

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

FÁBIO KIEI NAKASONE

MANUFATURA ADITIVA DE MECANISMOS SEM MONTAGEM APLICADA NO  
DESENVOLVIMENTO DE UM EFETUADOR FLEXÍVEL

São Carlos - SP  
2024

FÁBIO KIEI NAKASONE

MANUFATURA ADITIVA DE MECANISMOS SEM MONTAGEM APLICADA NO  
DESENVOLVIMENTO DE UM EFETUADOR FLEXÍVEL

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
da Universidade Federal de São Carlos,  
para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Mecânica.

Orientador: Flávio Yukio Watanabe

São Carlos – SP  
2024

**Nakasone, Fábio Kiei**

**Manufatura aditiva de mecanismos sem montagem aplicada no desenvolvimento de um efetuator flexível / Fábio Kiei Nakasone -- 2024. 78f.**

**Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos  
Orientador (a): Flávio Yukio Watanabe  
Banca Examinadora: Rafael Vidal Aroca, Roberto Eiki Oshiro  
Bibliografia**

**1. Manufatura aditiva. 2. Mecanismos sem montagem. 3. Efetuator flexível. I. Nakasone, Fábio Kiei. II. Título.**

**Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)**

**DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR**

**Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Fábio Kiei Nakasone, realizada em 25/11/2024.

**Comissão Julgadora:**

Prof. Dr. Flávio Yukio Watanabe (UFSCar)

Prof. Dr. Rafael Vidal Aroca (UFSCar)

Prof. Dr. Roberto Eiki Oshiro (EESC/USP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

## **AGRADECIMENTO**

À Deus, pela inspiração e fé.

Ao Professor Flávio, pela orientação, confiança e auxílio.

À Sandra, pela compreensão, incentivo e conselhos nos momentos de desânimo.

À minha família, pela motivação e paciência.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo incentivo à pesquisa.

## RESUMO

O processo de manufatura aditiva (MA), ou impressão 3D, pode ser aplicado tanto para produção de protótipos com finalidades apenas visuais, assim como de peças funcionais para aplicações finais. A MA possibilita a produção de peças complexas e personalizadas, sem a necessidade de várias etapas de processos de fabricação realizadas em equipamentos convencionais. A manufatura aditiva é aplicada em diferentes áreas, incluindo a de automação industrial utilizando dispositivos flexíveis produzidos por meio deste processo, visando uma maior eficiência nas linhas de produção com a distribuição proporcional de forças de baixo impacto, maior grau de liberdade dos efetuadores e a interface segura entre máquinas e humanos em sistemas de manipulação de objetos. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um estudo sobre o método de manufatura aditiva de mecanismos sem montagem (*non-assembly mechanisms*), aplicado no projeto de efetuadores flexíveis para aplicações educacionais, e analisar o comportamento mecânico da estrutura física, por meio de ensaios em bancada de teste no manuseio objetos de diferentes formas. São apresentados os processos de manufatura aditiva, impressão de mecanismos sem montagem, materiais utilizados na confecção dos efetuadores, sensores utilizados, superfícies texturizadas, tipos e sistemas de acionamento dos dispositivos flexíveis. A sequência de atividades consistiu em desenvolver o efetuator, selecionar o mecanismo de acionamento, produzir os efetuadores por MA, desenvolver o mecanismo de acionamento, selecionar texturas, realizar ensaios e analisar os dados obtidos. Durante os ensaios de manuseio de objetos com diferentes geometrias e massas, tabelas e gráficos foram gerados demonstrando o melhor desempenho do protótipo na posição vertical e com a textura de EVA homogênea.

**Palavras-chave:** impressão 3D; efetuator; garra; robótica.

## **ABSTRACT**

The additive manufacturing (AM) process, or 3D printing, can be applied both to the production of prototypes for visual purposes only, as well as functional parts for final applications. AM enables the production of complex and personalized parts, without the need for several manufacturing process steps carried out on conventional equipment. Additive manufacturing is applied in different areas, including industrial automation using flexible devices produced through this process, aiming for greater efficiency in production lines with the proportional distribution of low impact forces, greater degree of freedom of effectors and the interface between machines and humans in object manipulation systems. The objective of this work is to develop a study on additive manufacturing of non-assembly mechanisms, applied to the design of flexible effectors for educational applications, and to analyze the mechanical behavior of the physical structure, through tests on a test bench in handling objects of different shapes. Additive manufacturing processes, printing of mechanisms without assembly, materials used to manufacture the effectors, sensors used, textured surfaces, types and drive systems of flexible devices are presented. The sequence of activities consists of developing the effector, selecting the drive mechanism, producing the effectors by AM, developing the drive mechanism, selecting textures, carrying out tests and analyzing the data obtained. During testing of handling objects with different geometries and masses, tables and graphs were generated demonstrating the best performance of the prototype in a vertical position and with a homogeneous EVA texture.

**Keyword:** 3D printing; handler; claw; robotics.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Jateamento de aglutinante	12
Figura 1.2 – Deposição com energia direcionada	12
Figura 1.3 – Extrusão de material	13
Figura 1.4 – Jateamento de material	13
Figura 1.5 – Fusão de leito de pó	14
Figura 1.6 – Laminação em folha	14
Figura 1.7 – Fotopolimerização em cuba	15
Figura 1.8 – Ação de um efetuator flexível	16
Figura 2.1 – Etapas do processo de Manufatura Aditiva	18
Figura 2.2 - Descrição da extrusora do equipamento de FFF	21
Figura 2.3 – Manufatura aditiva de um mecanismo sem montagem	22
Figura 2.4 – Modelos de juntas esféricas	23
Figura 2.5 – Atuador com arquitetura de origami	24
Figura 2.6 – Classificação das garras robóticas	25
Figura 2.7 – Tipos de garras	26
Figura 2.8 – Tipos de deformação	26
Figura 2.9 – Tipos de assimetria dos atuadores flexíveis	27
Figura 2.10 – Sistema flexível por fricção	27
Figura 2.11 – Sistema da luva flexível	28
Figura 2.12 – Simulação e atividade prática do atuador flexível	28
Figura 2.13 – Acionamento pneumático de atuadores flexíveis	29
Figura 2.14 – Prótese com sistema de tendão	29
Figura 2.15 – Simulação do atuador flexível	30
Figura 2.16 – Acionamento do dispositivo com três garras	30
Figura 2.17 – Estrutura e esquema elétrico do protótipo	31
Figura 2.18 – Mecanismo de tendão	31
Figura 2.19 - Sistema de acionamento com tendão	32
Figura 2.20 – Localização dos sensores na luva	34
Figura 2.21 – Modelo da garra e posicionamento dos sensores FSR	35
Figura 2.22 – Perfil das superfícies texturizadas	35
Figura 3.1 – Atuador montado	37
Figura 3.2 – Evolução do protótipo	37
Figura 3.3 – Defeitos nas peças impressas	38

Figura 3.4 – Motor DC 3-6V com Caixa de Redução e Eixo Duplo	39
Figura 3.5 – Impressora 3d Ender 3	39
Figura 3.6 – a) efetuador, b) estrutura da garra e c) conjunto de engrenagens	40
Figura 3.7 – efetuador com a folga das articulações	40
Figura 3.8 – Configuração para impressão	41
Figura 3.9 – Garra montada	42
Figura 3.10 – Funcionamento da garra	42
Figura 3.11 – Tipos de texturas: a) superfície atoalhada em EVA, b) superfície homogênea em EVA, c) relevo entrelaçado em ABS, d) relevo quadriculado em ABS e e) faixa elástica de média intensidade.	43
Figura 3.12 – Figuras geométricas	43
Figura 3.13 – Deformação nos efetuadores com objetos de formatos: a) quadrado, b) retângulo, c) hexágono e d) círculo	44
Figura 3.14 – Textura anexada ao efetuador	44
Figura 3.15 – Posicionamento da garra nas posições: a) horizontal e b) vertical	45
Figura 3.16 – Processo de acoplar massa no objeto nos sentidos: a) horizontal e b) vertical	45
Figura 3.17 – Dispositivo para medir força: a) dispositivo, b) sensor FSR50N e c) garra pressionando o sensor	46
Quadro 2.1 – Comparativo entre os principais processos de manufatura aditiva	20
Quadro 2.2 – Comparativo entre sistemas de acionamento dos atuadores flexíveis	33
Gráfico 4.1 – Média da massa suportada utilizando texturas em objetos de formatos variados, com desvio padrão, na posição horizontal	47
Gráfico 4.2 – Média da massa suportada utilizando texturas em objetos de formatos variados, com desvio padrão, na posição vertical.	49
Gráfico 4.3 – Relação entre a massa e os valores médios de saída do sensor FSR50N	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Parâmetros utilizados	41
Tabela 4.1 – Média da massa suportada utilizando texturas em objetos de formatos variados na posição horizontal	47
Tabela 4.2 – Média da massa suportada utilizando texturas em objetos de formatos variados na posição vertical	49
Tabela 4.3 – Relação entre a massa e os valores de saída do sensor FSR50N	50
Tabela 4.4 – Valores obtidos pela aplicação de força pela garra no sensor	51

## LISTA DE SIGLAS

PDP – Processo de Desenvolvimento de Produtos CAD – *Computer Aided Design*

MA – Manufatura Aditiva

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

STL – *Stereolithography*

FFF – *Fused Filament Fabrication*

SLA – *Stereolithography*

PBF – *Powder Bed Fusion*

CNC – Controle Numérico Computadorizado

TPU – Thermoplastic polyurethane

ABS – *Acrylonitrile Butadiene Styrene* PETG – *Polyethylene terephthalate glycol*

PLA – *Polylactic acid*

FSR – *Force Sensitive Resistor*

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	11
1.1 Objetivos	16
1.2 Estrutura do texto de dissertação	16
<b>2 MANUFATURA ADITIVA E EFETUADORES FLEXÍVEIS</b>	18
2.1 Processos de manufatura aditiva	18
2.2 Mecanismos sem montagem (Non Assembly Mechanisms)	21
2.3 Materiais utilizados em MA	23
2.4 Tipos de atuadores flexíveis	24
2.5 Sistemas de acionamento dos atuadores flexíveis	27
2.6 Uso de sensores nos robôs flexíveis	34
2.7 Superfícies texturizadas produzidas por MA	35
2.8 Design for Additive Manufacturing (DFMA)	36
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	37
3.1 Desenvolvimento do atuador	38
3.2 Seleção do mecanismo de acionamento	38
3.3 Realizar simulação computacional	39
3.4 Produção do atuador e do mecanismo de acionamento	40
3.5 Seleção e confecção de texturas intercambiáveis	42
3.6 Realização de ensaios	43
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	47
<b>5 CONCLUSÕES</b>	52
<b>REFERÊNCIAS</b>	54
<b>APÊNDICES</b>	59
<b>ANEXOS</b>	73

## 1 INTRODUÇÃO

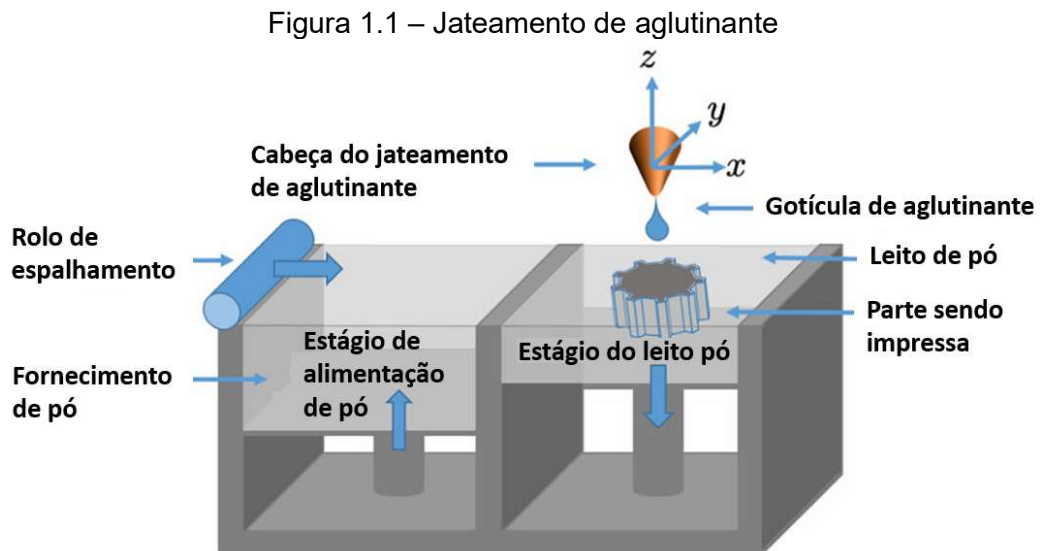
Com consumidores mais exigentes, os quais almejam produtos que simplifiquem as atividades diárias, as empresas buscam atender essas exigências com artigos inovadores em meio à concorrência. Segundo Volpato *et al.* (2017), no Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP), qualidade, competitividade, redução de custo e menor tempo para apresentar o produto no mercado são exigidos. Para desenvolver novos produtos dentro de uma empresa, uma ferramenta importante é a utilização de protótipos que auxiliam na correção de falhas, na comunicação entre os setores envolvidos e no atendimento aos requisitos do cliente.

