

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**EDUARD GOULART ALCALDE**

**PROTOTIPAGEM RÁPIDA ADITIVA:  
APLICAÇÃO EM DISPOSITIVO FUNCIONAL DE  
AUXÍLIO HUMANO PARA MEMBROS SUPERIORES**

**Taubaté - SP**

**2019**

**EDUARD GOULART ALCALDE**

**PROTOTIPAGEM RÁPIDA ADITIVA:  
APLICAÇÃO EM DISPOSITIVO FUNCIONAL DE  
AUXÍLIO HUMANO PARA MEMBROS SUPERIORES**

Dissertação apresentada para obtenção  
do Certificado de Título de Mestre pelo  
Curso Mestrado Profissional em  
Engenharia Mecânica do Departamento  
de Engenharia da Universidade de  
Taubaté,  
Área de Concentração: Energia e  
Materiais  
Orientador: Prof. Dr. Luis Filipe de Faria  
Pereira Wiltgen Barbosa

**Taubaté – SP**

**2019**

**SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU**

A346p    Alcalde, Eduard Goulart  
Prototipagem rápida aditiva: aplicação em dispositivo de auxílio humano para membros superiores / Eduard Goulart Alcalde. -- 2019.  
127 f. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Luis Filipe de Faria Pereira Wiltgen Barbosa, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Dispositivo de auxílio humano. 2. Impressão 3D. 3. Manufatura aditiva. 4. Materiais plásticos. 5. Prototipagem rápida aditiva. I. Título. II. Mestrado em Engenharia Mecânica.

CDD – 681.62

**Ficha catalográfica elaborada por Shirlei Righeti – CRB-8/6995**

**EDUARD GOULART ALCALDE**

**PROTOTIPAGEM RÁPIDA ADITIVA:  
APLICAÇÃO EM DISPOSITIVO FUNCIONAL DE AUXÍLIO HUMANO PARA  
MEMBROS SUPERIORES**

Dissertação apresentada para obtenção  
do Certificado de Título de Mestre pelo  
Curso Mestrado Profissional em  
Engenharia Mecânica do Departamento  
de Engenharia da Universidade de  
Taubaté  
Área de Concentração: Energia e  
Materiais

Data: 04 de maio de 2019

Resultado:

**BANCADA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Luis Filipe de Faria Pereira Wiltgen Barbosa      Universidade de Taubaté

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Francisco Carlos Parquet Bizarria      Universidade de Taubaté

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Gustavo Pompeo de Camargo Leme      Faculdade Anhanguera

Assinatura \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Filipe Wiltgen, pela habilidade e paciência com que orientou o trabalho, sempre com confiança e determinação na eficácia do estudo.

Ao Prof. Evandro Nohara, pela disponibilidade e atenção durante todo o trajeto.

À minha esposa Calina Vilela, pela paciência durante todo este período, principalmente durante as revisões e impressões dos protótipos.

À Universidade de Taubaté incluindo todos os envolvidos, pela oportunidade de participar do Mestrado.

“Insanidade é continuar fazendo sempre a mesma coisa  
e esperar resultados diferentes.”

Albert Einstein

## RESUMO

No mundo ocorrem cerca de quatrocentos mil acidentes que envolvem lesões profundas ou amputações de mãos. Esses acidentes resultam quase sempre em longos períodos de reabilitação física e psicológica do acidentado. Os avanços na tecnologia de manufatura aditiva aplicada em prototipagem rápida utilizando a impressão 3D pode ser uma solução promissora para reduzir o tempo de recuperação de amputados, quer seja com os baixos custos dos *Dispositivos de Auxílio Humano* (DAH), quer seja, pelas várias funcionalidades que permitem aos usuários voltarem a realizar as tarefas cotidianas. O dispositivo foi desenvolvido para permitir o controle da mão baseado apenas na movimentação do punho sem a necessidade de energia elétrica ou uso de sensores, apenas com a energia mecânica humana. Esta pesquisa utilizou um dispositivo de código aberto (*open source*) existente em uma organização não governamental (*E-Nable*) como base para o desenvolvimento de um novo dispositivo incluindo novas funções como acesso a dispositivos *touch screen* e movimentação isolada dos dedos, e buscou melhorias em pontos como movimento de pega, travas e pinos para fixação do dispositivo e melhoria nas travas de tendões. Os resultados apresentados em relação a proposta do novo dispositivo foram considerados satisfatórios, permitindo ao usuário um dispositivo mais leve e mais fácil de montagem, além das novas funções adicionadas. A pesquisa proporcionou amplo conhecimento das tecnologias de manufatura aditiva via impressão 3D as quais são de grande interesse e aplicação na indústria dado a versatilidade construtiva, economia de material e flexibilidade operacional.

Palavras Chave: Dispositivo de Auxílio Humano, Prototipagem Rápida Aditiva, Materiais Plásticos, Manufatura Aditiva, Impressão 3D, Próteses.

## **ABSTRACT**

About four hundred thousand accidents occur around the world involving injury or amputations of hands. These accidents result almost always in long periods of physical and psychological rehabilitation of injured. Advances in additive rapid prototyping technology using 3D printing can be a promising solution to reduce amputee recovery time, either with low costs of Human Assistance Devices or various features that allow users return to daily tasks with hand. The prototype device was developed to allow control of hand based only on movement of wrist without need of electrical energy or use of sensors, only human mechanical energy. This research used an open source device in a non-governmental organization (E-Nable) as base to development of a new device including new functions such as access touch screen and isolated finger movement, and improvements such as movement of handle, locks and pins for fixation of device and improvement in tendon. The results presented was considered satisfactory, allowing the user a lighter and easier device of assembly, besides the new added functions. This research provided knowledge of additive manufacturing technologies with 3D printing which are of great interest and application in the industry given the constructive versatility, material economy and operational flexibility.

Keywords: Human Device, Additive Rapid Prototyping, Plastic Materials, Additive Technologies, 3D Printing, Prosthetics.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 - Distribuição das publicações ao longo do tempo .....	24
Figura 1-2 - Distribuição das publicações por tipo de documento .....	25
Figura 1-3 - Distribuição dos artigos por temas abordados .....	25
Figura 2-1 – Ossos da mão humana .....	29
Figura 2-2 - Nomes dos dedos da mão humana .....	30
Figura 2-3 - Tendões flexores da mão humana.....	31
Figura 2-4 - Tendões extensores na mão humana.....	32
Figura 2-5 - Passagem tendões flexores e extensores na mão humana .....	33
Figura 3-1 - I-Limp Quantum prótese de mão robótica.....	37
Figura 3-2 – Próteses robóticas de membros inferiores do MIT .....	38
Figura 3-3 - Modelos de dispositivos de auxílio humano (DAH) da E-Nable .....	39
Figura 4-1 – Comparativo entre os processos de manufatura.....	42
Figura 4-2 – Processo de Manufatura Aditiva via impressão 3D .....	43
Figura 4-3 - Exemplificação do processo de fabricação da técnica SLA.....	44
Figura 4-4 – Foto da construção real de uma peça com a técnica SLA .....	45
Figura 4-5 – Exemplificação do processo de funcionamento da técnica SLA .....	45
Figura 4-6 - Ilustração de um conjunto dutos de motor a combustão interna construído com a técnica SLA.....	46
Figura 4-7 – Exemplificação do processo de funcionamento da técnica FDM .....	47
Figura 4-8 – Peças mecânicas impressas com a técnica FDM .....	48
Figura 4-9 - Ilustração da ocupação interna de objetos impressos em plástico com a técnica FDM – 10%, 30% e 50% de ocupação .....	64
Figura 5-1 - Modelo Raptor Reloaded .....	65
Figura 5-2 - Modelo 3D da Raptor Reloaded Vista explodida .....	65
Figura 5-3 – Fluxograma sintético da montagem do dispositivo Raptor Reloaded original .....	67
Figura 5-4 – Falanges juntas do dedo do protótipo DAH .....	69
Figura 5-5 – Falanges juntas do dedo do protótipo DAH .....	69
Figura 5-6 – Falanges juntas do dedo do Protótipo DAH .....	70
Figura 5-7 – Falange proximal do dedo do protótipo DAH .....	70

Figura 5-8 – Falange proximal do dedo do protótipo DAH .....	71
Figura 5-9 – Canal para encaixe de trava do dedo do protótipo DAH .....	71
Figura 5-10 – Trava de movimento do dedo indicador do protótipo .....	72
Figura 5-11 – Pino para montagem dos dedos do protótipo DAH .....	72
Figura 5-12 – Pino para montagem dos dedos do protótipo DAH .....	73
Figura 5-13 – Mão modificada do protótipo DAH .....	74
Figura 5-14 – Vista da abertura para encaixe do componente de rotação.....	74
Figura 5-15 – Abertura para movimentação polegar do Protótipo DAH .....	75
Figura 5-16 – Mão do protótipo DAH.....	75
Figura 5-17 – Componente de rotação do polegar do protótipo DAH .....	76
Figura 5-18 - Componente de rotação do protótipo DAH .....	76
Figura 5-19 - Pino de encaixe do componente de rotação do polegar protótipo DAH.....	no 77
Figura 5-20 - Mão modificada do protótipo DAH .....	77
Figura 5-21 - Abertura para encaixe das travas dos dedos do protótipo DAH .....	78
Figura 5-22 - Pino de junção mão e dedos do protótipo DAH .....	78
Figura 5-23 - Dorso da mão com abertura para passagem das linhas de movimentação protótipo DAH .....	79
Figura 5-24 - Manopla do protótipo DAH.....	80
Figura 5-25 - Ilustração completa do protótipo DAH montado.....	81
Figura 5-26 - Lista de peças do protótipo DAH .....	82
Figura 6-1 - Impressora 3dFDM Prusa Air 2 modelo utilizado nesta pesquisa.....	84
Figura 6-2 – Fluxograma sintético para realizar uma impressão 3D FDM do DAH...	85
Figura 6-3 - Parâmetros de configuração utilizada na impressão 3D FDM .....	87
Figura 7-1 - Impressão dos dedos do protótipo DAH .....	89
Figura 7-2 - Dedo do protótipo DAH.....	90
Figura 7-3 - Pinos e travas dos dedos do protótipo DAH .....	90
Figura 7-4 – Mão do protótipo DAH.....	91
Figura 7-5 – Palma do Protótipo DAH Vista Inferior .....	91
Figura 7-6 - Componente de rotação do polegar do protótipo DAH .....	92
Figura 7-7 - Pino de junção entre mão e dedos .....	92
Figura 7-8 - Dorso da mão do protótipo DAH.....	92

Figura 8-1 - Ilustração de montagem do dedo do protótipo DAH .....	93
Figura 8-2 - Montagem do dedo do Protótipo DAH .....	93
Figura 8-3 - Montagem do dedo do protótipo DAH – Vista Frontal.....	94
Figura 8-4 - Montagem do componente de rotação do protótipo DAH .....	94
Figura 8-5 - Montagem geral da mão do protótipo DAH.....	95
Figura 8-6 - Montagem geral da mão do protótipo DAH - Vista em Perspectiva .....	96
Figura 8-7 - Montagem da mão do protótipo DAH.....	96
Figura 8-8 - Montagem da mão do protótipo DAH.....	97
Figura 8-9 – Mão completa do protótipo DAH .....	98
Figura 8-10 – Montagem completa do protótipo DAH - vista explodida .....	98
Figura 8-11 – Linhas de amarração do protótipo DAH .....	99
Figura 8-12 – Fixação dos tendões rígidos do protótipo DAH.....	99
Figura 8-13 – Passagem do fio de nylon para fixação do tendão rígido.....	100
Figura 8-14 – Fixação dos tendões rígidos na Manopla do protótipo DAH .....	100
Figura 8-15 – Fixação dos tendões flexíveis (elásticos) do protótipo DAH .....	101
Figura 8-16 – Passagem dos tendões flexíveis (elásticos) do protótipo DAH .....	101
Figura 8-17 – Local de fixação dos tendões elásticos do protótipo DAH .....	102
Figura 8-18 Fixação dos pinos de fixação do protótipo DAH .....	102
Figura 8-19 Passagem da fita de velcro no protótipo DAH .....	103
Figura 8-20 Fixação do condutor capacitivo do protótipo DAH .....	104
Figura 8-21 - Passagem do condutor capacitivo (touch screen) para operar dispositivos móveis do protótipo DAH.....	105
Figura 9-1 - Dimensionamento posição 1.....	106
Figura 9-2 - Dimensionamento posição 2.....	107
Figura 9-3 - Dimensionamento posição 3.....	107
Figura 9-4 - Dimensionamento do DAH personalizado para cada usuário utilizando o site Rawgit (Programa Tracker) .....	108
Figura 9-5 - Editando Dimensão do DAH .....	108
Figura 9-6 - Vista Inferior DAH com Dimensões.....	109
Figura 9-7 - Corte lateral do DAH com dimensões .....	110
Figura 10-1 - Dispositivo completamente montado do protótipo DAH.....	111
Figura 10-2 - Movimento da mão do protótipo DAH .....	112

Figura 10-3 - Posição de Pega do Protótipo DAH.....	113
Figura 10-4 - Posição de pega do protótipo DAH com objeto .....	114
Figura 10-5 - Movimentação isolada do indicador do protótipo DAH .....	114
Figura 10-6 - Acessibilidade capacitiva ( <i>Touch Screen</i> ) do protótipo DAH .....	115

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 - Comparativo Tecnologias de Impressão 3D .....	49
Tabela 4-2 - Propriedades Mecânica ABS .....	51
Tabela 4-3 - Propriedades Mecânicas PLA .....	53
Tabela 4-4 - Propriedades mecânicas do nylon .....	54
Tabela 4-5 - Propriedades mecânicas do PVA.....	55
Tabela 4-6 - Propriedades mecânicas PEAD / HDPE .....	56
Tabela 4-7 - Propriedades Mecânicas PETG .....	57
Tabela 4-8 - Propriedades mecânicas do TRITAN.....	58
Tabela 4-9 - Propriedades mecânicas da fibra de carbono com PLA .....	59
Tabela 4-10 - Comparativo de materiais .....	61
Tabela 4-11 - Comparativo Propriedades Mecânicas ABS, PLAe NYLON .....	62
Tabela 4-12 - Custo Materiais ABS, PLA e NYLON .....	63
Tabela 10-1 - Análise dos resultados das implementações no DAH modificado.....	116

## LISTA DE SIGLAS

2D – Duas Dimensões

3D – Três Dimensões

AOPA - Associação Americana de Órteses e Próteses

ASTM - American Society for Testing and Materials

CAD - Computer Aided Design

CNC - Computer Numeric Control

DAH – Dispositivo de Auxílio Humano

DT&E – Development Test and Evaluation

EMI - Eletromagnética

FDM – Fused Deposition Modeling

ISO – Internacional Organization for Standardization

$\text{kJ/m}^2$  - Quilo Joule por Metro Quadrado

Mpa - Mega Pascal

MIT - Massachusetts Institute of Technology

OBJ - Object

OT&E – Operational Test and Evaluation

RF – Rádio Frequência

RIT - Instituto de Tecnologia Rochester

SLA - Stereolithography

SLS – Selective Laser Sintering

STL - Standard Triangle Language

UV – Ultravioleta

## SUMÁRIO

	Pág.
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
1.1. OBJETIVO GERAL DO TRABALHO .....	18
1.2. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	19
1.3. DELIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	20
1.4. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	21
1.5. METODOLOGIA APLICADA .....	23
1.6. LEVANTAMENTO E ESTUDO BIBLIOGRÁFICO .....	24
1.7. ARTIGO PUBLICADO .....	28
<b>2. ANATOMIA DA MÃO HUMANA .....</b>	<b>29</b>
<b>3. DISPOSITIVOS DE AUXÍLIO HUMANO (DAH) .....</b>	<b>34</b>
3.1. HISTÓRICO DE PRÓTESES HUMANAS .....	37
<b>4. PROTOTIPAGEM RÁPIDA COM IMPRESSÃO 3D .....</b>	<b>41</b>
4.1. ESTEREOLITOGRAFIA (STERELITHOGRAPHY - SLA) .....	43
4.2. SINTERIZAÇÃO A LASER (SELECTIVE LASER SINTERING - SLS) .....	45
4.3. DEPOSIÇÃO POR FUSÃO (FUDED DEPOSITION MODELING – FDM) .....	47
4.4. COMPARATIVO ENTRE AS TÉCNICAS SLA, SLS e FDM .....	49
4.5. MATERIAIS UTILIZADOS EM IMPRESSÃO 3D NA TÉCNICA FDM.....	50
4.5.1. ABS (Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno) .....	50
4.5.2. PLA (Poliácido Láctico).....	52
4.5.3. NYLON.....	53
4.5.4. PVA (Poliálcool Vinílico).....	54
4.5.5. PEAD / HDPE (Polietileno de Alta Densidade) .....	56
4.5.6. PETG (Polietileno Teraftalato Glicol-Modificado).....	57
4.5.7. TRITAN (Eastman™ Tritan®) .....	58
4.5.8. FIBRA DE CARBONO (PLA COM FIBRA DE CARBONO) .....	59
4.5.9. GRAFENO (PLA COM GRAFENO) .....	60
4.5.10. COMPARATIVO ENTRE MATERIAIS PARA IMPRESSÃO 3D FDM	61
4.5.11. MATERIAL UTILIZADO NO PROJETO .....	63
<b>5. PESQUISA E APRIMORAMENTO DE UM DISPOSITIVO DE AUXÍLIO HUMANO</b>	<b>65</b>
5.1. FOCO DA PESQUISA .....	65

5.2. DEDOS DO PROTÓTIPO DAH.....	68
5.3. MÃO DO PROPÓTIPO DAH .....	73
5.4. MANOPLA DO PROTÓTIPO DAH .....	80
5.5. VISÃO GERAL DO PROTÓTIPO DAH.....	81
<b>6. MODELO DA IMPRESSORA 3D E OS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D FDM DO PROTÓTIPO DAH.....</b>	<b>83</b>
<b>7. PROTÓTIPO FÍSICO DO DAH PARA TESTES .....</b>	<b>89</b>
<b>8. MONTAGEM DO PROTÓTIPO FÍSICO DO DAH .....</b>	<b>93</b>
<b>9. DIMENSIONAMENTO DO PROTÓTIPO FÍSICO DO DAH .....</b>	<b>106</b>
<b>10. RESULTADOS DOS TESTES FÍSICOS DO DAH .....</b>	<b>111</b>
10.1. FUNCIONAMENTO MECÂNICO DO PROTÓTIPO DAH.....	112
10.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO PROTÓTIPO DAH.....	116
10.3. QUANTIDADE DE MATERIAL UTILIZADO NO PROTÓTIPO DAH.....	117
10.4. TEMPO DE PROCESSAMENTO UTILIZADO NA FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO DAH DE TESTE.....	118
<b>11. CONCLUSÃO.....</b>	<b>119</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>120</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>126</b>
<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>136</b>



## 1. INTRODUÇÃO

Os *Dispositivo de Auxílio Humano* (DAH) são hoje uma opção viável para pessoas amputadas ou devido a deformações genéticas ou má formação.

Essa afirmação hoje só é possível devido aos avanços tecnológicos permitindo que as pessoas possam ter um dispositivo através da técnica de impressão 3D. A impressão 3D não é nova e vem evoluindo com o tempo mostrando as oportunidades para novos desenvolvimentos e produtos em diversas áreas da indústria.

Esta pesquisa faz uso da manufatura aditiva via impressão 3D para a construção de um protótipo de um DAH de membro superior para mão. Esse sistema é capaz de realizar algumas das funções similares a de uma mão humana biológica, mas fabricado em plástico e com funcionamento totalmente mecânico.

Na pesquisa são detalhadas as funções de cada componente do dispositivo de forma que seja possível visualizar suas partes, como as mesmas interagem e como foram aprimoradas. No decorrer deste trabalho será possível também, verificar os tipos de materiais utilizados na fabricação, como foi construído o protótipo, o detalhamento das montagens, testes de funcionamento, ajustes das melhorias e futuras propostas de pesquisas.

Para a realização dos aprimoramentos foram escolhidos seis requisitos:

- *O dispositivo deve ter três posições do primeiro quirodáctilo (polegar), para realizar a “pega” de objetos.*
- *A movimentação isolada do dedo indicador (segundo quirodáctilo).*
- *Acessibilidade por capacitância de toque (touch screen) permitindo ao usuário utilizar os dispositivos com tecnologia capacitiva, tais como, celulares e outros equipamentos.*
- *A melhoria na montagem das juntas dos dedos (segundo ao quinto quirodáctilo).*
- *Redução de material permitindo que o dispositivo seja mais leve e rápido de imprimir, tornando ainda mais atrativo financeiramente.*
- *A alteração nos encaixes de movimentação do punho, de forma a permitir que sejam mais robustos durante o funcionamento por longos períodos.*

## 1.1. OBJETIVO GERAL DO TRABALHO

O objetivo desta pesquisa é o aprimoramento funcional, a fabricação, a montagem e os testes de um protótipo do Dispositivo de Auxílio Humano (DAH) para uma mão mecânica em plástico, através da manufatura aditiva via impressão 3D.

Esses aprimoramentos no DAH têm como objetivo ajudar a melhorar as funcionalidades deste dispositivo, e assim, a qualidade de vida das pessoas amputadas ou com má formação genética, através de técnicas de prototipagem rápida aditiva.

O desenvolvimento deste dispositivo visa prover uma boa interface entre homem e máquina. De tal forma, que este seja capaz de ser utilizado para operar um mouse e/ou um teclado de computador, assim como, aparelhos celulares tipo *smartphone*, e também, para auxílio nas tarefas usuais do dia a dia, tais como: segurar um objeto leve qualquer, como um talher ou mesmo uma caneta.

## 1.2. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A motivação desta pesquisa é o aperfeiçoamento de um *Dispositivo de Auxílio Humano* (DAH) através da técnica de manufatura aditiva via impressão 3D que proporcione aprimoramentos nas funções deste dispositivo.

O dispositivo desta pesquisa tem como base um projeto desenvolvido e utilizado pelos voluntários da E-Nable ([enablingthefuture.org](http://enablingthefuture.org)) desde 2014, porém nesta pesquisa foi desenvolvido um novo dispositivo aperfeiçoado, no qual foi realizado o aprimoramento da construção e da utilização do dispositivo, impactando tanto no processo de fabricação e montagem, quanto em sua própria funcionalidade.

Faz parte desta pesquisa o estudo das tecnologias de impressão 3D disponíveis atualmente no mercado. Permitindo deste modo, identificar, como a indústria pode se beneficiar com esse método que permite testar rapidamente novos desenvolvimentos com custo e tempo mais reduzidos que os processos tradicionais de manufatura subtrativa.

Além do desenvolvimento do dispositivo, este estudo serve também, como base para a investigação e o aprofundamento da tecnologia de impressão 3D na indústria, assim como, de todos os tipos de materiais utilizados na técnica FDM (ver Capítulo 4), obtendo resultados comparativos relevantes para a utilização industrial e científica da manufatura aditiva.

### 1.3. DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa se limita ao desenvolvimento e aperfeiçoamento do *Dispositivo de Auxilio Humano* (DAH) para a mão, apresentando suas novas funções, e modificações, não apresentando testes de resistência e/ou de duração, assim como, da realização de testes de campo, que posteriormente poderão ser realizados como forma de continuação desta pesquisa.

#### 1.4. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação de pesquisa foi dividida em onze capítulos:

O *primeiro capítulo* apresenta a introdução, descrevendo de forma breve o contexto da pesquisa, a estrutura do trabalho, justificativa, objetivo, organização e metodologia aplicada a pesquisa.

O *segundo capítulo* apresenta o estudo da anatomia humana para servir de base para o melhor entendimento e desenvolvimento desta pesquisa, no qual pode-se observar a composição dos ossos e das articulações da mão humana.

O *terceiro capítulo* apresenta o histórico das próteses e dispositivos de auxílio humano, como estes evoluíram até o dia de hoje e como surgiu o projeto chamado E-Nable.

O *quarto capítulo* apresenta a prototipagem rápida aditiva, como surgiu, principais modelos de impressões disponíveis, e apresenta os comparativos para que sejam utilizados como base para a escolha da técnica aplicada a esta pesquisa. É apresentado um comparativo dos principais materiais utilizados nesta técnica e que permitiram escolher o material adequado a ser aplicado na construção do protótipo deste estudo.

No *quinto capítulo* apresenta-se a pesquisa desenvolvida, as soluções para cada conjunto de componentes principais: dedos, palma e punho. Além da visão geral do novo dispositivo desenvolvido.

No *sexto capítulo* são apresentados os parâmetros de impressão utilizados na pesquisa com base no material escolhido no quarto capítulo.

O *sétimo capítulo* apresenta fotos das peças impressas com a tecnologia 3D, conforme o projeto descrito no quinto capítulo, e os parâmetros utilizados e apresentados no sexto capítulo.

O *oitavo capítulo* descreve a montagem de cada componente para submontagens e o passo a passo para a construção do dispositivo.

O *nono capítulo* apresenta um método para ajustar o dimensionamento do dispositivo via a calibração e medidas obtidas através de fotografias.

O *décimo capítulo* apresenta os resultados de acordo com os objetivos apresentados no quinto capítulo, e classificando cada função dentro dos parâmetros considerados, como: *Ruim*, *Bom* ou *Excelente*. Deste modo, foi possível atribuir uma qualificação para cada etapa da pesquisa. Foi considerado ***Ruim*** a função que obteve o resultado esperado. Foi considerado como ***Bom*** a função que obteve o resultado esperado. Foi considerado *Excelente* a função que apresentou um resultado acima do esperado. Neste capítulo é apresentado também, a quantidade de material utilizado para cada componente do protótipo do DAH, assim como, a massa total do conjunto, e o tempo total de fabricação.

O *décimo primeiro* capítulo apresenta a conclusão da pesquisa e os objetivos alcançados. As propostas para os próximos passos na continuidade desta pesquisa são discutidas nos resultados.

## 1.5. METODOLOGIA APLICADA

Para o desenvolvimento e aperfeiçoamento do projeto foi utilizado como base um projeto consolidado no meio acadêmico e científico, identificando possíveis modificações para aprimoramentos no projeto do dispositivo existente, análise de todos os desenhos em 3D (CAD) de tal forma a permitir as modificações e implementações de melhorias no projeto, no qual foi acrescentado a um novo dispositivo novas funcionalidades advindas das necessidades que foram relatadas ao longo do tempo no período de utilização deste tipo de dispositivo por usuários e pesquisadores, que desenvolveram e acompanharam sua utilização nestes últimos anos.

Após a conclusão do modelo do novo dispositivo foi utilizada a técnica de impressão 3D para a construção das peças físicas permitindo verificar os resultados e realizar os ajustes e testes necessários.

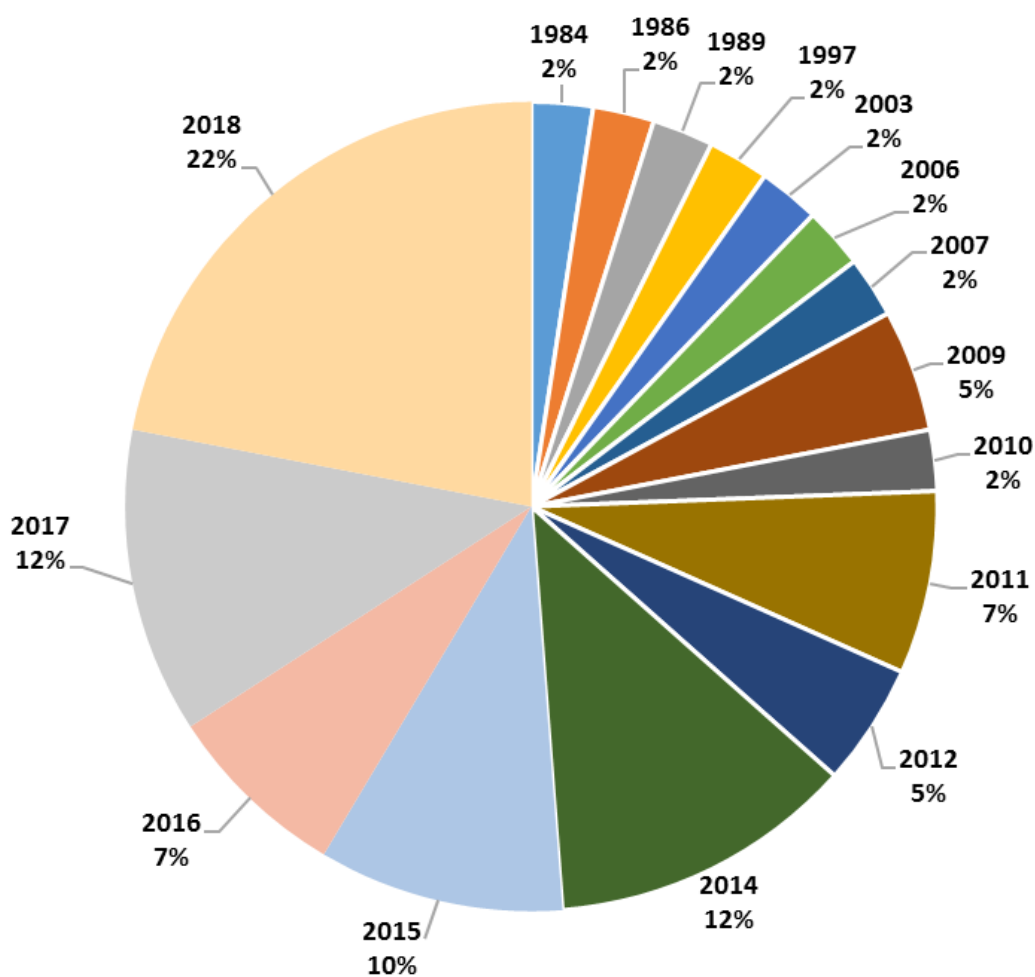
Espera-se no futuro próximo, que estas modificações possam ser comprovadas em campo nos testes operacionais (*OT&E – Operational Test and Evaluation*), realizados com usuários. Esta fase de testes em campo não pode ser realizada devido ao tempo necessário para se obter resultados estatísticos relevantes.

Entretanto, os testes de desenvolvimento (*DT&E - Developmental Test and Evaluation*) foram realizados e como esperado e são apresentados e discutidos no Capítulo 10 (Resultados).

## 1.6. LEVANTAMENTO E ESTUDO BIBLIOGRÁFICO

Nesta pesquisa foi feito um estudo das referências bibliográficas necessárias para o embasamento teórico e científico da pesquisa tecnológica aplicada.

Dentre as referências tem-se a distribuição das mesmas em dois gráficos, como pode ser visto na Figura 1-1 a distribuição das publicações ao longo do tempo, sendo um total de 41 publicações entre artigos, livros e dissertações.

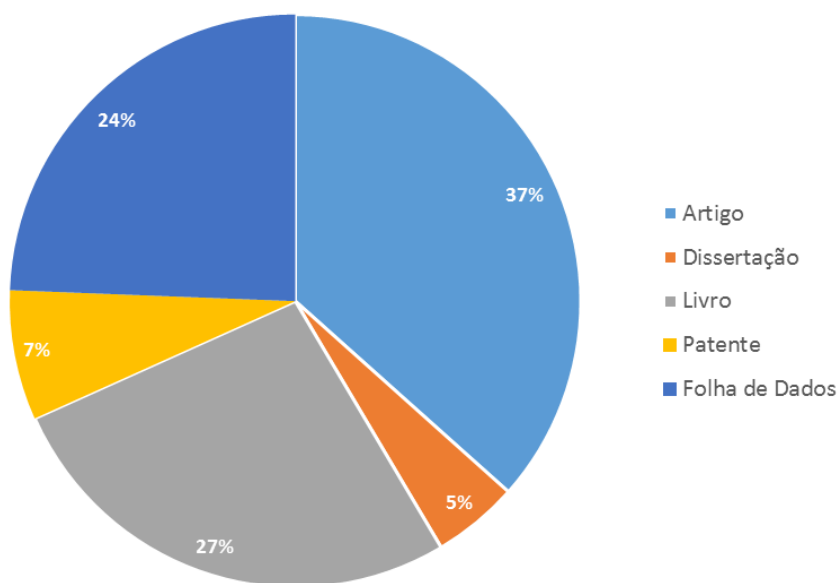


**Figura 1-1 - Distribuição das publicações ao longo do tempo**

Fonte: Próprio autor



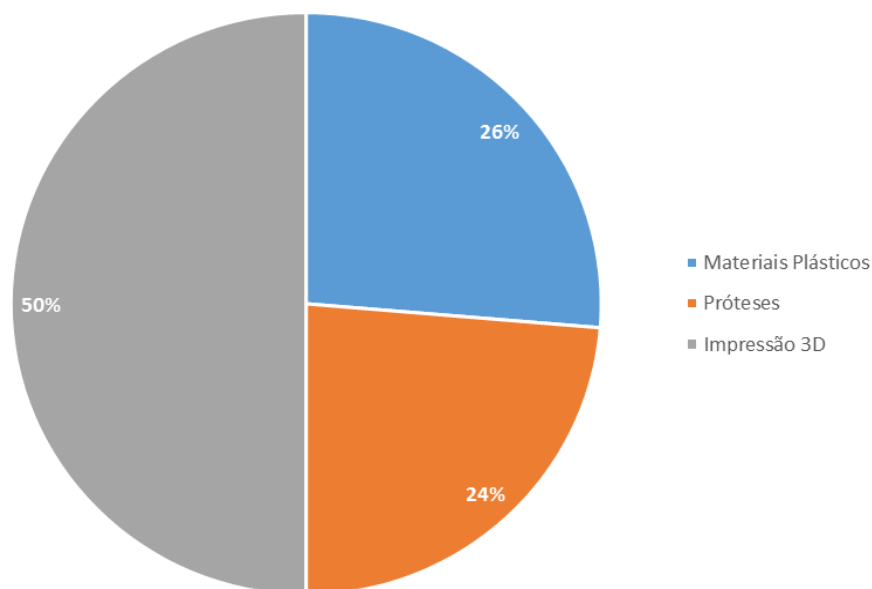
Entre as 41 publicações, na Figura 1-2 pode ser visto a distribuição por tipo de documento.



**Figura 1-2 - Distribuição das publicações por tipo de documento**

Fonte: Próprio autor

Entre as 41 publicações, na Figura 1-3 pode ser visto a distribuição por tipo de documento.



**Figura 1-3 - Distribuição dos artigos por temas abordados**

Fonte: Próprio autor

O estudo bibliográfico tem como objetivo apresentar artigos, que também serviram como base para o desenvolvimento do texto da dissertação.

Atualmente diversos estudos são realizados referentes a próteses, órteses e apoios, cada uma com suas peculiaridades para resolver seus problemas definidos, observa-se que a técnica de prototipagem rápida está presente em diversos estudos em sua grande maioria das vezes viabilizando a construção do protótipo.

Segundo Abdallah (2017) as deficiências de mão mais comuns que podem afetar a população mundial são espasticidade, falta de controle ou fraqueza muscular em consequência de acidente vascular cerebral, paralisia, lesões ou doenças musculares, Abdallah desenvolveu um dispositivo para reabilitação da mão impresso em 3D combinado com um controlador incorporado e cinco servo-motores, o sistema robótico capaz de realizar funções de até três graus de liberdade.

Segundo Yoshikawa (2015), pessoas com amputação utilizam próteses estéticas as quais proporcionam aparência realista, mas sem função para levantar objetos. Yoshikawa, apresenta uma prótese elétrica desenvolvida com uma impressora 3D capaz de segurar objetos e fazer atividades cotidianas.

Zuniga (2015) desenvolveu um dispositivo com o nome de *Cyborg beast*, em seu desenvolvimento ele afirma que há um número crescente de crianças com amputações traumáticas e congênitas das mãos. As necessidades das crianças são complexas devido ao seu pequeno tamanho, crescimento constante e fatores psicossociais. Ele afirma que os recursos financeiros das famílias desempenham um papel importante uma vez que os custos de manutenção e substituição são sempre um obstáculo. Zuniga se restringe ao desenvolvimento do dispositivo, não apresentando estudos de funcionalidades, durabilidade, benefícios e taxa de rejeição.

