional foi utilizado para ocultar a pessoa em si, minimizando a influência das cores próximas da parede, de outros objetos presentes e de outras partes do corpo da pessoa sendo escaneada. Para o escaneamento de peles mais escuras, seria necessário a utilização de uma superfície mais clara, como papéis cartão brancos.

Figura 17 – Posicionamento da mão para escaneamento utilizando papéis cartão pretos



Fonte: Autoria própria (2023)

Com a melhoria do contraste, foi possível que o algoritmo diferenciase o membro da superfície durante o escaneamento. Entretanto, ainda não foi alcançado um modelo 3D satisfatório pelo KIRI Engine. A Figura 18 apresenta o resultado de um escaneamento de uma mão, realizado a partir da captura de 70 imagens, em que o modelo 3D ficou incompleto. Um melhor resultado foi obtido ao escanear apenas um dedo da mão, utilizando 20 imagens, mas que ainda assim não gerou um resultado de qualidade adequada, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 18 – Escaneamento de uma mão realizado pelo KIRI Engine



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 19 – Escaneamento de um dedo realizado pelo KIRI Engine



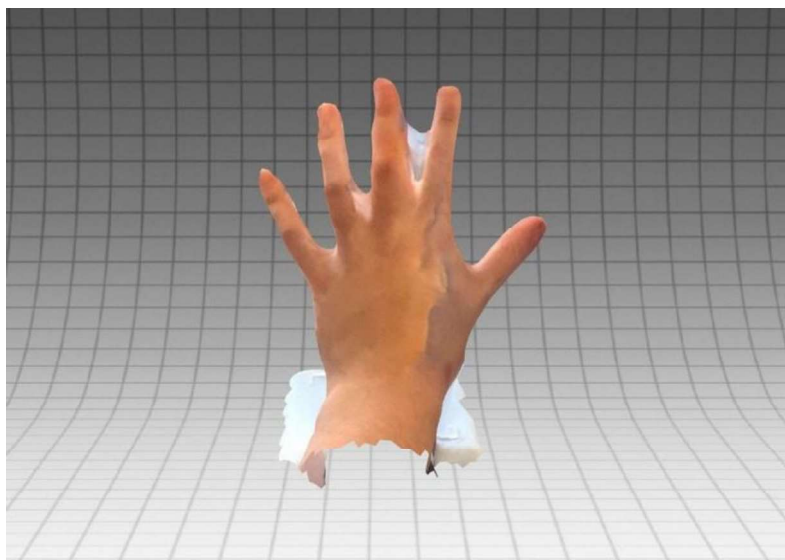
Fonte: Autoria própria (2023)

Para o uso do aplicativo Qlone, adotou-se a mesma abordagem de preparação, utilizando os papéis cartão pretos para escanear a mão na posição indicada na Figura 17. O escaneamento foi feito sem a presença do marcador disponibilizado pelo aplicativo, uma vez que os testes demonstraram que a qualidade do escaneamento realizado dessa forma é superior, proporcionando modelos mais nítidos e fiéis à realidade.

Os primeiros testes de escaneamento de uma mão realizados com o Qlone, utilizando o contraste entre o membro e a superfície, geraram resultados notavelmente mais precisos e semelhantes à realidade em comparação ao KIRI Engine. Em alguns casos, foi observada uma pequena restrição onde o espaço entre dois dedos da mão não era capturado corretamente, fazendo com que não houvesse uma separação correta entre eles, como mostra a Figura 20.



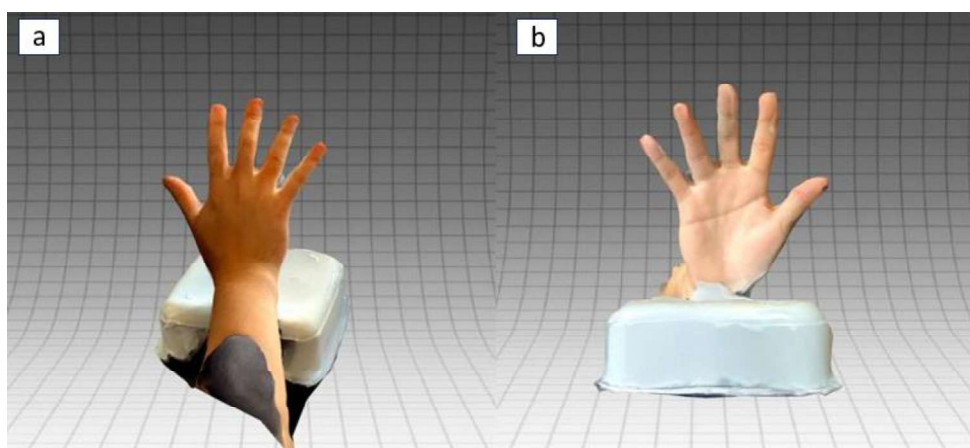
Figura 20 – Escaneamento de uma mão realizado com o Qlone