No final da década de 80, uma técnica de fabricação, chamada de prototipagem rápida, foi desenvolvida, na qual o produto era fabricado por meio de adição de materiais utilizando dados de um software CAD (*Computer Aided Design*), não sendo necessário moldes, ferramentais e minimizando os erros humanos no processo de fabricação. Chamado inicialmente de impressão 3D e atualmente de manufatura aditiva (MA), este processo consiste em produzir um objeto por meio de deposição de material, camada por camada, com base em um modelo digital tridimensional desenvolvido em um software CAD (Rodrigues *et al.*, 2017). O processo de MA pode ser aplicado tanto para produção de protótipos com finalidades apenas visuais ou peças funcionais para aplicações finais. Os materiais depositados podem ser metais, cerâmicas, polímeros, compósitos, ou compostos biológicos (Frazier, 2014). A MA possibilita a produção de peças complexas e personalizadas, sem a necessidade de vários equipamentos e etapas comuns aos processos convencionais.

De acordo com a norma ASTM F2792-12a da *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 2015), os processos de MA foram divididos em 7 categorias: jateamento de aglutinante (*binder jetting*), deposição com energia direcionada (*direct energy deposition*), extrusão de material (*material extrusion*), jateamento de material (*material jetting*), fusão de leito de pó (*powder bed fusion*), laminação em folha (*sheet lamination*) e fotopolimerização em cuba (*vat photopolymerization*). Para a divisão foram levados em conta as fontes de energia, os tipos de materiais de deposição, e o processamento das camadas depositadas.

A norma ISO/ASTM 52900:2015(E) define os processos de manufatura aditiva conforme as características:

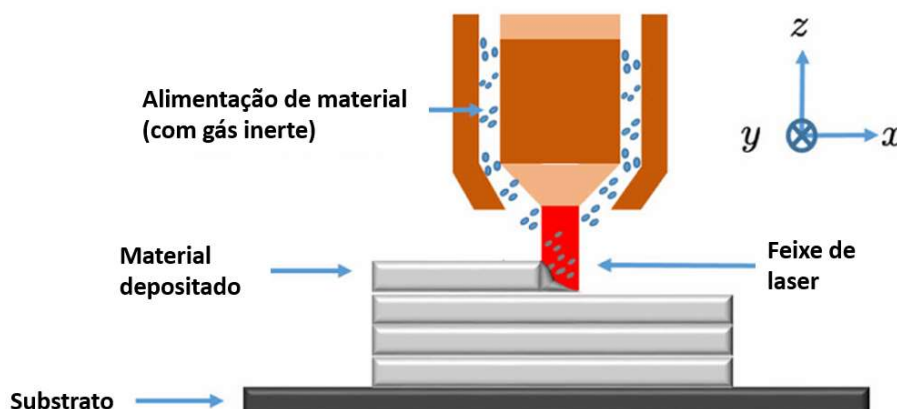
- **Jateamento de aglutinante** (*binder jetting*): processo de fabricação aditiva no qual um agente de ligação líquido é depositado seletivamente para unir materiais em pó, descrito na Figura 1.1.



Fonte: adaptado de Pastre, Quinsat e Lartigue (2021)

- **Deposição com energia direcionada** (*direct energy deposition*): processo de fabricação aditiva no qual energia térmica focada é usada para fundir materiais enquanto eles estão sendo depositados, conforme a Figura 1.2.

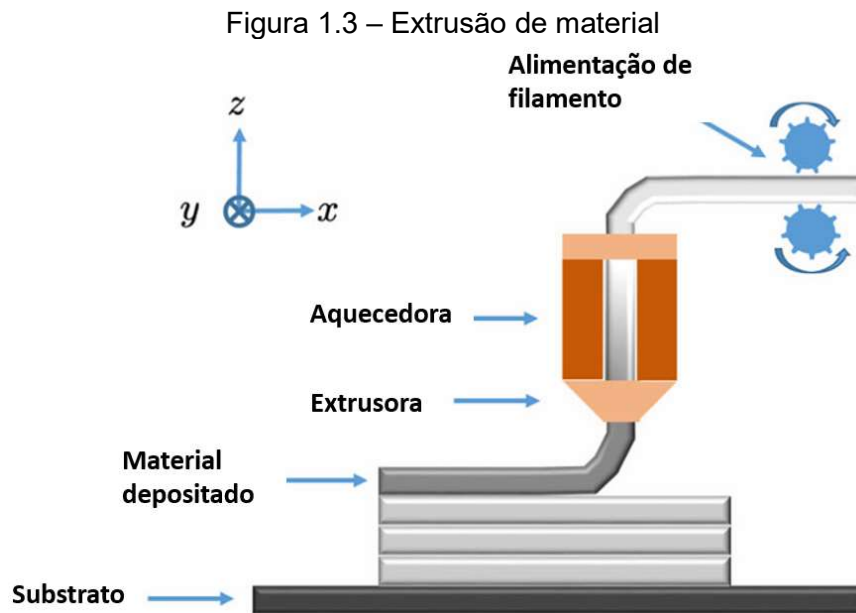
Figura 1.2 – Deposição com energia direcionada



Fonte: adaptado de Pastre, Quinsat e Lartigue (2021)

- **Extrusão de material** (*material extrusion*): processo de fabricação aditiva em que o material é seletivamente dispensado através de um bico ou orifício, como

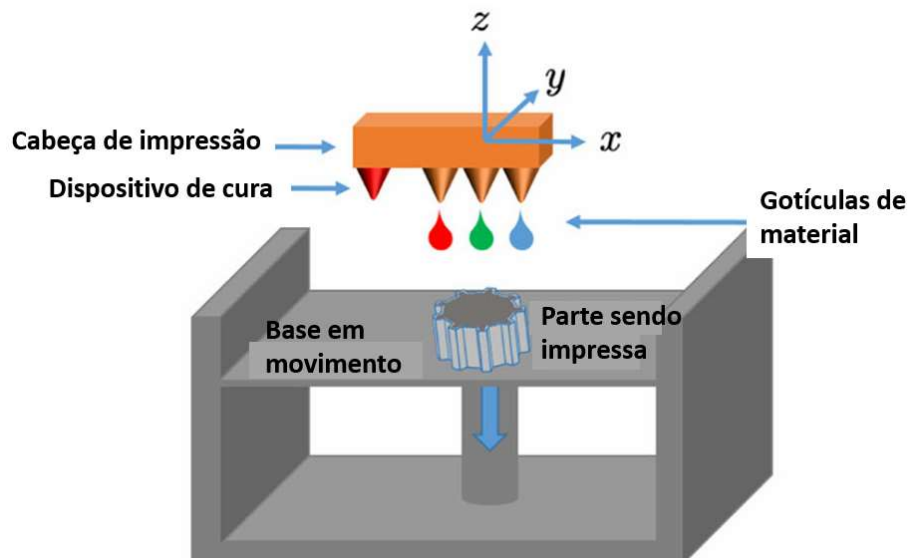
demonstra a Figura 1.3.



Fonte: adaptado de Pastre, Quinsat e Lartigue (2021)

- **Jateamento de material (*material jetting*):** processo de manufatura aditiva no qual gotículas de material de construção são depositadas seletivamente, conforme ilustrado na Figura 1.4.

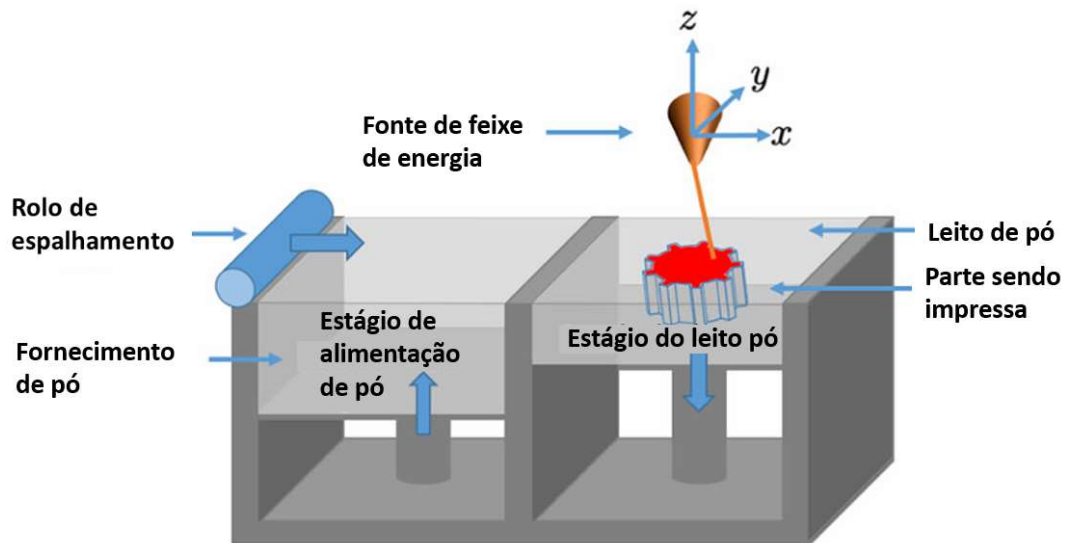
Figura 1.4 – Jateamento de material



Fonte: adaptado de Pastre, Quinsat e Lartigue (2021)

- **Fusão de leito de pó (*powder bed fusion*):** processo de fabricação aditiva em que a energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó, de acordo com a Figura 1.5.