Buscando validar a funcionalidade da mão impressa em 3D, Dally (2015) apresenta uma série de testes de tarefas do dia-a-dia utilizando o dispositivo de código aberto *Raptor Reloaded*, no qual afirma que o dispositivo foi capaz de completar uma série de tarefas, limitado obviamente a tarefas que exigiam alguns movimentos específicos e acima do limite de peso suportado. Sendo necessário executar grande variedade de tarefas, e segurar objetos com uma variedade de formas.

Duong (2017), realiza um comparativo entre uma prótese comercial e dispositivos de auxílio humano (DAH) impressos em 3D, ambos com sensores eletrônicos mio-elétricos. Duong mostra as limitações de desempenho patentes entre os DAH impressos em 3D e as próteses comerciais. Entretanto, afirma-se que existe um potencial para os DAH impressos em 3D por serem uma opção de baixo custo, permitindo o acesso a mais pessoas, apenas devido aos elevados custos das próteses comerciais.

Os estudos bibliográficos sobre o foco da pesquisa mostraram ser uma área promissora para o desenvolvimento e aperfeiçoamento funcional de dispositivos de auxílio humano desenvolvidos com manufatura aditiva via impressão 3D do tipo FDM, como a pesquisa desenvolvida nesta dissertação.

## 1.7. ARTIGO PUBLICADO

No decorrer da pesquisa surgiu a oportunidade de escrever artigos apresentando as tecnologias existentes para realizar a Prototipagem Rápida Aditiva.

Estes artigos estão anexados nos Apêndices A e B.

No **Apêndice A**, tem-se o artigo explicando como a impressão em 3D tem quebrado o paradigma de projetos sofisticados na indústria e na pesquisa os quais não tinham condições de serem realizados, quer pelo alto custo, quer pelo modelo sofisticado que integra as funcionalidades intrínsecas dos objetos a serem confeccionados sem a necessidade de montagens extras.

Este artigo foi publicado na Revista de Ciências Exatas da Universidade de Taubaté (ISSN 1516-2893 no v.24, n°2, 2018), cujo título é:

***ESTUDO DAS TECNOLOGIAS EM PROTOTIPAGEM RÁPIDA: PASSADO, PRESENTE E FUTURO.***

No **Apêndice B**, tem-se o artigo explicando como a impressão em 3D via a prototipagem rápida aditiva pode auxiliar na construção e evolução de dispositivos funcionais de auxílio humano.

Este artigo será publicado no Décimo Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF2019), cujo título é:

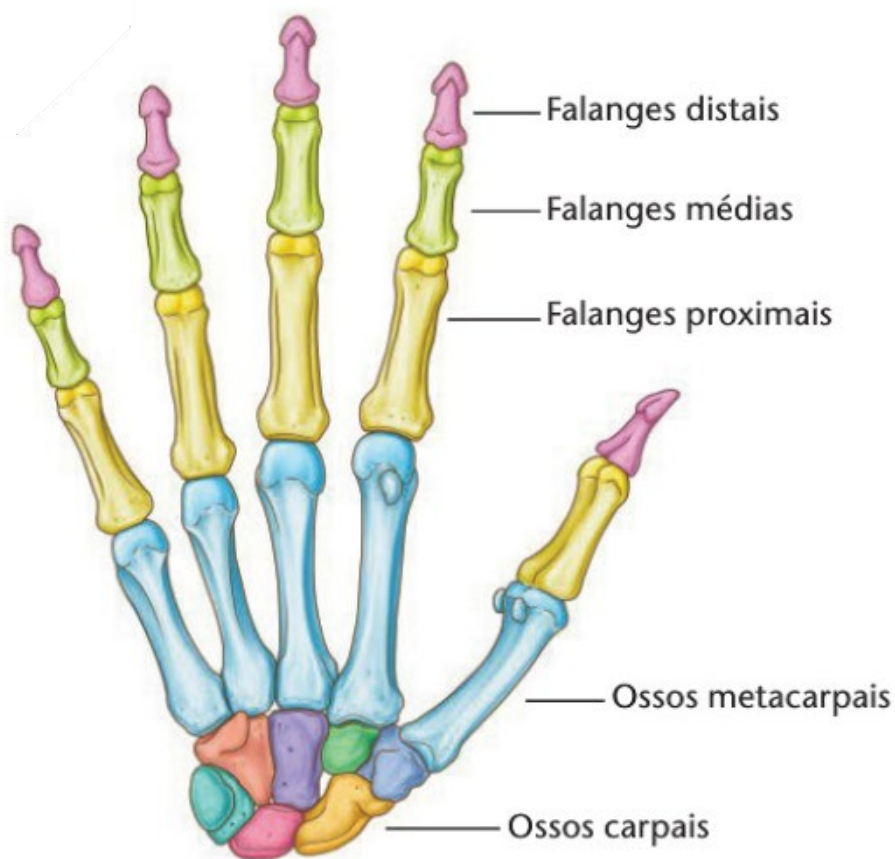
***PROTOTIPAGEM RÁPIDA ADITIVA APLICADA EM DISPOSITIVOS FUNCIONAIS DE AUXÍLIO HUMANO.***

## 2. ANATOMIA DA MÃO HUMANA

A anatomia da mão humana, assim como, as demais partes do corpo humano é extremamente complexa, envolvendo articulações, tendões, artérias, veias, nervos, ligamentos e ossos (GASPAR, 2010).

Para o projeto de pesquisa proposto se faz necessário o entendimento do funcionamento principalmente do fechar e abrir da mão humana, levando em consideração a quantidade de ossos que compõe a mão, e também, o funcionamento dos tendões para o desenvolvimento de melhorias do *Dispositivo de Auxílio Humano* (DAH) para servir como referência funcional.

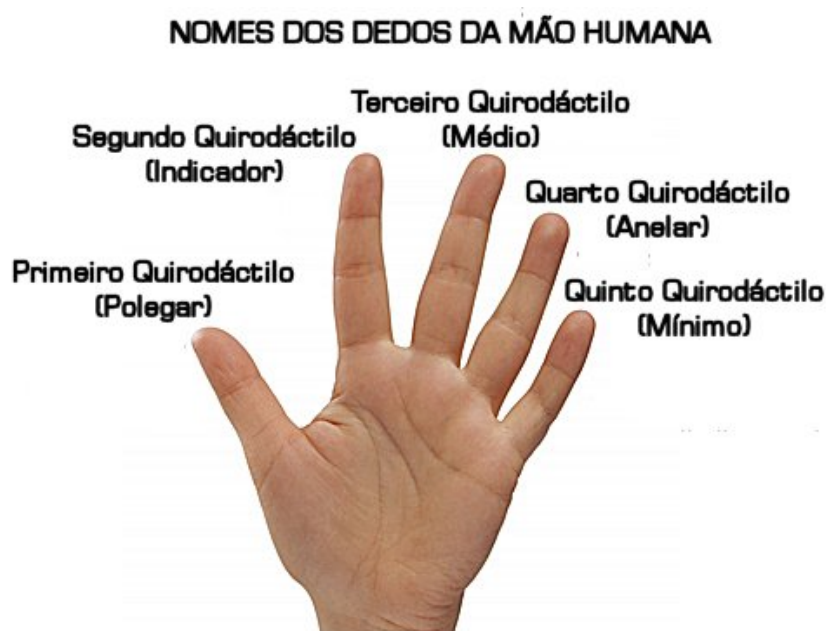
Na Figura 2-1 é possível observar a quantidade de ossos que compõe o sistema da mão humana. Segundo Standring (2010), o esqueleto da mão consiste no carpo, metacarpo e falanges.



**Figura 2-1 – Ossos da mão humana**  
Fonte: DRAKE (2009)

A divisão vista na Figura 2-1 é necessária para a construção e funcionamento do DAH. No Capítulo 5 será possível identificar a mesma divisão no protótipo fabricado em plástico.

Como pode ser visto na Figura 2-2 a designação de todos os dedos da mão humana, no qual são numerados de primeiro a quinto, a partir do dedo polegar, cujo nome científico é primeiro quirodáctilo.

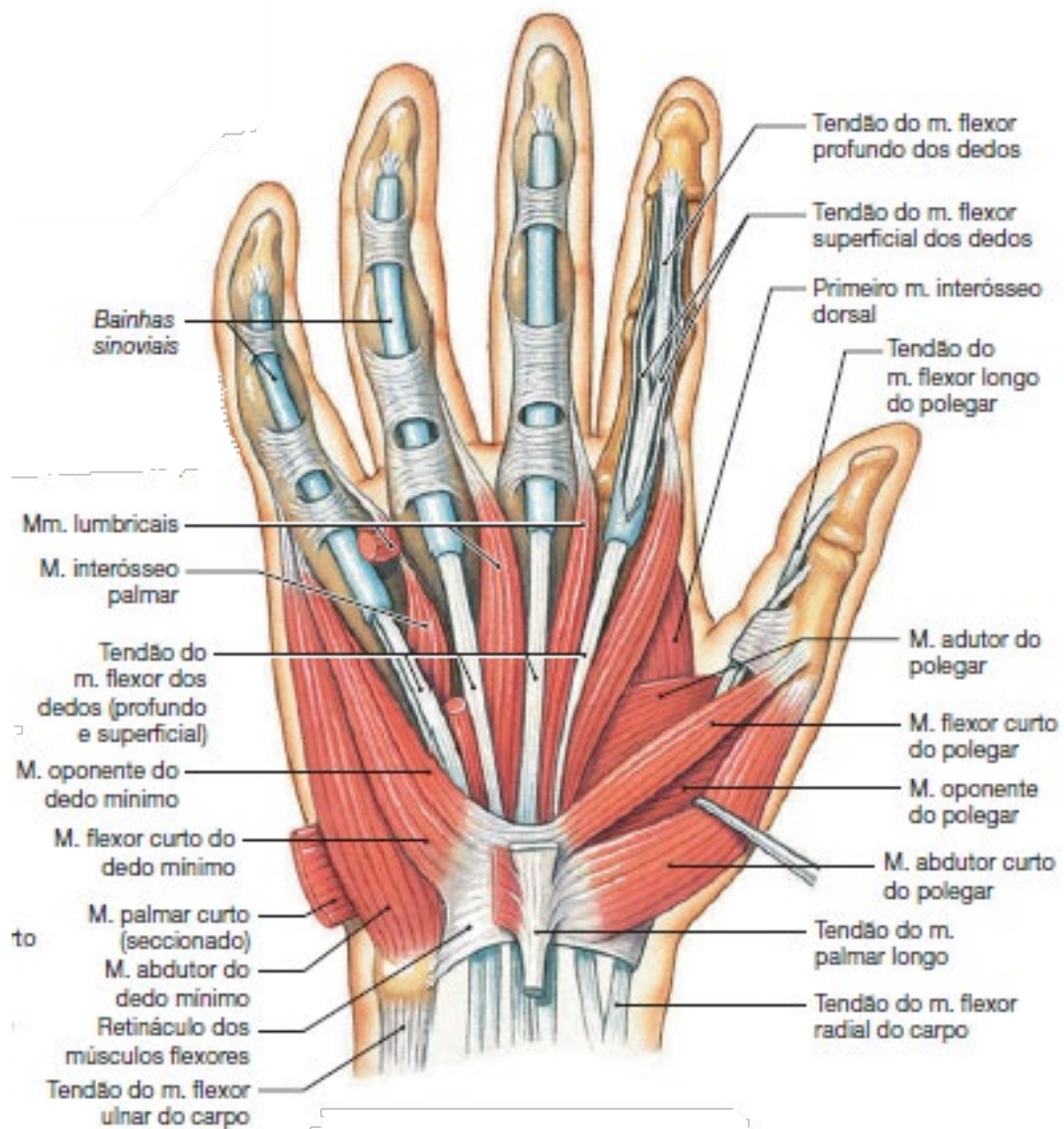


**Figura 2-2 - Nomes dos dedos da mão humana**

Fonte: Próprio autor (2018)

Outro entendimento necessário é o funcionamento do fechar e abrir a mão, conforme é descrito por Standring (2010), o músculo flexor superficial dos dedos atua principalmente para flexionar as articulações interfalângicas proximais, através das suas inserções nas falanges médias. Entretanto, em cada dedo existe a ação sobre a articulação metacarpofalângica. Essa informação, servirá como referência para a passagem e fixação que será chamada no dispositivo protótipo DAH como tendões flexíveis, responsáveis por abrir os dedos da mão mecânica.

Como pode ser visto na Figura 2-3 a posição dos tendões flexores na mão humana.



**Figura 2-3 - Tendões flexores da mão humana**

Fonte: FREDERIC (2009)

Segundo Standring (2010), o abrir da mão é realizado com a extensão das articulações interfalângicas distais, proximais e metacarpofalângicas, no qual a mão dispõe de um mecanismo engenhoso que permite que isso ocorra.

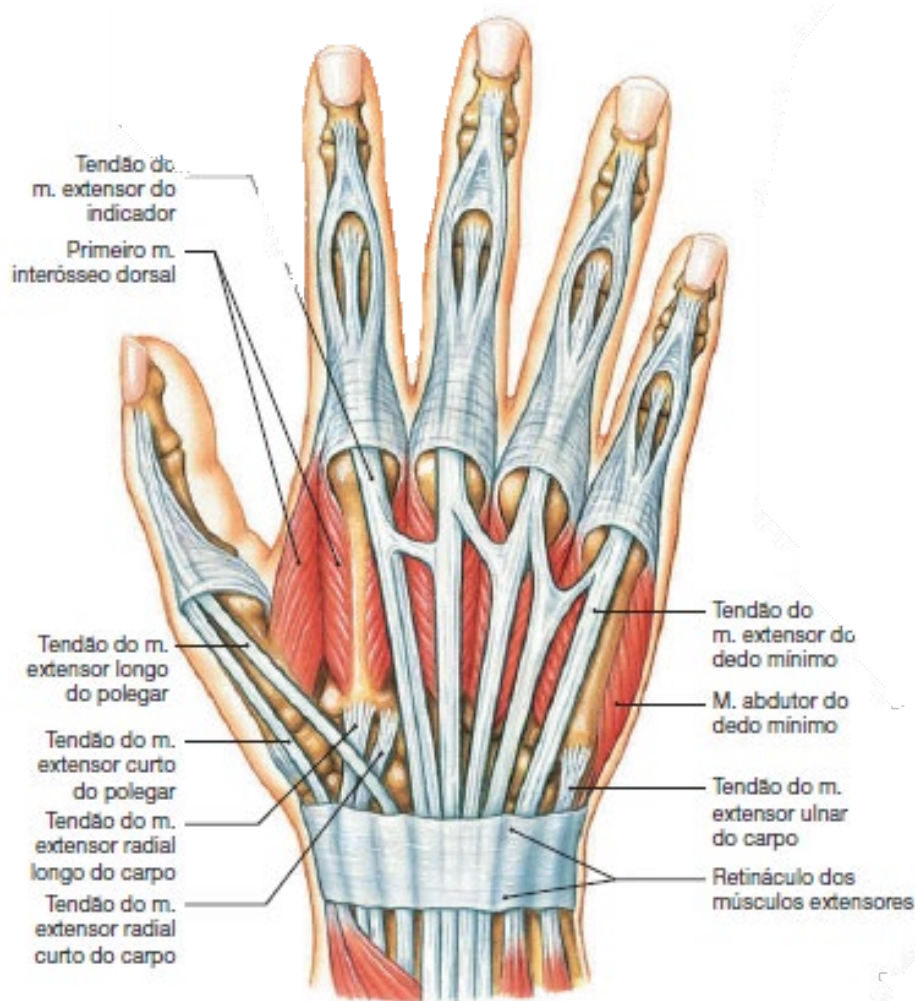
As leis da mecânica sugerem que seria necessário um motor para cada articulação, além de outro motor para o conjunto. Todos associados a algum tipo de mecanismo de controle para assegurar em que a cadeia de articulações se mova conjuntamente e de maneira coordenada (STANDRING, 2010).

Na mão humana o movimento é obtido através de um aparelho extensor que reduz ao mínimo o número de motores necessários, ao possibilitar que os músculos atuem sobre mais de uma articulação, e ligando diferentes níveis no mecanismo de modo que o movimento seja controlado.

Os tendões do músculo extensor dos dedos seguem distalmente sobre as cabeças dos ossos metacarpais, formando o principal componente do aparelho extensor (STANDRING, 2010).

Essa informação, servirá como referência para a passagem e fixação que será chamada no dispositivo protótipo DAH como tendões rígidos, que no dispositivo serão responsáveis por fechar os dedos da mão mecânica.

Como pode ser visto na Figura 2-4, é possível observar a localização dos tendões extensores.



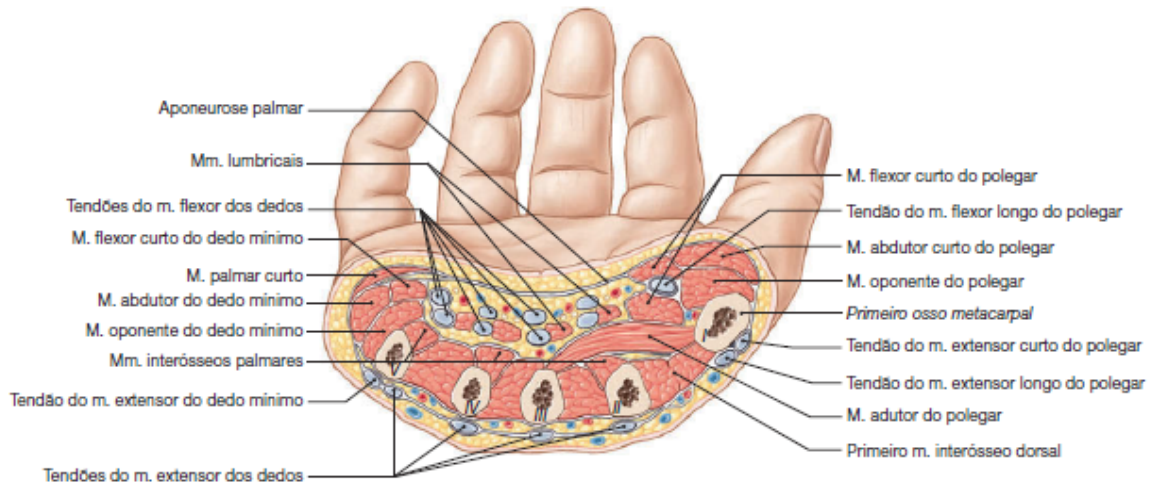
**Figura 2-4 - Tendões extensores na mão humana**

Fonte: FREDERIC (2009)



A localização da passagem dos tendões reais na mão humana, serviram como importante informação, e foram aplicadas no dispositivo protótipo DAH para emular o movimento de fechar e abrir os dedos do dispositivo de forma similar ao da mão humana.

Como pode ser visto na Figura 2-5 a divisão entre a passagem dos tendões extensores e flexores na mão humana.



**Figura 2-5 - Passagem tendões flexores e extensores na mão humana**  
 Fonte: FREDERIC (2009)

### 3. DISPOSITIVOS DE AUXÍLIO HUMANO (DAH)

Nesta pesquisa será utilizada a nomenclatura de *Dispositivos de Auxílio Humano* (DAH) para descrever dispositivos fabricados por impressão 3D, essa nomenclatura parte do projeto E-Nable ([enablingthefuture.org/upper-limb-prosthetics](http://enablingthefuture.org/upper-limb-prosthetics)).

Segundo Kyberd (1995), a experiência mostra que um aspecto importante no projeto de uma mão artificial é a simplicidade do controle do dispositivo, quanto mais simples e funcional melhor será a capacidade do usuário se adaptar ao dispositivo.

É possível verificar que existem basicamente dois tipos de próteses comerciais, as funcionais e as estéticas.

Próteses estéticas tem como função completar um membro do corpo, ou seja, não tem função de realizar algum tipo de tarefa. Enquanto que as próteses funcionais, servem para realizar algum tipo de tarefa, muitas vezes uma tarefa simples e rotineira, como pegar um objeto ou andar. As próteses são produtos comerciais de alto valor, e que possuem homologação de algum órgão de saúde ou de medidas padronizadas, muito diferentes dos DAH que não são produtos ou próteses comerciais.

Um DAH, não é um produto e pode ser fabricado por qualquer pessoa que possua uma impressora 3D de qualquer tipo. A impressora 3D mais popular, e também, a mais difundida é a que utiliza *Deposição por Material Fundido* (FDM), neste caso específico a matéria prima são plásticos. Essa técnica FDM é melhor explicada no Capítulo 4.

Observa-se que DAH são protótipos funcionais (WILTGEN, 2015), ou seja, pode realizar tarefas simples e com determinadas limitações. Seu movimento é totalmente mecânico, e acionado pelo próprio usuário através do movimento conjunto de uma das articulações (parte do dedo, punho, cotovelo e ombro - juntas).

Segundo Wiltgen (2015), em geral estes DAH disponíveis no projeto E-Nable são protótipos e não produtos comerciais, e estão em constante aprimoramento, não são homologados e não são padronizados.

Um DAH possui limitações, dentre elas tem-se:

- **DURAÇÃO:** Sua duração é indeterminada, mas sabe-se que são frágeis e podem quebrar, dobrar, amassar e torcer.
- **ADAPTAÇÃO:** Sua adaptação depende muito dos ajustes realizados pelo próprio usuário. E devem ser substituídos quando a formação óssea mudar, quer seja pelo crescimento ou mudanças físicas.
- **REPAROS:** Dado a sua fragilidade, é suscetível a reparos, principalmente nas articulações e tendões.
- **CUIDADOS:** Em geral um DAH não pode ser lavado ou mergulhado em qualquer líquido, ele até pode ser limpo com pano úmido e álcool de pequena concentração. Também não pode ser exposto ao sol ou locais quentes, por ser um polímero pode sofrer deformação em temperaturas acima de 40°C. O limite de peso suportado que pode ser utilizado em um DAH pode variar dependendo do tipo de plástico, mas para não danificar o dispositivo é recomendado não utilizar massa superior a 350 g no caso de um DAH de mão, para DAH de braço a massa não deve ser superior a 100 g (WILTGEN 2015).

Segundo Wiltgen (2015), um DAH possui quatro vantagens intrínsecas ao uso desta tecnologia de fabricação aditiva em impressão 3D, são eles:

- **CUSTO:** Para um usuário do E-Nable no Brasil o custo é basicamente o material de fabricação, construção e montagem, além dos valores de envio. O próprio usuário pode construir o DAH em sua própria residência, caso já possua uma impressora 3D, ou venha a adquirir uma para esta função. Assim sendo, o custo é do próprio material de fabricação, construção, montagem, peças de reposição/manutenção da impressora 3D, reparos eventuais e o consumo de energia elétrica (significativo para peças grandes e detalhadas). Os arquivos digitais podem ser adquiridos gratuitamente, dado ao código aberto. Não sendo um produto comercial, não tem o custo de produção hora/máquina, tempo de trabalho especializado de técnicos de

operação, ou técnicos envolvidos em ajustes, montagens, testes e adaptações, e por fim, não tem os valores associados ao lucro.

- **FEITO SOB MEDIDA:** Uma grande vantagem desta tecnologia, é que o DAH é feito especialmente para o usuário nas medidas necessárias para seu funcionamento, e isso ajuda na adaptação e utilização do dispositivo.
- **PESO:** Como o DAH atual é construído em plástico, mesmo que a ocupação interna das peças seja de alta densidade, em geral fica mais leve que qualquer outro dispositivo similar, mesmo que venha a ser um produto comercial.
- **CONSTANTE DESENVOLVIMENTO:** Este tipo de técnica vive um momento de constante desenvolvimento do código aberto (*open source*) o que permite que novas ideias sejam sempre implementadas.

### 3.1. HISTÓRICO DE PRÓTESES HUMANAS

Apesar de uma recente evolução, o conceito não é novo, não se sabe ao certo quando e quem criou a primeira prótese humana. Segundo Norton (2007) as primeiras próteses humanas datam de 424 A.C. citadas por um historiador grego chamado Heródoto, que cita o uso de um enchimento de madeira. A primeira perna artificial foi construída por volta de 300 A.C encontrada na Itália em 1858. Este tipo de prótese era feito de bronze, ferro e madeira.

A utilização de próteses começou a ser mais necessária devido aos feridos em combates e guerras. Muitos são os casos de soldados feridos e que perdem seus membros em batalhas. Este fato, abriu uma oportunidade para inúmeros testes e desenvolvimentos diversos. Isto também, se tornou lucrativo, porém muitas vezes inviável devido ao alto custo.

Segundo Norton (2007), à medida que a Guerra Civil dos Estados Unidos se arrastava, o número de amputações aumentava, forçando os norte-americanos a entrar no comércio e desenvolvimento de próteses. Na Segunda Guerra Mundial com poucos avanços tecnológicos em próteses, e devido a insatisfação dos usuários surgiu a Associação Americana de Órteses e Próteses (AOPA), o que permitiu um grande avanço destes dispositivos nos Estados Unidos.

Hoje é possível comprar próteses robóticas como o I-Limp da *Touch Bionics* (Figura 3-1) que é uma prótese de alta tecnologia, capaz de fazer movimentos diversos e de forma adaptativa através de sensores mio-elétricos que interpretam as solicitações de terminações nervosas em movimentos robóticos da mão.



**Figura 3-1 - I-Limp Quantum prótese de mão robótica**  
Fonte: Touch Bionics (2018)

Nessa prótese o movimento é realizado através de sensores que transmitem sinais dos músculos para as próteses. Entretanto, o elevado custo deste dispositivo se torna uma barreira para a grande maioria das pessoas.

Para membros inferiores também existem muitos avanços incluindo pernas e outros dispositivos para os atletas paraolímpicos.

Existem dispositivos sofisticados do MIT (*Instituto de Tecnologia de Massachusetts*) desenvolvidos em conjunto com o Sr. Hugh Herr. O Sr. Herr teve suas pernas amputadas devido ao congelamento em um acidente de alpinismo. Depois disso, passou a se dedicar a evolução de próteses como pode ser visto na Figura 3-2.

Inicialmente o desenvolvimento das pernas surgiu com a fabricação de próteses em madeira para a prática de esportes, porém verificou que a tecnologia poderia ser aperfeiçoada e ajudar outras pessoas.

Como pode ser visto na Figura 3-2 diversos modelos de pernas robóticas que prometem revolucionar a utilização de próteses de pernas.



**Figura 3-2 – Próteses robóticas de membros inferiores do MIT**  
Fonte: MIT (2018)

Essa tecnologia cibernética ou robótica, é muito distante da maioria das pessoas, devido ao elevado custo de aquisição.

A tecnologia de prototipagem rápida aditiva, parece ser capaz de ajudar a tornar mais acessível a aquisição de DAH, e vem se tornando cada vez mais popular devido ao menor custo.

A mão desenvolvida por Ivan Owen é um projeto simples de metal e acabou por se tornar um grande projeto no auxílio para diversas pessoas. Ivan foi responsável por desenvolver um DAH feito em impressora 3D. Com a colaboração de diversos pesquisadores e engenheiros em todo o mundo, o projeto foi sendo aperfeiçoado e desenvolvido conforme pode ser visto no site do E-Nable (ENABLING THE FUTURE, 2017 - [enablingthefuture.org/about/](http://enablingthefuture.org/about/)).

Como pode ser visto na Figura 3-3 existem vários modelos de DAH da E-Nable à disposição, em sua grande maioria para utilização em crianças.



**Figura 3-3 - Modelos de dispositivos de auxílio humano (DAH) da E-Nable**  
Fonte: E-NABLE (2018)

Esses modelos do projeto E-Nable não são elétricos e nem eletrônicos, ou seja, não necessitam de baterias, não contém sensores, são totalmente mecânicos baseados na energia mecânica humana e 90% deles são fabricados em impressoras 3D.

*Enabling The Future* é um grupo dedicado a ajudar crianças que necessitam de DAH, via a impressão 3D.

O projeto E-Nable teve início com o *Ivan Owen* e *Richard Van As* em 2012 (ENABLING THE FUTURE, 2017). Ivan mostrou um vídeo na internet sobre um dispositivo que ele construiu. Este vídeo chegou às mãos de um carpinteiro chamado Richard na África do Sul.

Richard havia perdido os dedos em um acidente, em contato com Ivan os dois iniciaram um desenvolvimento de um novo dispositivo para mão utilizando objetos que poderiam ser encontrados facilmente em suas residências.

Foi então que Ivan pesquisou DAH e encontrou um desenvolvido em 1800 por Robert Norman que o construiu a partir de ossos de baleia, cabos e polias.

Isso deu início ao desenvolvimento do projeto e do funcionamento dos dispositivos da E-Nable. Ivan e Richard decidiram publicar os arquivos do modelo como um código aberto (*open source*) para que todos em qualquer lugar pudessem utilizar seus arquivos para desenvolver seus próprios DAH.

Em julho de 2013, Jon Schull, professor da RIT (*Instituto de Tecnologia Rochester em Nova York nos EUA*), viu um vídeo de uma pessoa utilizando uma mão impressa em 3D, e decidiu começar um grupo de desenvolvedores de DAH, que atualmente possui mais de 8.000 membros espalhados por todo o mundo.



#### 4. PROTOTIPAGEM RÁPIDA COM IMPRESSÃO 3D

A prototipagem rápida é considerada hoje um método de desenvolvimento de produto fundamental para definição do modelo, testes de intercambialidade, montagem de protótipos, amostras, moldes, entre outras possibilidades, permitindo assim ganhar tempo e reduzir custos (ALCALDE e WILTGEN, 2018).

Assim sendo, é possível afirmar que é uma ferramenta importante para um projeto robusto, segundo Pham (1998) a prototipagem é uma parte essencial no desenvolvimento de produto e ciclo de manufatura para verificar forma, encaixes e funcionalidade antes de um possível investimento em ferramental para a produção em larga escala.

Prototipagem rápida é um termo que abrange uma gama de novas tecnologias para produção de peças precisas diretamente do modelo CAD em poucas horas, com pouca intervenção humana (PHAM, 1998).

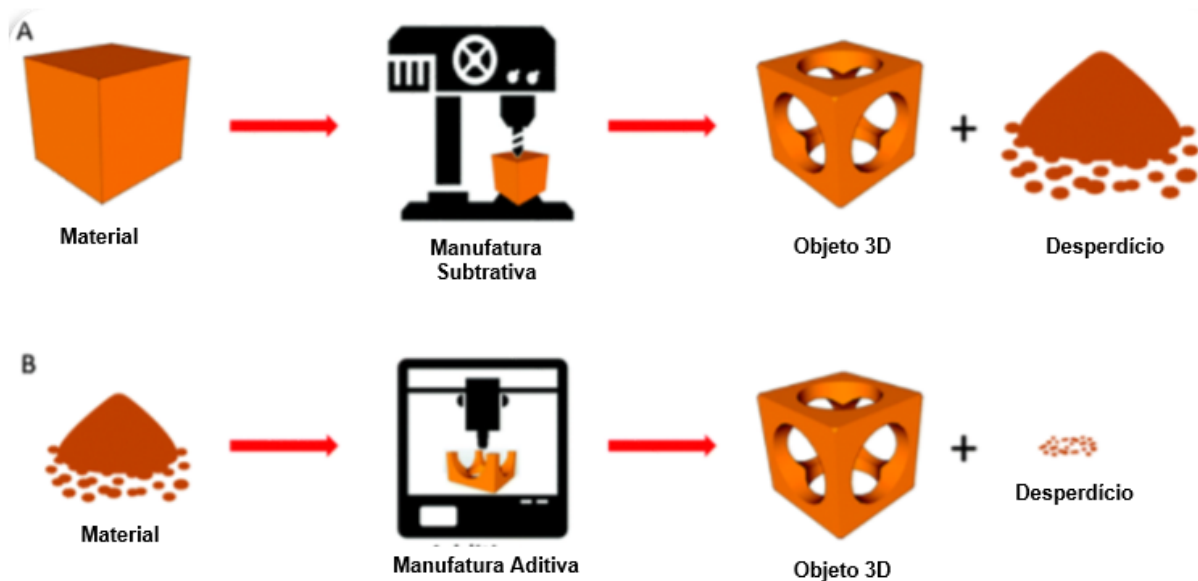
Segundo Volpato (2017) devido a elevada concorrência, e a crescente complexidade dos produtos têm exigido das empresas alterações substanciais no processo de desenvolvimento de produtos.

Com isso, atualmente as empresas tem como um recurso a manufatura aditiva, que pode ser definida como um processo de fabricação por meio da adição sucessiva de material na forma de camadas, com informações obtidas diretamente de uma apresentação geométrica computacional 3D do componente.

Prototipagem rápida pode ser obtida de várias formas, as principais são duas muito diferentes entre si. Uma dessas formas é a de subtração de material como nas máquinas CNC tradicionais, a outra forma é com a deposição de material, como no método de impressão 3D.

Como pode ser visto na Figura 4-1, sendo (a) manufatura subtrativa e (b) manufatura aditiva.

A principal vantagem do método de deposição aditivo é justamente o menor desperdício de matéria prima, quando comparado ao método subtrativo tradicional.



**Figura 4-1 – Comparativo entre os processos de manufatura Subtrativa (A) e Aditiva (B)**

Fonte: Adaptado de NX Additive Manufacturing (2018)

Um dos grandes diferenciais da técnica de impressão 3D é a possibilidade de construir peças complexas e personalizadas, e quando comparadas as tecnologias em relação ao tempo gasto para construção de uma mesma peça é sem dúvida um grande diferencial.

Além disso, existem técnicas de impressão 3D no qual um sistema todo pode ser fabricado de uma só vez, incluindo todas as partes móveis, já quando comparadas as precisões de fabricação, a tecnologia subtrativa ainda possui grande precisão devido a forma com que as ferramentas atuam sobre as peças, porém com a evolução da técnica aditiva, é possível que em alguns anos a técnica de fabricação aditiva possa ser equivalente ou melhor do que a técnica de fabricação subtrativa.

Na década de 80 surgiu o primeiro e mais conhecido método de impressão 3D, a estereolitografia (*Stereolithography*), que foi inventado por Charles Hull, cujo trabalho levou a inúmeras patentes de outras diversas formas de impressões (WILTGEN, 2015).

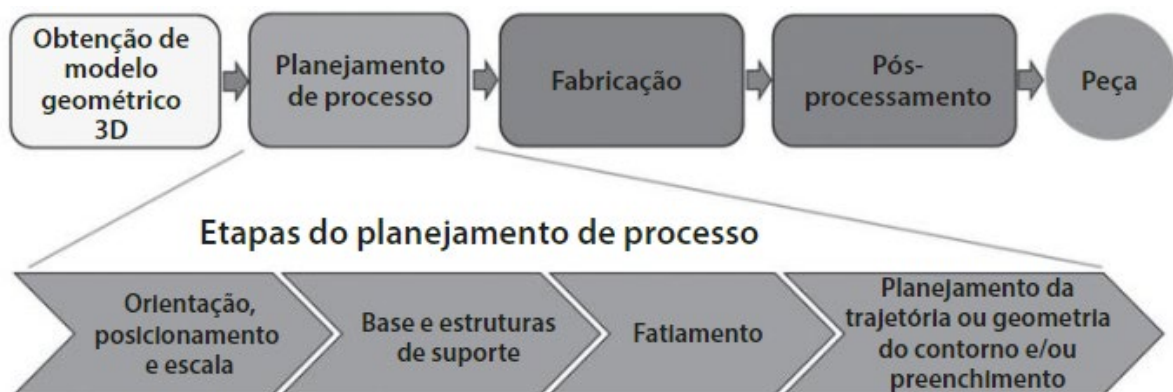
Atualmente existem diversas técnicas de impressão 3D, a pesquisa se limitou as técnicas que tivessem seus métodos conhecidos e difundidos no meio acadêmico e industrial.

Dentre os principais métodos, tem-se:

- **Stereolithography** (*Estereolitografia - SLA*).
- **Fused Deposition Modeling** (*Deposição por Material Fundido - FDM*).
- **Selective Laser Sintering** (*Sinterização Seletiva a Laser - SLS*).