Fonte: Autoria própria (2023)

A leitura incorreta da separação entre os dedos pelo *software* foi atribuída a possíveis movimentos sutis da mão durante o processo de escaneamento ou à presença de iluminação inadequada. Diante dessa constatação, uma nova tentativa foi conduzida, com ênfase na estabilização da mão e na aplicação de uma iluminação cuidadosamente ajustada. O escaneamento foi realizado em um ambiente claro, com exposição à luz solar e com a aplicação de uma luz branca artificial seguindo a rotação do dispositivo. Como resultado, o modelo 3D obtido nessa nova tentativa apresentou uma qualidade superior, correspondendo às expectativas estabelecidas. A Figura 21 ilustra esse resultado.

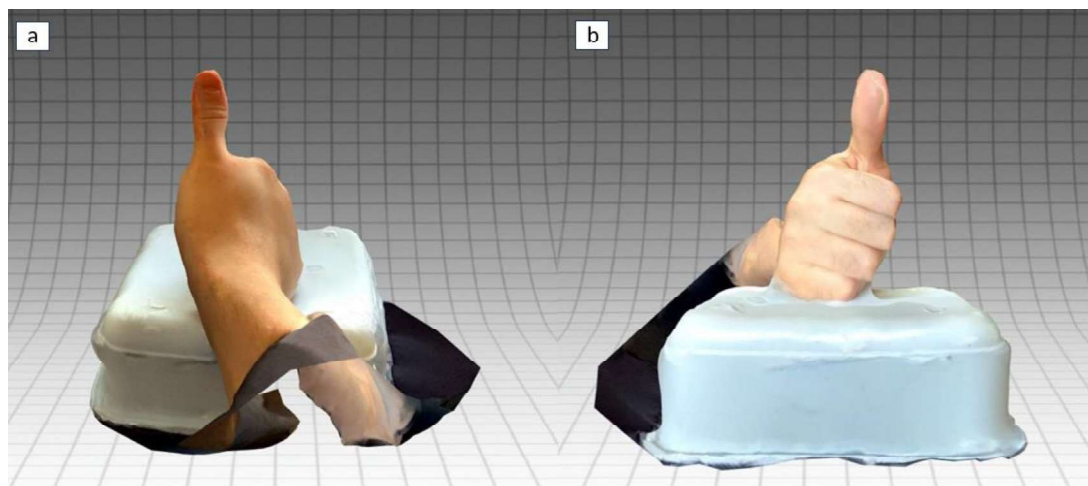
Figura 21 – Escaneamento de uma mão realizado com o Qlone: (a) parte frontal; (b) parte traseira



Fonte: Autoria própria (2023)

Seguindo ainda o mesmo processo, foi realizado o escaneamento de um dedo da mão pelo Qlone. O resultado é ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Escaneamento de um dedo realizado com o Qlone: (a) parte frontal; (b) parte traseira



Fonte: Autoria própria (2023)

Após realizar escaneamentos da mão e do dedo, levando em consideração as medidas de contraste da superfície, aprimorando a iluminação adequada e garantindo a estabilização do membro, o aplicativo Qlone demonstrou sua capacidade de gerar modelos 3D das partes do corpo humano com fidelidade à realidade e com a qualidade esperada para o presente estudo.

#### 4.2. Impressão 3D

As primeiras impressões foram conduzidas com base no escaneamento apresentado na Figura 20, em que o *software* não interpretou adequadamente a separação entre os dedos da mão, utilizando o filamento de ABS. A impressão foi feita definindo um tamanho reduzido do modelo, a fim de se observar suas características de impressão e avaliar como poderia ser aprimorado a junção entre os dedos gerada pelo escaneamento. As configurações de impressão utilizadas são apresentadas na Figura 12, com as temperaturas impressão e da cama definidas de acordo com as propriedades do ABS.