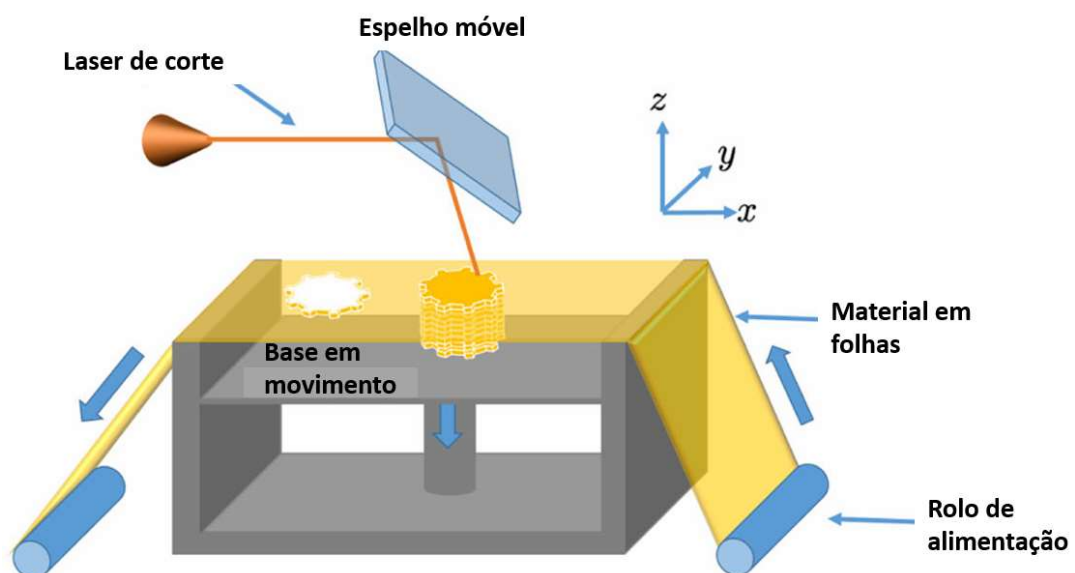
Figura 1.5 – Fusão de leito de pó



Fonte: adaptado de Pastre, Quinsat e Lartigue (2021)

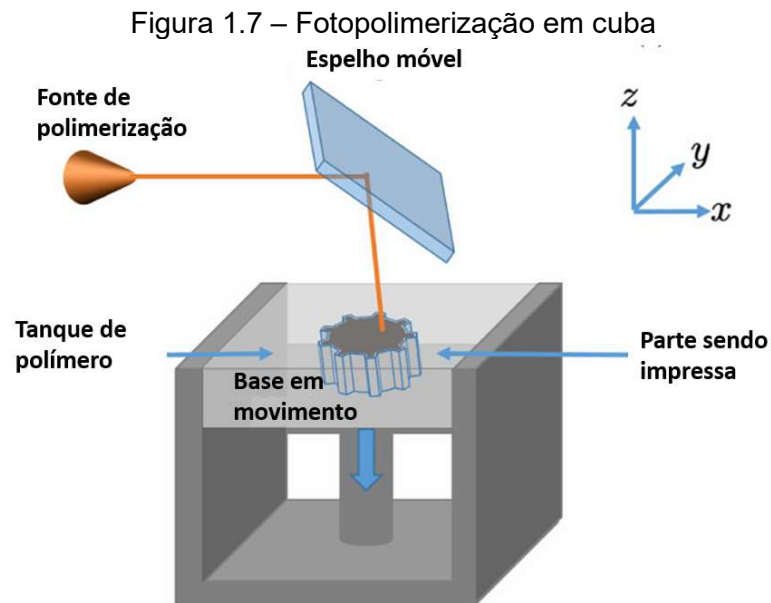
- **Laminação em folha (*sheet lamination*)**: processo de manufatura aditiva em que folhas de material são unidas para formar uma peça, como demonstrado na Figura 1.6.

Figura 1.6 – Laminação em folha



Fonte: adaptado de Pastre, Quinsat e Lartigue (2021)

- **Fotopolimerização em cuba (*vat photopolymerization*)**: processo de fabricação aditiva no qual o fotorpolímero líquido em uma cuba é seletivamente curado por polimerização ativada por luz. A Figura 1.7 demonstra o processo.



Os múltiplos processos de manufatura aditiva estão em evidência com a confecção de protótipos e o crescimento da fabricação de peças finais para as indústrias automotivas, aeroespaciais e desenvolvimento de produtos (Rodrigues *et al.*, 2017).

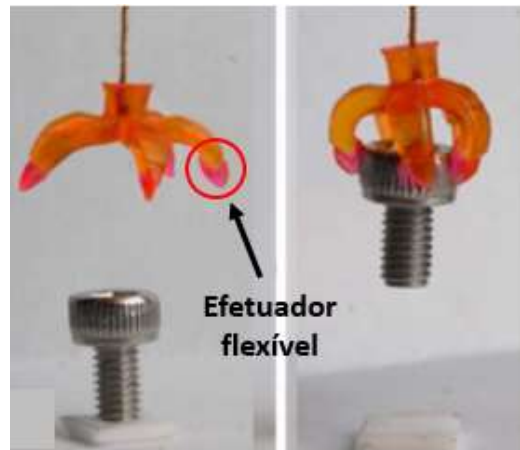
A montagem de mecanismos complexos que possuem juntas multiarticuladas é demorada, desafiadora e os processos de manufatura aditiva têm a habilidade de fabricar mecanismos sem a necessidade de montagem em um passo simples e sem precisar de pós-processamento (Leung; Raza; Zhong, 2021).

Buscando a melhoria da eficiência nas linhas de produção, dispositivos flexíveis, produzidos por manufatura aditiva, foram estudados para o controle e posicionamento preciso das peças, de acordo com Basson, Bright e Walker (2017).

O estudo sobre robôs flexíveis justifica-se, segundo Wallin *et al.* (2018), devido à distribuição proporcional de forças de contato, maior grau de liberdade dos atuadores, a interface segura entre máquinas e humanos em sistemas de manipulação de objetos.

De acordo com Keneth *et al.* (2021), o componente mais importante de um robô flexível é o efetuator devido a responsabilidade de realizar movimentos como agarrar um objeto ou movimentar-se em superfícies. A Figura 1.8 demonstra a atuação de um efetuator flexível.

Figura 1.8 – Ação de um efetuator flexível



Fonte: Pagoli *et al.* (2022)

## 1.1 Objetivos

### Objetivo geral

Desenvolver um estudo sobre o método de manufatura aditiva de mecanismos sem montagem (*non-assembly mechanisms*), aplicado no projeto de efetadores flexíveis para aplicações educacionais, analisando o comportamento mecânico de um protótipo por meio de ensaios de bancada.

### Objetivos específicos

- Levantar os diferentes tipos de efetadores flexíveis, incluindo os mecanismos sem montagem, e dispositivos de acionamento, visando a definição do sistema que será desenvolvido;
- Realizar ensaios em bancada de testes para a caracterização do comportamento do protótipo do efetador desenvolvido;
- Avaliar a viabilidade do protótipo em estudo, visando aprimoramentos futuros e a utilização em aplicações educacionais.

## 1.2 Estrutura do Texto de dissertação

O texto foi estruturado em cinco capítulos: Introdução, Manufatura Aditiva e Efetadores Flexíveis, Materiais e Métodos, Resultados e Discussões e Conclusões.

Na Introdução foram abordados os conceitos iniciais sobre o tema, os objetivos geral e específicos.

No capítulo Manufatura Aditiva e Efetadores Flexíveis, são apresentados conteúdos relacionados à aplicação da manufatura aditiva na fabricação de

efetadores flexíveis.

No capítulo de Materiais e Métodos, é descrito como o efetador foi desenvolvido, do estudo até a produção, os ensaios que serão realizados e a obtenção dos resultados.

Em Resultados e Discussões, com os dados obtidos nos ensaios, foram desenvolvidas planilhas e gráficos em que foram analisadas e discutidas a performance do protótipo em cada etapa dos experimentos.

No capítulo de Conclusões, é feita análise geral do trabalho desenvolvido, dos resultados gerados, se os objetivos estipulados foram alcançados e proposto sugestões para trabalhos futuros.

## 2 MANUFATURA ADITIVA E EFETUADORES FLEXÍVEIS

O presente trabalho possui três pilares: pesquisar tipos de efetadores flexíveis produzidos por manufatura aditiva; analisar acionamentos de efetadores flexíveis; fabricar, ensaiar e analisar o desempenho de um sistema com dois atuadores com superfícies de contato texturizadas. Nesta etapa serão estudados os processos de manufatura aditiva, materiais utilizados na confecção dos efetadores, sensores utilizados, superfícies texturizadas, tipos e sistemas de acionamento dos dispositivos flexíveis.

### 2.1 Processos de manufatura aditiva

O processo de MA possui oito etapas no desenvolvimento do objeto tridimensional digital até o objeto físico fabricado, conforme demonstra a Figura 2.1 descrito por Gibson, Rosen e Stucker (2015).

Figura 2.1 - Etapas do processo de Manufatura Aditiva



Fonte: adaptado de Gibson, Rosen e Stucker (2015)

Os oito estágios são descritos a seguir:

1. Modelagem do objeto em CAD: descrição completa da geometria de um modelo por meio de um sólido, em 3D, utilizando um software CAD;

2. Conversão para o formato STL (*Stereolithography*): converter o formato original do objeto CAD em arquivo STL, dispondo a superfície para a etapa de fatiamento;

3. Manuseio do arquivo STL: fase de configuração e fatiamento do objeto. Nesta etapa será gerado o GCODE do processo, que corresponde a linguagem de programação que controla os movimentos da impressora 3D;

4. Configurações do equipamento: definidos parâmetros de produção como tempos, altura de camadas e material utilizado;

5. Construção: etapa onde o equipamento irá fabricar o objeto;



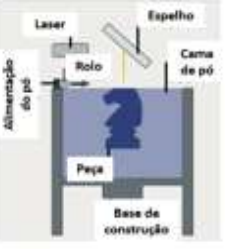
6. Remoção: depois de terminada a confecção da peça, a mesma tem de ser retirada do equipamento;

7. Pós-processamento: fase em que é feito a retirada de suportes e rebarbas, quando necessário;

8. Aplicação: o objeto está pronto para uso. Momento em que é feita utilização do item com aplicação do produto, montagens de conjuntos e pintura quando for relevante.

Wallin, Pikul e Shepherd (2018) e Yap, Sing e Yeong (2020), apresentaram revisões dos processos de manufatura aditiva utilizados na confecção de robôs flexíveis. O Quadro 2.1 foi elaborado para comparar as características dos três processos mais aplicados. O processo de Fabricação por Filamento Fundido (FFF) é o mais acessível e popular da manufatura aditiva utilizando como material polímeros termoplásticos. A Fotopolimerização em cuba (SLA) aplica a intensidade da luz para fotopolimerizar resina construindo um objeto sólido. A Fusão em Leito de Pó (PBF) constrói objetos a partir de material em pó que é fundido por um laser de varredura.

Quadro 2.1 - Comparativo entre os principais processos de manufatura aditiva

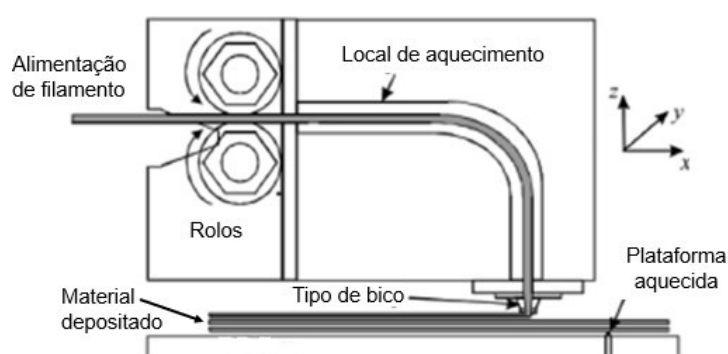
Revisão dos Processos de Manufatura Aditiva empregados na fabricação de robôs flexíveis							
Processo Manufatura Aditiva	Descrição	Ilustração do processo	Material aplicado	Modelo típico	Método de atuação	Vantagens	Desvantagens
<b>Fused Filament Fabrication (FFF)</b>	Filamento termoplástico sólido é extrudado através de um bocal aquecido para derreter, depositar e fundir o material.		Filamento TPE ABS PLA PETG	Garra tubular semelhante a dedos e pinças	Pneumático.	Barato. Relação entre peso e carga alta.	Materiais muito macios ou com alta temperatura de transição são desafiadores para serem impressos corretamente. Os materiais têm geralmente maior dureza.
<b>Stereolithography (SLA)</b>	Um fotopolímero líquido é exposto seletivamente à luz (através de um laser de varredura). A resina líquida polimeriza em uma camada sólida. O objeto é então transladado, o líquido recobre a interface e a próxima camada é exposta de forma semelhante.		Hidrogéis tipo elastômero - resinas de silicone.	Pinças tubulares.	Pneumático.	Alta resolução (0,2 mm de espessura de parede pode ser impresso). Projetos complexos podem ser impressos.	Baixa variedade de materiais. Propriedades de fadiga fracas.
<b>Powder Bed Fusion (PBF)</b>	Um leito de pó termoplástico sólido é aquecido seletivamente por um laser de varredura. Esta irradiação causa derretimento e fusão localizada do material. Uma nova camada de pó é depositada para recobrir o leito e o processo é repetido.		TPU e Nylon (PA12)	Estrutura com articulações e mão com muitos dedos.	Pneumático. Sistema de tendões	Alta resolução. Estruturas complexas podem ser impressas. Não é necessário materiais de suporte.	PA12 não é um elastômero e pode ceder e deformar plasticamente.