A técnica de impressão 3D consiste em transformar um sólido digital construído utilizando um programa de CAD, para um arquivo especialmente fatiado na altura (Z) e com sua localização X e Y. Este arquivo é comum para todas as impressões em 3D, cada qual com suas características de orientação de coordenadas X, Y e Z para cada tipo de impressora ou técnica de impressão em 3D. Um arquivo de CAD comum deve ser transformado em um arquivo de impressão 3D para que suas coordenadas sejam correlacionadas ao modelo a ser impresso.

Como pode ser visto na Figura 4-2 as etapas conforme descritas por Volpato (2017).



**Figura 4-2 – Processo de Manufatura Aditiva via impressão 3D**

Fonte: VOLPATO (2017)

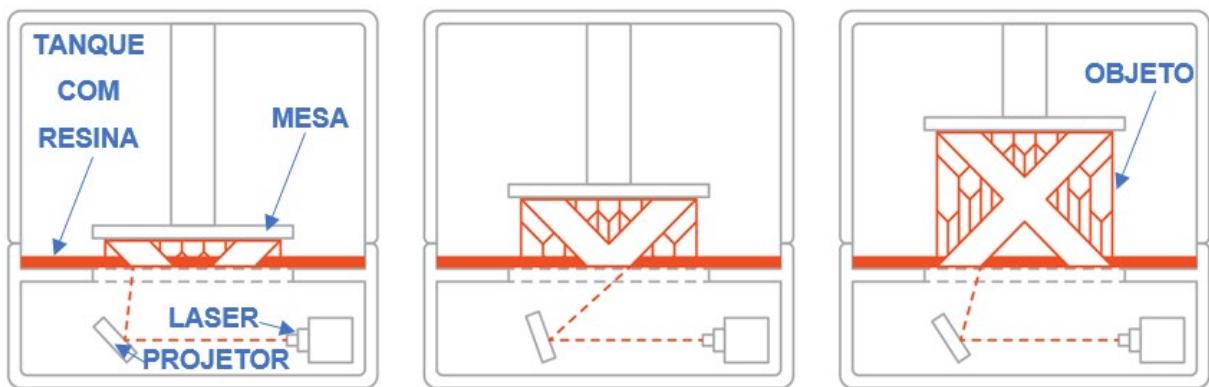
#### 4.1. ESTEREOLITOGRAFIA (STERELITHOGRAPHY - SLA)

Em 1984, *Charles Hull* inventou e patenteou a técnica SLA (HULL, 1984), a mais conhecida tecnologia de impressão 3D, e mesmo sendo a primeira tecnologia de Prototipagem Rápida Aditiva a surgir ainda é um dos métodos mais utilizados de impressão 3D profissional (GEBHARDT, 2011).

Esta técnica consiste em transformar um sólido digital construído em um programa de CAD em um arquivo especialmente fatiado na altura (Z) e com sua localização X e Y. Este arquivo é comum para todas as impressões em 3D, cada qual com suas características de orientação de coordenadas X, Y e Z para cada tipo de impressora ou técnica de impressão em 3D. Um arquivo de CAD comum deve ser transformado em um arquivo de impressão 3D para que suas coordenadas sejam correlacionadas ao modelo a ser impresso.

Após a conclusão de cada camada a plataforma, ou mesa de impressão, a mesma se desloca (para cima ou para baixo, dependendo apenas do modelo de impressora) possibilitando assim a formação de uma nova camada de impressão do objeto. O processo se repete nas camadas seguintes até que o objeto seja concluído. Como pode ser visto na Figura 4-3, o funcionamento da técnica.

A técnica SLA (GEBHARDT, 2011) utiliza de uma fonte de laser que envia raios ultravioleta para solidificar a resina polimérica. O feixe do laser é direcionado sobre um polímero na forma líquida, que se solidifica nas regiões atingidas pelo feixe de laser formando uma das camadas do objeto.



**Figura 4-3 - Exemplificação do processo de fabricação da técnica SLA**

Fonte: Adaptado de 3D HUBS (2017)

Como pode ser visto na Figura 4-3 é possível perceber o processo de funcionamento para a fabricação de uma peça. Na figura a função do laser é solidificar a parte da resina que está no tanque, seguindo as coordenadas do modelo que são direcionadas pelo projetor. Conforme cada camada é construída a mesa é elevada, e assim, o objeto é fabricado camada por camada.

Esta técnica pode ser utilizada para diversas aplicações industriais, como na confecção de protótipos, análise dimensional, e até mesmo em testes funcionais no desenvolvimento de produtos.

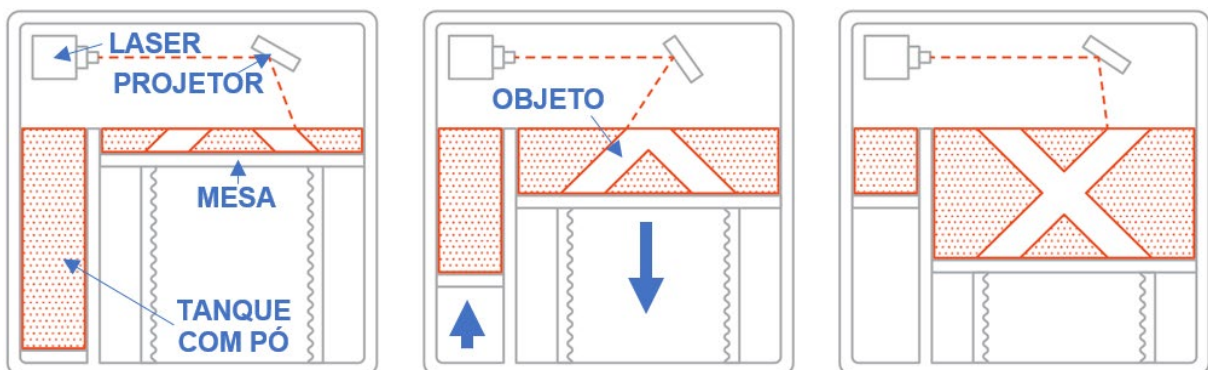
Como pode ser visto na Figura 4-4, uma peça impressa 3D através desta técnica no qual é possível identificar na parte inferior o laser confeccionando a peça.



**Figura 4-4 – Foto da construção real de uma peça com a técnica SLA**  
Fonte: RapidParts (2018)

#### 4.2. SINTERIZAÇÃO A LASER (SELECTIVE LASER SINTERING - SLS)

O método SLS foi desenvolvida por Carl Deckard (DECKARD, 1986). Essa técnica consiste do uso de um feixe de laser para criar os modelos 3D de forma similar a SLA. A principal diferença tecnológica é a utilização de um polímero em pó, e não de uma resina líquida como é utilizado na técnica SLA. Conforme pode ser visto na Figura 4-5, o funcionamento esquemático de uma máquina baseada na técnica SLS.



**Figura 4-5 – Exemplificação do processo de funcionamento da técnica SLA**  
Fonte: adaptado de 3D HUBS (2017)

Na Figura 4-5 é possível verificar o processo descrito anteriormente por Gebhardt (2011). Nota-se as cinco partes básicas: mesa, tanque com polímero em pó, laser e projetor.

O feixe de laser solidifica o pó que está na superfície da mesa no qual a forma geométrica referente a um camada é projetada, após a conclusão da polimerização desta camada a mesa desce, e uma nova camada de pó que está armazenada nas laterais da máquina é colocada sobre a camada anterior através de um rolo, e o processo se repete camada a camada, até que o objeto seja finalizado.

Suas aplicações são diversas, podendo utilizar seções muito finas devido ao material utilizado, é possível desenvolver peças com geometrias complexas, as peças são resistentes ao impacto e calor, podendo utilizar até mesmo em carcaças de motor, ou seja, construção de uma peça funcional. A técnica SLS pode produzir uma ampla variedade de peças funcionais (CHUA, 2003).

Como pode ser visto na Figura 4-6, um objeto fabricado através da técnica SLS.



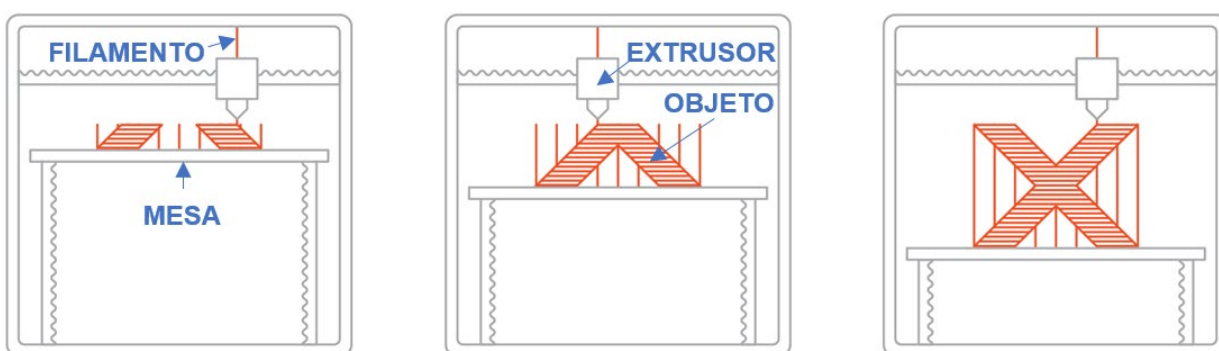
**Figura 4-6 - Ilustração de um conjunto dutos de motor a combustão interna construído com a técnica SLA**

Fonte: 3DSYSTEMS (2018)

### 4.3. DEPOSIÇÃO POR FUSÃO (FUSED DEPOSITION MODELING – FDM)

Poucos anos após invenção da técnica SLS, foi inventado por Steven Scott Crump (CRUMP, 1989) a tecnologia FDM. Esta técnica foi a responsável pela divulgação da impressão 3D, isso porque essa técnica é a simples, mais fácil de ser construída e a de menor custo (GEBHARDT, 2011).

Como pode ser visto na Figura 4-7, o processo de construção utilizando esta técnica FDM.



**Figura 4-7 – Exemplificação do processo de funcionamento da técnica FDM**  
Fonte: adaptado de 3D HUBS (2017)

Na Figura 4-7 o modelo consiste em derreter o filamento de um termoplástico que é puxado por uma engrenagem e empurrado pelo bico extrusor, com temperatura entre 120° C e 220° C, no qual é responsável por derreter e diminuir seu diâmetro a fim de melhorar a qualidade da impressão 3D (WILTGEN, 2015).

Nesta técnica, tanto a extrusora, quanto a mesa se movimentam, para cima e para baixo (eixo Z) ou para os lados (eixos X e Y).

O filamento fica praticamente líquido, de tal forma, que possa ser depositado na mesa de construção da impressora camada por camada para que o objeto seja construído. Após o material ser depositado sobre a mesa de impressão (aquecida ou não) se inicia o processo de transformação do termoplástico novamente para o estado físico sólido.

As vantagens intrínsecas desta tecnologia permitiram o maior acesso às pessoas. Fácil e simples de ser construída, com o tempo surgiram vários modelos

chamados de impressoras de mesas ou *desktops* (como são chamadas as impressoras não profissionais). Isso difundiu a impressão 3D nas residências.

Suas aplicações podem ser diversas, como construção de modelos geométricos para verificação de intercambialidade, modelos demonstrativos e dependo da aplicação até podendo ser utilizada como peças funcionais em prototipagem rápida aditiva (CHUA, 2003).

Como pode ser visto na Figura 4-8, algumas peças impressas por com a técnica FDM.



**Figura 4-8 – Peças mecânicas impressas com a técnica FDM**  
Fonte: STRATASYS (2018)



#### 4.4. COMPARATIVO ENTRE AS TÉCNICAS SLA, SLS e FDM

Um comparativo entre as técnicas SLA, SLS e FDM apresenta as vantagens e desvantagens. A comparação se faz com três distintos conceitos para o interesse desta pesquisa: **Melhor, Neutro e Pior**.

A Tabela 4-1 apresenta a compilação dos principais dados para comparação baseados nas referências dos estudos de CHUA (2003), NIAKI (2018), HOPKINSON (2006), COOPER (2001), GIBSON (2015), 3D HUBS (2017) e VOLPATO (2017).

**Tabela 4-1 - Comparativo Tecnologias de Impressão 3D**

<b>Descrição</b>	<b>SLA</b>	<b>SLS</b>	<b>FDM</b>
<i>Custo do Equipamento</i>	Pior	Neutro	Melhor
<i>Custo de Manutenção</i>	Pior	Neutro	Melhor
<i>Custo de Material</i>	Pior	Neutro	Melhor
<i>Disponibilidade de Materiais</i>	Neutro	Pior	Melhor
<i>Resolução de Impressão</i>	Melhor	Neutro	Pior
<i>Precisão de Impressão</i>	Melhor	Neutro	Pior
<i>Acabamento Superficial</i>	Melhor	Neutro	Pior
<i>Tolerância</i>	Melhor	Neutro	Pior
<i>Tempo de Processamento</i>	Melhor	Pior	Neutro
<i>Resistência ao Calor (Peça)</i>	Pior	Melhor	Neutro
<i>Resistência Mecânica (Peça)</i>	Pior	Melhor	Neutro
<i>Resistência em altas Temperaturas (Peça)</i>	Pior	Melhor	Neutro
<i>Durabilidade (Peça)</i>	Pior	Melhor	Neutro
<i>Impressão de Peças Funcionais</i>	Pior	Melhor	Neutro

Fonte: Próprio autor – Baseado em CHUA (2003), NIAKI (2018), HOPKINSON (2006), COOPER (2001), GIBSON (2015), 3D HUBS (2017) e VOLPATO (2017).

Quando comparada cada técnica de impressão 3D de interesse para esta pesquisa, a técnica SLA apresenta uma melhor resolução, precisão, acabamento, tolerância e tempo de processamento. Entretanto possui alto custo no equipamento, na manutenção, nos materiais, além de apresentar a mais baixa resistência mecânica, e também, ao calor. Dentre as três técnicas a SLA possui a melhor resolução e acabamento.

A técnica SLS possui como principal vantagem a resistência ao calor. Dessa forma, possibilidade de imprimir peças funcionais para prototipagem rápida aditiva, com alta resistência mecânica e durabilidade. Entretanto, possui o pior tempo de processamento entre as três técnicas, e também, pouca variedade de materiais para impressão.

A técnica FDM apresenta o melhor custo referente ao equipamento, a manutenção e aos materiais. Por ser muito difundida atraiu uma grande quantidade de empresas fabricantes fornecendo uma boa diversidade em materiais termoplásticos e várias opções de tipos de extrusoras.

Esse comparativo teve como intenção orientar na escolha da técnica a ser seguida na pesquisa em questão visando manter o melhor custo benefício para o presente estudo. Assim sendo, o baixo custo operacional e de aquisição, além do fácil acesso a diversos tipos de materiais, fez da técnica FDM a mais adequada a esta pesquisa.

#### 4.5. MATERIAIS UTILIZADOS EM IMPRESSÃO 3D NA TÉCNICA FDM

Com a difusão da impressão 3D, surge também a difusão dos tipos de materiais disponíveis para confecção de peças impressas em FDM. Como exemplo de materiais utilizados na técnica FDM, destacam-se: materiais magnéticos, grafeno, borrachas, cerâmicas, silicone e metais.

Esta expansão de tipos de materiais fomenta uma indústria sedenta por finalmente ser capaz de confeccionar peças que podem ser impressas de uma só vez com diferentes tipos de material e em uma só peça funcional, integrada via arquivo digital sem a necessidade de montagens, fixações ou integração de partes.

##### 4.5.1. ABS (Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno)

O Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno ou ABS é um material muito conhecido na indústria (SANTOS, 2010), o ABS é um copolímero com grande aplicação na indústria de plásticos devido às suas excelentes propriedades (mecânicas,

elétricas, químicas e ópticas) e por possuir baixo custo para um polímero de grande aplicação em engenharia.

Segundo um de seus fabricantes, a Ultimaker (2018a), o material ABS é um material com excelente adesão entre camadas, estética agradável, deformação mínima e adesão estável à base, porém na tecnologia 3D é importante ressaltar que inúmeros fatores devem ser considerados para sua impressão.

De modo geral, o que ocorre muitas vezes são as rachaduras e o desprendimento da mesa de impressão. No caso do material ABS, é importante que a impressão 3D seja realizada em um ambiente com temperatura controlada e principalmente sem correntes de ar mantendo a mesa de impressão a uma temperatura mínima de 110° C, e temperatura de extrusão em 220° C (ULTIMAKER, 2018a).

Normalmente este material pode ser utilizado para muitos tipos de protótipos, mas sua folha de dados (ULTIMAKER, 2018a) informa que o ABS não é indicado para peças em contato com alimentos e sua exposição prolongada aos raios UV podem afetar as propriedades do material. A temperatura máxima de exposição recomendada deve ser inferior a 85° C.

Na Tabela 4-2 observa-se as características do filamento da fabricante Ultimaker (2018a).

**Tabela 4-2 - Propriedades Mecânica ABS**

<i>Teste</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>	<i>Método do Teste</i>
<i>Módulo de tração</i>	1681,5	MPa	ISO 527
<i>Resistência a tração no limite</i>	39,0	MPa	ISO 527
<i>Resistência a tração na ruptura</i>	33,9	MPa	ISO 527
<i>Alongamento no limite</i>	3,5	%	ISO 527
<i>Alongamento na ruptura</i>	4,8	%	ISO 527
<i>Resistência à Flexão</i>	70,5	MPa	ISO 178
<i>Módulo de flexão</i>	2070,0	MPa	ISO 178
<i>Resistência ao impacto Izod, com entalhe (a 23°C)</i>	10,5	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180
<i>Dureza</i>	76 (Shore D)	-	Durômetro

Fonte: adaptado de Ultimaker (2018a)

O material ABS além de ser uma boa opção para impressão, também é um material resistente a impactos mecânicos (possui boa propriedade mecânica). O custo do material varia de acordo com cada fabricante, utilizando como referência alguns de seus principais fornecedores e fabricantes como 3D Fila ([3dfila.com.br](http://3dfila.com.br)), 3D Lab ([3dlab.com.br](http://3dlab.com.br)) e Filamentos Brasil ([filamentos3dbrasil.com.br](http://filamentos3dbrasil.com.br)) é possível encontrar o material por valores entre US\$ 20 a US\$ 30 cada 1 kg.

#### 4.5.2. PLA (Poliácido Láctico)

O Poliácido Láctico ou PLA é um dos materiais mais utilizados em impressões 3D principalmente na técnica FDM, pois é um material de fácil impressão, composto de materiais biológicos como amido de milho e cana de açúcar.

Assim como o material ABS, o PLA é um material resistente, porém não é tolerante ao calor como o ABS.

O PLA é considerado um material muito promissor, sendo obtido por fermentação bacteriana de glicose extraída do milho (SOUZA, 2014). A decomposição do PLA é lenta em solo (mais de 80 dias) porém facilmente degradado em ambiente de compostagem.

Segundo um de seus fabricantes, a Ultimaker (2018b), o material pode ser utilizado com utensílios domésticos, brinquedos, protótipos e modelos arquitetônicos, e não é recomendado sua utilização em materiais em contato com alimentos, e em aplicações com longa duração em espaços exteriores, exposta a temperaturas superiores a 40° C.

Para impressão deste material cada fabricante indica uma temperatura diferente devido ao processo de fabricação do filamento, mas de modo geral recomenda-se uma temperatura mínima para extrusão de 180° C e não há necessidade de uma mesa aquecida, se for utilizado basta estar com a temperatura baixa entre 40° C a 60° C.

Um ponto importante na impressão 3D com PLA é a utilização de ventilação direta no bico da extrusora para ajudar na integração entre as camadas e o resfriamento do material para a colagem correta entre cada camada (WILTGEN, 2015).

Na Tabela 4-3 podem ser vistas as propriedades mecânicas deste material segundo o fabricante Ultimaker (2018b).

**Tabela 4-3 - Propriedades Mecânicas PLA**

<i>Teste</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>	<i>Método do Teste</i>
<i>Módulo de tração</i>	2346,5	MPa	ISO 527
<i>Resistência a tração no limite</i>	49,5	MPa	ISO 527
<i>Resistência a tração na ruptura</i>	45,6	MPa	ISO 527
<i>Alongamento no limite</i>	3,3	%	ISO 527
<i>Alongamento na ruptura</i>	5,2	%	ISO 527
<i>Resistência à Flexão</i>	103,0	MPa	ISO 178
<i>Módulo de flexão</i>	3150,0	MPa	ISO 178
<i>Resistência ao impacto Izod, com entalhe (a 23°C)</i>	5,1	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180
<i>Dureza</i>	83 (Shore D)	-	Durômetro

Fonte: adaptado de Ultimaker (2018b)

Com essas propriedades o PLA possui uma boa resistência a tração, com isso combinado a uma boa qualidade superficial (resolução), fácil impressão, diversas opções de aplicação e cores, biodegradável, torna-se um dos materiais mais indicados para impressão 3D FDM.

O custo do material varia de acordo com cada fabricante, utilizando como referência alguns fabricantes como 3D Fila ([3dfila.com.br](http://3dfila.com.br)), 3D Lab ([3dlab.com.br](http://3dlab.com.br)) e Filamentos Brasil ([filamentos3dbrasil.com.br](http://filamentos3dbrasil.com.br)) é possível encontrar o material por valores entre US\$ 30 a US\$ 40 cada 1 kg.

#### 4.5.3. NYLON

O Poliamida nylon é mundialmente conhecido. Segundo Wojtyła (2017) o nylon é forte, durável e versátil como material de impressão 3D.

Para sua impressão cada fabricante indica uma temperatura diferente, mas de forma geral a temperatura mínima de extrusão de 220° C e temperatura da mesa acima de 85° C. Sua alta temperatura de extrusão e de fixação na mesa impactam

seu uso, pois poucas impressoras no mercado atingem estas altas temperaturas de impressão, tornando a utilização deste material um problema.

Na Tabela 4-4 podem ser vistas as propriedades mecânicas do nylon conforme a fabricante Ultimaker (2018c).

**Tabela 4-4 - Propriedades mecânicas do nylon**

<i>Teste</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>	<i>Método do Teste</i>
<i>Módulo de tração</i>	579,0	MPa	ISO 527
<i>Resistência a tração no limite</i>	27,8	MPa	ISO 527
<i>Resistência a tração na ruptura</i>	34,4	MPa	ISO 527
<i>Alongamento no limite</i>	20,0	%	ISO 527
<i>Alongamento na ruptura</i>	210,0	%	ISO 527
<i>Resistência à Flexão</i>	24,0	MPa	ISO 178
<i>Módulo de flexão</i>	463,5	MPa	ISO 178
<i>Resistência ao impacto Izod, com entalhe (a 23°C)</i>	34,4	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180
<i>Dureza</i>	74	-	Durômetro (Shore D)

Fonte: adaptado de Ultimaker (2018c)

O custo do material varia de acordo com cada fabricante, mas o nylon não é um material fácil de se encontrar em lojas e seu custo é muito maior que os demais apresentados até o momento, utilizando como referência alguns de seus fabricantes como Rede Brasileira de Fabricação Digital ([rbfd.com.br](http://rbfd.com.br)) e em lojas online é possível encontrar o material por valores entre US\$ 80 a US\$ 100 cada 1 kg.

#### 4.5.4. PVA (Poliálcool Vinílico)

O Poliálcool Vinílico ou PVA é um material utilizado normalmente como suporte, segundo a Ultimaker (2018d), é um material de suporte hidrossolúvel para impressão 3D multiextração.

Por se tratar de um material utilizado como suporte é utilizado quando há necessidade de imprimir peças com complexidade muito alta que necessitam de suportes internos para sustentar as peças a serem confeccionadas.

Segundo a fabricante Ultimaker (2018d), o PVA possui boa estabilidade térmica que resulta numa melhor resistência a degradação, além de possuí ótima adesão.

Para sua impressão o fabricante indica uma temperatura mínima de extrusão de 190° C.

Como trata-se de um material praticamente exclusivo para suportes, ele não apresenta diversos testes mecânicos, como pode ser observado na Tabela 4-5 conforme um de seus fabricantes a Ultimaker (2018d).

**Tabela 4-5 - Propriedades mecânicas do PVA**

<i>Teste</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>	<i>Método do Teste</i>
<i>Módulo de tração</i>	3860,0	MPa	ISO 527
<i>Resistência a tração no limite</i>	-	MPa	ISO 527
<i>Resistência a tração na ruptura</i>	78,0	MPa	ISO 527
<i>Alongamento no limite</i>	-	%	ISO 527
<i>Alongamento na ruptura</i>	9,9	%	ISO 527
<i>Resistência à Flexão</i>	-	MPa	ISO 178
<i>Módulo de flexão</i>	-	MPa	ISO 178
<i>Resistência ao impacto Izod, com entalhe (a 23°C)</i>	-	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180
<i>Dureza</i>	-	-	Durômetro

Fonte: adaptado de Ultimaker (2018d)

O custo do material varia de acordo com cada fabricante, o PVA assim como o nylon não é um material fácil de se encontrar. Foi utilizado como referência os fabricantes Rede Brasileira de Fabricação Digital ([rbfd.com.br](http://rbfd.com.br)), Ultimaker ([ultimaker.com](http://ultimaker.com)). Seu custo é elevado e os valores estão entre US\$ 80 e US\$ 200 cada 0,5 kg.

#### 4.5.5. PEAD / HDPE (Polietileno de Alta Densidade)

O Polietileno de Alta Densidade ou PEAD ou HDPE da sigla em inglês para *High-density polyethylene* (ARAUJO, 2016) é um dos plásticos mais consumidos no mercado nacional, representando 30% do resíduo plástico gerado no Brasil.

O material PEAD tem excelentes propriedades mecânicas como alta resistência à tração e alta rigidez (HAMOD, 2014). Sua impressão indica uma temperatura de 230° C.

Na Tabela 4-6 podem ser vistas algumas de suas características, porém essas informações são para o material utilizado para injeção e não filamento de impressão 3D, segundo o fabricante Lyndellbase (2018). Não foi encontrada nenhuma referência a características deste material para filamentos de impressão FDM.

**Tabela 4-6 - Propriedades mecânicas PEAD / HDPE para injeção em plástico**

<i>Teste</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>	<i>Método do Teste</i>
<i>Módulo de tração</i>	900,0	Mpa	ISO 527
<i>Resistência a tração no limite</i>	22,0	Mpa	ISO 527
<i>Resistência a tração na ruptura</i>	-	Mpa	ISO 527
<i>Alongamento no limite</i>	-	%	ISO 527
<i>Alongamento na ruptura</i>	-	%	ISO 527
<i>Resistência à Flexão</i>	-	Mpa	ISO 178
<i>Módulo de flexão</i>	-	Mpa	ISO 178
<i>Resistência ao impacto Izod, com entalhe (a 23°C)</i>	-	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180
<i>Dureza</i>	-	-	Durômetro

Fonte: adaptado de Lyndellbase (2018)

O material para injeção custa cerca de US\$ 70 cada 1 kg. Entretanto, isso não permite sua utilização como parâmetro de comparação entre os outros materiais que são fabricados em forma de filamento FDM.



#### 4.5.6. PETG (Polietileno Teraftalato Glicol-Modificado)

O Polietileno Teraftalato Glicol-Modificado ou PETG é muito conhecido na indústria. Material versátil com boa resistência térmica. Normalmente este material é translúcido e segundo um de seus fabricantes (FILATECH, 2018), este material pode ser utilizado junto à alimentos.

Ao contrário do ABS, o PETG não se deforma e não produz gases no processo de impressão 3D FDM.

Para o fabricante Rigid.ink (2018), este material pode ser utilizado para impressão de brinquedos, caixas, garrafas e artigos esportivos.

Para sua impressão a temperatura de extrusão é de 230° C, e a mesa deve ser aquecida a 70° C.

Na Tabela 4-7 podem ser vistas algumas de suas características.

**Tabela 4-7 - Propriedades Mecânicas PETG**

<i>Teste</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>	<i>Método do Teste</i>
<i>Módulo de tração</i>	2100,0	Mpa	ISO 527
<i>Resistência a tração no limite</i>	50,0	Mpa	ISO 527
<i>Resistência a tração na ruptura</i>	28,0	Mpa	ISO 527
<i>Alongamento no limite</i>	-	%	ISO 527
<i>Alongamento na ruptura</i>	100,0	%	ISO 527
<i>Resistência à Flexão</i>	68,0	Mpa	ISO 178
<i>Módulo de flexão</i>	2000,0	Mpa	ISO 178
<i>Resistência ao impacto Izod, com entalhe (a 23°C)</i>	6,2	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180
<i>Dureza</i>	-	-	Durômetro

Fonte: adaptado de Rigid.ink (2018)

As boas propriedades mecânicas deste material possibilitam imprimir objetos grandes. O material também apresenta boa resistência química a ácidos e a água.

O custo do material varia de acordo com cada fabricante, como 3D Fila ([3dfila.com.br](http://3dfila.com.br)), 3D Lab ([3dlab.com.br](http://3dlab.com.br)) e Filamentos Brasil ([filamentos3dbrasil.com.br](http://filamentos3dbrasil.com.br)) é possível encontrar o material por valores entre US\$ 25 a US\$ 35 cada 1 kg, sendo um material facilmente encontrado no mercado.

#### 4.5.7. TRITAN (Eastman™ Tritan®)

O TRITAN é um material de propriedade da empresa Eastman, segundo o fabricante do TRITAN é um copoliéster de alta resistência.

Segundo um de seus fabricantes de filamentos (TAULMAN, 2018), o material utilizado em filamento de impressão 3D é um dos mais resistente (principalmente quanto a tração) e fortes do mercado.

Para a impressão 3D deste material é necessário uma temperatura mínima de extrusão de 260° C, e também, a mesa aquecida em 100° C.

Na Tabela 4-8 podem ser vistas algumas das propriedades mecânicas do TRITAN.

**Tabela 4-8 - Propriedades mecânicas do TRITAN**

<i>Teste</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>	<i>Método do Teste</i>
<i>Módulo de tração</i>	1560,0	Mpa	ASTM D638
<i>Resistência a tração no limite</i>	-	Mpa	ASTM D638
<i>Resistência a tração na ruptura</i>	53,0	Mpa	ASTM D638
<i>Alongamento no limite</i>	-	%	ASTM D638
<i>Alongamento na ruptura</i>	5,5	%	ASTM D638
<i>Resistência à Flexão</i>	64,0	Mpa	ASTM D790
<i>Módulo de flexão</i>	1560,0	Mpa	ASTM D790
<i>Resistência ao impacto Izod, com entalhe (a 23°C)</i>	-	kJ/m <sup>2</sup>	ASTM D256
<i>Dureza</i>	-	-	Durômetro

Fonte: adaptado de 3DFila (2018)

O custo do material varia de acordo com cada fabricante, a 3D Fila ([3dfila.com.br](http://3dfila.com.br)) e a Filament2Print ([filament2print.com](http://filament2print.com)) possuem valores que variam entre US\$ 45 a US\$ 60 cada 1 kg.

#### 4.5.8. FIBRA DE CARBONO (PLA COM FIBRA DE CARBONO)

Para a impressão 3D a Fibra de Carbono é combinada com o PLA, segundo um de seus fabricantes (3DXTECH, 2018), é ideal para aplicações que exigem rigidez e estabilidade dimensional.

Recomenda-se cautela no uso da fibra de carbono por ser abrasiva, podendo danificar o extrusor e a garganta de teflon do equipamento.

O fabricante 3DXTECH recomenda em sua ficha técnica temperatura de extrusão entre 190° C a 220° C, e temperatura da mesa até 60°C.

Na Tabela 4-9 podem ser vistas algumas de suas propriedades mecânicas.

**Tabela 4-9 - Propriedades mecânicas da fibra de carbono com PLA**

<i>Teste</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>	<i>Método do Teste</i>
<i>Módulo de tração</i>	4791,0	Mpa	ISO 527
<i>Resistência a tração no limite</i>	-	Mpa	ISO 527
<i>Resistência a tração na ruptura</i>	-	Mpa	ISO 527
<i>Alongamento no limite</i>	-	%	ISO 527
<i>Alongamento na ruptura</i>	2,0	%	ISO 527
<i>Resistência à Flexão</i>	114,0	Mpa	ISO 178
<i>Módulo de flexão</i>	6320,0	Mpa	ISO 178
<i>Resistência ao impacto Izod, com entalhe (a 23°C)</i>	-	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180
<i>Dureza</i>	-	-	Durômetro

Fonte: adaptado de 3DXTECH (2018)

Como é possível verificar este material apresenta algumas de suas propriedades mecânicas muito superiores a outros materiais de impressão 3D. Este material não é facilmente encontrado no Brasil.

O custo do material é elevado e pode variar entre US\$ 60 a US\$ 80 cada 0,5 kg.

#### 4.5.9. GRAFENO (PLA COM GRAFENO)

O Grafeno apesar de não ser um material relativamente novo, vem sendo explorado principalmente por ser um material condutivo (ALVES, 2016). Utilizado em forma de filamento para impressão de circuitos flexíveis.

Segundo o fabricante (BLACK MAGIC 3D, 2018), este material possui resistência mecânica superior quando comparado ao ABS e PLA.

Pode ser utilizado para criar sensores capacitivos, circuitos elétricos para uso em dispositivos eletrônicos, e também, devido a sua condutividade pode ser utilizado na blindagem contra Interferência Eletromagnética (EMI) e de Rádio Frequência (RF) em telecomunicações, equipamentos hospitalares, dispositivos médicos, aeroespacial e automotivo.

Para a sua impressão recomenda-se uma temperatura de extrusão de 220° C, e mesa aquecida no mínimo em 50° C.

O custo deste material, por ser importado tem custo elevado, da ordem de US\$ 160 cada 0,2 kg (*blackmagic3d.com*).

As informações de propriedades mecânicas deste material ainda não estão disponíveis. Entretanto, o grafeno é considerado o material do futuro por ter aplicações diversas nas mais variadas áreas, como na nanoquímica, nanoengenharia e nanobiologia. acredita-se que este material será muito importante na indústria nos próximos anos (MARION, 2016).

#### 4.5.10. COMPARATIVO ENTRE MATERIAIS PARA IMPRESSÃO 3D FDM

Com a escolha da técnica FDM e o aprofundamento sobre materiais utilizados nesta técnica, há a necessidade de um comparativo entre os materiais apresentados para que seja possível identificar qual o melhor material para aplicação no desenvolvimento de DAH nesta pesquisa.

Os resultados apresentados na Tabela 4-10 refletem as características de cada material utilizando os resultados das folhas de dados conforme disponibilizado no capítulo anterior por cada fornecedor e utilizando os dados de testes realizados com as mesmas normas para um comparativo adequado.

**Tabela 4-10 - Comparativo de materiais**

<i>Teste</i>	<i>ABS</i>	<i>PLA</i>	<i>NYLO N</i>	<i>PVA</i>	<i>HDP E</i>	<i>PETG</i>	<i>TRITA N</i>	<i>FIBRA DE CARBON O + PLA</i>
<i>Módulo de tração (MPa)</i>	1681,5	2346,5	579,0	3860,0	900,0	2100,0	1560,0	4791,0
<i>Resistência a tração no limite (MPa)</i>	39,0	49,5	27,8	-	22,0	50,0	-	-
<i>Resistência a tração na ruptura (MPa)</i>	33,9	45,6	34,4	78,0	-	28,0	53,0	-
<i>Alongamento no limite (%)</i>	3,5	3,3	20,0	-	-	-	-	-
<i>Alongamento na ruptura (%)</i>	4,8	5,2	210,0	9,9	-	100,0	5,5	2,0
<i>Resistência à Flexão (MPa)</i>	70,5	103,0	24,0	-	-	68,0	64,0	114,0
<i>Módulo de flexão (MPa)</i>	2070,0	3150	463,5	-	-	2000,0	1560,0	6320,0
<i>Resistência ao impacto Izod, com entalhe (a 23°C) (kJ/m²)</i>	10,5	5,1	34,4	-	-	6,2	-	-
<i>Dureza</i>	76 (Shore D)	83 (Shore D)	74 (Shore D)	-	-	-	-	-

Fonte: adaptado de Ultimaker (2018a, 2018b, 2018c, 2018d), Lyndellbase (2018), Rigid.ink (2018), 3DFila (2018), 3DXTECH (2018)

Conforme é possível observar na Tabela 4-10 o material com valores mais elevados em relação a tração, módulo de flexão e resistência à flexão é a Fibra de

Carbono com PLA, quando comparado os demais materiais apresentados na tabela, porém não é possível comparar em outros aspectos relevantes para determinar as demais propriedades mecânicas dado a falta de informação do fabricante.