O resultado do primeiro teste de impressão pode ser visualizado na Figura 23. Após a conclusão da impressão, os suportes aplicados para proporcionar estabilidade ao objeto foram removidos manualmente. Para reduzir a presença de filamentos soltos e irregularidades, foram utilizadas lixas de diferentes granulometrias, o que permitiu um melhor acabamento do objeto de forma prática e fácil. Quanto à área gerada erroneamente entre os dois dedos, foi realizada uma tentativa de corte com lâmina, que não foi bem-sucedida. Como essa região possui uma maior quantidade de material, foram observadas dificuldades em sua remoção. O esforço realizado para removê-la resultaram na quebra de uma parte de um dos dedos, ilustrado na Figura 24.

Figura 23 – Primeiro teste de impressão realizado com ABS



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 24 – Objeto impresso após lixamento e tentativa de corte

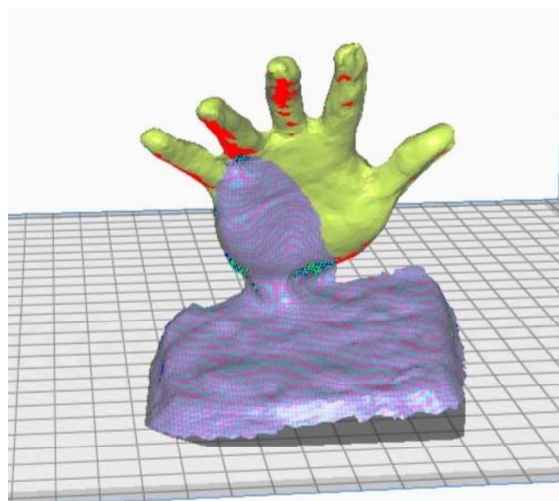


Fonte: Autoria própria (2023)

As impressões seguintes foram realizadas com o modelo da mão apresentado na Figura 21, em ABS e PLA. As configurações de impressão foram as mesmas para os dois tipos de filamento, como ilustradas na Figura 12, com exceção das temperaturas. Para as impressões em PLA, a temperatura de impressão foi de 210 °C e a temperatura da cama de 60 °C, seguindo as propriedades do material.

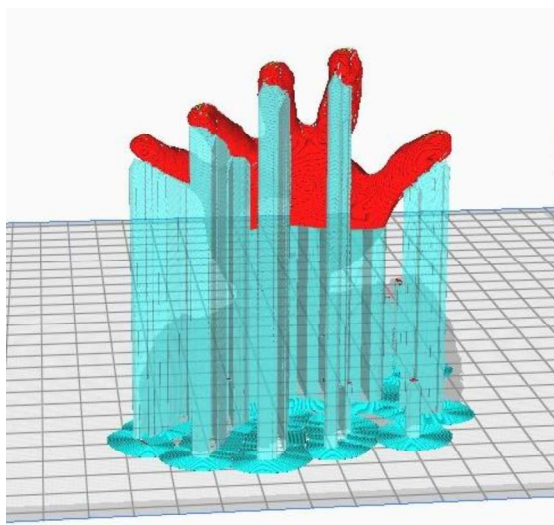
A Figura 25 mostra o modelo a ser impresso importado no *software* fatiador, enquanto a Figura 26 exibe a aplicação de suportes pelo *software* para a estabilidade da peça.

Figura 25 – Modelo da mão escaneada exibido pelo UltiMaker Cura



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 26 – Suportes aplicados pelo UltiMaker Cura para estabilidade da peça



Fonte: Autoria própria (2023)

Os resultados das impressões estão ilustrados na Figura 27, onde é possível comparar superficialmente as próteses de ABS e de PLA. À esquerda da imagem está posicionada a peça impressa em PLA, enquanto à direita está a peça impressa em ABS.

Figura 27 – Impressões realizadas em PLA e ABS: (a) parte frontal; (b) parte traseira



Fonte: Autoria própria (2023)

Comparando as próteses impressas com os dois tipos de material, é possível perceber que a peça de ABS apresentou um melhor acabamento, com uma quantidade significativamente menor de filamentos soltos e irregularidades. Além disso, notou-se também que a remoção do suporte na prótese de ABS ocorreu com uma maior facilidade em comparação com o outro material utilizado.

Considerando o melhor resultado estético da peça impressa em ABS, esse material foi utilizado para a impressão da prótese em tamanho real da mão, definindo sua dimensão de altura, no eixo Z, como 182 mm. Essa impressão demandou um tempo total de 23 horas e 23 minutos para ser concluída, e consumiu aproximadamente 156 gramas de filamento, como apontados pelo *software*. A Figura 28 ilustra a prótese impressa ainda com os suportes, enquanto a Figura 29 mostra a prótese após a realização de cortes e lixamento para acabamento.



Figura 28 – Prótese impressa em ABS com suportes



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 29 – Prótese impressa em ABS após corte e lixamento



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 30 é apresentada uma comparação entre a mão real escaneada e a prótese impressa, confirmando a semelhança entre as duas.