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Na categoria de processos de manufatura aditiva por extrusão de material, o método de fabricação por filamento fundido é o mais adotado, segundo Yap, Sing e Yeong (2020). De acordo com Ahmadifar *et al.* (2021), a fabricação por filamentos fundidos (FFF) é um dos processos de manufatura aditiva mais populares na manufatura de peças em polímero ou materiais compostos. O método inicia-se com o modelamento de um objeto sólido em um software CAD e a configuração do arquivo no formato STL. A orientação da construção esperada é configurada em um programa de fatiamento que decompõe em camadas horizontais a seções transversais do produto. Códigos de instrução, no formato GCODE, são gerados e processados pelo equipamento que exercerá o plano de construção.

O equipamento de FFF é descrito como uma máquina CNC conduzindo bicos de extrusão. O material utilizado na construção dos objetos está no formato de filamento acondicionado em carretéis e abastece um cabeçote de extrusão em que será aquecido. Com a alteração do estado físico, a matéria é depositada e solidifica-se conforme há o resfriamento. No final de cada camada acabada, a plataforma aquecida ou o bico extrusor movimenta-se no sentido vertical, de acordo com a altura de camada especificada e retorna a construção. O trajeto e os parâmetros de deposição são configurados conforme o material utilizado, as condições de fabricação e aplicações da peça projetada. O mecanismo de extrusão do filamento é descrito na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Descrição da extrusora do equipamento de FFF



Fonte: Ahmadifar *et al.* (2021)

## 2.2 Mecanismos sem montagem (*Non Assembly Mechanisms*)

Mecanismos móveis requerem a montagem de seus componentes devido ao movimento entre as partes. Uma alternativa proporcionada pela manufatura aditiva é

a produção de mecanismos móveis, em uma única etapa, do dispositivo sem a necessidade de montagem e totalmente funcionais. Esse método é chamado de *non assembly mechanisms* que, na tradução livre, significa “mecanismos sem montagem”. Na busca sistemática na literatura sobre mecanismos sem montagem, Lussemburg, Sakes e Breedveld (2021) utilizaram também a palavra-chave *print-in-place* que na tradução livre é “impresso no lugar”. Os mecanismos sem montagem podem ser classificados em três categorias principais: geometria, materiais e padrões. Na classe de geometria, a funcionalidade do mecanismo depende principalmente da geometria da estrutura, podendo conter um único ou múltiplos corpos. Na divisão dos materiais, a funcionalidade do material é responsável ao funcionamento do mecanismo. Aos mecanismos baseados em padrões, a repetição ou padrão de um bloco de construção é o motivador da ação.

Conforme Cuelar *et al.* (2018), para a fabricação de articulações de alta qualidade em mecanismos sem montagem, é necessário que o processo por MA forneça espessura de camada reduzida durante a produção, sem material de suporte ou que a remoção seja acessível e que não deixe material residual. A utilização do processo de fabricação por filamento fundido (FFF) na confecção de mecanismos sem montagem com juntas ocasionou níveis razoáveis de precisão das peças. Na Figura 2.3 é demonstrado o processo de confecção de um mecanismo sem montagem.

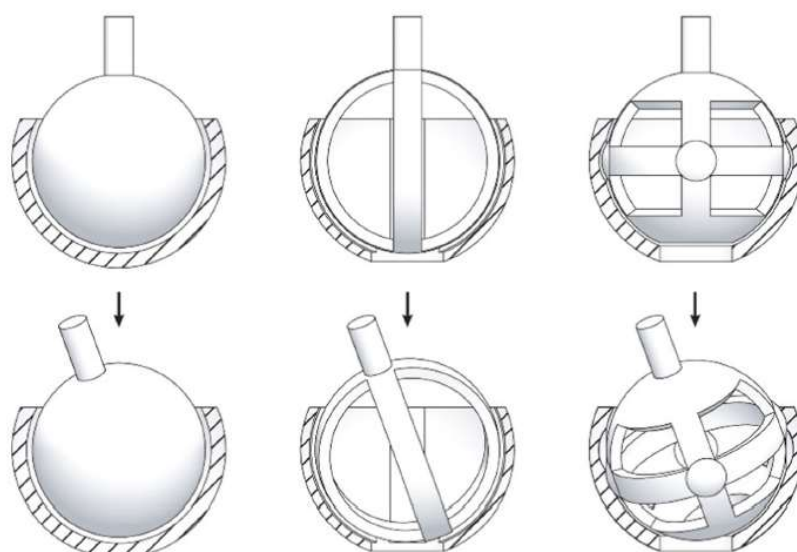
Figura 2.3. Manufatura aditiva de um mecanismo sem montagem



Fonte: Roth *et al.* (2019)

A Figura 2.4 demonstra alguns modelos de juntas esféricas que foram projetadas para serem produzidas por manufatura aditiva pela técnica de mecanismos sem montagem.

Figura 2.4. Modelos de juntas esféricas



Fonte: Lussemburg, Sakes e Breedveld (2021).

A fabricação de robôs flexíveis e atuadores pelo método de mecanismos sem montagem foi bem-sucedida utilizando materiais como polímeros e metais. Projetos de mecanismos sem montagem, impressos por fabricação por filamento fundido (FFF), totalmente funcionais não foram relatados até 2018, de acordo com Cuelar *et al.* (2018). Neste processo, geometria, folga e direção de construção são fatores importantes na produção de mecanismos com articulações, segundo Sörensen, Mouratidis e Engela (2023). Processos de manufatura aditiva em leito de pó são mais adequados na produção de mecanismos sem montagem devido ao pó ser o suporte entre os componentes das articulações como descreve Egan (2023).

### 2.3 Materiais utilizados em MA

Os robôs flexíveis podem ser construídos por uma infinidade de materiais com propriedades mecânicas distintas. Segundo Keneth *et al.* (2021), Stano e Percoco (2021), podem ser utilizados hidrogéis, resinas epóxi, polímeros sólidos, entre outros. Por modelar sistemas flexíveis, os materiais mais comuns a serem aplicados são elastômeros a base de silicone e TPU (*thermoplastic polyurethane*) principalmente em conjuntos pneumáticos.

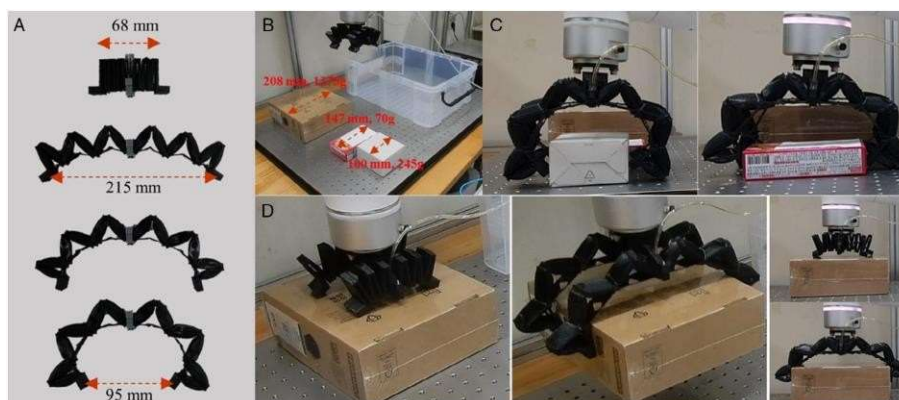
## 2.4 Tipos de efetadores flexíveis

Considerado como fundamental nos robôs flexíveis, o efetador flexível é o componente que executa os movimentos. De acordo com a função de locomoção ou manuseio de objetos, o formato é determinado segundo Pagoli *et al.* (2022), Chen e Wang (2020).

As vantagens da utilização de efetadores flexíveis são: interação com humanos e objetos delicados devido ao material de construção, menos componentes na estrutura, possibilidade de utilizar manufatura aditiva para confecção do dispositivo e implementação em diversas aplicações robóticas de acordo com Talk e Alici (2021).

Kim, Eom e Cho (2021) desenvolveram efetadores com arquitetura de origami que são formas compactas dobráveis fornecendo portabilidade quando em repouso e funcionalidade ao serem acionados. A garra possui duas etapas de movimento em que o primeiro é a expansão de sua estrutura e o segundo de fechá-la moderadamente como demonstra a Figura 2.5.

Figura 2.5 - Efetador com arquitetura de origami



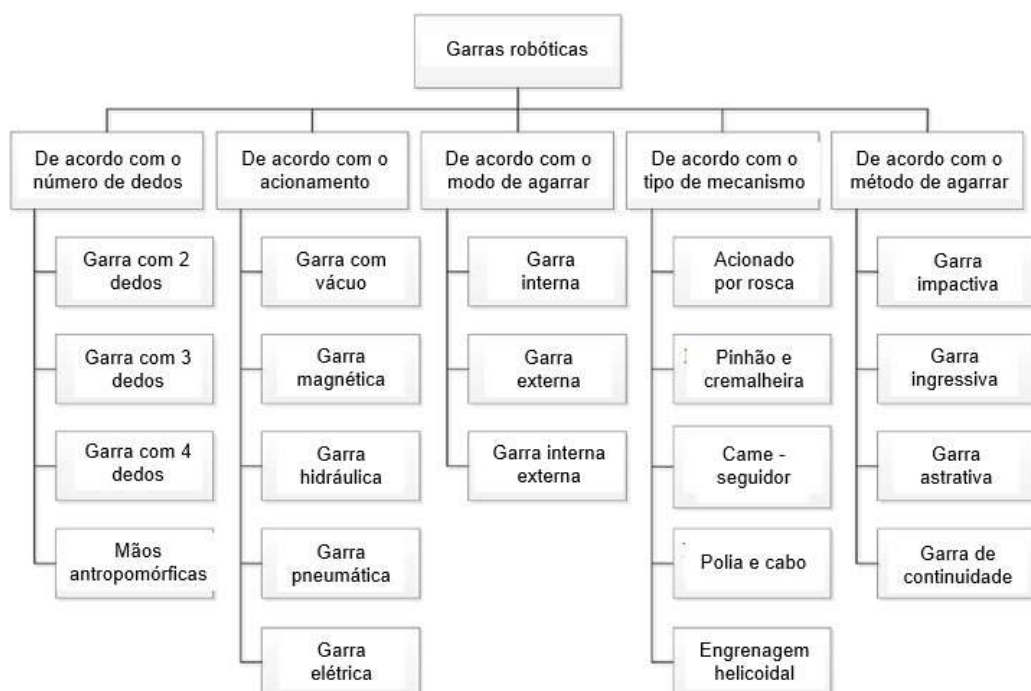
Fonte: Kim, Eom e Cho (2021)

Um tratamento térmico superficial foi aplicado nos efetadores visando conter possíveis vazamentos em sua construção. Os objetos eram aquecidos por duas horas em temperatura de 172° C. Após o procedimento, foi verificado que os componentes tratados suportavam até 5,58 vezes a mais a pressão de acionamento do que o efetador original.