Esse comparativo serve como uma orientação para os usuários em impressão 3D FDM. Infelizmente, devido à falta de informação, a comparação entre os materiais teve de ser condensada apenas em traz tipos de materiais os quais os fabricantes que possuíam todas as informações relevantes para a escolha do material adequado a esta aplicação.

Deste modo, na Tabela 4-11 pode ser visto um comparativo, utilizando as mesmas características de impressão 3D FDM (mesmo equipamento, mesma qualidade, mesma ocupação interna e mesmos tamanhos do bico de extrusão) para os materiais ABS, PLA e Nylon para não ter variações foram utilizados materiais do mesmo fabricante, a Ultimaker (2018a, 2018b, 2018c).

**Tabela 4-11 – Comparativo das propriedades mecânicas dos materiais ABS, PLA e NYLON**

<i>Teste</i>	<i>ABS</i>	<i>PLA</i>	<i>NYLON</i>
<i>Módulo de tração (MPa)</i>	1681,5	2346,5	579
<i>Resistência a tração no limite (MPa)</i>	39	49,5	27,8
<i>Resistência a tração na ruptura (MPa)</i>	33,9	45,6	34,4
<i>Alongamento no limite (%)</i>	3,5	3,3	20
<i>Alongamento na ruptura (%)</i>	4,8	5,2	210
<i>Resistência à Flexão (MPa)</i>	70,5	103	24
<i>Módulo de flexão (MPa)</i>	2070	3150	463,5
<i>Resistência ao impacto Izod, com entalhe (a 23°C) (kJ/m<sup>2</sup>)</i>	10,5	5,1	34,4
<i>Dureza</i>	76 (Shore D)	83 (Shore D)	74 (Shore D)

Fonte: adaptado de Ultimaker (2018a, 2018b, 2018C)

É possível verificar a vantagem do PLA quando comparado com os outros tipos de materiais.

O módulo de tração, resistência a tração, resistência a tração no limite e módulo de flexão, são características relacionadas ao esforço necessário para que o

material suporte a ruptura. Conforme a Tabela 4-11 é possível verificar que o PLA apresenta valor superior quando comparado ao ABS e NYLON.

O nylon se mostra muito superior quando comparado aos outros materiais, relativo a resistência ao impacto, essa característica é importante considerando que o dispositivo desenvolvido será utilizado constantemente por crianças em diversas aplicações. Entretanto, sua característica higroscópica não é adequada para este tipo de aplicação.

Na Tabela 4-12, tem-se um comparativo em relação ao custo entre os três materiais apresentados na Tabela 4-11.

**Tabela 4-12 - Custo dos materiais ABS, PLA e NYLON**

<i>Material</i>	<i>ABS</i>	<i>PLA</i>	<i>NYLON</i>
<i>Custo</i>	Menor	Mediano	Maior

Deste modo pode-se verificar que o material com maior custo é o Nylon, seguido do PLA e ABS.

#### 4.5.11. MATERIAL UTILIZADO NO PROJETO

Após a análise das características mecânicas e das características de impressão, optou-se pela utilização do material PLA.

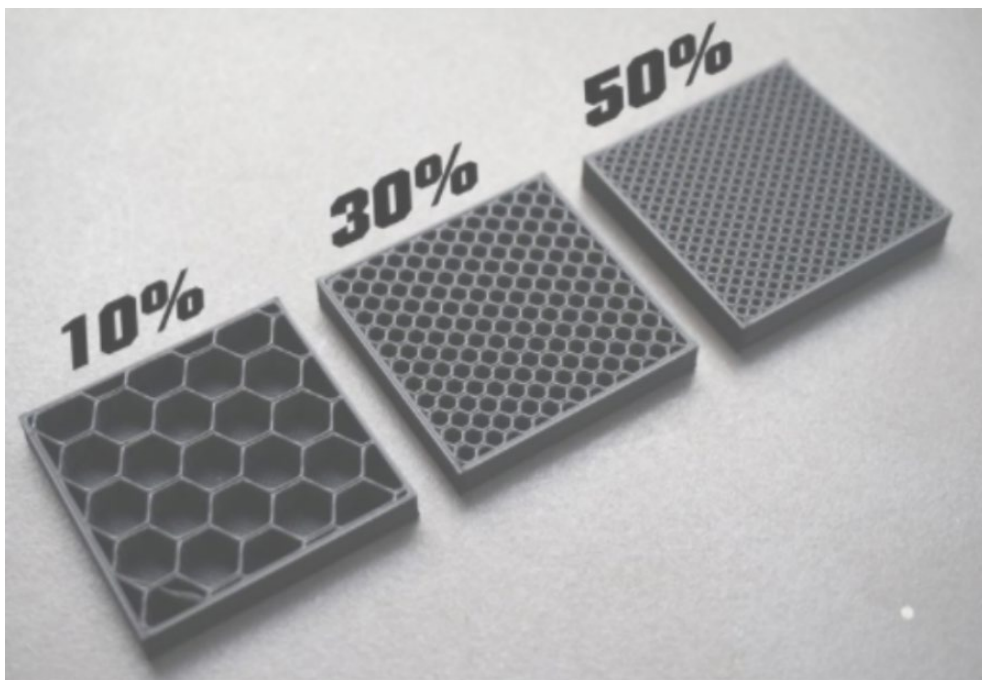
Este material apresenta uma fácil impressão 3D FDM, e suas propriedades mecânicas são muito boas quando comparadas aos demais materiais estudados, e também, por ser um material biodegradável com custo acessível.

Observa-se que apesar de existirem vários materiais disponíveis, infelizmente ainda não existe uma normalização das características de impressão 3D FDM permitindo ao usuário comparar os materiais conforme apresentado no capítulo anterior.

Na continuação desta pesquisa devem ser realizados testes em materiais de impressão 3D FDM para realizar comparativos completos para demais materiais como: PLA, ABS, PETG e TRITAN.

Dentre os principais testes mecânicos a serem realizados, tem-se: testes de Tração, Cisalhamento, Flexão, Compressão e Microdureza.

Nesta pesquisa durante a impressão das peças, identificou-se vários parâmetros que podem impactar na qualidade e no tempo de impressão 3D FDM, como a espessura de parede, o perímetro, o desenho de ocupação interna e a porcentagem de ocupação interna, como visto na Figura 4-9.



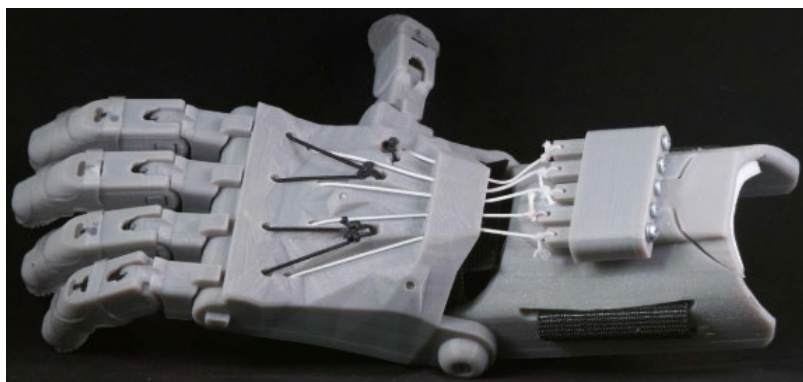
**Figura 4-9 - Ilustração da ocupação interna de objetos impressos em plástico com a técnica FDM – 10%, 30% e 50% de ocupação**  
Fonte: DEVIANTART (2018)



## 5. PESQUISA E APRIMORAMENTO DE UM DISPOSITIVO DE AUXÍLIO HUMANO

### 5.1. FOCO DA PESQUISA

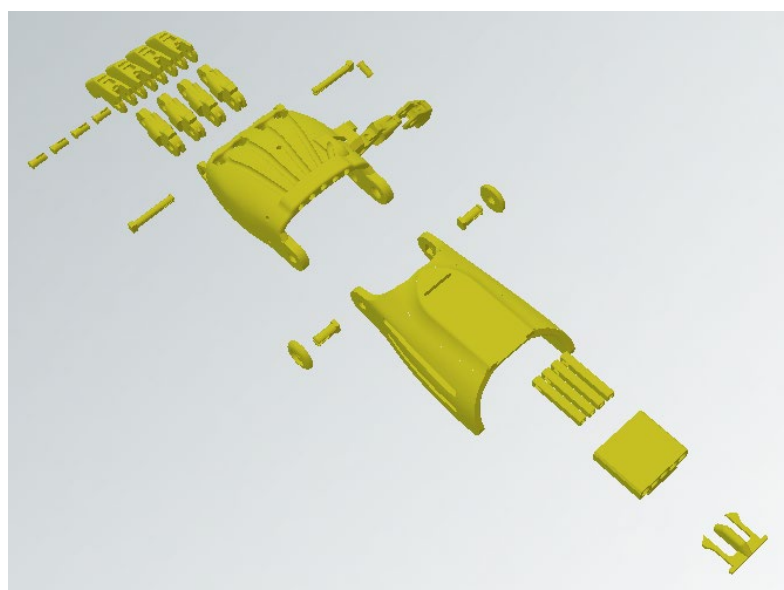
O desenvolvimento desta pesquisa iniciou-se com base em um projeto chamado *Raptor Reloaded*, cujo modelo possui código aberto para aperfeiçoamento (*Open Source*). Como pode ser visto na Figura 5-1, um dispositivo de auxílio humano completo.



**Figura 5-1 - Modelo Raptor Reloaded**

Fonte: E-NABLE (2018)

Na *E-Nable* ([enablingthefuture.org/upper-limb-prosthetics](http://enablingthefuture.org/upper-limb-prosthetics)) é possível ver o projeto completo e copiar o modelo para impressão ou remodelagem. Na Figura 5-2 pode ser visto o dispositivo atual em uma vista explodida.



**Figura 5-2 - Modelo 3D da Raptor Reloaded Vista explodida**

Fonte: Próprio autor

A pesquisa nesse modelo se concentra em uma revisão detalhada do projeto buscando melhorar o dispositivo para ficar mais fácil de montar e utilizar. Desta forma, os principais requisitos são:

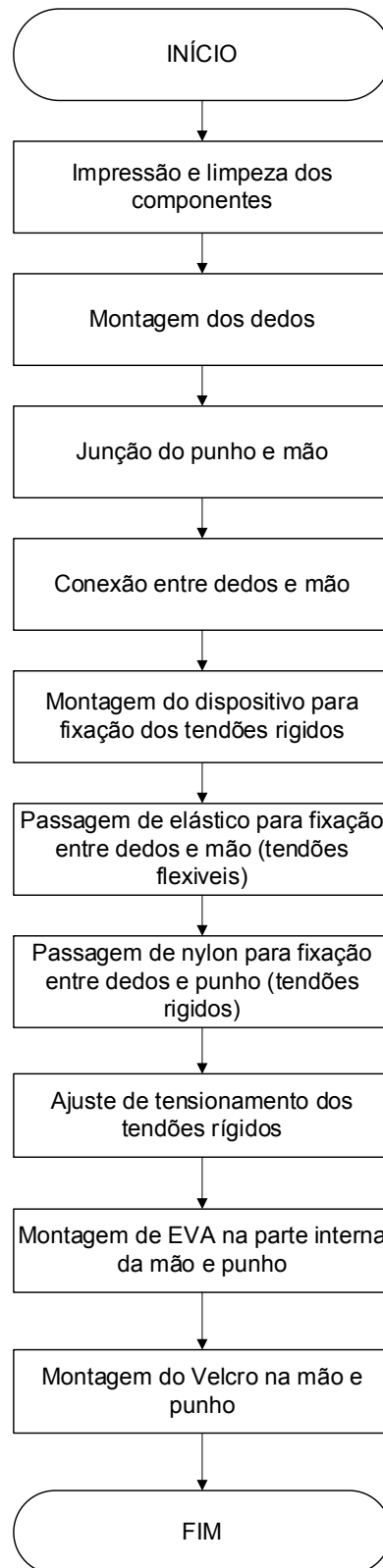
- *O dispositivo deve ter três posições do primeiro quirodáctilo, para realizar a “pega” de objetos.*
- *A movimentação isolada do segundo quirodáctilo.*
- *Acessibilidade por capacitância de toque (touch screen) permitindo o usuário utilizar os dispositivos com tecnologia capacitiva, tais como, celulares e outros equipamentos.*
- *A melhoria na montagem das juntas do segundo ao quinto quirodáctilo.*
- *O alívio de massa permitindo um dispositivo seja mais leve e rápido de imprimir, mas sem perde a rigidez mecânica.*
- *A alteração nos encaixes de movimentação do punho, de forma a permitir que sejam mais robustos durante o funcionamento por longos períodos.*

O projeto atual da RAPTOR (DAH) é composto por 30 partes impressas em 3D FDM para a construção completa do dispositivo. Este dispositivo é dividido em: dedos, palma e manopla.

A montagem atual segue o fluxograma sintético como pode ser visto na Figura 5-3.

A primeira parte investigada e estudada foi a palma da mão, pois é na palma da mão que será necessária a alteração da posição do polegar (primeiro quirodáctilo), essa alteração é importante para melhorar a utilização do dispositivo para que seja possível realizar a “pega” de objetos.

A forma como está atualmente projetado o DAH não permite ser possível pegar objetos de forma mais segura e correta, isso porque quando na posição fechada é necessário que o dedo polegar alcance o dedo indicador, algo que no dia a dia não é observado, mas no dispositivo tem um grande impacto, e atualmente o ângulo como está posicionado o polegar faz seu fechamento distante do indicador, não sendo possível realizar a pega corretamente.



**Figura 5-3 – Fluxograma sintético da montagem do dispositivo Raptor Reloaded original**  
Fonte: Próprio autor

Outros modelos que permitem a condição de “pega” mais segura e firme tem posições de indicador e polegar com ângulo de inclinação oposto ao do modelo *Raptor Reloaded*, isso para facilitar o alcance do polegar ao indicador, porém outros modelos ainda tem dificuldade para esse alcance, com isso a pesquisa busca o aperfeiçoamento da posição de “pega” alterando o ângulo, buscando como *benchmark* outros projetos que já possuem melhorias validadas, unindo as funções, mantendo a possibilidade do usuário trocar o ângulo do polegar de acordo com a necessidade dele.

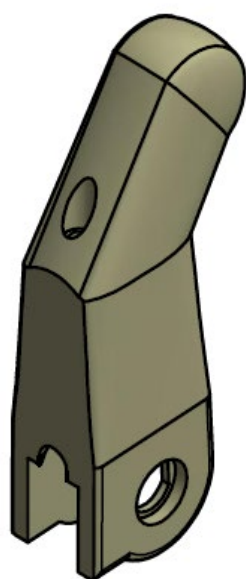
Outra alteração que permitirá a liberdade de escolha do usuário será a movimentação isolada do segundo quirodáctilo também conhecido como dedo indicador, permitindo o usuário a utilização de teclado ou outra função que necessidade de apenas um só dedo como a utilização por exemplo de *Smartphone* (celulares).

No qual a função da movimentação isolada do dedo indicador, quando combinado a acessibilidade por capacitância permite acessar dispositivos capacitivos (*touch screen*) ajudando na utilização também de outros equipamentos que necessitem de capacitância para acionar o teclado e a tela.

A melhoria da montagem das juntas e alteração nos encaixes de movimentação do punho permitiram ao voluntário uma maior praticidade na montagem do dispositivo e ao usuário uma maior facilidade caso necessária a manutenção do dispositivo ao longo da sua utilização.

## 5.2. DEDOS DO PROTÓTIPO DAH

Para a os dedos do protótipo de teste do DAH foi utilizada a junção de duas partes da anatomia da mão humana em uma só peça, a falange distal e falange média conforme Figura 2-1. A junção em um único componente pode ser visto na Figuras 5-4 e 5.5.



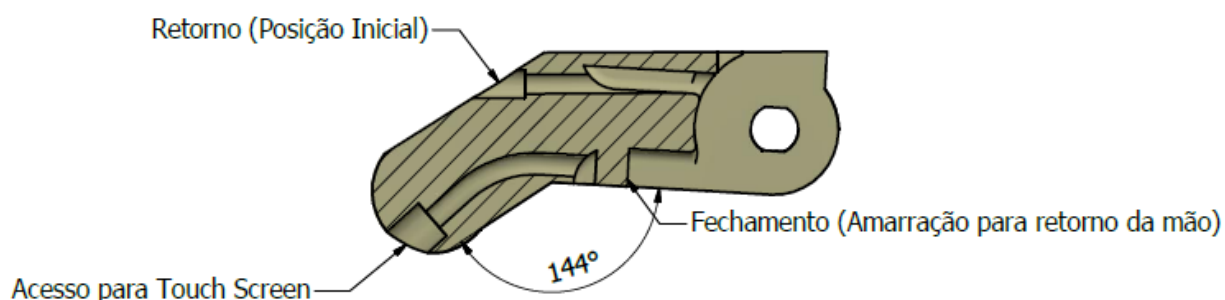
**Figura 5-4 – Falanges juntas do dedo do protótipo DAH**  
**Vista projetada posterior**  
Fonte: Próprio autor



**Figura 5-5 – Falanges juntas do dedo do protótipo DAH**  
**Vista projetada frontal**  
Fonte: Próprio autor

A “*amarração*” ou fixação dos tendões rígidos (não-elásticos) ficará na extremidade do dedo, os tendões rígidos são os responsáveis pelo fechamento dos dedos da mão, e os tendões elásticos são os responsáveis pela abertura automática dos dedos da mão (no caso de utilizar mão sempre aberta).

Na Figura 5-6 pode ser visto o corte para visualização dos locais nos quais são feitas fixações dos tendões elásticos (retorno da posição inicial, dedos abertos da mão), o local de fixação do tendão rígido (fechamento), e também, na ponta do dedo, é possível verificar o local para inserção do sistema capacitivo (*Touch Screen*).

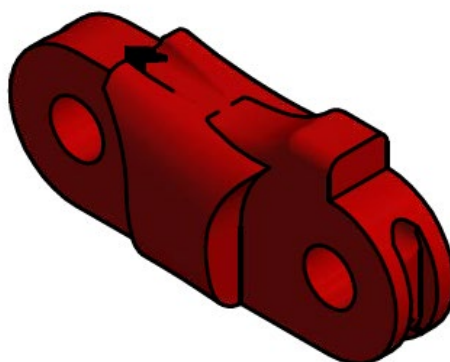


**Figura 5-6 – Falanges juntas do dedo do Protótipo DAH  
Vista em Corte**

Fonte: Próprio autor

Na Figura 5-6 pode ser visto o ângulo de 144° (cento e quarenta e quatro graus) utilizado realizar o movimento de pega mais adequado, ajudando na firmeza de segurar objetos.

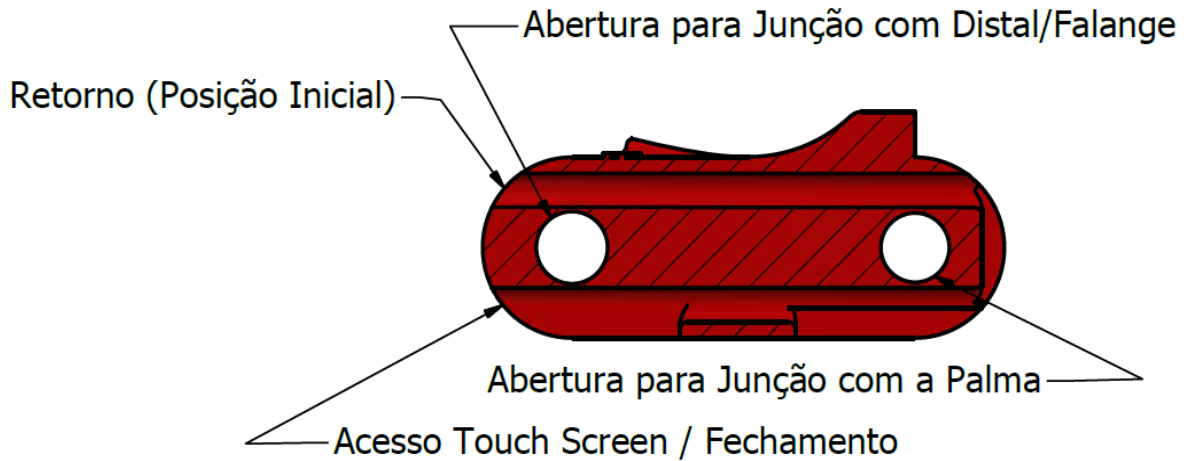
Em relação aos dedos, existe ainda a parte central que interliga o dedo a palma da mão, no qual foi utilizado para ser a falange proximal, conforme pode ser visto na Figura 5-7.



**Figura 5-7 – Falange proximal do dedo do protótipo DAH  
Vista projetada frontal**

Fonte: Próprio autor

Na Figura 5-8 pode ser visto em detalhes as aberturas de canais internos para as passagens dos tendões e sistema capacitivo de acionamento de equipamentos.

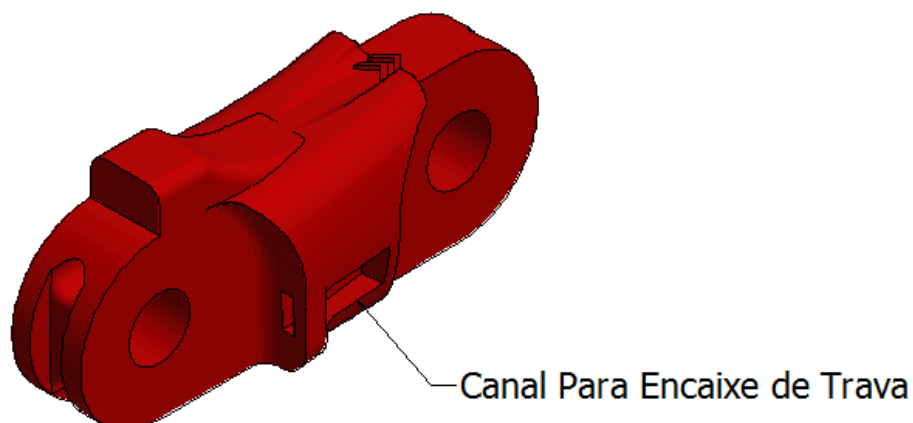


**Figura 5-8 – Falange proximal do dedo do protótipo DAH  
Vista em corte**

Fonte: Próprio autor

Para atender ao requisito da movimentação isolada do dedo indicador (segundo quirodáctilo), há a necessidade de uma trava que realizará contato com a palma para que os dedos não se mexam quando realizado o movimento de fechamento da mão.

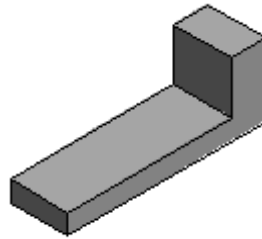
Na Figura 5-9 pode ser visto o canal para o encaixe da trava do dedo indicador.



**Figura 5-9 – Canal para encaixe de trava do dedo do protótipo DAH**

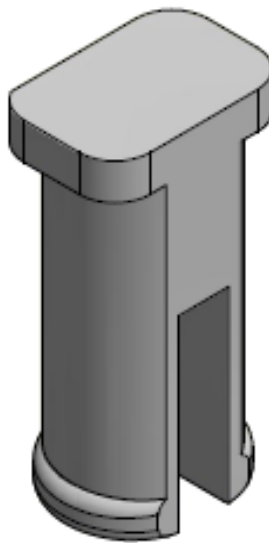
Fonte: Próprio autor

Como pode ser visto na Figura 5-10, a trava para encaixe no canal, note que a trava possui perfil em L permitindo o fácil manuseio para deslizamento e encaixe.



**Figura 5-10 – Trava de movimento do dedo indicador do protótipo**  
Fonte: Próprio autor

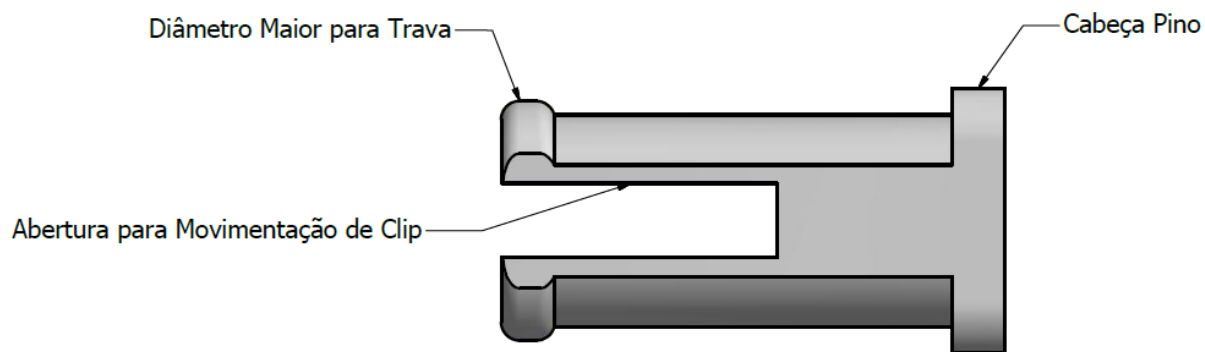
Para a ligação entre as partes do dedo foi utilizado com base os modelos de pinos existentes no projeto atual no qual foram realizadas pequenas alterações referentes aos raios e abertura do canal para melhorar o encaixe, como pode ser visto na Figura 5-11.



**Figura 5-11 – Pino para montagem dos dedos do protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor

Na Figura 5-12 pode ser visto o conceito do pino remodelado. Neste tem-se a cabeça do pino para trava com o diâmetro maior, fazendo com o que o pino não se desloque, além do corte na peça para realizar a movimentação de clip para facilitar a montagem.





**Figura 5-12 – Pino para montagem dos dedos do protótipo DAH**

Fonte: Próprio autor

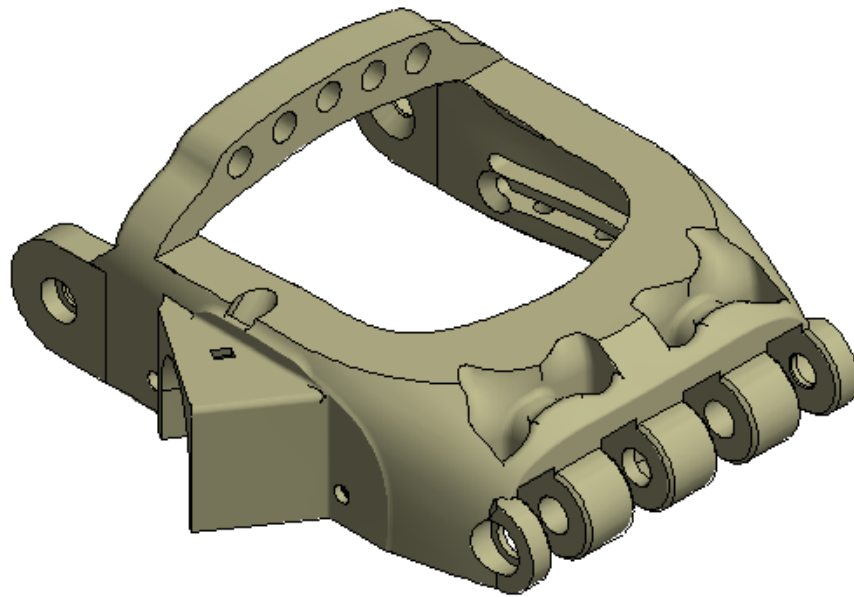
### 5.3. MÃO DO PROPÓTIPO DAH

Para o movimento de pega adequada, foi realizado um comparativo com outros dispositivos similares a este do protótipo do DAH.

O ângulo dos outros dispositivos que possuem posição de “pega” melhorada, possuem também um rebaixo a fim de melhorar a pega. Entretanto, neste dispositivo isso não é possível devido a necessidade de manter as duas posições neste modelo.

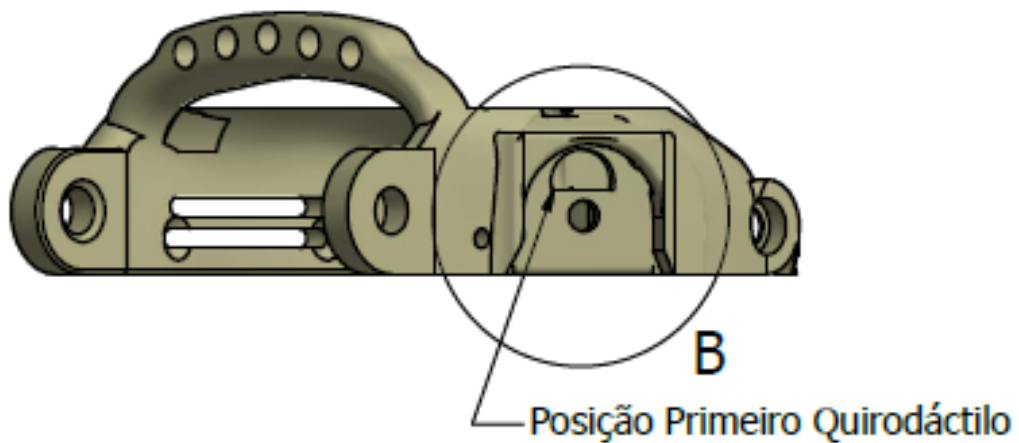
Assim sendo, após uma análise do dispositivo observou-se que para compensar o rebaixo para as posições de pega adequadas, o ângulo deveria ser próximo de  $124^{\circ}$  (cento e vinte e quatro graus) considerando a mesma linha de base.

Após essa análise, a primeira alteração realizada para a possibilidade das duas posições de “primária” com a de “pega”, obtendo um ângulo que seja possível alternar entre posições. Na Figura 5-13 pode ser visto como ficou o projeto alterado após estes testes.



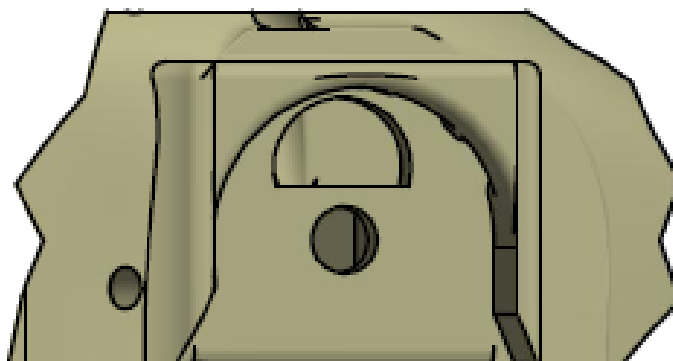
**Figura 5-13 – Mão modificada do protótipo DAH**  
**Vista isométrica**  
Fonte: Próprio autor

Na Figura 5-14 pode ser visto o local de encaixe do polegar (primeiro quirodáctilo), no qual foi desenhada uma abertura para o encaixe de uma nova peça que deverá realizar a rotação do dedo.



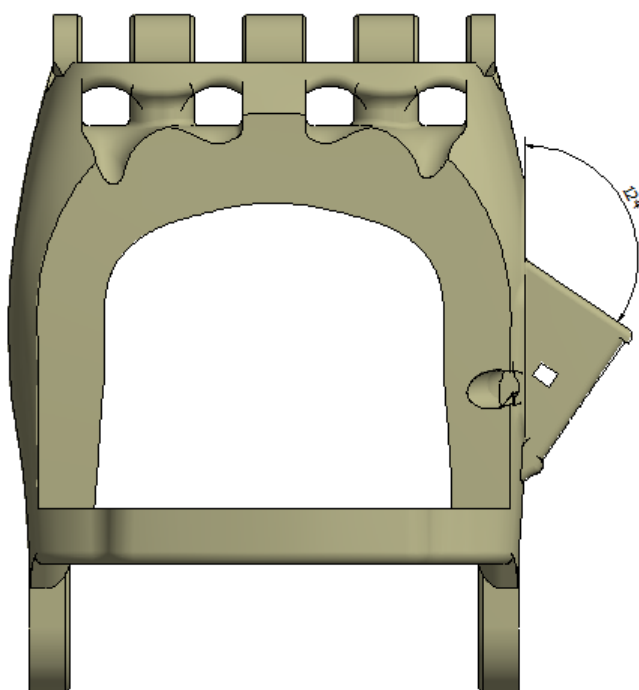
**Figura 5-14 – Vista da abertura para encaixe do componente de rotação**  
Fonte: Próprio autor

Na Figura 5-15 pode ser visto outra vista da abertura para o componente chamado de Componente de Rotação que poderá ser visto posteriormente, responsável pela rotação do polegar.



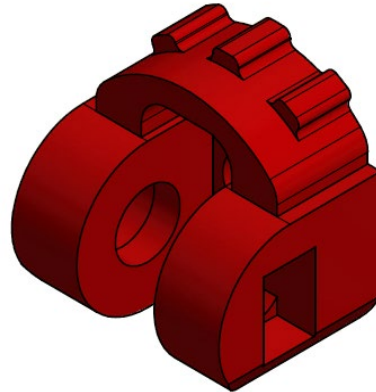
**Figura 5-15 – Abertura para movimentação polegar do Protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor

Na Figura 5-16 pode ser visto o ângulo final do protótipo com as modificações necessárias e o ângulo correto para exercer melhor a função de segurar objetos.



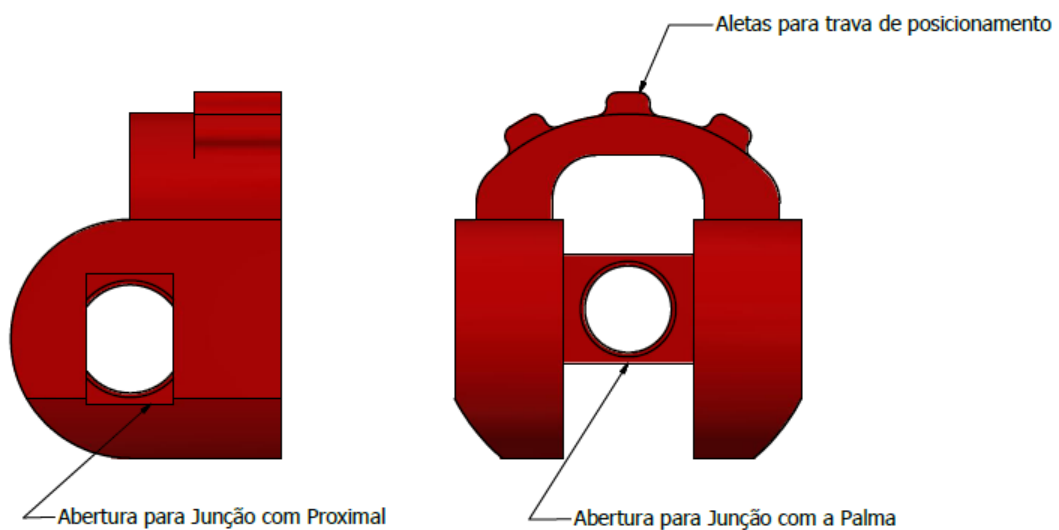
**Figura 5-16 – Mão do protótipo DAH**  
**Vista Superior**  
Fonte: Próprio autor

Na Figura 5-17 pode ser visto o componente de rotação que será responsável pela rotação do polegar variando entre 60° a 120°.