Figura 30 – Comparação entre o membro escaneado e a prótese impressa



Fonte: Autoria própria (2023)

Por fim, foi realizada a impressão de um dedo da mão obtido pelo escaneamento ilustrado na Figura 22. A peça foi impressa utilizando o filamento ABS e é ilustrada na Figura 31, onde é possível observar também sua semelhança com a realidade.

Figura 31 – Prótese de um dedo impressa em ABS



Fonte: Autoria própria (2023)



### 4.3. Ensaio mecânicos

Para a realização do experimento, foi utilizada a máquina universal da EMIC, de modelo DL-3000, equipada com uma célula de carga capaz de suportar 10 toneladas ou 100 kN, disponibilizada pela universidade. No entanto, devido às próteses utilizadas para teste não possuírem as dimensões adequadas para serem consideradas corpos de prova, não foi possível determinar suas áreas ou encaixá-las de maneira adequada na máquina para a realização dos ensaios de tração e flexão. Portanto, apenas o ensaio de compressão pôde ser realizado, como ilustrado na Figura 32.

Figura 32 – Ensaio de compressão realizado na máquina universal



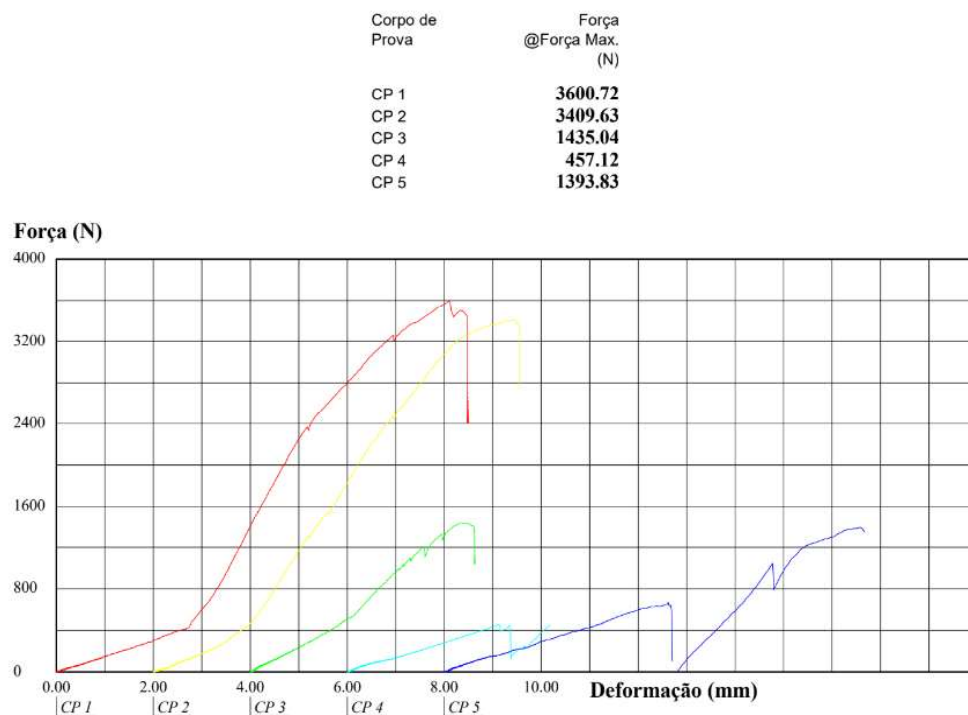
Fonte: Autoria própria (2023)

Para a realização do ensaio mecânico de compressão, foram utilizados três modelos em ABS e dois modelos em PLA de uma mão em escala reduzida em relação ao tamanho real. Devido à natureza irregular da geometria das peças, não foi possível determinar suas áreas, que são necessárias para definir a tensão aplicada e,

consequentemente, as propriedades dependentes desse parâmetro. Com isso, o ensaio foi conduzido com o objetivo de obter as forças máximas suportadas por cada material até sua ruptura, estabelecendo uma comparação entre eles.

A Figura 33 demonstra os resultados obtidos dos ensaios, onde são exibidas as forças máximas aplicadas em cada corpo de prova até sua ruptura, bem como seus gráficos de força por deformação.