O trabalho de Zhang *et al.* (2020) descreve a classificação de garras robóticas em categorias que incluem o número de dedos, tipo de acionamento, modos de pega, tipo de mecanismo e os princípios físicos de como agarrar o objeto, conforme

fluxograma da Figura 2.6. Na divisão das garras como pegar, há a impactiva (*impactive*), ingressiva (*ingressive*), astrictiva (*astrictive*) e de continuidade (*contigutive*). A primeira refere-se a dispositivos que movimentam os dedos para agarrar o objeto. No tipo ingressiva há a inserção na superfície do objeto por meio de agulhas ou ganchos. A classe astrictiva utilizam forças (magnéticas ou vácuo) de adesão à superfície do objeto. Nas garras de continuidade há o contato entre peça e dispositivo utilizando uma adesão química.

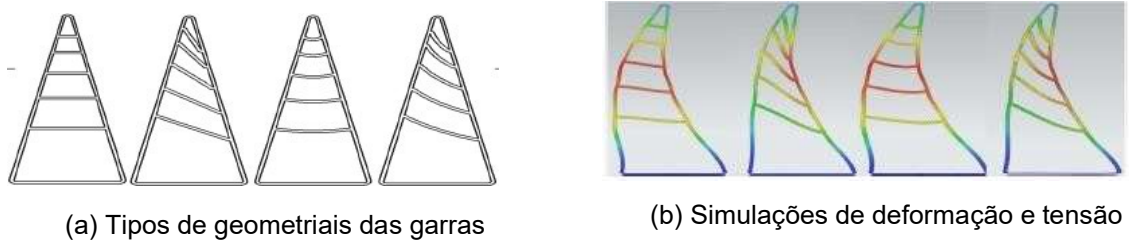
Figura 2.6 - Classificação das garras robóticas



Fonte: Zhang *et al.* (2020)

Basson, Bright e Walker (2017) estudaram o efeito do raio de nadadeira (*Fin Ray Effect*®) em um sistema de agarramento com garras produzidas por manufatura aditiva. Com quatro geometrias diferentes e dois tipos de materiais de fabricação, simulações foram desenvolvidas e analisadas deformações e tensões ao longo da estrutura conforme demonstra a Figura 2.7. Os resultados experimentais demonstraram que a alteração na geometria do atuador afeta a ação de agarrar os objetos.

Figura 2.7 – Tipos de garras

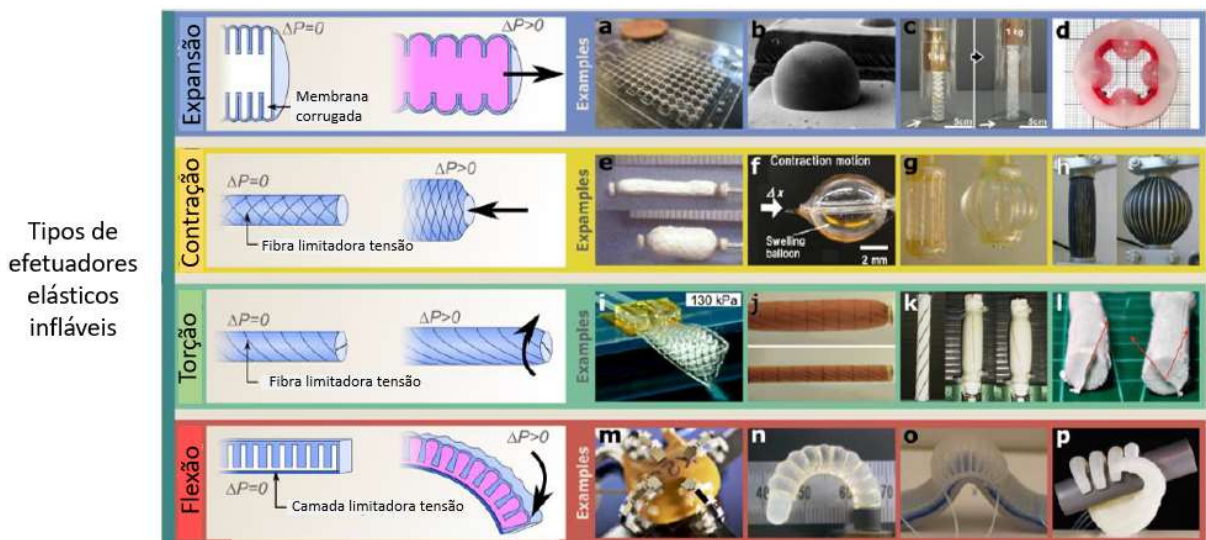


Fonte: Basson, Bright e Walker (2017)

Para manipular objetos frágeis, Basson e Bright (2018) desenvolveram um sistema de garras com controle de manipulação sensível ao toque. Testes para verificar a viabilidade em relação ao número de atuadores, três ou quatro, na garra foram feitos assim como a aplicação gradativa de força ao tocar objetos com diferentes tipos de geometria.

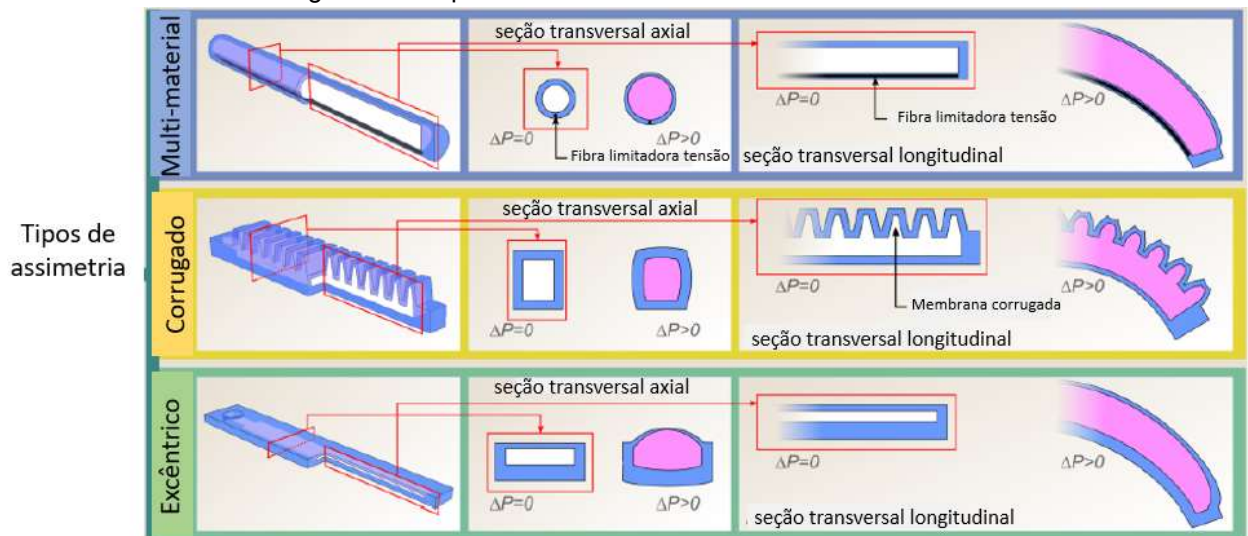
Gorrissier (2017) descreve os tipos de efetadores elásticos infláveis, classificação conforme a deformação (Figura 2.8) e os diferentes tipos de assimetrias (Figura 2.9).

Figura 2.8 - Tipos de deformação



Fonte: Gorrissier (2017)

Figura 2.9 - Tipos de assimetria dos atuadores flexíveis

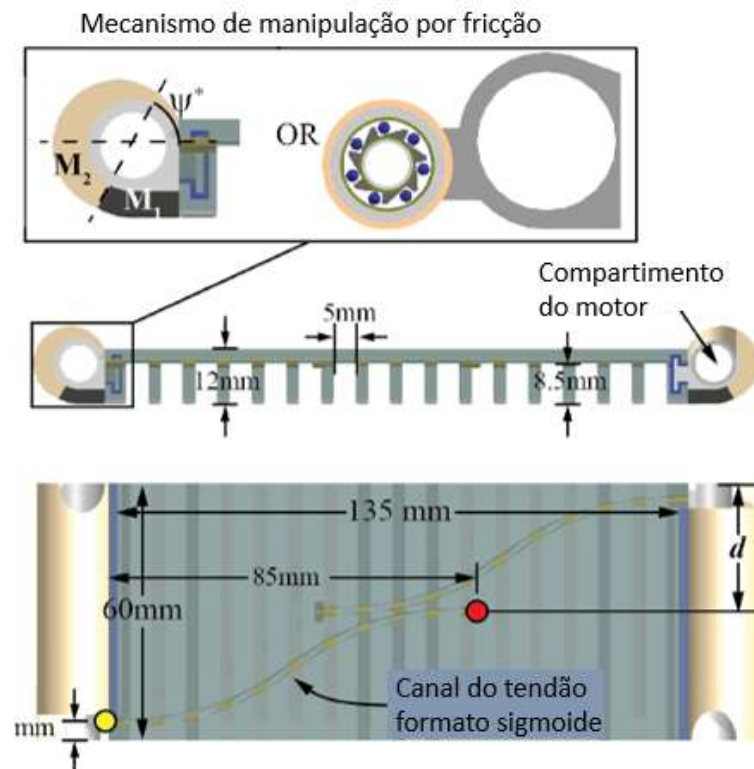


Fonte: Gorrissier (2017)

## 2.5 Sistemas de acionamento dos efetadores flexíveis

Para a movimentação do sistema flexível, Vikas (2016) utilizou manipulação por fricção e atuação de um motor que tensionava um tendão localizado ao longo do objeto (Figura 2.10).

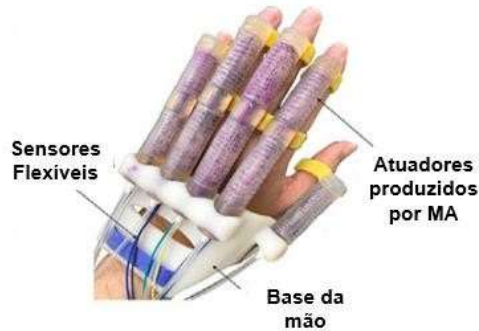
Figura 2.10 - Sistema flexível por fricção



Fonte: Vikas (2016)

Wang (2022) empregou um acionamento pneumático de uma luva flexível que auxilia o movimento de uma mão através de um sistema eletropneumático, conforme demonstra a Figura 2.11.