**Figura 5-17 – Componente de rotação do polegar do protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor

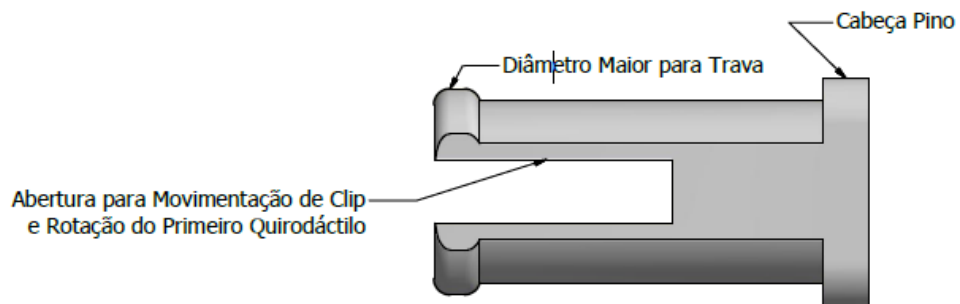
Na Figura 5-18 podem ser vistos os detalhes da peça tais como, as aletas de posicionamento que tem interface para travar a posição do polegar.



**Figura 5-18 - Componente de rotação do protótipo DAH**  
**Vista frontal e lateral**  
Fonte: Próprio autor

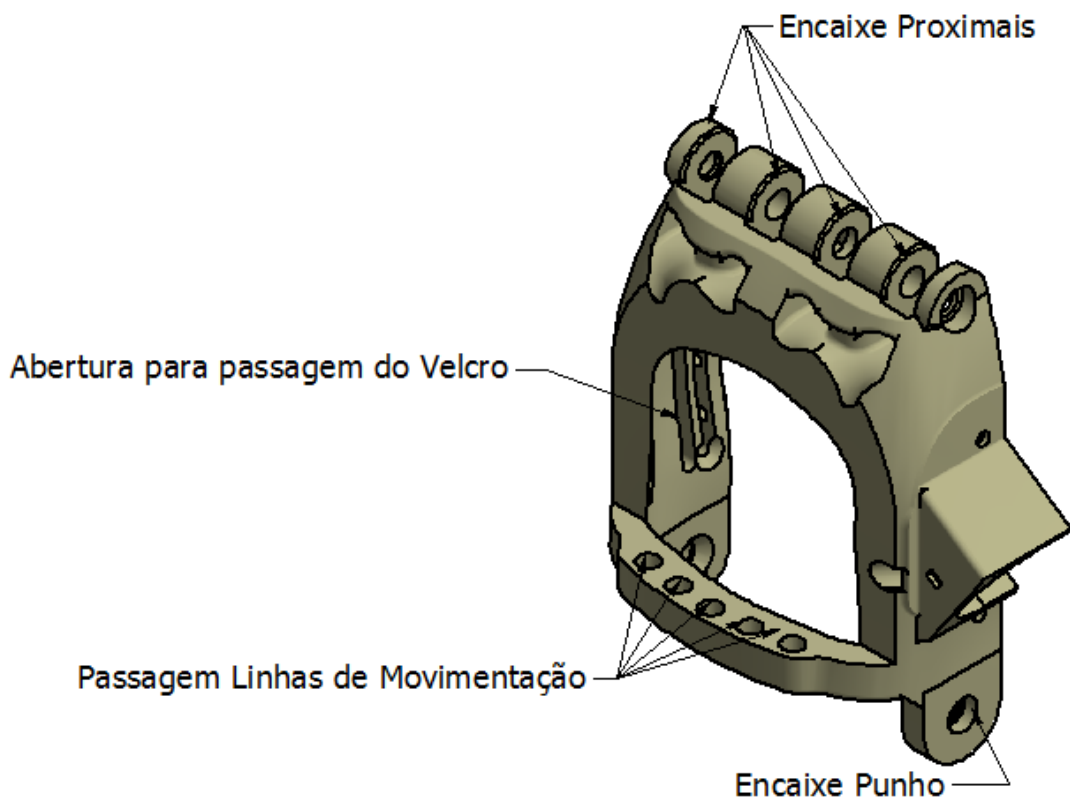
Na Figura 5-19 pode ser visto o pino de encaixe e seu detalhamento, esse pino faz interface entre o componente de rotação e a palma da mão, esta peça é

responsável pela fixação, assim como, os demais pinos demonstrados nas seções anteriores.



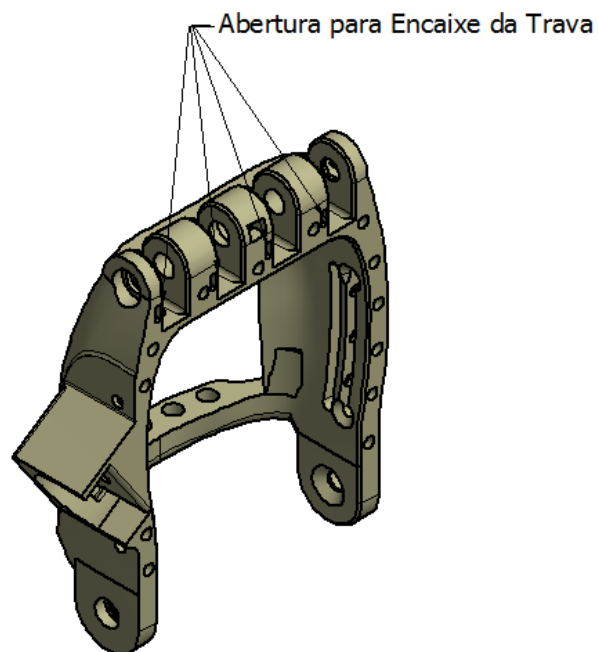
**Figura 5-19 - Pino de encaixe do componente de rotação do polegar no protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor

Na Figura 5-20 tem-se uma visão geral dos encaixes dos dedos, passagem dos tendões, e também, a abertura para passagem para inserir a fita de velcro de fixação do DAH a mão do usuário.



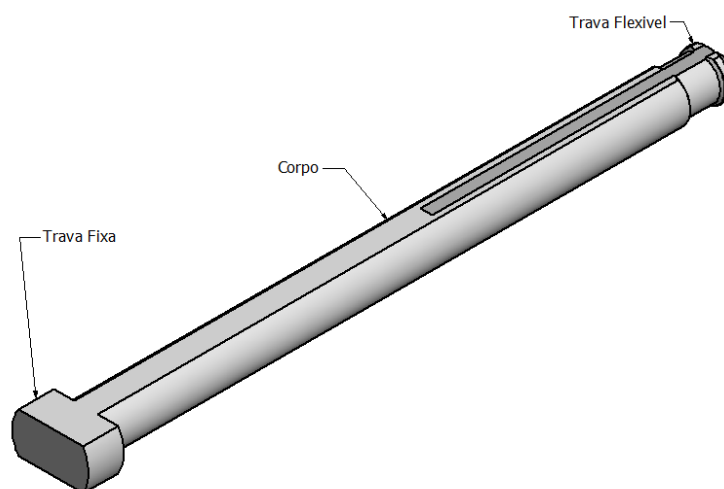
**Figura 5-20 - Mão modificada do protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor

A Figura 5-21 pode ser visto a abertura para o encaixe da interface com a trava do proximal visto na Figura 5-9.



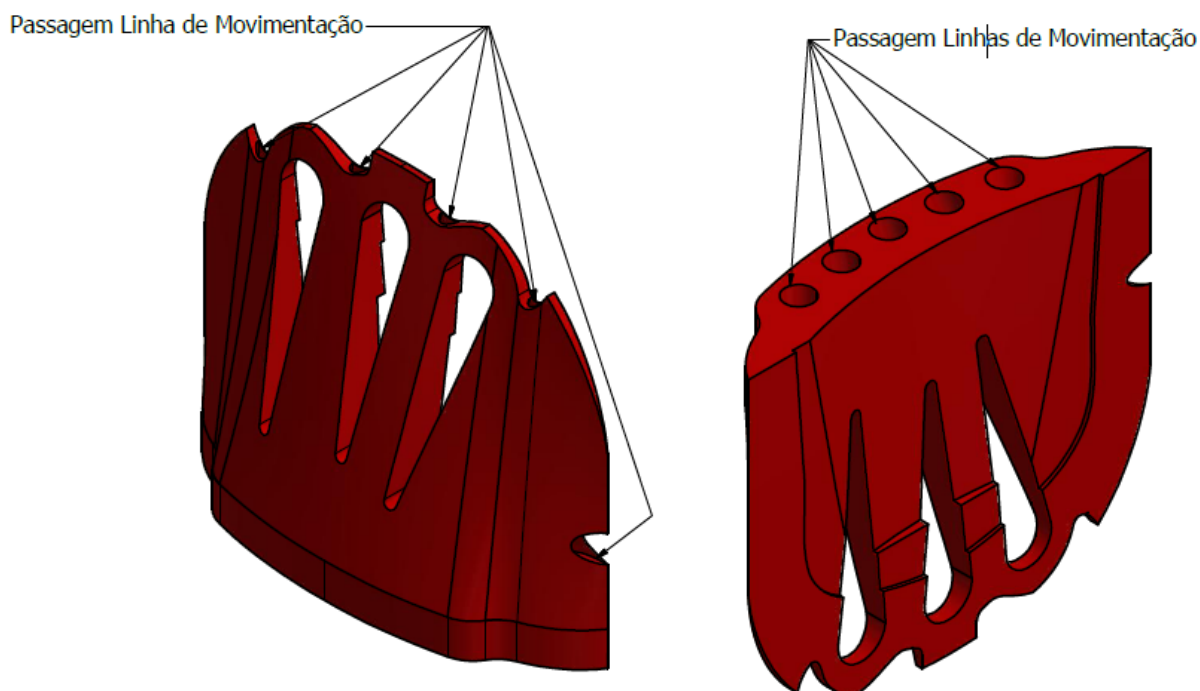
**Figura 5-21 - Abertura para encaixe das travas dos dedos do protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor

Para a junção entre a mão e os dedos foi utilizada a junção conforme a Figura 5-22 no qual os pinos possibilitam a rotação dos dedos, permitindo encaixe fácil na montagem e na manutenção.



**Figura 5-22 - Pino de junção mão e dedos do protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor

Para um DAH mais leve, o dorso da mão tem um modelo diferente, com acessos para passagem de ar. Foi desenvolvida para ser mais leve do que o modelo original. Na Figura 5-23 pode ser visto as aberturas para a passagem das linhas de movimentação.



**Figura 5-23 - Dorso da mão com abertura para passagem das linhas de movimentação protótipo DAH**

Fonte: Próprio autor

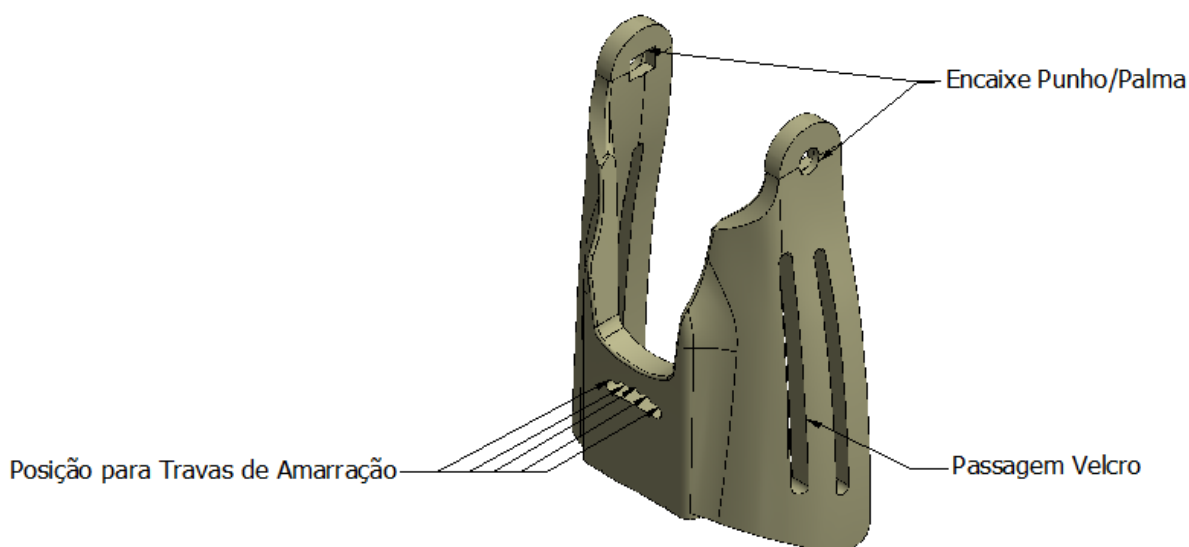
#### 5.4. MANOPLA DO PROTÓTIPO DAH

A manopla é a parte que fixa o dispositivo ao antebraço do usuário, no qual ficaram posicionados também os fixadores dos tendões rígidos (não-elásticos) utilizados para realizar a movimentação de fechamento dos dedos, quando houver a flexão do punho, esses tendões devem fazer a movimentação dos dedos para o fechamento da mão.

Outra revisão realizada na manopla foi a redução de peso, visando o conforto e a redução de componentes do dispositivo.

No modelo anterior havia necessidade de uma combinação de componentes para a montagem dos fixadores dos tendões, no qual foram acoplados em uma só peça, melhorando a velocidade de impressão e a montagem.

Na Figura 5-24 pode ser visto o novo modelo da manopla.

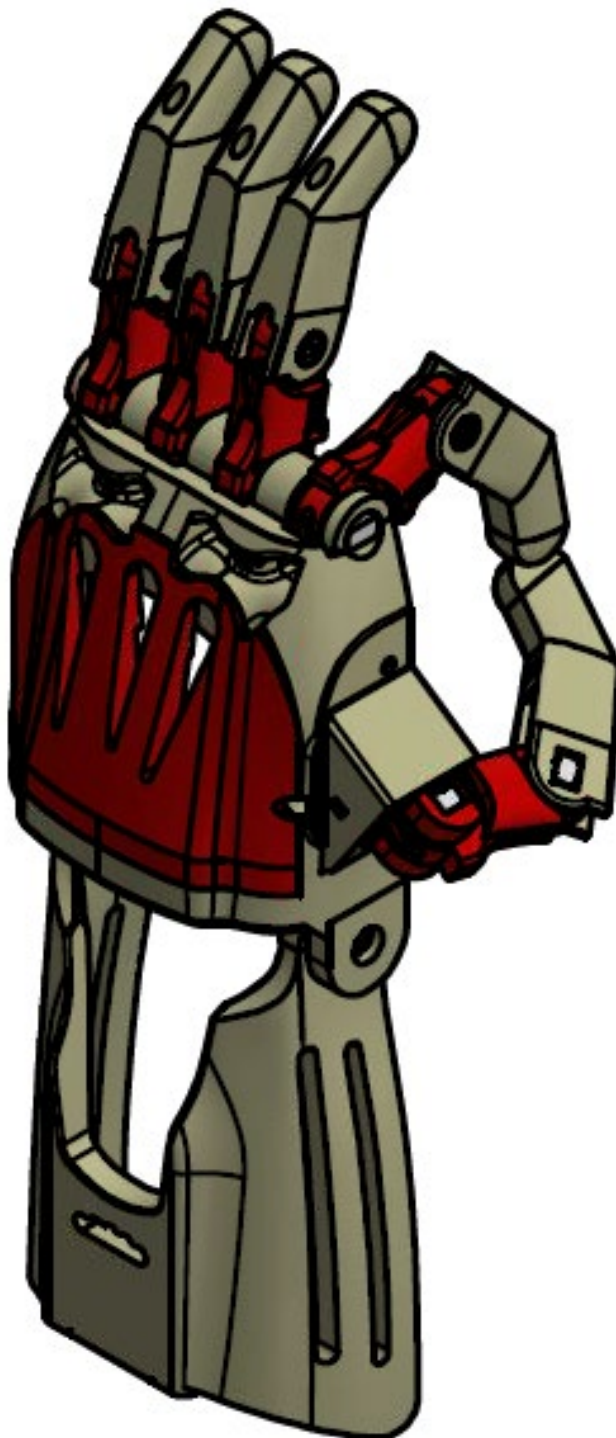


**Figura 5-24 - Manopla do protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor



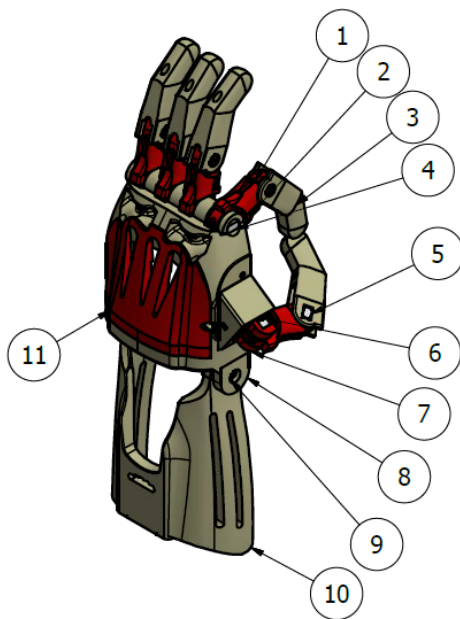
## 5.5. VISÃO GERAL DO PROTÓTIPO DAH

Na Figura 5-25 pode ser visto a ilustração do projeto do dispositivo completamente montado.



**Figura 5-25 - Ilustração completa do protótipo DAH montado**  
Fonte: Próprio autor

Na Figura 5-26 a lista com todas as peças impressas necessárias para a montagem completa do DAH.



LISTA DE PEÇAS		
ITEM	QTDE	DESCRIÇÃO
3	5	Dedo
1	5	Proximal
4	1	Junção Proximal / Palma
2	1	Trava Proximal
5	5	Pino Proximal / Distal
6	1	Pino Proximal
7	1	Componente de Rotação
8	1	Palma Inferior
9	2	Trava Palma
10	1	Pulso
11	1	Palma Superior

**Figura 5-26 - Lista de peças do protótipo DAH**

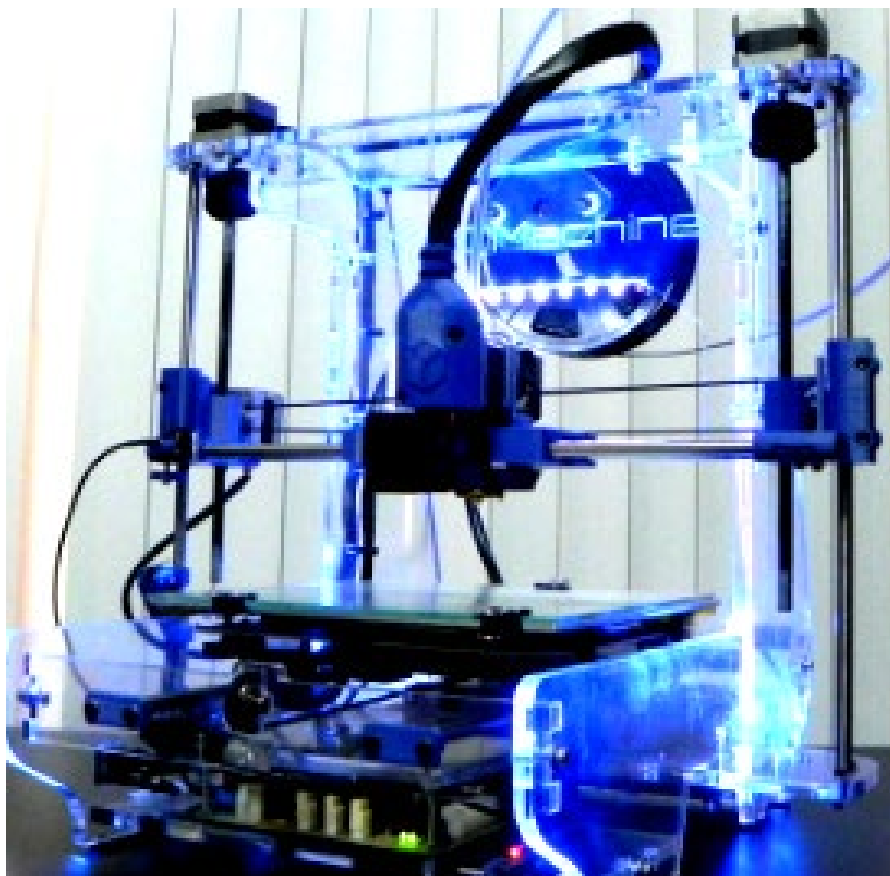
Fonte: Próprio autor

## 6. MODELO DA IMPRESSORA 3D E OS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D FDM DO PROTÓTIPO DAH

O modelo de impressora 3D FDM utilizado, foi a Prusa Air 2 da 3D Machine, cuja características do modelo segundo o seu fabricante são:

- **Estrutura:** Acrílico de 8 mm de espessura;
- **Dimensões:** Largura 465 mm x Profundidade 430 mm x Altura 420 mm;
- **Fonte de Alimentação:** Largura 200 mm x Profundidade 200 mm x Altura 130 mm;
- **Extrusão:** Modelo AJGW. Hotend modelo J-HEAD MK-II com bico de 0,4 mm;
- **Correias e Polias:** MXL com polias deslizantes em metal;
- **Eletrônica de Controle:** RepRap GEN7BR;
- **Drivers:** POLOLU;
- **Mesa:** Plataforma em alumínio com 80 W, aquecimento até 130° C;
- **Duto de Ventilação:** Orbital;
- **Motores de Passo:** 4 motores com 2,65 N de torque para eixos XYZ e 1 motor com 4,2 N de torque para o extrusor;
- **Programa:** Repetier Host;
- **Formato de impressão:** STL ou OBJ;
- **Velocidade de impressão:** 40 a 80 mm/s;
- **Precisão nos eixos XY:** 0,01 mm;
- **Precisão no eixo Z:** 0,003 mm;
- **Espessura da camada:** 0,1 mm;
- **Consumo de energia:** 150 W/h.

Como pode ser visto na Figura 6-1, a foto da impressora 3D FDM utilizada na pesquisa.



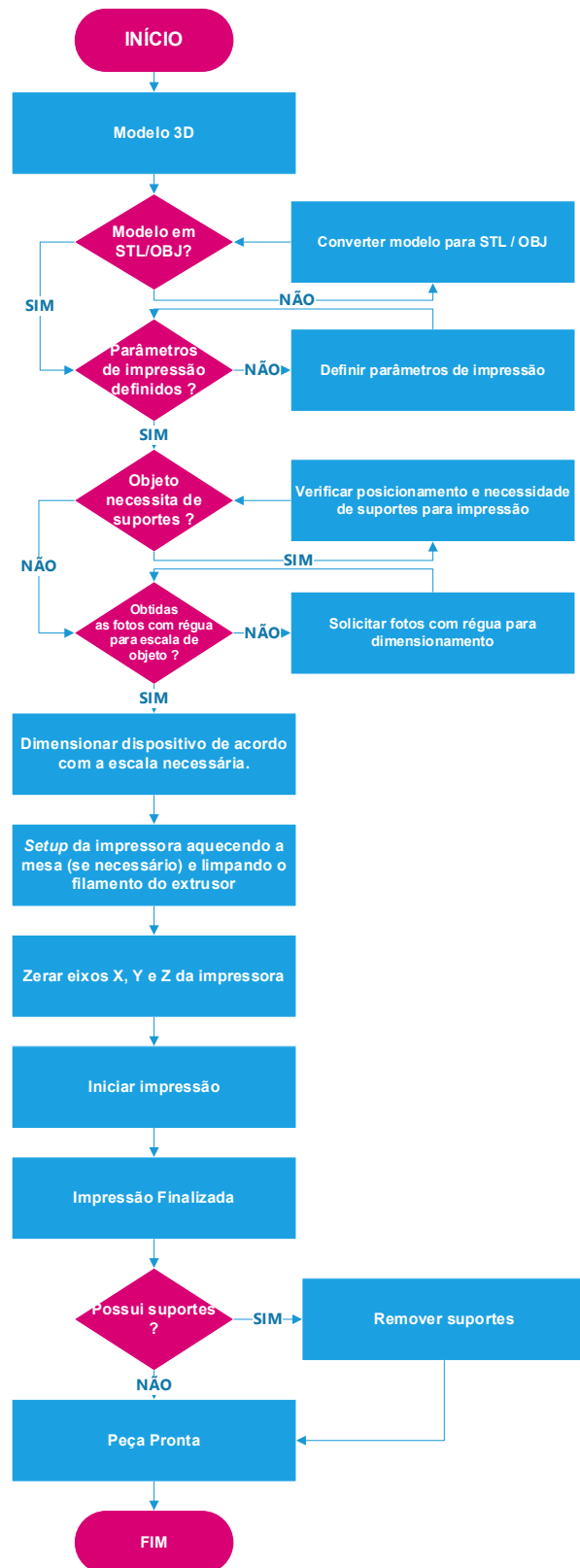
**Figura 6-1 - Impressora 3dFDM Prusa Air 2 modelo utilizado nesta pesquisa**  
Fonte: 3D Machine (2018)

O modelo *Prusa Air 2* não exige requisito mínimo para utilização conforme especificado pelo fabricante 3D Machine (2018), entretanto, o programa que é utilizado nele, o *Repetier Host* ([repetier.com](http://repetier.com)) requer o sistema operacional do computador de Windows XP ou maior.

O computador utilizado foi um Intel® Core™ i5-3230M CPU @ 2,60 GHz, 64 bits, 6GB RAM com sistema operacional Windows 8.1.

Tão importante quando a escolha do material e do projeto, são os parâmetros de impressão 3D FDM.

Na Figura 6-2 pode ser visto o fluxograma sintético do processo detalhado de impressão 3D FDM do DAH utilizado nesta pesquisa.



**Figura 6-2 – Fluxograma sintético para realizar uma impressão 3D FDM do DAH**  
 Fonte: Próprio autor

Diversos defeitos podem ocorrer neste momento, por isso é necessário evitar desperdícios de tempo, material e custos.

A escolha dos parâmetros de impressão 3D FDM deve considerar a tecnologia, material escolhido, modelo de impressora 3D, especificação do tipo de equipamento e, também, o programa de cálculo dimensional responsável pela separação das camadas das peças, comumente chamado de fatiador3D.

As tecnologias de impressão 3D FDM normalmente necessitam de um formato específico de arquivo que pode ser tanto STL (*Standard Triangle Language*) que é um formato de arquivos de computador para armazenar figuras geométricas tridimensionais em formato de triângulos, enquanto que o formato OBJ (*Object*) que é um formato de arquivos de computador para armazenar malhas poligonais tridimensionais. Com esses arquivos, nesses formatos específicos é possível imprimir em 3D um arquivo para se tornar uma peça física.

Nesta pesquisa foi utilizado o programa Inventor® 2016 da fabricante Autodesk (AUTODESK, 2016) para o desenvolvimento dos modelos que posteriormente foram convertidos para o formato STL.

Para realizar a impressão 3D há a necessidade do programa fatiador. Esse programa converte o arquivo digital modelado em três dimensões em um arquivo digital camada por camada, ou seja, faz com que as peças sejam divididas em camadas, além de gerar um “caminho” para a impressão nos eixos X e Y de cada camada, cujo deslocamento em Z será a espessura dessa camada.

O programa utilizado nesta pesquisa foi o CURA® 1.5 disponível gratuitamente no site da fabricante de impressoras 3D FDM Ultimaker, ([ultimaker.com/en/products/ultimaker-cura-software/list](http://ultimaker.com/en/products/ultimaker-cura-software/list)) esse programa contém diversas opções de impressão 3D, tais como: altura de camada, espessura de parede do objeto, suportes, entre outros.

O programa CURA exige um sistema operacional mínimo Windows Vista de 64 bit e um sistema Intel® Core™ 2 e 4GB RAM.

Na Figura 6-3 podem ser vistos os parâmetros utilizados para a impressão das peças.

### Quality

---

Layer height (mm)	<input type="text" value="0.2"/>
Shell thickness (mm)	<input type="text" value="0.8"/>
Enable retraction	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="button" value="..."/>

### Fill

---

Bottom/Top thickness (mm)	<input type="text" value="2"/>
Fill Density (%)	<input type="text" value="20"/> <input type="button" value="..."/>

### Speed and Temperature

---

Print speed (mm/s)	<input type="text" value="50"/>
Printing temperature (C)	<input type="text" value="180"/>
Bed temperature (C)	<input type="text" value="70"/>

### Support

---

Support type	<input type="text" value="Touching buildplate"/> <input type="button" value="..."/>
Platform adhesion type	<input type="text" value="Raft"/> <input type="button" value="..."/>

### Filament

---

Diameter (mm)	<input type="text" value="1.75"/>
Flow (%)	<input type="text" value="100"/>

### Machine

---

Nozzle size (mm)	<input type="text" value="0.4"/>
------------------	----------------------------------

**Figura 6-3 - Parâmetros de configuração utilizada na impressão 3D FDM**  
Fonte: Próprio autor

Conforme os parâmetros apresentados na Figura 6-1, foram utilizados nos parâmetros:

- **LayerHeight** 0,2 mm, que representa a altura de cada camada de impressão 3D.
- **Shell Thickness** de 0,8 mm, que representa a espessura da parede da peça a ser impressa.
- **Bottom/Top Thickness** de 2,0 mm, que representa a espessura na parte inferior e superior da peça.
- **FillDensity** de 20%, que é a porcentagem de ocupação interna (quantidade de plástico utilizada para compor o interior da peça).
- **Print Speed** de 50 mm/s, que é a velocidade de impressão da cabeça de extrusão.
- **PrintingTemperature** de 180° C, que representa a temperatura do bico extrusor.
- **BedTemperature** de 70° C, que é a temperatura da mesa de impressão.
- **SupportType** que são os modelos de suportes disponíveis no programa para todos os lugares ou somente nos locais em que o objeto está em contato com a mesa de impressão, neste caso, foram utilizados ambos os tipos.
- **Platform AdhesionType** foi utilizado o *Raft* que é um modelo que faz uma pré-camada antes da impressão real para que não ocorra o desprendimento da peça em impressão da mesa de impressão antes do final da construção.
- As demais configurações são características do modelo da impressora 3D, **Diameter** de 1,75 mm que é o diâmetro do filamento plástico, **Flow** de 100% que é a vazão de plástico e **Nozzle** de 0,4 mm que é diâmetro do bico extrusor da impressora 3D FDM.



## 7. PROTÓTIPO FÍSICO DO DAH PARA TESTES

Após término do projeto do DAH, iniciou-se o processo de impressão 3D FDM no qual as primeiras peças impressas foram os dedos.

Na Figura 7-1 podem ser vistos as falanges impressas em material PLA. Essas peças foram facilmente impressas e não ocorreram problemas como empenamento, quebra de suporte ou deslocamento durante o processo de impressão.



**Figura 7-1 - Impressão dos dedos do protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor

Na Figura 7-2 podem ser vistas as falanges proximais acoplada a outra parte que forma o dedo completo para o teste de montagem, incluindo o pino de encaixe/trava em branco.



**Figura 7-2 - Dedo do protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor

Na Figura 7-3 podem ser vistas as impressões dos pinos de encaixe de todas as partes dos dedos.



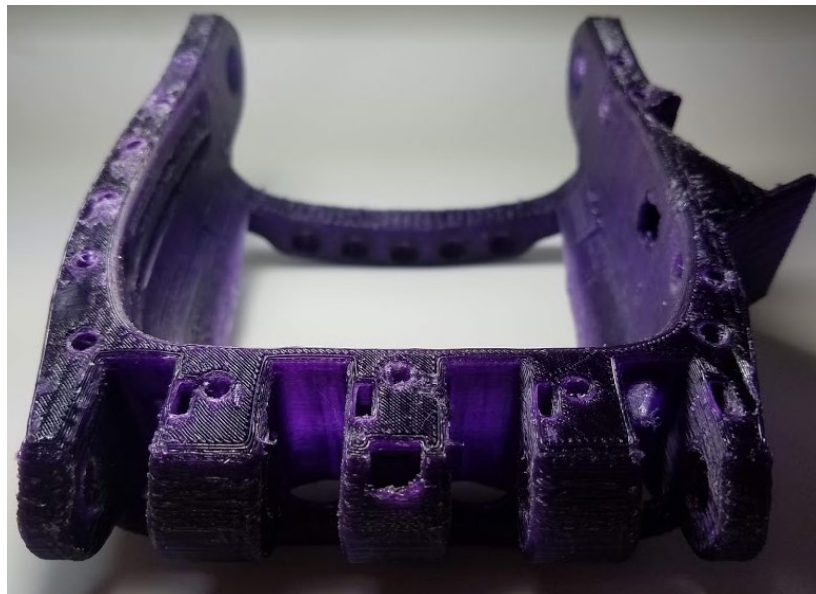
**Figura 7-3 - Pinos e travas dos dedos do protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor

Na Figura 7-4 pode ser visto a impressão de parte da mão do protótipo DAH.



**Figura 7-4 – Mão do protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor

Como pode ser visto na Figura 7-5, a parte inferior da mão.



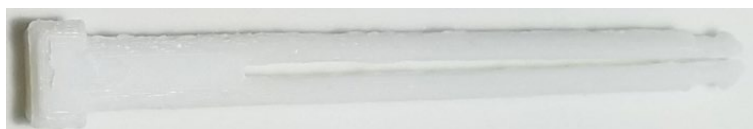
**Figura 7-5 – Palma do Protótipo DAH Vista Inferior**  
Fonte: Próprio autor

Como pode ser visto na Figura 7-6, a impressão do pino de trava da palma e o componente de rotação do polegar.



**Figura 7-6 - Componente de rotação do polegar do protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor

Na Figura 7-7 pode ser visto o pino de junção para entre mão e dedos em destaque na figura.



**Figura 7-7 - Pino de junção entre mão e dedos**  
Fonte: Próprio autor

Como pode ser visto na Figura 7-8, o dorso da mão na cor azul, mas posteriormente foi novamente fabricado na cor branca com o mesmo material PLA.

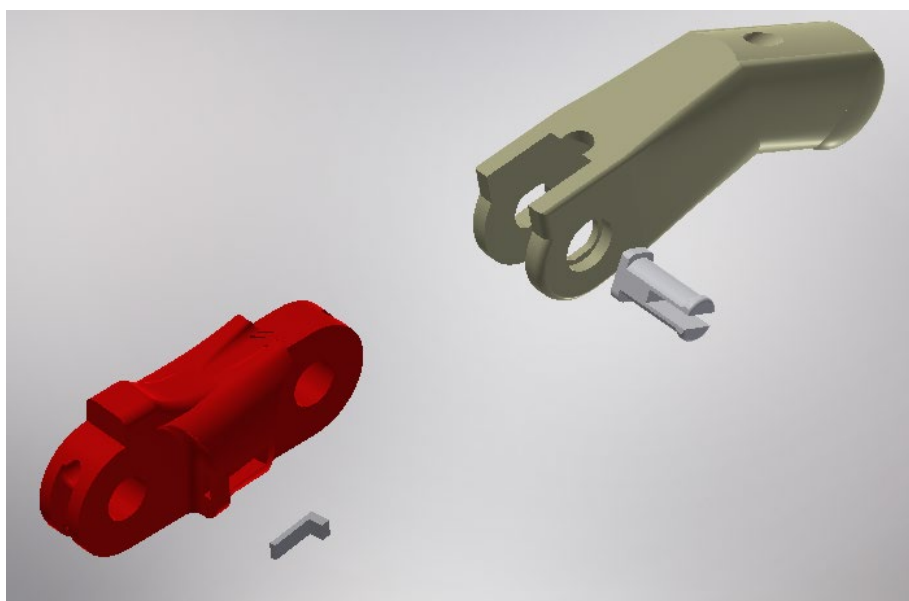


**Figura 7-8 - Dorso da mão do protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor

## 8. MONTAGEM DO PROTÓTIPO FÍSICO DO DAH

A montagem do protótipo inicia-se sempre pela montagem sequencial de cada dedo sendo composto pela falange média e distal (cor bege) com a falange proximal (cor vermelha).

Na Figura 8-1 é apresentada a montagem dos dedos.



**Figura 8-1 - Ilustração de montagem do dedo do protótipo DAH**

Fonte: Próprio autor

Na Figura 8-2 pode ser visto o dedo montado.