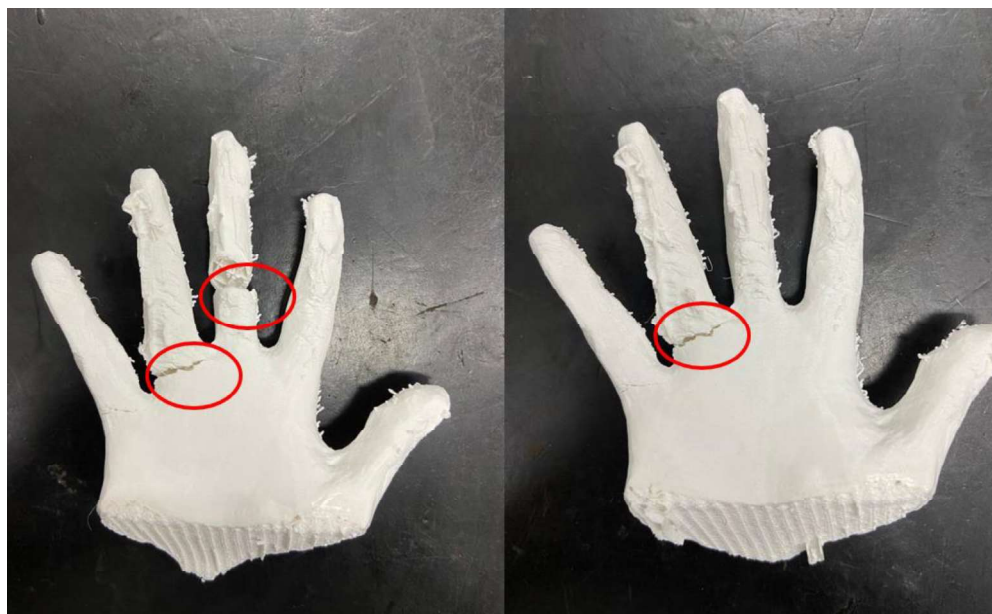
Figura 33 – Resultados dos ensaios mecânicos de compressão



Fonte: Gerado pela EMIC DL3000 (2023)

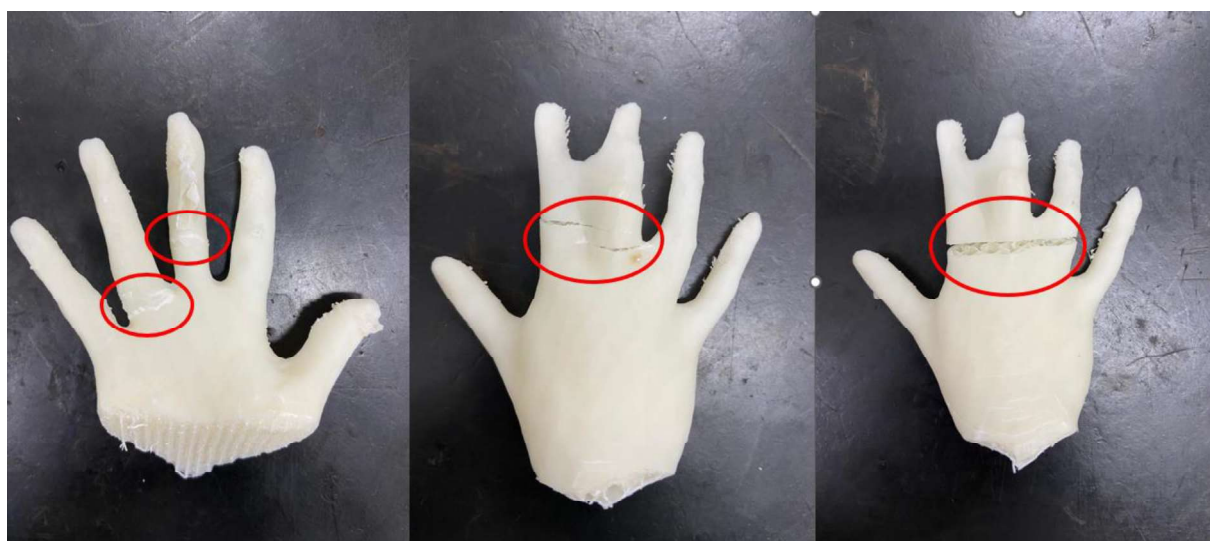
Os corpos de prova CP1 e CP2 no gráfico representam as peças de PLA, enquanto os corpos de prova CP3, CP4 e CP5 representam as peças de ABS. Todas as peças tiveram sua ruptura inicial na região dos dedos das mãos, como mostram a Figura 34 e a Figura 35.