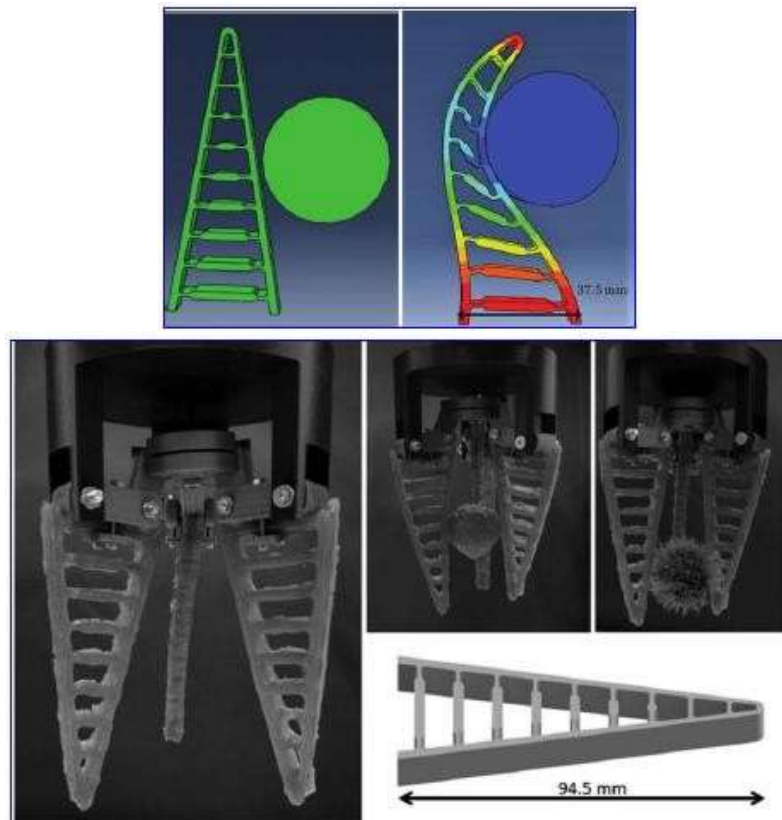
Figura 2.11 - Sistema da luva flexível



Fonte: Wang (2022)

Um outro exemplo de acionamento de efetores flexíveis foi apresentado por Roels *et al.* (2020), que apesar de não utilizar TPU na confecção das peças, pode ser aplicado no projeto seguindo o mesmo raciocínio de segurar algo, conforme demonstrado na Figura 2.12.

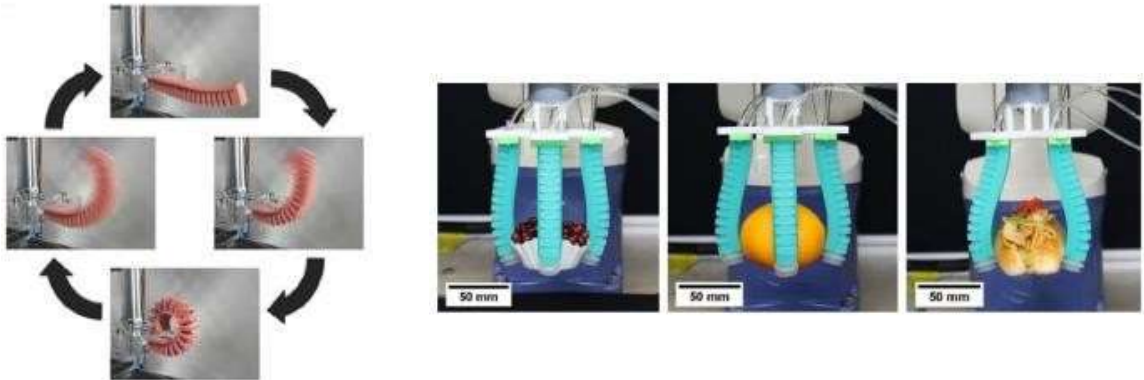
Figura 2.12 - Simulação e atividade prática do efetor flexível



Fonte: Roels *et al.* (2020)

Stano (2021) apresenta acionamentos de efetadores flexíveis por sistemas pneumáticos utilizando um ou mais elementos, conforme demonstra a Figura 2.13.

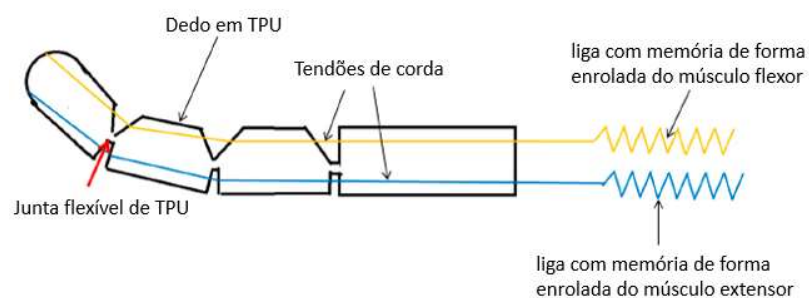
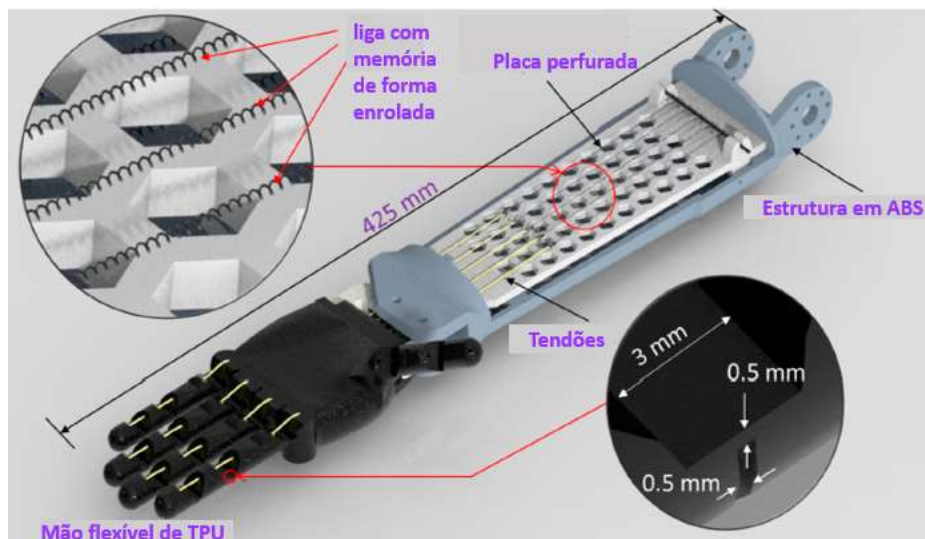
Figura 2.13 - Acionamento pneumático de efetadores flexíveis



Fonte: Stano (2021)

Deng (2020) desenvolveu um sistema de contração e alongamento dos dedos de uma prótese confeccionada em manufatura aditiva em TPU (Figura 2.14). Os movimentos são acionados por servomotores e controlados por programação em Arduino.

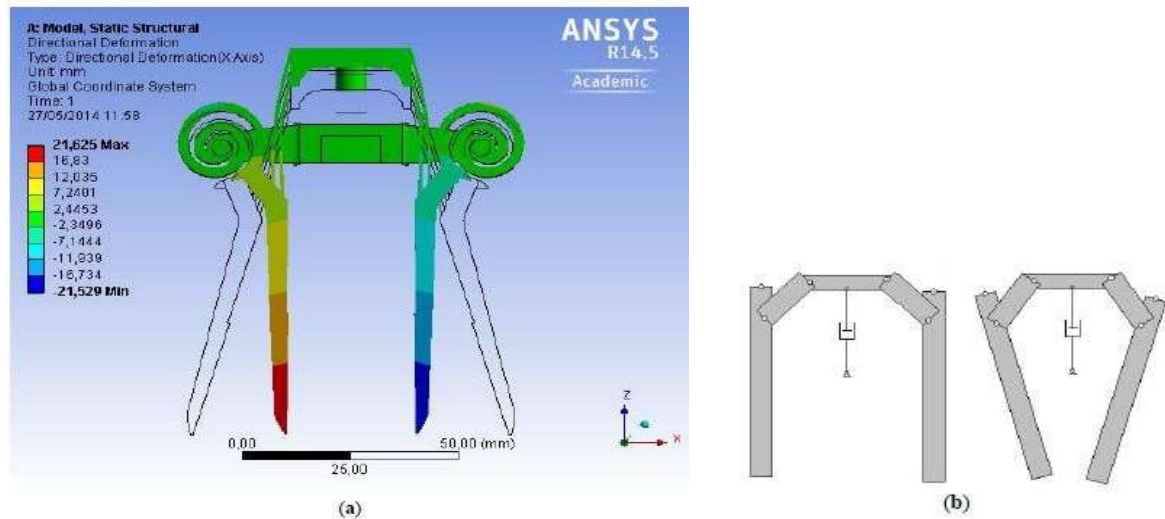
Figura 2.14 - Prótese com sistema de tendão



Fonte: Deng (2020)

Blanes (2014) estudou um mecanismo em que há a interação entre o acionamento pneumático e um conjunto de efetores flexíveis. Na Figura 2.15, ele compara a versão em estudo com uma de corpos rígidos.

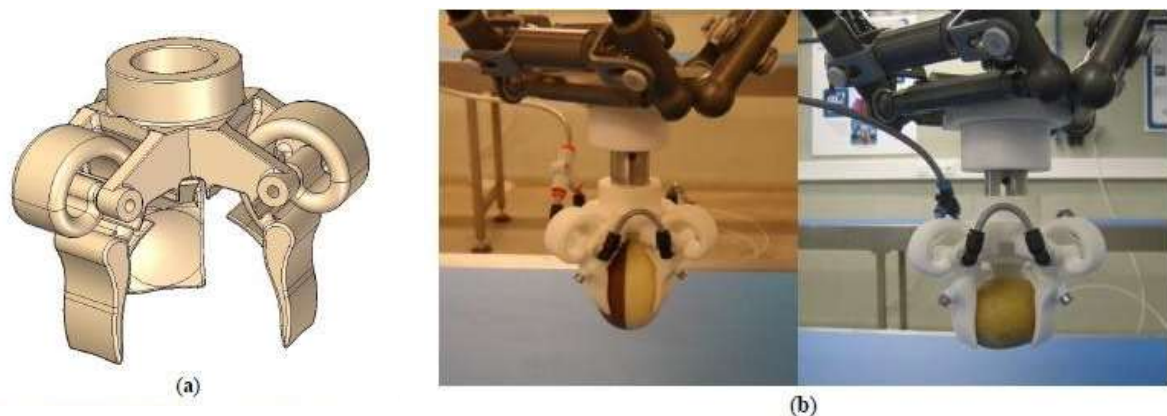
Figura 2.15 - Simulação do atuador flexível



Fonte: Blanes (2014)

Na Figura 2.16 é possível verificar o acionamento do dispositivo de três garras desenvolvido por Blanes (2014).

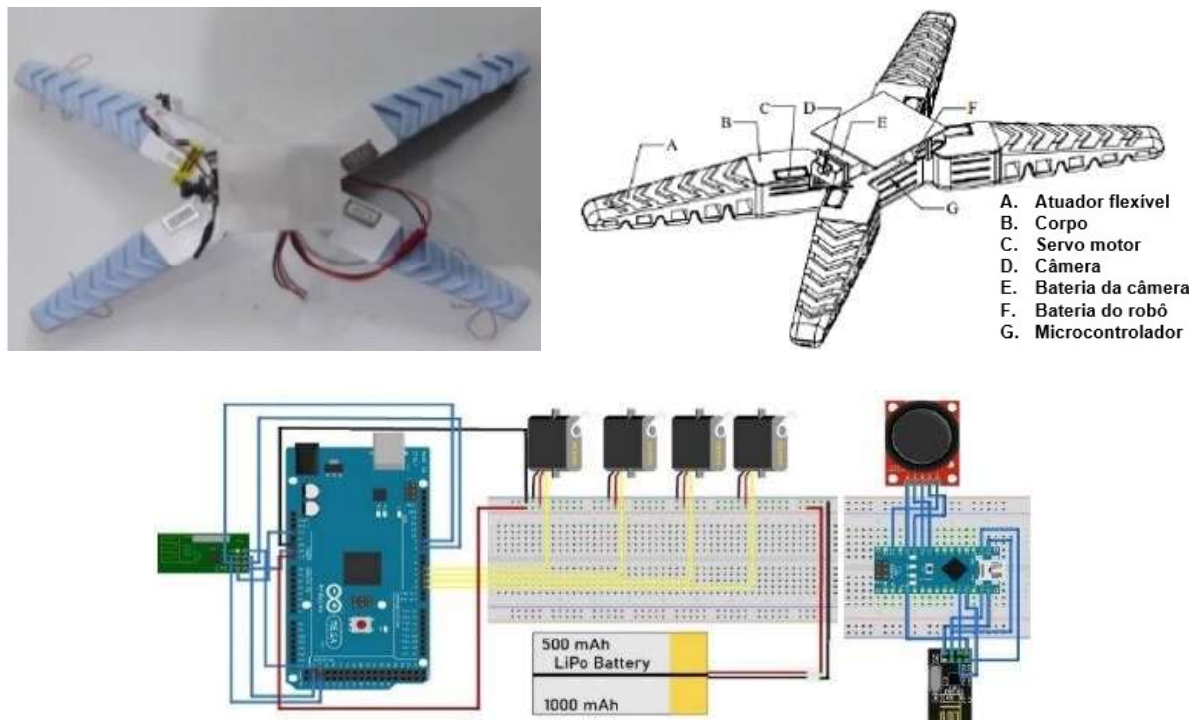
Figura 2.16 - Acionamento do dispositivo com três garras



Fonte: Blanes (2014)

Muna (2020) desenvolveu quatro efetores flexíveis acoplados a um corpo rígido em que faziam movimentos como de uma estrela do mar. Os efetores foram confeccionados em silicone por meio de moldes. Foi utilizado servomotores, ligados a tendões, para mover o protótipo e a plataforma Arduino para controlar os movimentos, conforme apresenta a Figura 2.17.