**Figura 8-2 - Montagem do dedo do Protótipo DAH**

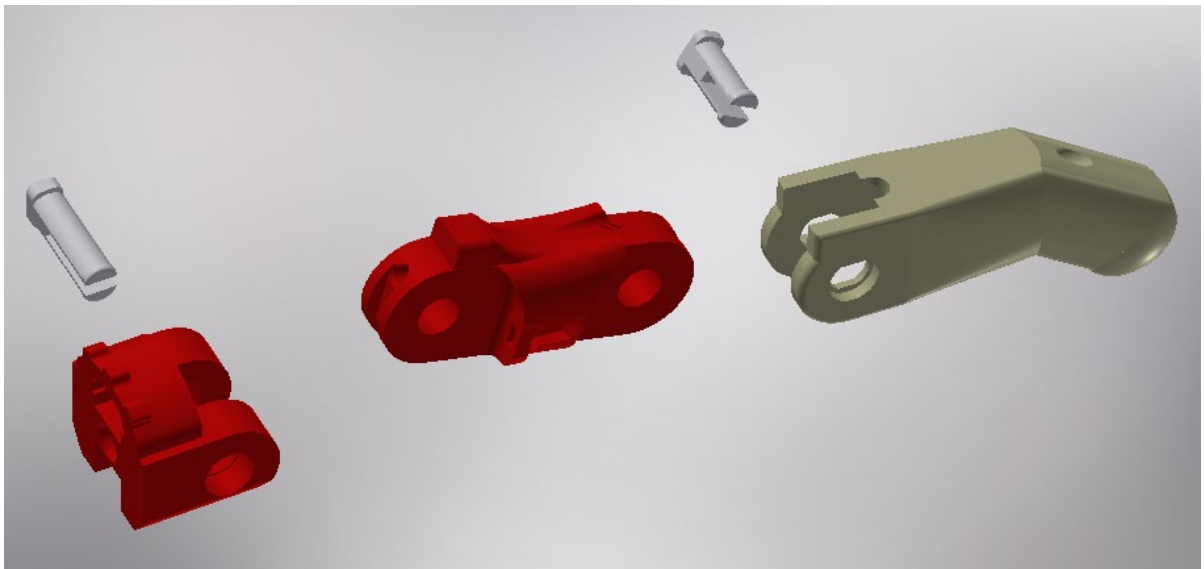
Fonte: Próprio autor

Na Figura 8-3 pode ser visto o dedo montado em posição.



**Figura 8-3 - Montagem do dedo do protótipo DAH – Vista Frontal**  
Fonte: Próprio autor

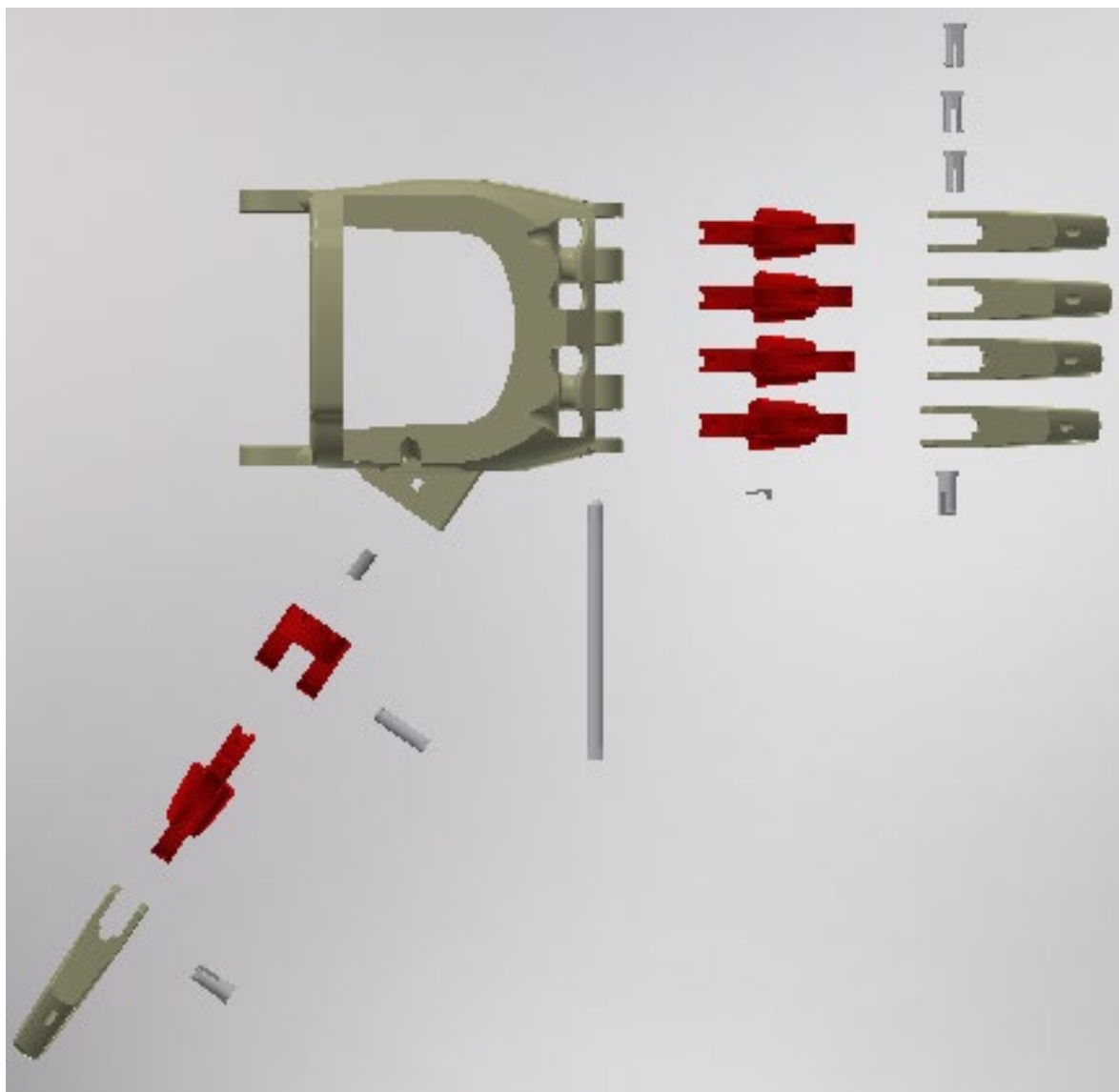
Depois de montados os dedos é possível partir para a montagem do componente de rotação (cor vermelha a esquerda) junto ao dedo, conforme pode ser visto na Figura 8-4.



**Figura 8-4 - Montagem do componente de rotação do protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor

Depois de montado todo o dedo do polegar com o componente de rotação, é possível anexar a mão utilizando o pino de rotação, assim como todos os demais dedos.

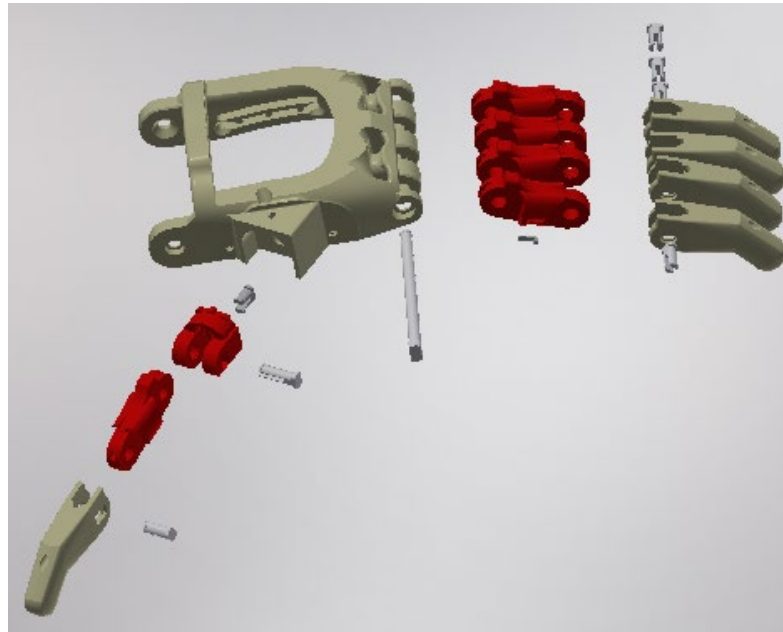
Na Figura 8-5 pode ser visto a ilustração da montagem de forma geral do protótipo do DAH.



**Figura 8-5 - Montagem geral da mão do protótipo DAH  
Vista explodida**

Fonte: Próprio autor

Na Figura 8-6 pode ser visto a ilustração da montagem de forma geral do protótipo do DAH em outra vista.



**Figura 8-6 - Montagem geral da mão do protótipo DAH - Vista em Perspectiva**  
Fonte: Próprio autor

Na Figura 8-7 pode ser visto os dedos unidos com a mão do DAH.



**Figura 8-7 - Montagem da mão do protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor



Na Figura 8-8 pode ser visto a montagem do componente de rotação e o dedo unidos com a mão.



**Figura 8-8 - Montagem da mão do protótipo DAH  
Detalhe do componente de rotação do polegar**  
Fonte: Próprio autor

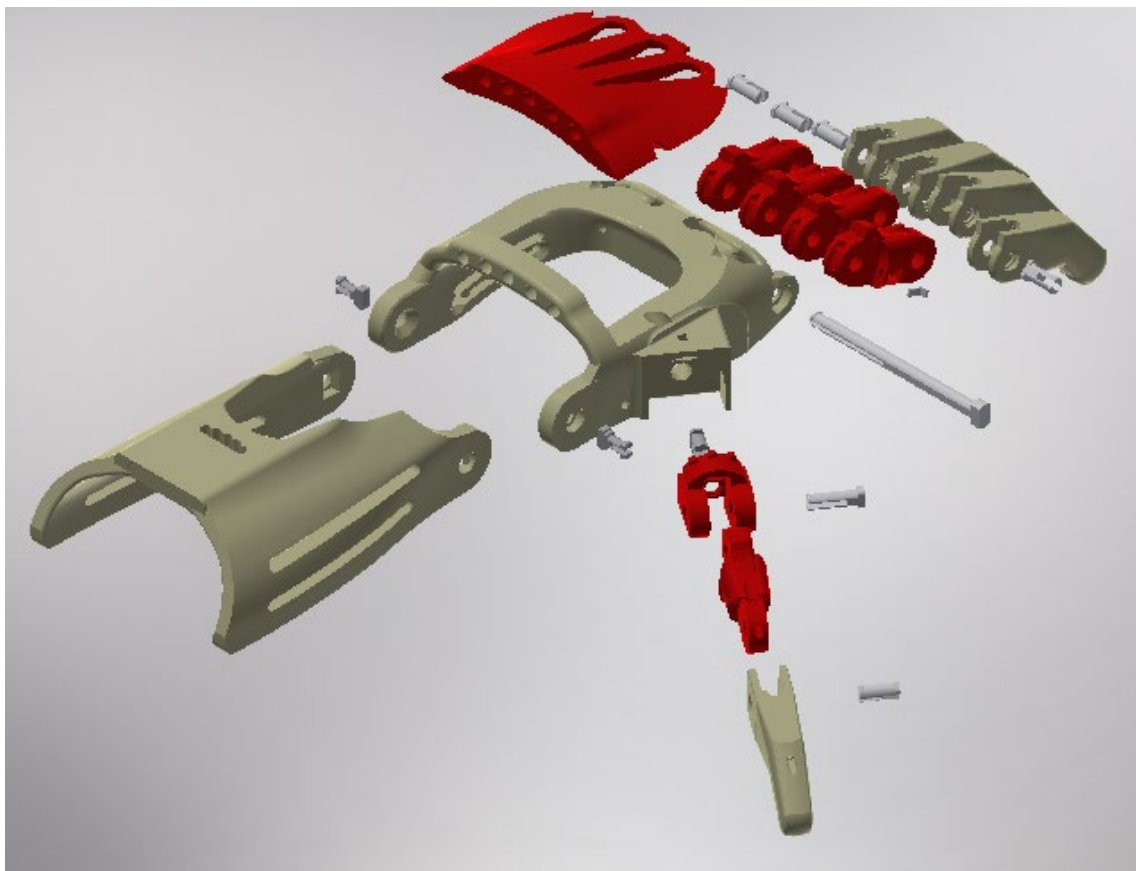
A finalização da mão é realizada com a montagem do dorso da mão, onde é unida utilizando cola instantânea (cianoacrilato). O plástico PLA adere e se funde com a cola tornando-se um tipo de solda no plástico.

Na Figura 8-9 pode ser visto a mão montada com todas as suas partes.

Para finalizar as montagens dos componentes impressos em 3D deve-se realizar a junção entre a manopla e a mão conforme pode ser visto na Figura 8-10.



**Figura 8-9 – Mão completa do protótipo DAH**  
**Dorso cor branca e Palma cor azul**  
Fonte: Próprio autor



**Figura 8-10 – Montagem completa do protótipo DAH - vista explodida**  
Fonte: Próprio autor

Com a finalização da montagem das partes impressas em 3D da Palma junto a Manopla, é possível dar o início a montagem dos tendões que são a parte de movimentação do DAH, colocando os tendões rígidos de movimentação de fechamento da mão com nylon.

Na Figura 8-11 pode ser visto a seta com o ponto de amarração e a passagem por dentro da parte proximal do dedo. O processo se repete para todos os dedos do DAH. Após a passagem da linha de nylon pela parte do dedo proximal o nylon segue para o outro lado conforme indica a seta inferior na Figura 8-12.



**Figura 8-11 – Linhas de amarração do protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor



**Figura 8-12 – Fixação dos tendões rígidos do protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor

Após a amarração e fixação dos tendões rígidos deve seguir pelo dorso da mão como pode ser visto na seta da Figura 8-13.



**Figura 8-13 – Passagem do fio de nylon para fixação do tendão rígido no protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor

Na Figura 8-14 pode ser visto na fixação do nylon na manopla para a conclusão do tendão rígido.



**Figura 8-14 – Fixação dos tendões rígidos na Manopla do protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor

Para concluir a fixação dos tendões rígidos é necessário a instalação dos tendões elásticos que automaticamente devido a tração do elástico, mantém os dedos da mão na posição aberta. Para facilitar a fixação do tendão elástico em cada dedo, utilizou-se o componente branco no mesmo material PLA, destacado pela seta vermelha conforme pode ser visto na Figura 8-15.



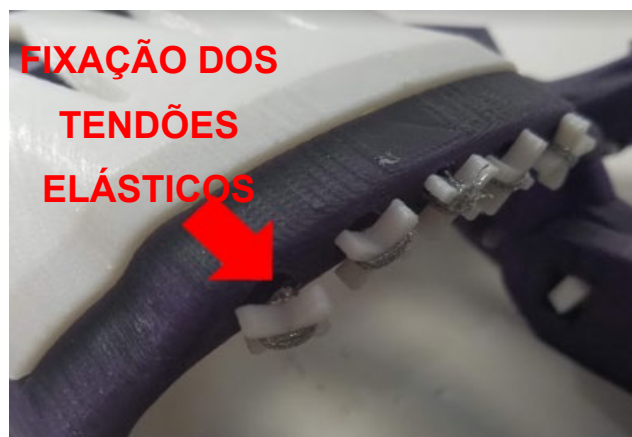
**Figura 8-15 – Fixação dos tendões flexíveis (elásticos) do protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor

Na Figura 8-16 são indicados os pontos de passagem do tendão elástico.



**Figura 8-16 – Passagem dos tendões flexíveis (elásticos) do protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor

Para permitir uma melhor fixação dos tendões elásticos, foram impressas peças em formato de “X” (seta na figura) conforme pode ser visto na Figura 8-17, a necessidade deste componente só foi observada após a montagem do protótipo.



**Figura 8-17 – Local de fixação dos tendões elásticos do protótipo DAH**

Fonte: Próprio autor

Para o encaixe do DAH no usuário é utilizada uma fita de velcro na mão e na manopla para melhor conforto do usuário e, também, pois o velcro permite o ajuste necessário para cada pessoa.

Na Figura 8-18 é indicada pelas setas em vermelho os pontos de fixação.



**Figura 8-18 Fixação dos pinos de fixação do protótipo DAH**

Fonte: Próprio autor

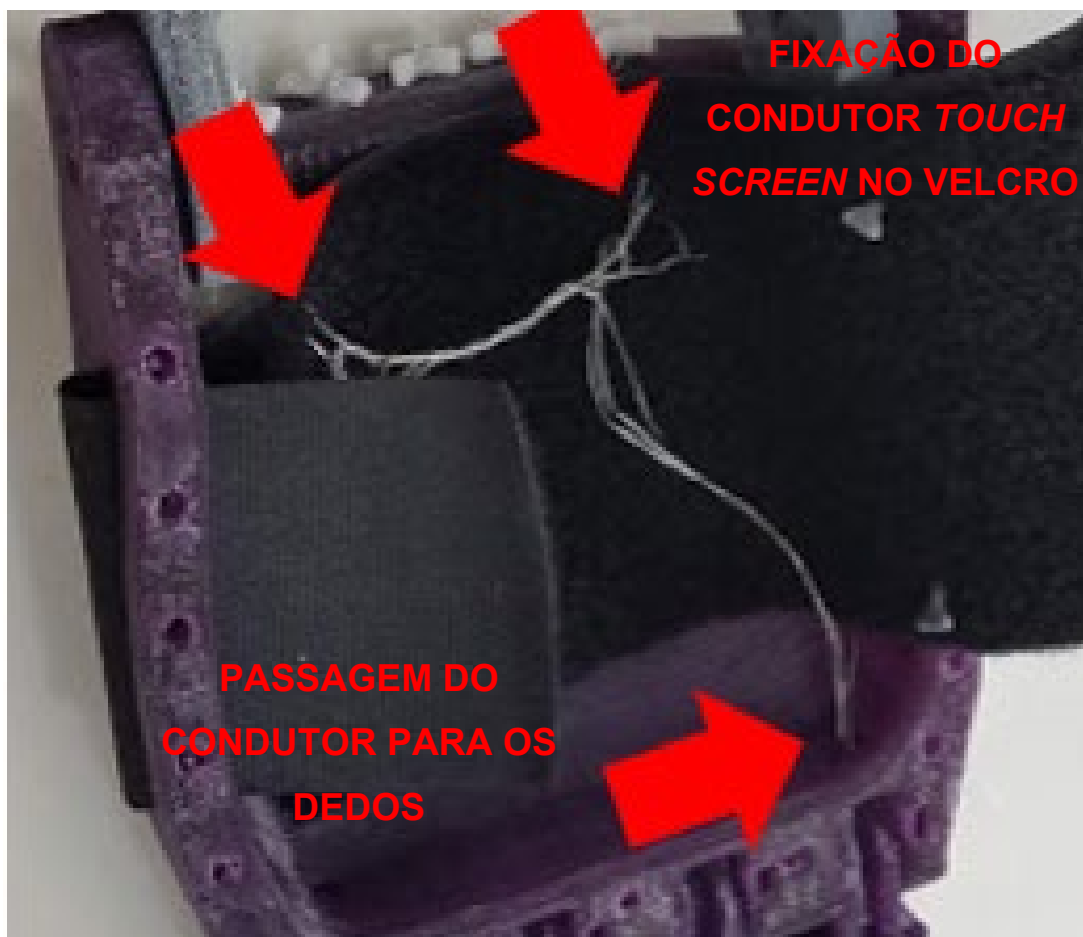
Na Figura 8-19 é indicada pelas setas em vermelho as passagem do velcro.



**Figura 8-19** Passagem da fita de velcro no protótipo DAH

Fonte: Próprio autor

Para o funcionamento do componente capacitivo (*Touch Screen*) na Figura 8-20 pode ser visto a passagem das linhas condutivas junto a fita velcro para se obter o contato entre a mão do usuário e a linha condutiva capacitiva.



**Figura 8-20** Fixação do condutor capacitivo do protótipo DAH  
Fonte: Próprio autor

Essa linha deve possuir capacidade de condução elétrica capacitiva, para que permita o funcionamento desta função, a passagem do condutor pelo dedo indicador deve alcançar as pontas dos dedos, no qual foi adicionado uma esponja condutiva para melhorar o manuseio suave.

A Figura 8-21 podem ser vistos as passagens do condutor e a ponta do dedo.





## 9. DIMENSIONAMENTO DO PROTÓTIPO FÍSICO DO DAH

Para o dimensionamento da peça em relação a mão existem algumas opções, o método mais utilizado e simples é através de fotografias e uma ferramenta de medição *open source* do programa Tracker disponível no site Rawgit ([rawgit.com/hzeller/augenmass/master/augenmass.html](http://rawgit.com/hzeller/augenmass/master/augenmass.html)).

Baseado no guia de Joe Cross ([enablingthefuture.org/resources-2/e-nable-device-sizing/](http://enablingthefuture.org/resources-2/e-nable-device-sizing/)), primeiramente são necessários uma câmera, caneta e régua ou fita métrica.

Marque com a caneta em ambos os punhos e, também, na parte maior do antebraço conforme pode ser visto na Figura 9-1. Para que a fotografia e o programa de computador possam obter medidas corretas, é necessário obter três posições diferentes, os braços devem estar sobre uma superfície plana e com a régua ou fita métrica entre eles que irão servir como referência no programa como meio de medição.

Na Figura 9-1 pode ser visto a primeira posição.



**Figura 9-1 - Dimensionamento posição 1**  
Fonte: Próprio autor

Na Figura 9-2 pode ser visto a segundo posição.



**Figura 9-2 - Dimensionamento posição 2**  
Fonte: Próprio autor

Na Figura 9-3 pode ser visto a terceira posição.



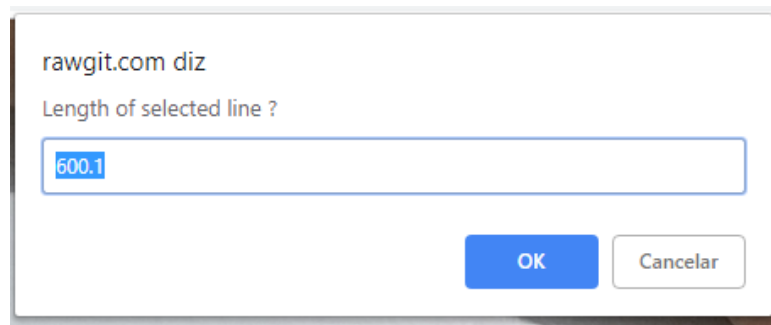
**Figura 9-3 - Dimensionamento posição 3**  
Fonte: Próprio autor

Com as fotografias é possível utilizar o programa de computador Tracker, o qual irá permitir a calibração da medida através da régua posicionada anteriormente na foto, ou seja, por isso a necessidade da régua junto à foto, como pode ser visto na Figura 9-4.



**Figura 9-4 - Dimensionamento do DAH personalizado para cada usuário utilizando o site Rawgit (Programa Tracker)**

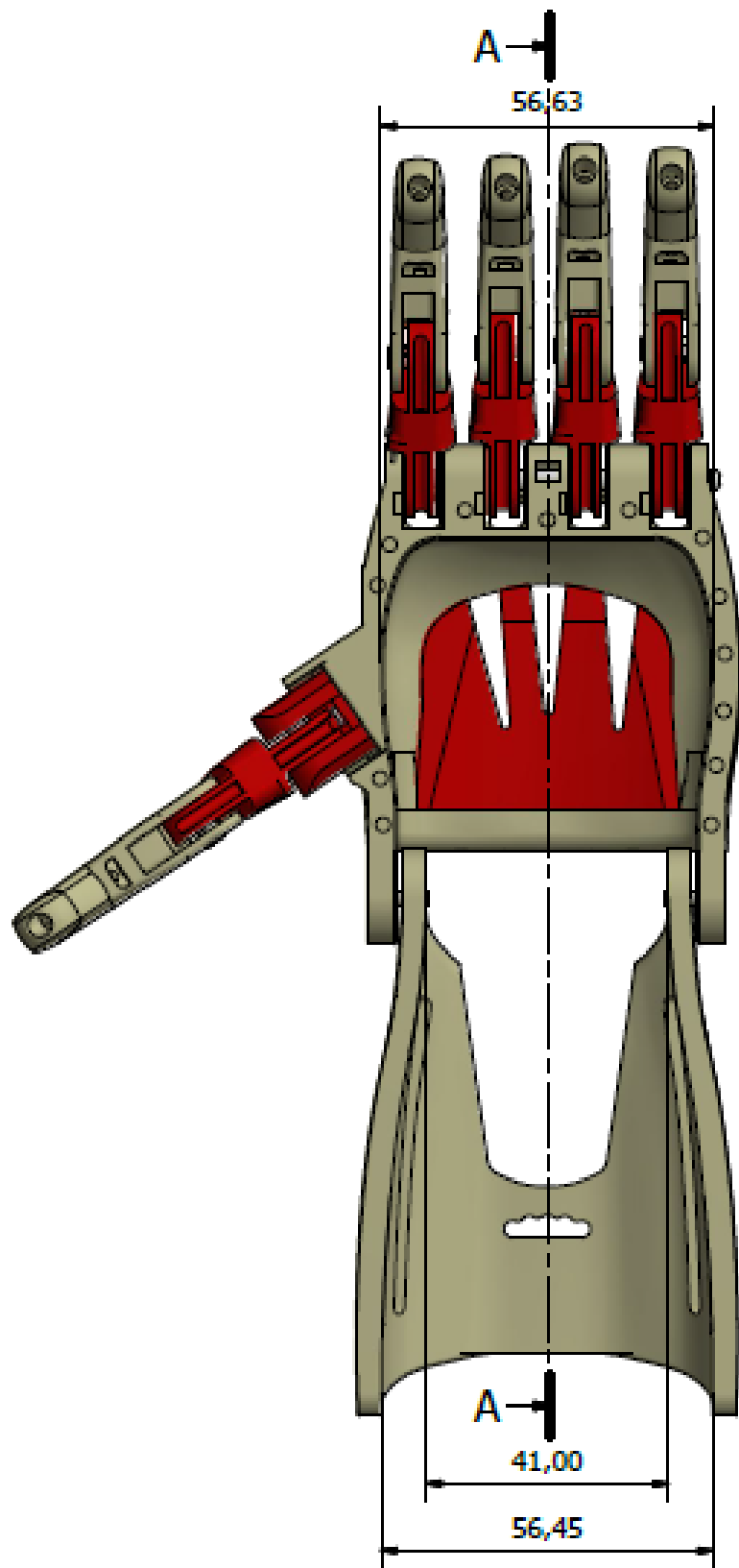
Fonte: Próprio autor



**Figura 9-5 - Editando Dimensão do DAH**

Fonte: Próprio autor

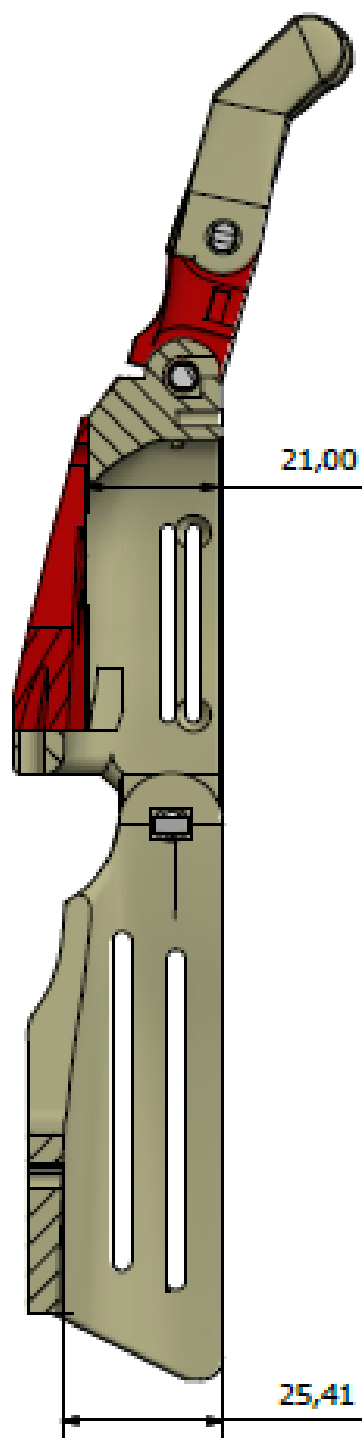
Concluído as medições via programa Tracker, é necessário entrar no modelo de impressão e ajustar as medidas da escala. Nas Figuras 9-5 e 9-6 contém as dimensões para a escala 1:1 de referência.



**Figura 9-6 - Vista Inferior DAH com Dimensões**  
Fonte: Próprio autor

Na Figura 9-7 pode ser visto outra vista com as dimensões em escala 1:1.

A-A ( 1 : 1 )



**Figura 9-7 - Corte lateral do DAH com dimensões**  
Fonte: Próprio autor

## 10. RESULTADOS DOS TESTES FÍSICOS DO DAH

Na Figura 10-1 pode ser visto o dispositivo montado.



**Figura 10-1 - Dispositivo completamente montado do protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor

## 10.1. FUNCIONAMENTO MECÂNICO DO PROTÓTIPO DAH

Para a verificação do funcionamento são apresentados os resultados de funcionamento conforme informado anteriormente no capítulo 5.

Na Figura 10-2 pode ser visto a movimentação dos dedos conforme o movimento de flexão do punho.



**Figura 10-2 - Movimento da mão do protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor



Na Figura 10-3 pode ser visto a posição de pega.



**Figura 10-3 - Posição de Pega do Protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor

Na Figura 10-4 pode ser visto a posição de “pega” do dispositivo segundo um objeto.



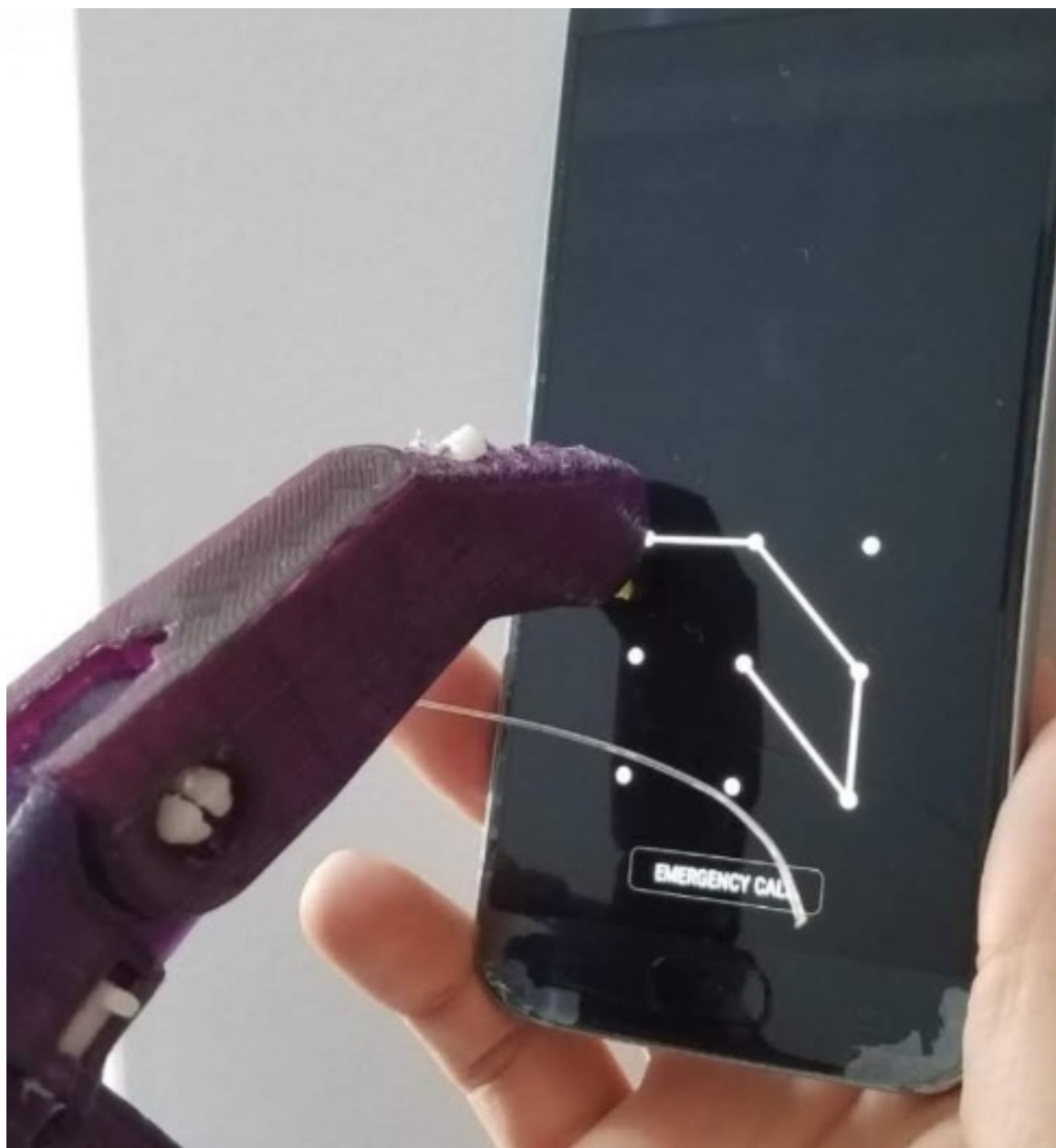
**Figura 10-4 - Posição de pega do protótipo DAH com objeto**  
Fonte: Próprio autor

Na Figura 10-5 pode ser visto a movimentação isolada do indicador (segundo quirodáctilo) e o funcionamento das travas.



**Figura 10-5 - Movimentação isolada do indicador do protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor

Na Figura 10-6 pode ser visto a acessibilidade capacitiva (*Touch Screen*) para equipamentos móveis.



**Figura 10-6 - Acessibilidade capacitiva (*Touch Screen*) do protótipo DAH**  
Fonte: Próprio autor

## 10.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO PROTÓTIPO DAH

Para a análise dos resultados utilizou-se como base as premissas do estudo classificando os resultados conforme a Tabela 10-1 em “**RUIM**” no qual há necessidade de realizar melhorias, “**BOM**”, no qual o funcionamento está satisfatório e “**EXCELENTE**”, quando o resultado obtido foi melhor do que o esperado.

**Tabela 10-1 - Análise dos resultados das implementações no DAH modificado**

<i>Função</i>	<i>Avaliação</i>	<i>Comentários</i>
<i>Movimentação dos dedos quando flexionado o punho.</i>	<i>Bom</i>	<i>A movimentação dos dedos quando movimentado o punho aconteceu como previsto e teve um funcionamento adequado</i>
<i>Posição de Pega</i>	<i>Bom</i>	<i>A posição de pega funcionou conforme esperado, porém, observa-se a necessidade de melhorias devido as linhas.</i>
<i>Funcionamento do Pino de Rotação do Primeiro Quirodáctilo.</i>	<i>Ruim</i>	<i>Para essa função, não funcionou conforme esperado, há necessidade de melhorias</i>
<i>Movimentação Isolada do Segundo Quirodáctilo (indicador) e o funcionamento das travas</i>	<i>Excelente</i>	<i>Esta função foi avaliada como Excelente pois apresentou resultado acima do esperado.</i>
<i>Acessibilidade TouchScreen</i>	<i>Bom</i>	<i>Esta função foi avaliada como boa pois demonstrou-se eficaz.</i>

Fonte: Próprio autor

Conforme a Tabela 10-1 entre os cinco itens analisados, três apresentam um bom funcionamento, um com excelente funcionamento e um que necessita de melhorias.

O movimento dos dedos demonstram que a articulação funcionou, e que as alterações não impactaram positivamente no funcionamento do DAH. Desse modo sua avaliação foi boa.

A posição de pega foi avaliada como **Bom**, pois funcionou conforme o esperado. Entretanto observa-se que existem outras melhorias a serem implementadas, tais como: movimento de flexão que permita menor força do usuário e, também, um modo no qual o usuário consiga fixar essa posição sem realizar esforço. Nesta pesquisa estes resultados foram bem avaliados, e mostraram que seu funcionamento foi conforme o esperado.

O funcionamento do componente de rotação foi avaliado como **Ruim**, isso devido a essa nova função necessitar de um grande esforço do usuário para realizar a rotação do dedo.