Figura 34 – Corpos de prova de PLA após a ruptura



Fonte: Autorial própria (2023)

Figura 35 – Corpos de prova de ABS após a ruptura



Fonte: Autorial própria (2023)

Ao realizar os testes, o primeiro corpo de prova de PLA suportou uma carga máxima de 3600,72 N e o segundo, uma carga máxima de 3409,63 N. Considerando esses valores, obtemos um valor médio para a força máxima de compressão para o PLA de 3505,18 N (ou 3,5 kN) até o ponto ruptura.

Quanto aos corpos de prova de ABS, notou-se que o CP3 e o CP5 apresentaram resultados próximos, enquanto o CP4 demonstrou uma ruptura

ocorrendo a uma força relativamente menor, o que pode ser interpretado como um indicativo de um posicionamento inadequado da peça durante o ensaio. Com base nisso, optou-se por considerar apenas os resultados obtidos a partir do CP3 e do CP5 para o estudo. O primeiro corpo de prova de ABS suportou uma carga máxima de compressão de 1435,04 N, enquanto o último corpo de prova de ABS suportou uma carga máxima de 1393,83 N (equivalente a 1,4 kN).

Portanto, os resultados obtidos evidenciam que as próteses fabricadas com PLA apresentam uma resistência superior às feitas com ABS, demonstrando maior capacidade de suportar forças de compressão.

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nesse trabalho confirmaram a viabilidade da utilização dispositivos móveis para realizar o escaneamento de partes do corpo humano com o intuito de fabricar próteses através da manufatura aditiva de forma mais fácil e com menores custos em relação ao processo tradicional. Dentre todos os aplicativos de escaneamento 3D avaliados, apenas o Qlone apresentou resultados satisfatórios em termos de precisão e fidelidade à realidade. Essa descoberta ressalta a importância de selecionar adequadamente a ferramenta de escaneamento para garantir a obtenção de modelos 3D confiáveis e de alta qualidade, a fim de viabilizar a fabricação de próteses personalizadas de acordo com as características de quem irá recebê-las.

O aplicativo selecionado para a idealização da pesquisa possui um custo único de R\$99,90 para utilização e um saldo inicial de 20 créditos em nuvem, forma em que os escaneamentos realizados sem o marcador disponibilizado pelo *software* são processados. Entretanto, é possível adquirir créditos adicionais pelo valor de R\$0,50 cada, permitindo ampliar a capacidade de processamento e realizar mais escaneamentos dentro do aplicativo, caso necessário.

Os resultados das impressões dos modelos gerados pelo Qlone comprovaram a eficácia do escaneamento realizado pelo aplicativo, evidenciando a qualidade dos resultados obtidos. Tanto as peças impressas em ABS quanto as impressas em PLA demandam um refinamento posterior para aprimorar seu aspecto estético. Contudo, notou-se que as próteses impressas em ABS apresentaram um acabamento superior em comparação com as impressas em PLA.

Apesar das próteses fabricadas com ABS apresentarem um melhor acabamento estético inicial, facilitando seu refinamento, as próteses de PLA demonstraram uma resistência superior às forças de compressão, propriedade crucial para a aplicação específica em questão.

### 5.1. Pesquisas futuras

Embora este estudo tenha explorado com sucesso a utilização de aplicativos de dispositivos móveis para o escaneamento de partes do corpo humano e fabricação de próteses por meio da impressão 3D, existem ainda algumas questões que merecem investigações futuras. Essas questões incluem:

- Busca por novos *softwares* que realizem escaneamentos precisos de partes do corpo humano, para que essa aplicação não seja limitada a apenas um *software*.
- Testes de digitalização com condições ambientais de iluminação diferentes.
- Avaliação do escaneamento 3D por dispositivos móveis de outras partes do corpo humano, expandindo o escopo da aplicação além de mãos e dedos.
- Estudo de materiais mais avançados na fabricação das próteses, que possam proporcionar propriedades mecânicas superiores, maior durabilidade e conforto para os usuários.
- Realização de ensaios mecânicos próprios para a geometria das próteses, fornecendo propriedades mais específicas e abrangentes.
- Estudos sobre como as próteses fabricadas pela impressão 3D podem ser integradas ao membro do usuário de forma eficiente e segura pela investigação de técnicas de encaixe, fixação e personalização.
- Avaliações clínicas e funcionais para avaliar o desempenho, a funcionalidade e o conforto das próteses por meio de testes práticos em pacientes reais.