Figura 2.17 - Estrutura e esquema elétrico do protótipo



Fonte: Muna (2020)

Talk *et al.* (2020) detalham o funcionamento de mecanismos de efetadores flexíveis com tendões (Figura 2.18). Neste trabalho foi utilizado o acionamento pneumático.

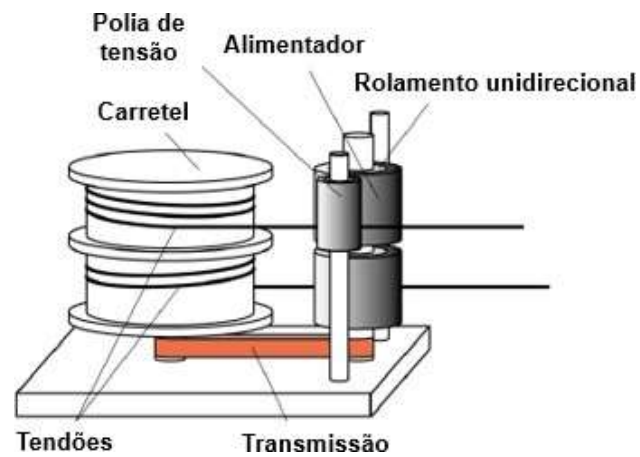
Figura 2.18 - Mecanismo de tendão



Fonte: Talk *et al.* (2020)

Um sistema de acionamento utilizando tendão foi desenvolvido por In *et al.* (2015) com o intuito de diminuir as perdas de tensão nos cabos do protótipo. De acordo com a Figura 2.19, o dispositivo ativa a folga dos tendões evitando o descarrilamento do cabo no carretel, mantendo-o tensionado por todo sistema.

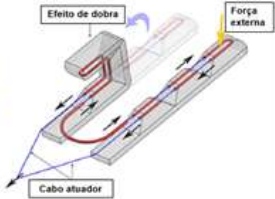
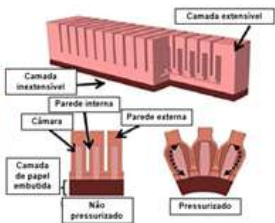
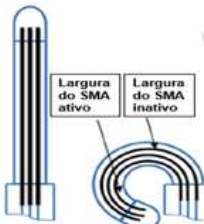
Figura 2.19 - Sistema de acionamento com tendão



Fonte: In *et al.* (2015)

Uma comparação entre os sistemas de acionamento dos efetadores flexíveis foi elaborada no trabalho de Zongxing, Wanxin e Liping (2020) descrevendo os métodos de movimento por tendão, fluxo pneumático, materiais inteligentes, suas características, vantagens e desvantagens conforme descrito no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Comparativo entre sistemas de acionamento dos atuadores flexíveis

Comparação entre sistemas dos efetadores em robôs flexíveis										
Sistemas	Descrição	Ilustração do processo	Direção da força	Velocidade de resposta	Extensão da deformação	Consumo de energia	Precisão de controle	Volume geral	Peso geral	Aplicação
<b>Tendão</b>	Os atuadores são acionados pela rotação de motores que tracionam os cabos		++	+++	++	+++	+++	++	++	++
<b>Pneumático</b>	Utilização de ar comprimido para movimentar atuadores em múltiplas direções e sentidos.		++	++	++	+	++	+++	+++	+++
<b>SMA (Liga com memória de forma)</b>	O material é deformado por uma força externa e retorna ao formato original com aplicação de calor.		+ e ++	+	++	++	++	+	+	+

Legenda: Muito Bom +++ Bom ++ Regular + Precário -

Fonte: Zongxing, Wanxin e Liping (2020)

## 2.6 Uso de sensores nos robôs flexíveis

De acordo com Zhang *et al.* (2020), sensores táteis são componentes que podem medir propriedades como pressão, força, temperatura, vibração, umidade mediante o contato entre o sensor e um objeto. Na manipulação robótica, a informação da força de contato aplicada é importante no estudo da interação física entre garra e peças de trabalho. Os sensores mais comuns são os capacitivos, resistivos, ópticos, ultrassônico, magnético e piezoelétrico.

Chen *et al.* (2018) utilizaram dois sensores acoplados em uma garra flexível acionada por um sistema pneumático. Para medir a força de pegar os objetos, um sensor de pressão é utilizado e, conjuntamente, outro flexível para detectar a posição em que é aplicado o estímulo.

Biju *et al.* (2021) desenvolveram um dispositivo para monitorar a perda de força da mão para pegar objetos. Utilizou-se de uma luva em que foram acoplados dois tipos de sensores: o sensor FSR (*Force Sensitive Resistor*) e o sensor Flexível (*Flex*). Na palma da luva estão localizados, em pontos específicos como demonstra a Figura 2.20, os sensores FSR responsáveis em medir a força aplicada e no dorso, sobre os dedos, os sensores flexíveis para aferir a flexão das extremidades.

Figura 2.20 – Localização dos sensores na luva



(a) Sensores FSR na palma da luva

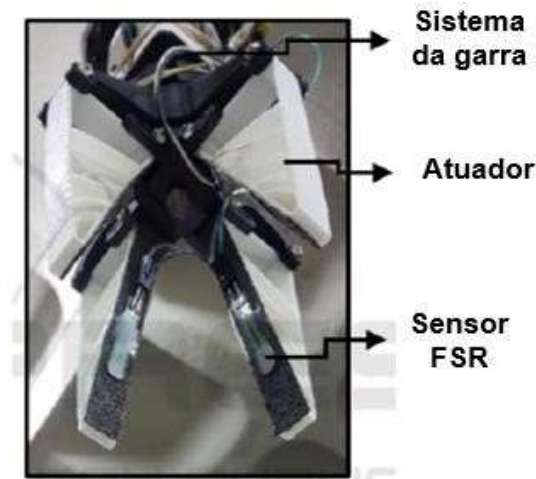
(b) Sensores flexíveis no dorso da luva

Fonte: Biju *et al.* (2021)

Um sistema de controle sensível ao toque foi desenvolvido por Basson e Bright (2018). O modelo dos efetadores da garra foi desenvolvido com referência no efeito raio de nadadeira (*Fin Ray Effect*®) e produzido por manufatura aditiva, utilizando o material ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*). Para medir a força no ato de agarrar, foi utilizado o sensor FSR (*Force Sensitive Resistor*) acoplado nos efetadores da garra conforme apresenta a Figura 2.21. Ensaios com objetos de

geometrias diferentes e movimentação após o ato de agarrá-los foram feitos.

Figura 2.21 – Modelo da garra e posicionamento dos sensores FSR

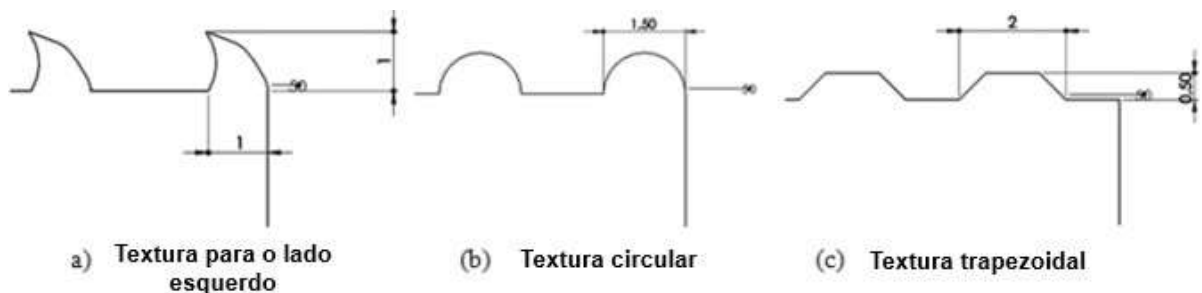


Fonte: Basson e Bright (2018)

## 2.7 Superfícies texturizadas produzidas por manufatura aditiva

Civici e Partar (2018) utilizaram em seus experimentos superfícies com três texturas diferentes (Figura 2.22) para analisar o deslocamento de um robô flexível sobre placas texturizadas. As superfícies foram produzidas por manufatura aditiva utilizando PLA como matéria prima e o dispositivo maleável em moldes, de formato triangular, com silicone líquido. O sistema de acionamento utilizado para movimentar o protótipo foi pneumático.

Figura 2.22 - Perfil das superfícies texturizadas



Fonte: Civici e Partar (2018)

Analisando os resultados, constatou-se que a textura com inclinação ao lado esquerdo percorreu o maior trajeto por impedir que o robô movimentasse no sentido contrário do percurso.

## **2.8 Design for Additive Manufacturing (DFMA)**

A integração da manufatura aditiva no setor produtivo das indústrias trouxe benefícios como confecção de objetos com formas complexas e flexibilidade no tamanho de lotes mas, ainda é um desafio tornar a MA um processo eficiente e lucrativo. O Projeto para Manufatura Aditiva (*Design for Additive Manufacturing – DFMA*) estuda a proposta do produto e o processo de fabricação buscando adequar o objeto 3D à sua produção. Neste contexto, o projetista precisa conhecer as relações entre o projeto, variáveis do processo e tolerâncias resultantes da confecção do produto, conforme Schaechtl *et al.* (2024).

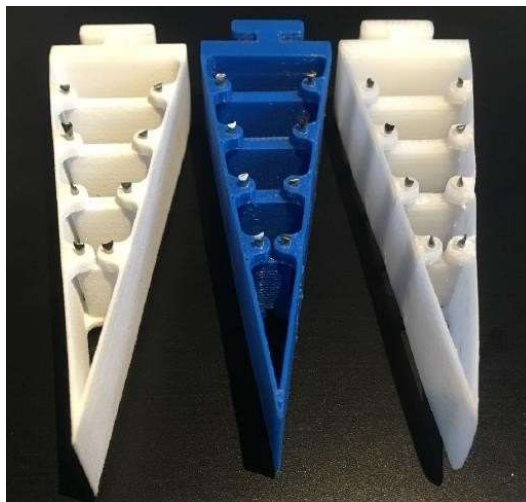
Segundo Egan (2023), pesquisadores desenvolveram uma planilha para auxiliar os projetistas nas tomadas de decisões, utilizando um sistema de pontuação aos critérios de complexibilidade, funcionalidade, remoção de material e necessidade de suporte. Um aspecto importante do DFMA é o estabelecimento de uma estrutura para aprendizagem e implementação de ferramentas e técnicas relevantes para uma aplicação de projeto específica. Uma das estruturas do DFMA está relacionado a montagem, ressaltando a manufatura aditiva de componentes e de mecanismos sem montagem.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do trabalho uma sequência de atividades foi elaborada para organizar os métodos e equipamentos a serem empregados.