A movimentação isolada do indicador foi analisada como **Excelente**, pois seu funcionamento foi acima do esperado, e foi possível replicar para os demais dedos, demonstrando ser muito útil. Além do aperfeiçoamento do projeto ser muito eficiente, permitindo o usuário do DAH utiliza-lo de diversas maneiras.

Por fim, o acesso *Touch Screen* foi avaliado como **Bom**. Essa função permite ao usuário conseguir utilizar dispositivos móveis conforme era esperado, mas é possível implementar melhorias, principalmente em sua aparência e funcionalidade mecânica.

### 10.3. QUANTIDADE DE MATERIAL UTILIZADO NO PROTÓTIPO DAH

A quantidade de termoplástico utilizado para impressão 3D FDM deste DAH foi de aproximadamente 110 m (cento e dez metros) de filamento com diâmetro de 1,75 mm (um virgula setenta e cinco milímetros), resultando em uma massa total de 370 g (trezentos e setenta gramas).

#### 10.4. TEMPO DE PROCESSAMENTO UTILIZADO NA FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO DAH DE TESTE

Para construir e fabricar o protótipo foram contabilizadas três etapas:

- **PRIMEIRA ETAPA:** *impressão 3D que resultando total de 28 (vinte e oito) horas e 27 (vinte e sete) minutos.*
- **SEGUNDA ETAPA:** *ajuste e limpeza das peças impressas que resulta no total de 3 (três) horas.*
- **TERCEIRA ETAPA:** *montagem de todas as partes que resultando em um total de 1 (uma) hora e 30 (trinta) minutos.*

Dessa forma, foram necessárias **32 h 57 m** (trinta e duas horas e cinquenta e sete minutos) para construção total e montagem final do protótipo, sem a contabilização do tempo gasto com os ajustes, limpeza e testes individuais e em conjunto.

## 11.CONCLUSÃO

Os resultados dos aperfeiçoamentos e inclusão de novas funcionalidades do DAH apresentados nesta pesquisa foram considerados satisfatórios, e assim podem ser utilizados como uma opção de DAH impresso em 3D FDM para pessoas com deficiência nas mãos.

As melhorias obtidas nesta pesquisa possibilitam que este novo DAH traga benefícios significativos como a fabricação mais rápida (cerca de 30%), facilidade na montagem (cerca de 25%), maior conforto aos usuários, tanto na redução do peso (cerca de 15%) e otimização funcional.

Desta forma, estes resultados da pesquisa se traduzem em melhorias na execução das tarefas rotineiras do dia-a-dia, permitindo ao usuário o acesso a dispositivos eletrônicos móveis e maior versatilidade no uso, e possivelmente no retorno às atividades comuns.

É possível observar no decorrer da pesquisa as contribuições acadêmicas e industriais, principalmente relativas as técnicas de manufatura aditiva via impressão 3D, assim como, o comparativo dos materiais disponíveis para a técnica FDM para aplicações em protótipos e produtos.

Acredita-se que estes resultados promissores possam incentivar outras pesquisas relacionadas a aprimoramentos ainda mais significantes, como por exemplo: a inserção de sensores mio-elétricos, adaptação de motores leves e de alto torque, implementação de um sistema de controle adaptativo baseado na utilização de microcontroladores de baixo consumo e embarcados no próprio dispositivo, além da integração de novos materiais com características condutoras e magnéticas.

Espera-se que esta pesquisa contribua para gerar novas ideias, sempre buscando a melhor qualidade de vida do ser humano e da sociedade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3DNATIVES, **3D Printing vs CNC Machining: Which is best for prototyping?**, <3dnatives.com/en/3d-printing-vs-cnc-160320184>, Acesso: 20/03/2018.

3DPRINT, Disponível em <3dprint.com/>, Acesso: 20/12/2017.

3DSYSTEMS, Disponível em <br.3dsystems.com/>, Acesso: 17/05/2017.

3DXTECH. **Technical Data Sheet Carbon x Carbon Fiber Reinforced PLA 3D Filament.** Disponível em <3dxtech.com/content/Carbon\_Fiber\_PLA\_Filament\_v2.1.pdf>. Acesso 02/12/2018;

ABDALLAH, I. B, BOUTERAA, Y, REKIK, C. **Design and development of 3D printed myoelectric robotic exoskeleton for han rehabilitation.** International Journal on Smart Sensing and Intelligent systems VOL. 10, Nº 2, Tunisia, Junho 2017.

ABREU, S. A. C., **Impressão 3D Baixo Custo Versus Impressão em Equipamentos de Elevado Custo.** Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto, 2015.

AGUIAR, M.C., RAVAZI, R.F., HERRERA, V.E., SILVA, D.C., FILHO, E.D., **Avaliação da Prototipagem Rápida em Impressão 3D como uma Inovação Tecnológica Aplicada ao Desenvolvimento de Produtos - Um Estudo Multicaso,** XXXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Curitiba, 2014.

ALCALDE, E. e WILTGEN, F. **Estudo das Tecnologias em Prototipagem Rápida: Passado, Presente e Futuro,** Revista de Ciências Exatas da Universidade de Taubaté, v.24, nº2, 2018.

AUTODESK. **Autodesk Inventor.** Disponível em <autodesk.com.br>. Acesso 25 mar. 2016.



BENSOUSSAN, H., **The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today**, SCULPTEO, 2016.

BERMAN, B., **3D Printing: The New Industrial Revolution**, ELSEVIER, Estados Unidos, 2012.

BLACKMAGIC3D. **Conductive Graphene Filament**. Disponível em <[blackmagic3d.com/](http://blackmagic3d.com/)>. Acesso 02/12/2017.

CHUA, C.K., LEONG, K.F. and LIM C.S., **Rapid Prototyping Principles and Applications**, 2ª Edição, World Scientific Publishing, Singapura, 2003.

CRUMP, S.S. **Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects**, US Patent 5,121,329, 1989.

DALLY, C., JOHNSON, D., CANON, M., RITTER, S., MEHTA, K. **Characteristics of a 3D-Printed Prosthetic Hand for Use in Developing Countries**. IEEE Global Humanitarian Technology Conference, 2015.

DECKARD, C.R. **Method and Apparatus for Producing Parts by Selective Sintering**, US Patent 4,863,538, 1986.

DRAKE, R., VOGL, A., MITCHELL, A., TIBBITTS, R., RICHARDSON, P. **Atlas de anatomia**. Elsevier Editora Ltda. 2009.

DUONG, T., WAGNER, B., ABRAHAM, T., DAVIDSON, M., BAINS, G., DAHER, N., FRIEDRICH, A. **Comparative Study of Functional Grasp and Efficiency Between a 3D-Printed and Commercial Myoelectric Transradial Prosthesis Using Able-Bodied Subjects: A Pilot Study**. American Academy of Orthotists and Prosthetists, 2017.

ENABLING THE FUTURE. **E-NABLE**. Disponível em <[enablingthefuture.org/](http://enablingthefuture.org/)>. Acesso 02/11/2017.

FRANCE, A.K, **Make: 3D Printing - The Essential Guide to 3D Printers**, Maker Media, Canada, 2014.

MARTINI, F., TIMMONS, M., TALLITSCH R. - **Anatomia humana**. Artmed, 2009.

Harsha Vardhan, G. Hari Charan, P. V. Subba Reddy, K. Sampath Kumar, **3D Printing: The Dawn of a New Era in Manufacturing**, Internacional Journal on Recent Innovation Trends in Computing and Communication, 2014.

GASPAR, H. **Estudo da Biomecânica da Mão por aplicação do Método dos Elementos Finitos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Biomédica, Universidade do Porto, 2010.

GEBHARDT, A. **Understanding Additive Manufacturing**. Hanser, 1st Edition, 2011.

HANUS, A., Špirutová, N., Beňo, J., **Surface Quality of Foundry Pattern Manufactured by FDM Method – Rapid Prototyping**, ISSN (1897-3310) Volume 11, Archives of Foundry Engineering, República Checa, 2011.

He, Y., Xue, G., & Fu J., **Fabrication of Low Cost Soft Tissue Prostheses With The Desktop 3D Printer**, Scientific Reports, 2014.

HULL, C.W. **Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography**, US Patent 4,575,330, 1984.

KIM, J., ROBB, D., **3D Printing - A Revolution in the Making**, Volume 17, University of Auckland Business Review, 2014.

LYONDELLBASELL. **Technical Data Sheet Lupolen GX 5038**. Disponível em <[lyondellbasell.com/en/polymers/p/Lupolen-GX-5038/87de701f-6c82-48a3-a1e7-f4d5c63c56e5](http://lyondellbasell.com/en/polymers/p/Lupolen-GX-5038/87de701f-6c82-48a3-a1e7-f4d5c63c56e5)>. Acesso 03/03/2018.

MAKERBOT, Disponível em <[makerbot.com](http://makerbot.com)>, Acesso: 16/05/2017.

MANUFACTURING GUIDE, Disponível em <[manufacturingguide.com/en](http://manufacturingguide.com/en)>, Acesso: 10/08/2017.

MELLO, C.H.P., DA SILVA, C.E.S. e DA COSTA, S.C., **Comparação entre três diferentes tecnologias de prototipagem rápida em relação a critérios de custo e tempo**, XXVI ENEGEP, Fortaleza, 2006.

MINIIBERS. **Technical Data Sheet High Density Polyethylene / Polypropylene**. Disponível em <[minifibers.com/documents/TD/TD\\_Bicomponent-Fibers\\_HDPE-PP.pdf](http://minifibers.com/documents/TD/TD_Bicomponent-Fibers_HDPE-PP.pdf)>. Acesso 03/03/2018.

MIT, Disponível em: <[biomech.media.mit.edu](http://biomech.media.mit.edu)>, Acesso: 10/07/2017.

NISHIMURA, P.L.G., RODRIGUES, O.V., JÚNIOR, B.G., DA SILVA, L.A., **Prototipagem Rápida: Um Comparativo Entre uma Tecnologia Aditiva e uma Subtrativa**, 12° P&D 2016 - Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento Em Design, Minas Gerais, 2016.

NORTON, K. M., **A Brief History of Prosthetics**, Volume 17, Issue 7, inMotion, 2007.

PAPAYA3DP, Disponível <[papaya3dp.com/](http://papaya3dp.com/)>, Acesso: 10/08/2017.

PEREIRA, H. G., RODRIGUES, L. F., VOLKMER, T. M., PUPIM V. M., LUZ, F. F., **Comportamento Mecânico do Políácido Láctico com Diferentes Pigmentações Para a Impressão 3D de Componentes Para Aplicação em Próteses e Órteses**, 22° CVECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal, 2016.

PHAM, D.T., GAULT, R.S. **A comparison of rapid prototyping technologies**, International Journal of Machine Tools & Manufacture Design Research and Application, UK, 1997.

RAPIDPARTS. **Stereolithography**. Disponível em <[rapidparts.eu](http://rapidparts.eu)>. Acesso 01/02/2018

RIGID.INK. **Technical Data Sheet**. Disponível em <[rigid.ink](http://rigid.ink)>. Acesso 01/02/2018.

STANDRING, S. **Anatomia – A base anatômica da prática clínica**. Elsevier Editora Ltda. 2011.

STRATASYS, **FDM Technology**, Disponível em <[stratasys.com/br/impressoras-3d/technologies/fdm-technology](http://stratasys.com/br/impressoras-3d/technologies/fdm-technology)>, Acesso em 25/08/2017.

TAULMAN3D. **Specification Blu Print**. Disponível em <[taulman3d.com/bluprint-spec.html](http://taulman3d.com/bluprint-spec.html)>. Acesso 05/12/2017.

TOTI, F. DE A., ARANHA, E.F. DE C., FRANCO, S.M., ROSA, L.C., **Influência da orientação no posicionamento do modelo 3D prototipado por deposição de material fundido - FDM**, CONEM 2012 - VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Maranhão, 2012.

TOUCH BIONICS, **I-Limp**, Disponível em: <[touchbionics.com](http://touchbionics.com)>, Acesso: 10/07/2017.

ULTIMAKER. **Ficha Técnica ABS**. Disponível em <[ultimaker.com/en/resources/49912-abs#technical](http://ultimaker.com/en/resources/49912-abs#technical)>. Acesso 03/03/2018.

ULTIMAKER. **Ficha Técnica NYLON**. Disponível em <[ultimaker.com/en/resources/49913-nylon#technical](http://ultimaker.com/en/resources/49913-nylon#technical)>. Acesso 03/03/2018.

ULTIMAKER. **Ficha Técnica PLA**. Disponível em <[ultimaker.com/en/resources/49911-pla#technical](http://ultimaker.com/en/resources/49911-pla#technical)>. Acesso 03/03/2018.

ULTIMAKER. **Ficha Técnica PVA**. Disponível em <[ultimaker.com/en/products/materials/pva](http://ultimaker.com/en/products/materials/pva)>. Acesso 03/03/2018.

VOLPATO, N. **Manufatura Aditiva: Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D**, Edição 1, Blucher, 2017.

WILTGEN, F. **Projeto E-nable – Dispositivos de Auxílio Humano**. Palestra realizada na *1ª Semana de Gestão, Tecnologia e Inovação*. Faculdade ETEP (Escola Técnica Everardo Passos) Unidade de Taubaté - SP, 2015.

YOSHIKAWA, M., SATO, R., HIGASHIHARA, T., OGASAWARA, T., KAWASHIMA, N., **Rehand: Realistic Electric Prosthetic Hand Created with a 3D Printer**. IEEE, 2015.

ZUNIGA, J., KATSAVELIS, D., PECK, J., STOLLBERG, J., PETRYKOWSKI, M., CARSON, A., FERNANDEZ, C. **Cyborg beast: a low-cost 3d-printed prosthetic hand for children with upper-limb differences**. BMC Research Notes, 2015.

## **APÊNDICE A**

### ***ARTIGO: ESTUDO DAS TECNOLOGIAS EM PROTOTIPAGEM RÁPIDA: PASSADO, PRESENTE E FUTURO***

## ESTUDO DAS TECNOLOGIAS EM PROTOTIPAGEM RÁPIDA: PASSADO, PRESENTE E FUTURO

**ALCALDE, Eduard**  
Universidade de Taubaté  
eduard\_ga@hotmail.com

**WILTGEN, Filipe**  
Universidade de Taubaté  
lfwbarbosa@gmail.com

**Resumo.** Atualmente parece trivial falar de um protótipo e sua confecção, quer seja, pelos métodos tradicionais (subtrativos) de fabricação, ou pelos métodos modernos (aditivos) de fabricação em impressão em 3D. Nem sempre foi assim, houve um tempo que até mesmo fabricar um protótipo era impeditivo, pelo custo, ou pelo tempo. Os processos de desenvolvimento de produtos, quase sempre requerem testes de um modelo. Um modelo físico tridimensional permite a análise completa do produto, verificação de aperfeiçoamentos e interferências funcionais, que permitem chegar de forma efetiva ao produto final. Dentre as tecnologias do passado, todas estavam limitadas a construção de um produto a ser testado, e não um modelo ou protótipo. Na atualidade as diversas tecnologias existentes nos permitem fabricar e testar facilmente um novo produto utilizando as tecnologias que chamamos de prototipagem rápida. Em vista das tendências atuais é possível extrapolar nossas perspectivas tecnológicas disponíveis no futuro próximo, assim como, no futuro longínquo.

**Palavras chave:** Prototipagem Rápida. Impressão 3D. Desenvolvimento de Produto. Fabricação Aditiva. Fabricação Subtrativa. Protótipo.

**Abstract.** At present it seems trivial to speak of a prototype and its manufacture, whether by traditional (subtractive) methods of manufacture, or by modern methods (additives) of manufacture in 3D printing. It was not always so, there was a time that even making a prototype was impeding, by cost, or by time. Product development processes almost always require testing of a model. A three-dimensional physical model allows complete analysis of product, verification of improvements and functional interferences, that allow to reach the final product effectively. Among technologies of past, all were limited to building a product to be tested, not a model or prototype. At present, various technologies available allow us to easily manufacture and test a new product using technologies we call rapid prototyping. In view of current trends, it is possible to extrapolate our technological perspectives available in near future, as well as in distant future.

**key words:** Rapid Prototyping. 3D Printing. Product Development. Additive Manufacturing. Subtractive Manufacturing. Prototype.

### 1. INTRODUÇÃO

Faz parte da engenharia moderna a fabricação, teste e ensaio de peças e dispositivos em desenvolvimento, no qual são chamados de protótipos.

Os protótipos em engenharia são versões que tem forma e aparência do produto final, mas que ainda deve sofrer modificações e aperfeiçoamentos, que só são possíveis se houver um protótipo físico.

Para melhorar o processo final de fabricação de um produto, é necessária a realização de testes e ensaios em pouco tempo, ou seja, os protótipos devem ser construídos rapidamente, de tal forma que não sejam muito impactantes no prazo final. Além disto, o processo de prototipagem deve ser de baixo custo, rápido de fabricar e assim rápido de testar.

A Prototipagem Rápida, envolve muitas técnicas de fabricação e diversos materiais que não necessariamente serão os mesmos materiais finais do produto. Este artigo trás de forma sucinta, a cronologia destas tecnologias aplicadas na Prototipagem Rápida.

#### 1.1. Objetivo

Mostrar de forma clara e objetiva, alguns dos principais tipos de prototipagem rápidas que existem hoje no mundo com a finalidade de encurtar o caminho da escolha e utilização deste tipo de tecnologia. Possibilitando o leitor verificar

as vantagens e desvantagens de cada tecnologia de prototipagem.

## 2. PROTOTIPAGEM RÁPIDA NO PASSADO

Durante mais de 200 anos, os dispositivos eram construídos sem testes e ensaios, e seus ajustes realizados diretamente, no que em algum momento se tornaria o próprio produto final.

Desta forma, o material construtivo deveria ser capaz de ser modificado durante o seu desenvolvimento, e cada produto era construído a mão, ou com ferramentas pouco precisas. Por isso neste período não era possível obter controle de qualidade e repetibilidade precisa dos produtos.

Em geral os projetistas no passado distante eram artesãos que através de suas próprias aptidões transformavam a matéria prima existente em ferramentas, utensílios, objetos do dia-a-dia e arte em geral. Cada um destes projetistas do passado tinham uma visão diferente de cada processo de fabricação de um novo objeto, e quase sempre os objetos tinham similaridade, mas não eram idênticos.

A necessidade de fazer um protótipo era difícil de ser adotada, e quando necessário se fazia por tentativa e erro, até que o projetista estivesse satisfeito com a forma e funcionalidade do objeto.

Com o passar dos anos, e das exigências dos usuários e do mercado, os produtos começaram a ser testados, aperfeiçoados e fabricados com máquinas de maior precisão e repetibilidade, mesmo assim, eram poucos os protótipos construídos. A limitação de custo e tempo quase sempre inviabilizava este importante processo de desenvolvimento de produtos. Durante muito tempo os protótipos quando indispensáveis, impactavam diretamente no lançamento e no custo de um produto, se o produto não tivesse um bom valor agregado, não possibilitava utilização destes processos.

Durante décadas o processo de prototipagem parecia ser inviável, mas com a inclusão no passado recente de computadores nos processos de automatização de máquinas de fabricação (usinagem e fresagem), diversos produtos começaram a ser testados via um modelo chamado de protótipo e não mais a versão final do produto.

Foi com a invenção de uma máquina na década de 80, com o processo de Estereolitografia, desenvolvida por Charles W. Hull, que veio a se tornar um equipamento inovador. Esta técnica foi aplicada na primeira impressora 3D. Hull é conhecido hoje como o pai da impressão 3D. Sua máquina possibilitava construir um protótipo físico real a partir de um código de computador que representava os desenhos de um produto em desenvolvimento. E uma vez interpretado pelo equipamento de fabricação em 3D, o objeto é confeccionado em material de menor valor, e quase geralmente em um tempo e custo menor que o necessário na fabricação tradicional.

## 3. PROTOTIPAGEM RÁPIDA NO PRESENTE

O conceito de prototipagem rápida não é novo. Foi com o surgimento de computadores que o professor Herbert Voelker começou a considerar formas de utilizar os projetos desenvolvidos em computadores diretamente em máquinas que estavam começando a aparecer nas fábricas no final dos anos 60 conforme BROWN e LIPMAN (2013). Seu trabalho e esforço foram a base e resultaram nos primeiros modelos reais baseados em algoritmos e cálculos matemáticos para descrever partes tridimensionais.

Foi a ideia Hull de imprimir objetos camada por camada sobrepostas foi testada, fabricada e difundida. As primeiras máquinas comerciais de prototipagem rápida usando essa técnica de camadas foram produzidas em 1987 e apresentadas ao público no mesmo ano em uma feira nos EUA (LIPSON e KURMAN, 2013; NIAKI, 2018). Essa técnica é a base da impressão 3D em uso hoje, embora tenha sido consideravelmente refinada e aperfeiçoada, além é claro, das múltiplas técnicas inventadas.

### 3.1. Técnicas de Imprimir em 3D

O conceito por trás de todas as impressoras 3D é basicamente o mesmo, com diferentes tecnologias de impressão e materiais diferentes.

Antes de tudo, deve existir um projeto de um objeto em CAD cujo desenho seja tridimensional, ou seja, o objeto deve ser um sólido virtual.

Os desenhos computacionais tridimensionais em CAD são tratados e convertidos em coordenadas tridimensionais por um programa via um algoritmo matemático que divide o sólido em diversas camadas. As camadas podem variar de 0,01 mm até alguns centímetros de espessura, dependendo é claro da máquina que está sendo usada.

Neste processo de fatiamento do objeto, o mesmo é programado em um arquivo eletrônico que informa a impressora qual é a primeira e a última camada do mesmo, que geralmente é composto por múltiplas camadas.

Cada camada, ou fatia, representa uma única camada do objeto construído conforme a estrutura do arquivo enviado a impressora. Após a conclusão de uma camada, a máquina passa para a próxima camada e sucessivamente até que a última camada do objeto seja concluída.



### 3.2. Principais Processos de Prototipagem Rápida - Subtrativo e Aditivo

A prototipagem rápida hoje é dividida em dois processos. O mais antigo, e primeiro a surgir, o processo subtrativo comum em máquinas tradicionais, mesmo que automatizadas (CNC), como um torno ou fresa, e o segundo processo a surgir, o processo aditivo, que é utilizado com frequência em técnicas de impressão 3D.

Comparando os métodos subtrativo e aditivo é possível identificar de imediato duas vantagens a favor da tecnologia aditiva, como o tempo de fabricação e o desperdício de material. Como o próprio nome dos processos sugere, um retira material para fabricar (subtrativo) e o outro acrescenta o material necessário para fabricar (aditivo).

No método subtrativo Fig. (1) o material é retirado de um bloco, assim como, eram realizados no passado distante com os escultores, e no passado recente com os técnicos mecânicos torneando ou esculpindo peças.

O resultado é um objeto cuja quantidade de material realmente útil, ou seja, aquela para o qual se destina o objeto, em geral é muito inferior a quantidade inicial, ou seja, muito material, tempo e energia são consumidos e desperdiçados durante a fabricação.

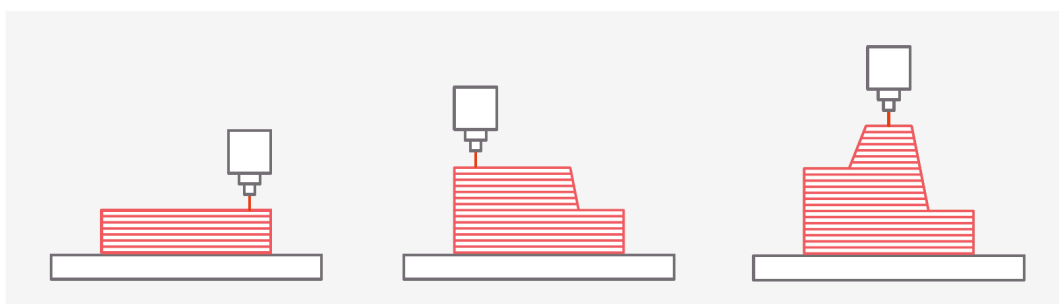
Figura 1 – Processo de Fabricação Subtrativo



Fonte: REDWOOD *et al.* (2017).

No modelo aditivo Fig. (2) o material requerido para a fabricação do objeto é inserido na quantidade necessária para a fabricação do objeto, e assim, tornando o processo mais econômico, tanto em tempo, quanto em custo de energia e material. A redução do desperdício é consequência do processo.

Figura 2 – Processo de Fabricação Aditivo



Fonte: REDWOOD *et al.* (2017).

Entretanto, ainda hoje quando comparando os processos subtrativo e aditivo, ambos têm vantagens e desvantagens, se destinam a diferentes estratégias construtivas.

Quanto à capacidade de construir muito objetos com grandes dimensões e alta precisão o processo de usinagem ainda possui vantagem em relação ao processo aditivo.

Hoje existem muitas tecnologias de Prototipagem Rápida, dentre estas, as que possuem o processo de fabricação do tipo aditivo, são comumente chamadas de impressão em 3D, destacam-se três: Estereolitografia (SLA), Sinterização a Laser (SLS) e Deposição por Fusão (FDM).

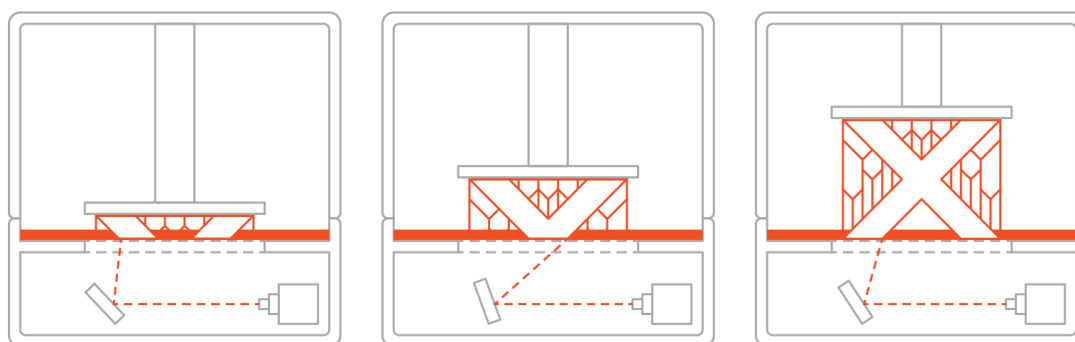
### 3.3. Estereolitografia (Stereolithography - SLA)

Em 1984 Hull inventou e patenteou a tecnologia SLA conforme a patente U.S 4,575,330 (1984), a mais conhecida tecnologia de impressão 3D, e mesmo sendo a primeira tecnologia de Prototipagem Rápida Aditiva a surgir é ainda é um dos métodos mais utilizados.

Esta técnica consiste de uma fonte de laser que envia raios ultravioleta para solidificar a resina polimérica, o feixe é direcionado sobre o polímero na forma líquida, que se solidifica nas regiões atingidas pelo feixe de laser que forma uma das camadas do objeto.

Após a conclusão de cada camada a plataforma ou mesa se desloca (para cima ou para baixo) possibilitando assim a formação de uma nova camada. O processo se repete nas camadas seguintes até que o objeto seja concluído. Na Fig. (3) este processo é ilustrado.

Figura 3 – Tecnologia SLA



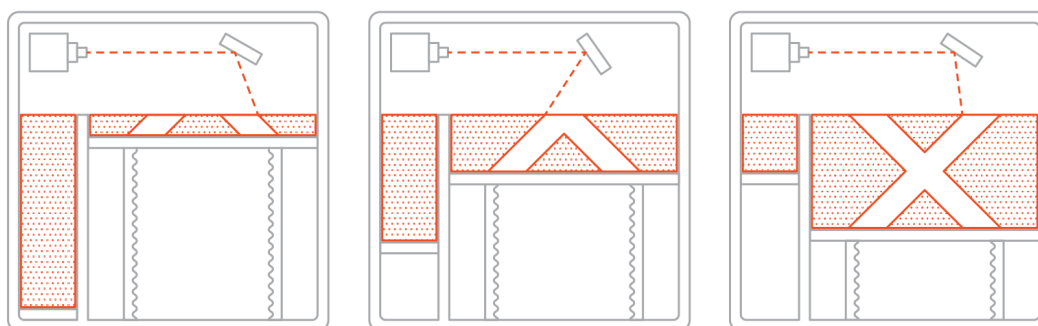
Fonte: REDWOOD *et al.* (2017).

### 3.4. Sinterização a Laser (*Selective Laser Sintering - SLS*)

O método SLS, o segundo a surgir, foi criado também na década de 80 por Carl Deckard. Consiste do uso de um feixe de laser para criar os modelos 3D. Sua diferença tecnológica é a utilização de um polímero em pó e não de uma resina como é utilizado na tecnologia SLA.

Na Figura 4 observa-se o funcionamento esquemático de uma máquina de tecnologia SLS.

Figura 4 - Tecnologia SLS[4]



Fonte: REDWOOD *et al.* (2017).

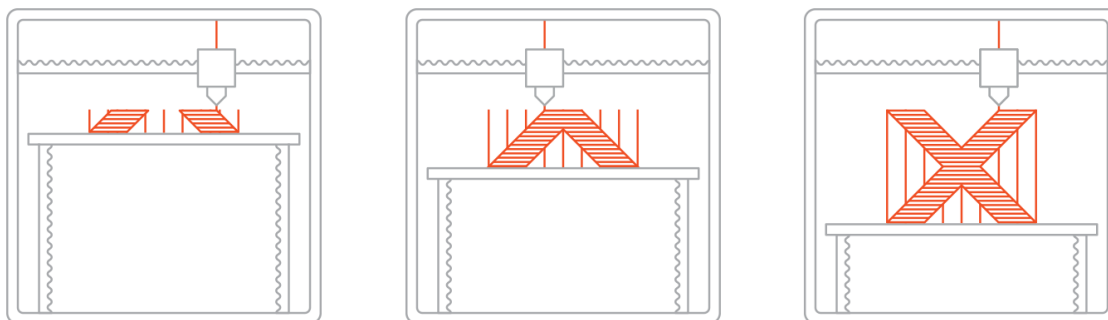
Veja que o feixe de laser solidifica o pó que está na superfície da máquina conforme o mesmo é projetado imprimindo uma imagem, na Figura 2. Após a conclusão desta camada a mesa desce e uma nova camada de pó armazenada nas laterais da máquina é colocada por sobre a camada anterior e novamente atingida pelo feixe de laser. Este processo se repete camada a camada, até que o objeto seja finalizado (Gebhardt, 2011).

### 3.5. Deposição por Fusão (*Fused Deposition Modeling - FDM*)

Logo após a invenção da técnica SLS, foi inventado por Steven Scott Crump, a tecnologia FDM. Esta técnica foi a responsável pela divulgação da impressão 3D, isso porque essa tecnologia é simples e de baixo custo.

As vantagens intrínsecas desta tecnologia permitiram o maior acesso às pessoas. Fácil de ser construída, com o tempo surgiram vários modelos chamados de impressoras de mesas ou desktops (como são chamadas as impressoras não profissionais). Isto difundiu a impressão 3D nas residências.

Figura 5 - Tecnologia FDM



Fonte: REDWOOD *et al.* (2017).

Este modelo consiste em derreter o filamento de um termoplástico que é puxado por uma engrenagem e empurrado pelo bico extrusor.

Nesta tecnologia tanto a extrusora quanto a mesa se movimentam, para cima e para baixo (eixo Z) ou para os lados (eixos X e Y). Deste modo o filamento fica praticamente líquido. De tal forma que o filamento derretido possa ser depositado na mesa de construção da impressora, camada por camada para que o objeto seja construído.

### 3.6. Tipos de Materiais mais Comuns em Prototipagem Rápida Aditiva

Os materiais existentes na Prototipagem Rápida são variados e vem crescendo cada vez mais, principalmente com investimentos para prototipagem aditiva de metais e materiais biodegradáveis.

Dentro de cada tecnologia é possível observar algumas similaridades, principalmente nas tecnologias SLS, SLA e FDM.

A tecnologia SLS utiliza resina, é possível citar três materiais como: Accura®55, Accura®25 e Accura®60, todos da empresa 3DSYSTEMS, fabricante também dos equipamentos de Estereolitografia.

O Accura®55, segundo a 3DSYSTEMS (2015) é um material similar ao material ABS, rígido e resistente, indicado para peças de produção de curto prazo e para as montagens funcionais. O Accura®25 (3DSYSTEMS, 2015) é feito de material flexível similar ao polipropileno, indicado para montagens com encaixe, moldes para fundição a vácuo e protótipos funcionais duráveis. O Accura®60 é rígido e se assemelha ao policarbonato, é um plástico transparente indicado para peças rígidas e fortes, pode ser utilizado para aplicações em faróis, garrafas e montagens transparentes (3DSYSTEMS, 2015). Estes são alguns dos materiais utilizados em SLA, porém existem diversos materiais cada um destinado para uma finalidade específica.

Para a técnica SLS os materiais são variações de Nylon. Dentre estes tem-se: Nylon 11, Nylon 12 PA e o Nylon 12 GF, sendo o Nylon 11, com alto alongamento, resistência ao impacto e indicado para fabricação de peças aeroespaciais (STRATASYS, 2017).

O Nylon 12 PA, possui boa resistência química, baixa absorção de umidade utilizados em projetos de encaixe rápido (STRATATYS, 2017).

O Nylon 12 GF é um Nylon misturado com fibra de vidro com excelente rigidez mecânica, resistência à altas temperaturas e dimensionalmente estável, suas aplicações variam de artigos esportivos a protótipos funcionais (STRATATYS, 2017).

A tecnologia FDM é a que contém maior variação de materiais disponíveis no mercado, provavelmente por ser a tecnologia mais acessível. Dentre os materiais da tecnologia FDM, destaca-se: ABS, PLA e Nylon.

O Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) é amplamente conhecido na indústria automotiva e possui inúmeras aplicações. Possui excelente adesão entre camadas e deformação mínima, sua aplicação é na fabricação de protótipos funcionais (ULTIMAKER, 2017).

O Ácido Polilático (PLA) é um dos materiais mais versáteis existentes para a tecnologia FDM. Apresenta boa resistência a tração e permite criar peças de resolução elevada. É utilizado na fabricação de utensílios domésticos, brinquedos, projetos educativos, protótipos e modelos arquitetônicos (ULTIMAKER, 2017).

O Nylon é um material amplamente conhecido. Resistente a impacto e a abrasão, durável, baixo coeficiente de atrito e boa resistência à corrosão de produtos químicos orgânicos, suas aplicações variam de protótipos funcionais e modelagem industrial (ULTIMAKER, 2017).

### 3.7. Algumas Vantagens e Desvantagens entre as Tecnologias Atuais

Este tópico tem como finalidade demonstrar de modo objetivo e claro algumas vantagens e desvantagens de modo geral sobre a tecnologia aditiva.

Como base nos tópicos anteriores é possível destacar algumas características, como agilidade, possibilidade de construir peças muito complexas com diversos tipos de materiais.

Existe ainda a questão ambiental. Atualmente os recursos naturais estão esgotando cada vez mais cedo, neste ano de 2018 segundo a Global Footprint Network (2018) comunicou que, no dia primeiro de agosto deste ano foi declarado o dia da sobrecarga do planeta Terra, ou seja, o esgotamento da capacidade do planeta se recuperar da exploração de seus recursos naturais pelas ações humanas.

Algumas tecnologias de Prototipagem Rápida Aditivas utilizam materiais biodegradáveis, como o PLA (Ácido Polilático) que é um material composto de materiais biológicos como amido de milho e cana de açúcar. Há ainda uma série de pesquisas sendo realizadas com materiais bio-impressos em 3D para uma série de aplicações médicas como exemplo do artigo publicado por CHIA (2015).

A tecnologia FDM vem aumentando a quantidade de materiais disponíveis para impressão e vem trazendo cada vez mais polímeros biocompatíveis com baixas temperaturas de fusão.

Na Tabela 1 são apresentados itens comparativos entre as três tecnologias baseados em NIAKI (2018), JUNIOR *et al* (2007), CUNICO (2015), RECROSIO (2018) e VOLPATO (2007).