## REFERÊNCIAS

- ALAZZAM, Abdualziz; ALJARBA, Sultan; ALSHOMER, Feras; ALAWIRDHI, Bassam. The Utility of Smartphone 3D Scanning, Open-Sourced Computer-aided Design, and Desktop 3D Printing in the Surgical Planning of Microtia Reconstruction: a step by step guide and concept assessment. **Jpras Open**, [S.L.], v. 30, p. 17-22, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpra.2021.06.001>.
- ASTM. **D695 – 10**: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. Estados Unidos, 2010.
- CABIBIHAN, John-John; ABUBASHA, M. Khaleel; THAKOR, Nitish. A Method for 3-D Printing Patient-Specific Prosthetic Arms With High Accuracy Shape and Size. **IEEE Access**, [S.L.], v. 6, p. 25029-25039, 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/access.2018.2825224>.
- CAMPBELL, Thomas; WILLIAMS, Christopher; IVANOVA, Olga; GARRETT, Banning. Could 3D Printing Change the World?: technologies, potential, and implications of additive manufacturing. **Atlantic Council**, [S.L.], p. 1-15, out. 2011.
- CANEVAROLO JÚNIOR, Sebastião Vicente. **Ciência dos Polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006. 227 p.
- CARUSO, Juliana Gutierrez. **DESENVOLVIMENTO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE CORPOS DE PROVA APLICÁVEIS A ENSAIOS DE TRAÇÃO, COMPRESSÃO E TORÇÃO DE POLÍMEROS**. 2015. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário da Fei, São Bernardo do Campo, 2015.
- DAVIM, J. P.; MAGALHÃES, A. G.. **Ensaaios Mecânicos e Tecnológicos**. 3. ed. Porto: Publindústria, 2010.
- DODZIUK, Helena. Applications of 3D printing in healthcare. **Polish Journal Of Cardio-Thoracic Surgery**, [S.L.], v. 3, p. 283-293, 2016. Termedia Sp. z.o.o. <http://dx.doi.org/10.5114/kitp.2016.62625>.
- GOKHARE, Vinod G.; RAUT, D. N.; SHINDE, D. K. A Review paper on 3D-Printing Aspects and Various Processes Used in the 3D-Printing. **Ijert Journal**, Mumbai, v. 6, n. 6, p. 953-958, jun. 2017.
- HALEEM, Abid; JAVAID, Mohd; SINGH, Ravi Pratap; RAB, Shanay; SUMAN, Rajiv; KUMAR, Lalit; KHAN, Ibrahim Haleem. Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: an overview. **International Journal Of Cognitive Computing In Engineering**, [S.L.], v. 3, p. 161-171, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijcce.2022.08.003>.
- JAVAID, Mohd; HALEEM, Abid; SINGH, Ravi Pratap; SUMAN, Rajiv. Industrial perspectives of 3D scanning: features, roles and it's analytical applications. **Sensors**

**International**, [S.L.], v. 2, p. 100114, 2021. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100114>.

KAMRAN, Medhavi; SAXENA, Abhishek. A Comprehensive Study on 3D Printing Technology. **Mit International Journal Of Mechanical Engineering**, [S.L.], v. 6, n. 2, p. 63-68, ago. 2016.

KATE, Jelle Ten; SMIT, Gerwin; BREEDVELD, Paul. 3D-printed upper limb prostheses: a review. **Disability And Rehabilitation: Assistive Technology**, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 300-314, 2 fev. 2017. Informa UK Limited.  
<http://dx.doi.org/10.1080/17483107.2016.1253117>.

KATE, Jelle Ten; SMIT, Gerwin; BREEDVELD, Paul. 3D-printed upper limb prostheses: a review. **Disability And Rehabilitation: Assistive Technology**, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 300-314, 2 fev. 2017. Informa UK Limited.  
<http://dx.doi.org/10.1080/17483107.2016.1253117>.

KOHTALA, Sampsa; ERICHSEN, Jørgen F.; WULLUM, Ole Petter; STEINERT, Martin. Photogrammetry-based 3D scanning for supporting design activities and testing in early stage product development. **Procedia Cirp**, [S.L.], v. 100, p. 762-767, 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.047>.

LIU, Jinghui; WANG, Yuezong. 3D surface reconstruction of small height object based on thin structured light scanning. **Micron**, [S.L.], v. 143, p. 103022, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.micron.2021.103022>.

MANERO, Albert; SMITH, Peter; SPARKMAN, John; DOMBROWSKI, Matt; COURBIN, Dominique; KESTER, Anna; WOMACK, Isaac; CHI, Albert. Implementation of 3D Printing Technology in the Field of Prosthetics: past, present, and future. **International Journal Of Environmental Research And Public Health**, [S.L.], v. 16, n. 9, p. 1641, 10 maio 2019. MDPI AG.  
<http://dx.doi.org/10.3390/ijerph16091641>.

MATHEW, Essyrose; PITZANTI, Giulia; LARRAÑETA, Eneko; LAMPROU, Dimitrios A. 3D Printing of Pharmaceuticals and Drug Delivery Devices. **Pharmaceutics**, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 266, 15 mar. 2020. MDPI AG.  
<http://dx.doi.org/10.3390/pharmaceutics12030266>.

MURATOV, Oleg; SLYNKO, Yury; CHERNOV, Vitaly; LYUBIMTSEVA, Maria; SHAMSUAROV, Artem; BUCHA, Victor. 3DCapture: 3d reconstruction for a smartphone. **2016 IEEE Conference On Computer Vision And Pattern Recognition Workshops (Cvprw)**, Las Vegas, p. 893-900, jun. 2016. IEEE.  
<http://dx.doi.org/10.1109/cvprw.2016.116>.

PAGAC, Marek; HAJNYS, Jiri; MA, Quoc-Phu; JANCAR, Lukas; JANSKA, Jan; STEFEK, Petr; MESICEK, Jakub. A Review of Vat Photopolymerization Technology: materials, applications, challenges, and future trends of 3d printing. **Polymers**, [S.L.], v. 13, n. 4, p. 598, 17 fev. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym13040598>.



PEIRAVI, Ali; TAABBODI, Behrai. A Reliable 3D Laser Triangulation-based Scanner with a New Simple but Accurate Procedure for Finding Scanner Parameters. **Journal Of American Science**, [S.L.], v. 6, n. 5, p. 80-85, jan. 2010.

RADOSH, Aleksandra; KUCZKO, Wiesław; WICHNIAREK, Radosław; GÓRSKI, Filip. Prototyping of Cosmetic Prosthesis of Upper Limb Using Additive Manufacturing Technologies. **Advances In Science And Technology Research Journal**, [S.L.], v. 11, n. 3, p. 102-108, 3 set. 2017. Wydawnictwo Naukowe Gabriel Borowski (WNGB). <http://dx.doi.org/10.12913/22998624/70995>.

READY, Steven; ENDICOTT, Fred; WHITING, Gregory L; NG, Tse Nga; CHOW, Eugene M; LU, Jengping. 3D Printed Electronics. **Nip29 / Digital Fabrication 2013**, Seattle, p. 9-12, out. 2013.

SAVINI, A.; SAVINI, G.G. A short history of 3D printing, a technological revolution just started. **2015 Icohtec/IEEE International History Of High-Technologies And Their Socio-Cultural Contexts Conference (Histelcon)**, Tel-Aviv, p. 1-8, ago. 2015. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/histelcon.2015.7307314>.

SHACKELFORD, James F.. **Ciência dos Materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson Education, 2014. 556 p.

SHAHRUBUDIN, N.; LEE, T.C.; RAMLAN, R. An Overview on 3D Printing Technology: technological, materials, and applications. **Procedia Manufacturing**, [S.L.], v. 35, p. 1286-1296, 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>.

STOJKIC, Zeljko; CULJAK, Eva; SARAVANJA, Luka. 3D Measurement - Comparison of CMM and 3D Scanner. **Daaam Proceedings**, [S.L.], p. 0780-0787, 2020. DAAAM International Vienna. <http://dx.doi.org/10.2507/31st.daaam.proceedings.108>.

SUN, Jie; PENG, Zhuo; ZHOU, Weibiao; FUH, Jerry Y.H.; HONG, Geok Soon; CHIU, Annette. A Review on 3D Printing for Customized Food Fabrication. **Procedia Manufacturing**, [S.L.], v. 1, p. 308-319, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.057>.

TAN, Kang. The Framework of Combining Artificial Intelligence and Construction 3D Printing in Civil Engineering. **Matec Web Of Conferences**, [S.L.], v. 206, p. 01008, 2018. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/201820601008>.

YAMASHITA, Tomoko; YAMASHITA, Kazuhiko; SATO, Mitsuru; KAWASUMI, Masashi; ATA, Shingo. Foot-surface-structure analysis using a smartphone-based 3D foot scanner. **Medical Engineering & Physics**, [S.L.], v. 95, p. 90-96, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.medengphy.2021.08.001>.

YAN, Qian; DONG, Hanhua; SU, Jin; HAN, Jianhua; SONG, Bo; WEI, Qingsong; SHI, Yusheng. A Review of 3D Printing Technology for Medical Applications. **Engineering**, [S.L.], v. 4, n. 5, p. 729-742, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eng.2018.07.021>.