Tabela 1 – Comparações SLA, SLS e FDM

<b>Descrição</b>	<b>SLA</b>	<b>SLS</b>	<b>FDM</b>
<i>Custo do Equipamento</i>	Pior	Mediano	Melhor
<i>Custo de Manutenção</i>	Pior	Mediano	Melhor
<i>Custo de Material</i>	Pior	Mediano	Melhor
<i>Disponibilidade de Materiais</i>	Mediano	Pior	Melhor
<i>Resolução de Impressão</i>	Melhor	Mediano	Pior
<i>Precisão de Impressão</i>	Melhor	Mediano	Pior
<i>Acabamento Superficial</i>	Melhor	Mediano	Pior
<i>Tolerância</i>	Melhor	Mediano	Pior
<i>Tempo de Processamento</i>	Melhor	Pior	Mediano
<i>Resistência ao Calor (Peça)</i>	Pior	Melhor	Mediano
<i>Resistência Mecânica (Peça)</i>	Pior	Melhor	Mediano
<i>Resistência em altas Temperaturas (Peça)</i>	Pior	Melhor	Mediano
<i>Durabilidade (Peça)</i>	Pior	Melhor	Mediano
<i>Impressão de Peças Funcionais</i>	Pior	Melhor	Mediano

Como é possível verificar a vantagem das tecnologias são: na tecnologia SLA melhor resolução, precisão, acabamento, tolerância e tempo de processamento. A tecnologia SLS tem a melhor resistência ao calor, possibilidade de imprimir peças funcionais, com resistência mecânica, resistência a altas temperaturas e durabilidade. A tecnologia FDM apresenta uma boa resolução, precisão, acabamento e tolerância, porém ainda com qualidade inferior a da tecnologia SLA.

Dentre estas três tecnologias a tecnologia FDM apresenta o menor custo do equipamento, de manutenção e de material, além de grande diversidade em materiais.

Com este resumo comparativo é possível verificar que cada uma possui vantagens e desvantagens, o fator determinante para a escolha de qual tecnologia utilizar é o estudo do custo benefício e a necessidade para cada aplicação.

#### 4. PROTOTIPAGEM RÁPIDA NO FUTURO

No futuro próximo, a difusão de novas técnicas e das novas máquinas de Prototipagem Rápidas devem seguir no desenvolvimento de objetos constituídos de partes biológicas, para tratamento médico, tais como: remédios e partes do corpo humano, como ossos e tecido humano.

Além é claro, a impressão de alimentos onde já existem projetos conforme demonstrados por SUN *et al.* (2015). Hoje já existem alguns modelos como por exemplo a impressão de panquecas que já são já comercializados, mas no futuro com os avanços a apresentação será mais refinada possibilitando fazer alimentos personalizados. A personalização de um objeto é algo que tem relacionamento bem estreito com a tecnologia de Prototipagem Rápida Aditiva.

Outra área que será muito explorada no futuro próximo será a de construção de tecidos, utilizando é claro compostos ainda não desenvolvidos, que permitiram confeccionar trajes e roupas sem padrões definidos tais como: P, M e G (pequeno, médio e grande).

Com isto será também eliminada a parte mais frágil de todas as roupas atuais, que são as linhas necessárias para juntar as partes e costurar um tecido em outro.

As pessoas serão escaneadas em cabines de prova, e suas dimensões corporais serão apresentadas para sua escolha com relação aos ajustes, cores, tipo de textura, quantidade a ser confeccionada e eletrônica embarcada. Sendo esta última uma grande inovação, podendo ser aplicada tanto para comunicação, quanto para conforto térmico (aquecendo ou resfriando), e será impresso junto com as roupas fundido a eletrônica ao tecido impresso.

A realidade futura da construção civil será radicalmente modificada com o avanço das grandes máquinas construtivas, estudos como LIM *et al.* (2011) e Perrot *et al.* (2015) demonstram a utilização de impressão 3D para construção civil. No futuro é possível uma mudança radical utilizando concreto e outros materiais a serem empregados nas construções de moradias e outras construções com a integração concreto, resinas e metal, tudo ao mesmo tempo.

Desta forma, o processo de construção civil será realizado de forma rápida e muito diferente de como é feito hoje, incluindo a construção de pontes e túneis.

Em um futuro mais distante, os processos de montagens serão extintos, visto que as máquinas aditivas, farão isto por completo. Não necessitando mais o processo de montagem, pois cada peça será fabricada integrada a sua estrutura e funcionalidade.

Por exemplo, um veículo será completamente impresso conforme demonstrado por POLYAMAKER (2018). No futuro será possível transições suaves e integradas entre a estrutura metálica do banco com a estrutura de espuma do estofamento e a do tecido que o reveste. Todas etapas serão confeccionadas no mesmo momento da fabricação, e definido conforme o projeto e na mesma máquina. A famosa “linha de montagem de Henry Ford” deixará de existir.

A impressão de um motor a combustão completo e funcional, sem ter que montar nenhuma das partes, melhorando muito a estanqueidade de câmaras de combustão e os ajustes necessários, uma vez que a máquina o faz de forma contínua, com precisão e completo.

O veículo inteiro poderá ser impresso de uma só vez, finalizado com uma camada verniz e de tinta logo que estiver pronta sua construção, realizado pela mesma máquina que o construiu.

Toda a eletrônica, incluindo os chicotes de cabecamentos elétricos do veículo serão impressos, de tal forma a possibilitar um melhor aproveitamento dos espaços e caminhos elétricos, tornando os sistemas muito mais seguros, eficazes e eficientes. Integrando a estrutura aos sistemas eletrônicos e sensoriais de um veículo.

Desta forma, fazendo parte das peças e regiões a serem sensoriadas e monitoradas pelos sistemas do computador de bordo, similares a uma ECU atual. Dispositivos eletrônicos serão facilmente incorporados às roupas, medicamentos, equipamentos, utensílios domésticos, aparelhos e máquinas. Integrando muitas vezes a própria fonte de energia.

Parte dos objetos serão impressos com células fotovoltaicas maleáveis integradas. Por exemplo, no próprio tecido de roupas, mochilas, capacetes, entre outros. Mesmo uma simples caneta descartável, será capaz de lhe informar quanto de tinta ainda resta em seu compartimento antes de acabar, alertando o usuário para a substituição.

Aparelhos de telefonia móveis serão totalmente obsoletos, uma vez que eles podem ser integrados e transferidos pelo próprio usuário para os veículos, roupas, entre outros dispositivos.

A confecção de órgãos, tecidos e ossos demonstrados em artigos como VENTOLA (2014) e BOSE (2013). No futuro a confecção terá alcançado o mesmo desenvolvimento tecnológico de objetos personalizados. Possibilitando que uma pessoa jovem possa extrair seu DNA e através de células tronco produzir via impressão 3D os órgãos essenciais e deixá-los guardados e prontos para serem utilizados se necessários, como no envelhecimento ou em doenças.

Não será um processo comum de Prototipagem Rápida visto que os órgãos a serem replicados foram minuciosamente reconstruídos por um processo digital não invasivo, e que copia os órgãos não só em suas dimensões, mas também com as funções e estruturas idênticas a nível celular do próprio DNA. Será uma revolução sem proporções para a medicina futura.

A Prototipagem Rápida na fabricação de objetos deverá ser algo trivial no qual a própria máquina, realizará a confecção do objeto prototipado, realizando os ajustes e aperfeiçoamentos necessários. Depois descartará o protótipo e utilizará seu próprio material na confecção do objeto final.

Entretanto, mesmo conhecendo as tendências futuras e os possíveis caminhos que esta tecnologia tem seguido, muitas destas ideias do futuro são especulações controladas, baseadas nas tendências e opiniões de diversos especialistas e pesquisadores envolvidos em pesquisas e prototipagens atuais.

## 5. CONCLUSÃO

No presente artigo foi apresentado o histórico da Prototipagem Rápida, e o estado atual das principais técnicas e processos utilizados hoje e um possível futuro da impressão 3D.

É certo que esta tecnologia é hoje um dos métodos mais utilizados para confecção de protótipos, devido a sua facilidade de manuseio, baixo custo e curto tempo de fabricação quando comparado com métodos tradicionais.

Acredita-se que no futuro a impressão 3D quebrará paradigmas importantes incluindo os próprios protótipos como existem hoje. O futuro promissor dessa tecnologia é percebido nos grandes avanços na área médica e biológica, permitindo diversos estudos e novas tecnologias com a bio-impressão.

A manufatura aditiva demonstra que é aplicável em praticamente todas as áreas e conforme os avanços da tecnologia, incluindo o impacto no meio ambiente.

O consumo de recursos naturais estará cada vez mais entrelaçado com os novos métodos e as novas aplicações. Surgiram muitas dúvidas e discussões sobre limites desta tecnologia e os inúmeros impactos na vida humana.

## REFERÊNCIAS

- 3DSYSTEMS, *Data Sheet Accura®25 – PP CLASS*, 3DSYSTEMS Inc. 2015.
- 3DSYSTEMS, *Data Sheet Accura®60 – CLEAR CLASS*, 3DSYSTEMS Inc. 2015.
- 3DSYSTEMS, *Data Sheet Accura®55 – ABS CLASS*, 3DSYSTEMS Inc. 2015.
- BOSE, S., VAHABZADEH, S., BANDYOPADHYAY, A., *Bonnet Issue engineering using 3D printing*, Elsevier, 2013.
- BROWN, C., LUBELL, J., LIPMAN, R., *Additive manufacturing technical workshop summary report*. National Institute of Standard and Technology, 2013.
- CHIA, H.N., WU, B.M., *Recent advances in 3D printing of biomaterials*, Journal of biological engineering, 2015.
- CORRAI, L.C., WALKER, K.J., *Exploring the abilities of 3D printing and its viability for consumption in the fashion industry*, Apparel Merchandising and Product Development Undergraduate Honors Theses. 1, 2017.
- CUNICO, M., *Impressoras 3D: O novo meio produtivo*, 1ª Edição, Concep3D, 2015.
- GEBHARDT, A., *Understanding Additive Manufacturing*, 1st Edition, Hanser, 2011.
- GLOBAL FOOTPRINT NETWORK, *Earth Overshoot Day 2018 fell on August 1*. <<https://www.footprintnetwork.org/>>, Acesso em 08/08/2018.
- HULL, C.W., *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography* - US Patent US4,575,330, 1984.
- JUNIOR, A.S., JUNIOR, O.C, NETO, A.I., *Análise comparativa entre os processos de prototipagem rápida por deposição ou remoção de material na concepção de novos produtos*, 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2007.
- LIM, S. et al, *Development of a viable concrete printing process*. Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, (ISARC2011), Seoul, South Korea, 29th June 2nd July 2011, pp. 665 - 670.
- LIPSON, H., KURMAN, M., *Fabricated: the new world of 3D printing*, Wiley, 2013.

- MELNIKOVA, R., EHRMANN, A., FINSTERBUSCH, K., *3D printing of textile-based structures by Fused Deposition Modeling (FDM) with different polymer materials*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2014.
- NIAKI, M.K., NONINO, F. *The management of additive manufacturing*, Springer, 2018.
- PERROT, A., RANGEARD, D., PIERRE, A., *Structural built-up of cement-based materials used for 3D printing extrusion techniques*, Materials and Structures, 2015.
- POLYAMAKER, *Polymaker & XEV Launch 3D Printed Electric Car – LSEV*, <http://www.polymaker.com/polymaker-xev-launch-3d-printed-electric-car-lsev/>, Acesso em 08/08/2018.
- RECROSIO, E., *FDM vs. SLA vs. SLS: Battle of the 3D technologies*, Sculpteo, <<https://www.sculpteo.com/blog/2017/05/15/fdm-vs-sla-vs-sls-vs-clip-battle-of-the-3d-technologies/>>, Acesso em 08/08/2018.
- REDWOOD, B., SCHÖFFER, F., GARRET, B., *The 3D Printing Handbook - Technologies, Design and Applications*, Coers&Roest© 3D Hubs B.V., 2017.
- STRATASYS, *Material Data Sheet - Nylon 11 Laser Sintering Material Specifications*, Stratasys Direct Inc., 2017.
- STRATASYS, *Material Data Sheet - Nylon 12 GF Laser Sintering Material Specifications*, Stratasys Direct Inc., 2017.
- STRATASYS, *Material Data Sheet - Nylon 12 PA Laser Sintering Material Specifications*, Stratasys Direct Inc., 2017.
- SUN, J., ZHOU, W., HUANG, D., FUH, J.Y.H., HONG, G.S., *Overview of 3D printing Technologies for food fabrication*, Food Bioprocess Technology, Springer, 2015.
- ULTIMAKER. *Ficha técnica ABS*, Ultimaker, 2017.
- ULTIMAKER. *Ficha técnica Nylon*, Ultimaker, 2017.
- ULTIMAKER. *Ficha técnica PLA*, Ultimaker, 2017.
- VENTOLA, C.L., *Medical Application for 3D Printing: Current and Projected Uses*, P&T, 2014.
- VOLPATO, N. *Prototipagem Rápida – Tecnologias e Aplicações*, Editora Blücher, 2007.

## **APÊNDICE B**

### ***ARTIGO: PROTOTIPAGEM RÁPIDA ADITIVA APLICADA EM DISPOSITIVOS FUNCIONAIS DE AUXÍLIO HUMANO***



2019  
São Carlos - SP



10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação  
05 a 07 de agosto de 2019, São Carlos, SP, Brasil

## PROTOTIPAGEM RÁPIDA ADITIVA APLICADA EM DISPOSITIVOS FUNCIONAIS DE AUXÍLIO HUMANO

### Filipe Wiltgen

Universidade de Taubaté – UNITAU  
Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica  
lfbwbarbosa@gmail.com

### Eduard Alcalde

Universidade de Taubaté – UNITAU  
Mestrando em Engenharia Mecânica  
eduard\_ga@hotmail.com

**Resumo.** Este artigo tem a finalidade de apresentar a versatilidade da técnica de manufatura aditiva aplicada no desenvolvimento e construção de Dispositivos de Auxílio Humano (DAH) através da prototipagem rápida aditiva via impressora tridimensional (3D). O conhecimento adquirido de especialistas em ortopedia, tem beneficiado a engenharia biomecânica no desenvolvimento de próteses e órteses desde o surgimento das impressoras 3D. Fato este, que possibilita desenvolver e testar novas idéias rapidamente, e ainda, com a opção de fazê-las como um dispositivo personalizado para cada paciente. Entretanto, os custos desta área quase sempre são inacessíveis para grande parte da população. Foi pensando nisso, que há quase uma década, um projeto pioneiro de desenvolvimento de uma mão mecânica funcional, impressa em termoplástico, foi criado por um grupo de engenheiros por todo mundo. Este projeto fez surgir uma organização sem fins lucrativos (E-Nable) que tem como missão, encontrar para uma pessoa que necessita de um DAH, uma pessoa que esteja disposta a fabricar um DAH. Neste artigo traz o aperfeiçoamento obtido nas pesquisas realizadas em DAH e as novas adaptações criadas para a fabricação em impressoras 3D FDM pessoais, na montagem das partes e na versatilidade de uso da mão mecânica em plástico.

**Palavras chave:** Manufatura Aditiva. Prototipagem Rápida. Impressão 3D. Protótipo. Dispositivo de Auxílio Humano.

## 1. INTRODUÇÃO

Existe uma técnica de manufatura que tem revolucionado a vida de jovens e crianças que necessitam de uma prótese de mão ou de braço, esta técnica é chamada de prototipagem rápida aditiva via impressão em 3D. Como estes dispositivos são protótipos e não são um produto comercial licenciado, são chamados de Dispositivos de Auxílio Humano (DAH).

Os projetos estão disponíveis em arquivos de impressão 3D e foram desenvolvidos por pesquisadores, engenheiros e inventores anônimos em uma rede de cooperação via internet a mais de uma década atrás. Os projetos desenvolvidos são disponibilizados na página de internet do E-Nable ([enablingthefuture.org](http://enablingthefuture.org)) de forma gratuita e com código aberto (*open source*). Informações sobre o E-Nable devem ser obtidas via sua página na internet.

O processo de prototipagem rápida aditiva (Alcalde e Wiltgen, 2018) foi desenvolvido para criar protótipos para testes e ensaios de forma mais rápida e com menor custo (Júnior, *et al.* 2018) do que as formas tradicionais de manufatura. A grande diferença que existe entre os processos de manufatura e a manufatura aditiva, que utiliza uma impressora 3D, estão relacionados a forma como este processo faz uso da matéria prima (Nishimura *et al.*, 2016).

A Manufatura Aditiva, como o próprio nome diz adiciona matéria prima no processo de fabricação, ou seja, faz uso de uma quantidade de matéria prima muito próxima da quantidade necessária para confeccionar o objeto. Em geral a matéria prima é depositada sobre uma plataforma para formar o objeto a cada camada. Na Manufatura Subtrativa, a matéria prima é subtraída, ou seja, retirada de material para que o objeto seja construído. Ao fazer isto, note que é necessário ter mais matéria prima do que a quantidade realmente útil para a fabricação do objeto, tal como faz um torno ou uma fresa, máquinas tradicionais de usinagem. Na Manufatura Formativa, utiliza a matéria prima na forma de um líquido com várias densidades diferentes para preencher uma forma, ou molde, que pode ser construído via a manufatura aditiva ou subtrativa. Neste processo, a quantidade de matéria prima é muito próxima da quantidade necessária para confeccionar o objeto, de forma similar ao que ocorre na manufatura aditiva. Na Figura 1 é possível observar os três processos de manufatura.

A manufatura aditiva, por adicionar apenas a quantidade útil de matéria prima para construir um objeto é mais econômica e rápida. Isto porque o uso da matéria prima é menor do que a manufatura tradicional subtrativa, e mais rápida do que a formativa, dado que a mesma necessita de manufatura aditiva ou subtrativa na construção do molde.

Máquinas de prototipagem rápida aditiva desenvolvidas até hoje atendem aos três principais tipos de clientes: os amadores que fazem uso de impressoras pessoais, ou *Home Office* de pequeno porte e custo reduzido, os pequenos e médios empresários que fazem uso de impressoras de porte médio e custo relativamente acessível para pequena produção de até 2.000 (duas mil) peças por mês, chamadas de impressoras profissionais ou comerciais, e por fim, as impressoras industriais de grande porte e alto custo geralmente empregadas em grandes centros de usinagem no qual a aplicação não é exatamente na produção, mas para o desenvolvimento de protótipos e matrizes utilizadas para acelerar a produção de manufatura tradicional (Zaparolli, 2019).

Esta pesquisa foi desenvolvida para as máquinas de impressão 3D chamadas de pessoais, de pequeno porte e de baixo custo (Deusdará *et al.*, 2016), inclusive fez parte desta pesquisa adaptar o arquivo de uma mão mecânica tradicional do E-Nable, de tal forma, a facilitar o processo de construção e de montagem da mão mecânica, além de disponibilizar modificações no polegar e dedo indicador, para facilitar o processo de segurar objetos e manipular as telas capacitivas (*touch screen*) de dispositivos móveis como telefones celulares e *tablets*, respectivamente.

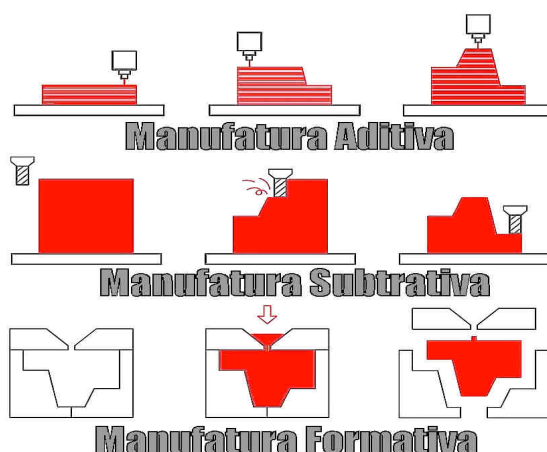


Figura 1. Tipos de Processos de Manufatura (Aditiva, Subtrativa e Formativa). Em vermelho o objeto construído.  
(Adaptada de Rajiv Desai, 2018 (<http://drrajivdesaimd.com>))

## 2. O QUE É A PROTOTIPAGEM RÁPIDA ADITIVA

A prototipagem rápida aditiva é baseada no uso das máquinas de impressão 3D (Yongnian *et al.*, 2009). A impressora 3D mais utilizada e difundida no mundo é baseada em um sistema de extrusão de plásticos moldados a altas temperaturas (*termoplásticos*), conhecida como FDM (*Fused Deposition Modeling*) que é o processo de deposição de material termoplástico fundido sobre uma mesa de impressão no qual é construída camada por camada do objeto (Canciglieri, *et al.*, 2015, Bak *et al.*, 2013 e Goldberg, 2014).

A matéria prima utilizada em máquinas 3D FDM para construção de um objeto disponibilizada na forma de um cordão de filamento plástico bobinado em carretéis de aproximadamente 1kg, com espessura de 1,75 mm de diâmetro, e os tipos de plásticos mais comuns são o ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) e o PLA (*Polylactic Acid*), ambos produzidos em várias cores diferentes conforme a necessidade. O termoplástico mais fácil de utilizar, com melhor custo/benefício é o PLA. Este termoplástico é biodegradável, além de poder ser reaproveitado na confecção de novos filamentos para impressão 3D (Chua, 2010 e Volpato, 2007).

Apesar do tempo de manufatura da prototipagem rápida aditiva não ser curto como o desejado, ainda sim é uma opção mais rápida e de menor custo (incluindo o material) do que outros processos de manufatura tradicionais.

## 3. CONSTRUÇÃO DE DISPOSITIVOS DE AUXÍLIO HUMANO (DAH) IMPRESSOS EM 3D

Como estes DAH são construídos por voluntários, ou por familiares dos usuários, estes arquivos podem ser modificados conforme a necessidade de cada usuário, ou seja, são personalizados. Os arquivos de impressão e de projeto dos DAH, podem ser baixados gratuitamente pela internet na página do E-Nable.

A grande vantagem destes DAH impressos em 3D (Guerra Neto *et al.*, 2018, Silva *et al.*, 2014 e Júnior *et al.*, 2018), decorre do fato que a mão mecânica, não possui nem sensores e nenhum tipo de acionamento elétrico, e assim, não necessita de fonte de energia elétrica.

Todo o processo de funcionamento é mecânico utilizando apenas a energia mecânica proveniente do movimento das articulação das juntas do corpo humano. Do punho, quando o DAH é uma mão mecânica (Figura 2A), ou do cotovelo quando o DAH é um braço mecânico (Figura 2B). Esta pesquisa foi realizada baseada no aperfeiçoamento de uma mão mecânica do E-Nable chamada *Raptor Hand*, que é um dispositivo que faz uso da energia mecânica humana do punho para o acionamento de fechar e abrir a mão para manipular objetos. Foi desenvolvido especialmente para

manufatura aditiva via impressão 3D. Na Figura 2, existem dois dispositivos doados pelo autor principal para crianças no Brasil entre 2014 e 2015. Na Figura 2A, é possível observar os tendões (elásticos e rígidos) que são responsáveis pelo movimento da mão quando o punho é flexionado. Quando isto ocorre, a mão se fecha devido aos tendões rígidos, e se abre automaticamente devido aos tendões elásticos.

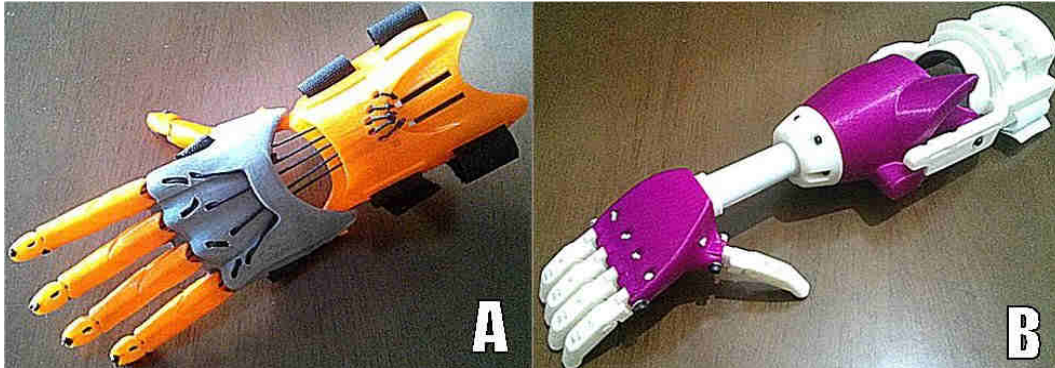


Figura 2. Mão DAH (A) e Braço DAH (B). Ambos construídos em impressora 3D de baixo custo.  
(Próprio Autor)

#### 4. APERFEIÇOAMENTOS E MELHORIAS NO DAH DE CÓDIGO ABERTO RAPTOR HAND

O DAH funcional e capaz de substituir movimentos básicos de uma mão ou um braço humano, acionados apenas por energia mecânica humana, de baixo custo, leves, versáteis e de código aberto (*open source*) podendo ser confeccionado em qualquer impressora 3D. Isso é realidade desde 2008 na organização não governamental do E-Nable.

Devido as necessidades modernas como o uso de aparelhos portáteis (celulares e *tablets*), foram realizadas modificações importantes nos dedos, na palma, nas ancoragens dos tendões, nos pinos de travamento, do suporte do polegar, na movimentação independente do dedo indicador e o novo canal no dedo indicador para a passagem do sistema de condução capacitiva até a extremidade do dedo.

O sistema de suporte do polegar, agora rotacional, permite ao usuário modificar o ângulo da posição de travamento para permitir segurar com mais facilidade um aparelho celular. Na Figura 3A, nota-se o movimento de pinça e o acionamento individual do dedo indicador. A Figura 3B, apresenta a vista explodida das peças da *Raptor Hand* modificada nesta pesquisa, as peças em vermelho são as que sofreram mais modificações.

A palma da mão foi dividida em três partes, para facilitar o movimento, proporcionar mais conforto e leveza ao usuário, e diminuir o custo de fabricação, tanto em tempo, quanto em quantidade de matéria prima.

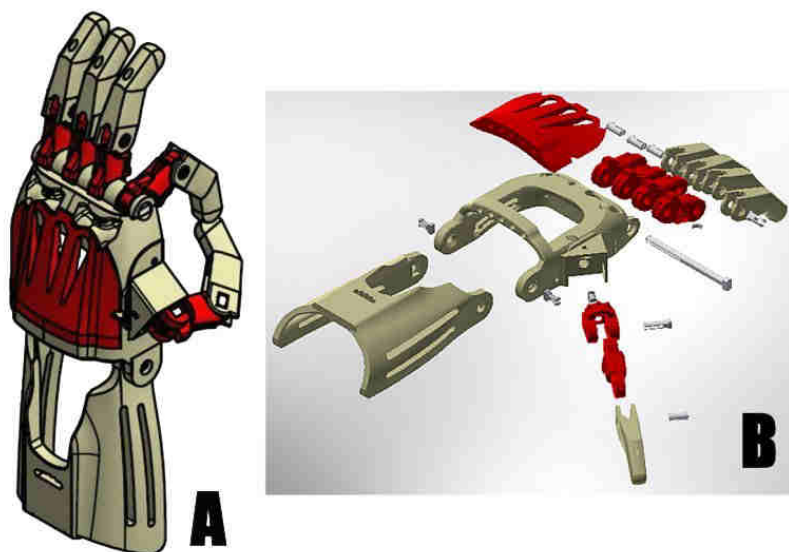


Figura 3. Projeto da mão *Raptor Hand* modificada DAH completa (A) e visão explodida DAH modificado (B).  
Em vermelho as peças que foram as mais modificadas do DAH nesta pesquisa.  
(Próprios Autores)

Outra modificação importante, principalmente para os jovens, é a condução capacitiva na ponta do dedo indicador. O próprio dedo indicador, além das modificações internas para permitir tornar o DAH capacitivo, também passou a ter a opção de acionamento individual. A capacitância que permite acionar as telas *touch screen*, nada mais é do que um sistema com fio de cobre bem fino que proporciona colocar em contato elétrico a palma ou punho do usuário direto com a ponta do dedo indicador, com uma pequena borracha condutiva amarela (círculo vermelho na Figura 4A) que permite fazer uso de um celular, assim como, pode ser visto na Figura 4B o DAH modificado desbloquear um aparelho celular.



Figura 4. Mão DAH flexionada (A) e dedo indicador com o *touch screen* (B).  
(Próprios Autores)

## 5. CONCLUSÕES

A prototipagem rápida aditiva é uma ferramenta útil para ajudar crianças e jovens que necessitam de um DAH. Sem dúvida, é uma opção financeiramente mais atrativa, devido aos elevados valores das próteses comerciais, cerca de 40 (quarenta) a 80 (oitenta) vezes o valor de um DAH impresso em 3D FDM cujo custo é de ~R\$1.500,00 (mil e quinhentos reais), considerando a energia elétrica, cordas, elásticos, velcros, colas, ferramentas e a matéria prima (termoplástico), sem contabilizar o custo da manutenção e hora máquina de fabricação em 3D.

Sua durabilidade do DAH é indeterminada, mas devido ao desgaste natural do termoplástico e da sua rigidez característica, o DAH impresso em 3D FDM deve durar em torno de 02 (dois) anos. O DAH em 3D FDM é frágil, não pode ser molhado ou exposto a altas temperaturas, nem mesmo a períodos prolongados no sol. Apesar disso, é uma boa alternativa de inclusão social.

Durante esta última década pesquisando e desenvolvendo DAH foi possível perceber que as crianças possuem uma adaptação natural imediata a estes dispositivos. Inclusive quase sempre solicitam os dispositivos com cores vivas e de destaque. Toda vez que é perguntada a cor para o DAH, ou porque da escolha de uma cor tão vibrante, como pode ser visto nas Figuras 2A e 2B (DAH doados a crianças), a resposta é sempre a mesma: quero que todos vejam que sou “biônico”. Diferentemente do que um adulto faria, ao tentar disfarçar o uso de um DAH, as crianças e jovens fazem questão de mostrar e passam a utilizar os dispositivos de forma rotineira.

A montagem do DAH aqui apresentado ficou mais simples devido as modificações, permitindo ajustar e inserir mais facilmente os tendões e os pinos de travamento dos dedos. Quanto ao sistema capacitivo, orientações vão permitir fazer a montagem detalhadamente, incluindo o diâmetro e o comprimento do condutor, além do local correto para a fixação do mesmo para permitir o contato entre a pele do usuário e a extremidade do dedo indicador com a borracha condutiva.

A fabricação deste novo dispositivo ficou mais rápida (cerca de 30%), o tempo de montagem ficou menor (cerca de 25%), peso ficou menor (cerca de 15%) proporcionando maior conforto.

Os resultados desta pesquisa foram publicados na dissertação de mestrado do engenheiro que é o co-autor deste artigo. As orientações de montagem e de impressão 3D estão sendo preparados junto com os arquivos de impressão 3D (CAD, STL e OBJ) que serão enviados e disponibilizados de forma gratuita na página do E-Nable na internet.

O papel da ciência é prover e permitir que os avanços tecnológicos possam alcançar de forma ampla e acessível toda a população, ajudando a melhorar a vida dos seres humanos.

## 6. AGRADECIMENTOS

O autores agradecem a Universidade de Taubaté – UNITAU pela oportunidade de ministrar disciplinas e desenvolver a pesquisa na instituição como professor doutor convidado do programa de Mestrado em Engenharia Mecânica, e também, por ser estudante do programa de Mestrado em Engenharia Mecânica. O autor principal aproveita a oportunidade para agradecer o apoio financeiro concedido pela Empresa de Pesquisa, Tecnologia e Serviços da Universidade de Taubaté – EPTS que permitiu a participação neste evento.

## 7. REFERÊNCIAS

- Alcalde, E. e Wiltgen, F. “Estudo das tecnologias em prototipagem rápida: passado, presente e futuro” Revista de Ciências Exatas, Universidade de Taubaté (UNITAU), v. 24, n. 2, p. 12-20, 2018  
<<http://periodicos.unitau.br/ojs/index.php/exatas/article/view/2757>>.
- Bak, D., “Rapid prototyping or rapid production? 3D printing processes move industry – towards the latter” Assembly Automation, v.23 (4), p. 345, 2013 <<http://doi.org/10.1128/AAC.03728-14>>.
- Canciglieri, O. J. et al. “Método de decisão dos processos de prototipagem rápida na concepção de novos produtos” Gestão de Produção, São Carlos, v. 22, n. 2, p. 345-355, 2015.
- Chua, C.K., Leong, K.F., Lim, C.S., 2010 *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. World Scientific, London.
- Deusdará, A.L.A., Rocha, P.S., Martins, A.B., Coelho, M.A. “A utilização da impressora 3D como solução aos altos custos das próteses de membros” In *Proceedings of XIII EVIDOSOL e X CILTEC*, junho, 2016 <<http://evidosol.textolivre.org>>.
- Goldberg, D., “The History of 3D Printing” Product Design and Development, p. 14–17, 2014 <<http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1108/17506200710779521>>.
- Guerra Neto, C.L.B., Nagem, D.A.P., Hékis, H.R., Coutinho, K.D., Valentim, R.A.M., 2018 *Tecnologia 3D NA SAÚDE. Uma visão sobre Órteses e Próteses*. Tecnologias Assistivas e Modelagem 3D. SEDIS-UFRN Editora UFRN.
- Júnior, J.L.R., Cruz, L.M.S., Sarmanho, A.P.S., “Impressora 3D no desenvolvimento de pesquisas com próteses” Rev. Interinst. Bras. Ter. Ocup. Rio de Janeiro, v.2, p. 398- 413, 2018.
- Nishimura, P.L.G., Rodrigues, O. V., Júnior, G.B., da Silva, L.A., “Prototipagem rápida: um comparativo entre uma tecnologia aditiva e uma subtrativa”. In *Proceedings of the Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design*, Belo Horizonte, Outubro 04-07, 2016.
- Silva, J.V.L., Maia, I.A., 2014 *Desenvolvimento de dispositivos de tecnologia assistiva utilizando impressão 3D. Reflexões Sobre Tecnologia Assistiva. I* Simpósio Internacional de Tecnologia Assistiva. Centro Nacional de Referência em Tecnologia Assistiva, CTI Renato Archer. Campinas, SP, 2ª versão.
- Volpato, N., 2007 *Prototipagem Rápida: tecnologias e aplicações*. Edgard Blucher, 1ª edição.
- Yongnian, Y. N., Shengjie, L. I., Renji, Z., e Feng, L. I. N., “Rapid Prototyping and Manufacturing Technology?” Principle , Representative Technics , Applications and Development Trends, v.14, p. 1–12, 2009.
- Zaparolli, D. “O avanço da impressão 3D” Revista Pesquisa FAPESP, v. 276, p. 60-65, Fevereiro, 2019.

## 8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

## **ADDITIVE RAPID PROTOTYPING APPLIED IN HUMAN AID FUNCTIONAL DEVICES**

### **Filipe Wiltgen**

Universidade de Taubaté – UNITAU  
Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica  
lfwbarbosa@gmail.com

### **Eduard Alcalde**

Universidade de Taubaté – UNITAU  
Mestrando em Engenharia Mecânica  
eduard\_ga@hotmail.com

**Abstract.** *The aim of this article is to present a versatility of the technique of applied additivity in development and construction of human aid devices (HAD) through additive rapid prototyping search via three - dimensional (3D) printer. The knowledge acquired from specialists in orthopedics has benefited biomechanical engineering in the development of prostheses and orthotics since emergence of 3D printers. This fact, which makes it possible to develop and test new ideas quickly, and with the option to make them as a personalized device for each patient. However, costs of this area are almost always inaccessible to a large part of population. The project was developed as a one decade, was developed by a set of engineers all over the world. The project has made a non-profit organization (E-Nable) whose mission is to find for a person who needs a HAD. This article brings the improvement after harvest of new technologies, such as new adaptations made for production of 3D parts, assembly of parts and versatility of the use of mechanical hand in plastic.*

**Keywords:** *Additive Manufacturing. Rapid Prototyping. 3D printing. Prototype. Human Aid Device.*

### **RESPONSIBILITY NOTICE**

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.