O efetuador a ser desenvolvido terá como base o da Festo que utiliza o efeito raio de nadadeira (*Fin Ray Effect*), como demonstrado no trabalho de Zbroja, Szykiedans e Credo (2019), em que produzem por manufatura aditiva as partes do efetuador e há a montagem do mesmo utilizando eixos metálicos, como demonstra a Figura 3.1.

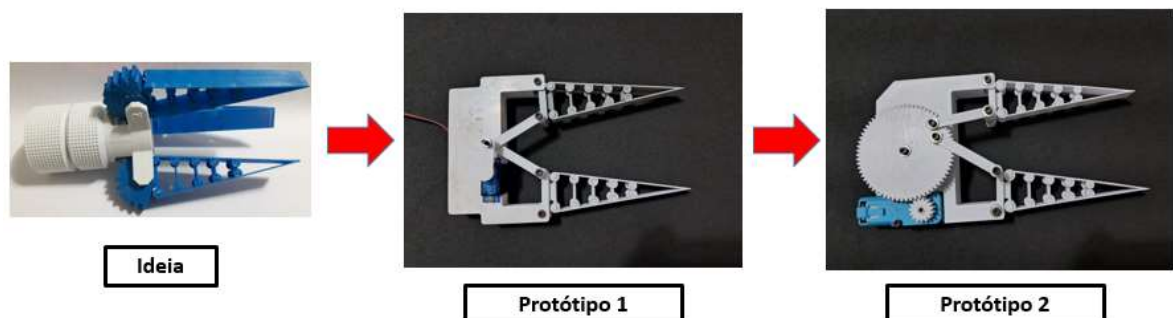
Figura 3.1 – Efetuador montado



Fonte: Zbroja, Szykiedans e Credo (2019)

Inicialmente foram testados alguns conceitos sobre efetuadores com efeito de raio de nadadeira, mecanismos de acionamento e tipos de garras, conforme demonstrado na figura 3.2.

Figura 3.2 – Evolução do protótipo



Fonte: Autor (2024)

Ao longo dos testes conceituais, erros de manufatura dos efetadores ocorreram, como demonstrado na figura 3.3.

Figura 3.3 – Defeitos nas peças impressas



Fonte: Autor (2024)

Utilizando a MA em mecanismos sem montagem foi desenvolvido o efetador com efeito de raio de nadadeira sem a necessidade de manufatura de peças e de montagem posterior.

### 3.1 Desenvolvimento do efetador

A proposta do trabalho é desenvolver o efetador sem a necessidade de montagem utilizando o método de mecanismos sem montagem na confecção por manufatura aditiva.

### 3.2 Seleção do mecanismo de acionamento

O mecanismo de acionamento a ser utilizado será um motor dc, de 3-6 V (*datasheet* - ANEXO A), com caixa de redução, rotação de 140 rpm a 4.5 V (Figura 3.4), que transmitirá o movimento para um sistema de redução 8:1 composto por um conjunto de quatro engrenagens cilíndricas de dentes retos.

Figura 3.4 – Motor DC 3-6V com Caixa de Redução e Eixo Duplo



Fonte: <https://www.robocore.net/motor-motoredutor/motor-dc-3-6v-com-caixa-de-reducao-e-eixo-duplo>

### 3.3 Equipamento utilizado para confecção do dispositivo

Para a produção dos componentes da garra, utilizou-se da impressora 3D Ender 3, da marca Creality, com mesa de impressão de 235X235mm e altura de 250mm. O diâmetro do bico da extrusora possui 0,4mm, as temperaturas da mesa de trabalho e extrusora são, respectivamente, de 108°C e 235°C, utilizando o material ABS. A estrutura do equipamento é composta de perfis de alumínio, conforme demonstrado na figura 3.5, tornando acessível a montagem. Demais informações técnicas sobre o equipamento estão no ANEXO C.

Figura 3.5 – Impressora 3d Ender 3

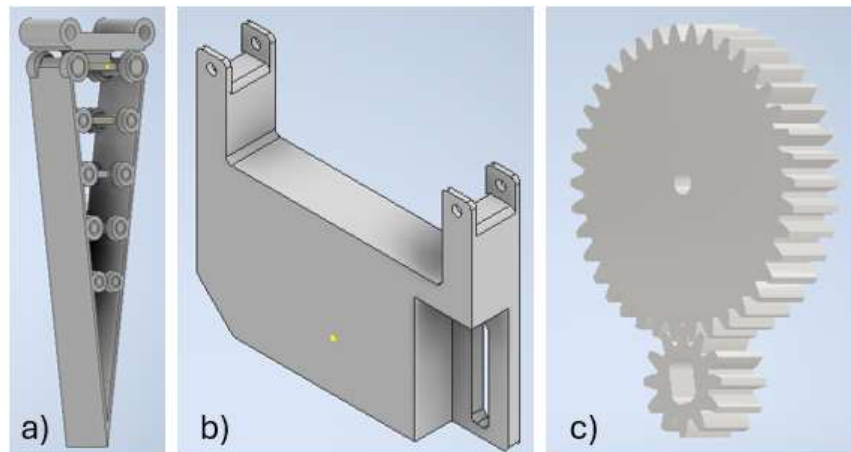


Fonte: <https://www.creality.com/products/ender-3-3d-printer>

### 3.4 Produção do efetuator e do mecanismo de acionamento

Os efetutores, a estrutura da garra e as engrenagens foram desenvolvidos no software CAD AutoDesk Inventor 2024 (Figuras 3.6a, 3.6b e 3.6c, respectivamente). Os desenhos dos componentes encontram-se no APÊNDICE B. A base da garra foi desenvolvida para condicionar o motor DC, o conjunto de quatro engrenagens e a distância entre os dois efetutores, condizente aos experimentos programados.

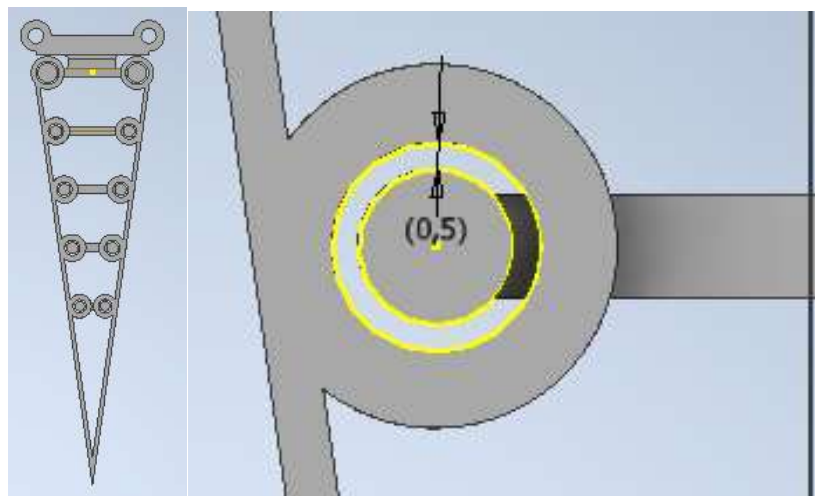
Figura 3.6 - a) efetuator, b) estrutura da garra e c) conjunto de engrenagens



Fonte: Autor (2024)

Após dois erros de impressão, que resultaram em efetutores com conexões travadas, a folga adequada às articulações foi de 0,5mm em relação ao raio conforme figura 3.7.

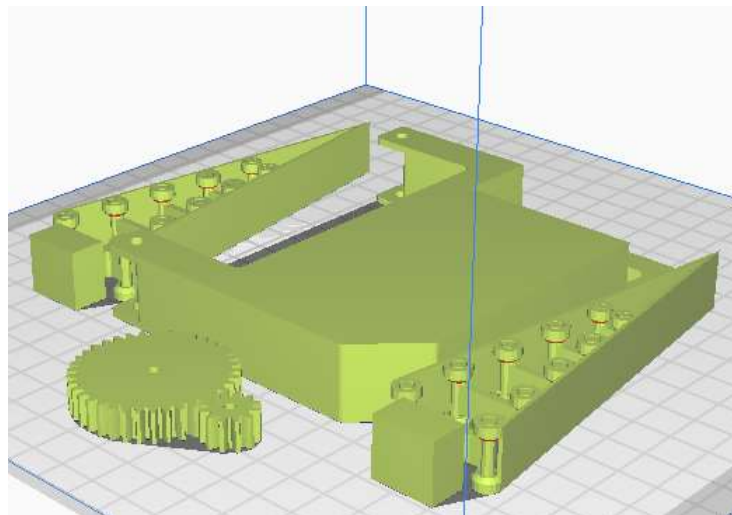
Figura 3.7 - efetuator com a folga das articulações



Fonte: Autor (2024)

Os arquivos no formato STL foram configurados para manufatura no Ultimaker Cura, versão 5.4.0 (Figura 3.8), confeccionados na impressora 3D Ender 3, marca Creality, e o material utilizado foi o ABS.

Figura 3.8 - Configuração para impressão



Fonte: Autor (2024)

Os parâmetros utilizados no equipamento para a produção dos componentes do protótipo estão descritos na tabela 3.1.

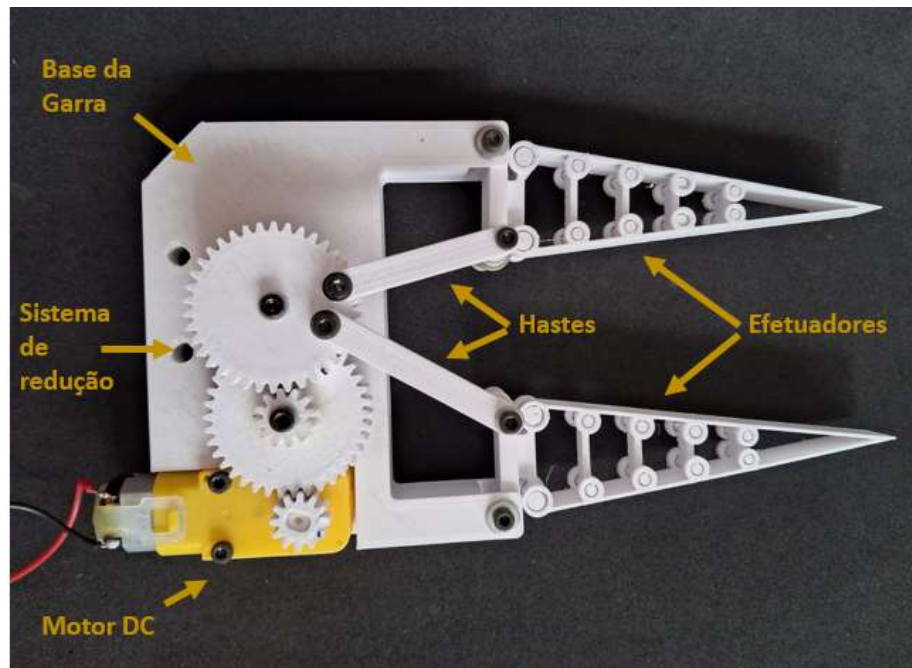
Tabela 3.1 – Parâmetros utilizados

<b>Informações da impressão</b>	
<b>Impressora</b>	Ender 3
<b>Material</b>	ABS
<b>Cor</b>	Branca
<b>Temp. bico</b>	235°C
<b>Temp. mesa</b>	108°C
<b>Velocidade impressão</b>	25mm/s
<b>Espessura Camada</b>	0,16mm
<b>Preenchimento</b>	100%

Fonte: Autor (2024)

O mecanismo de acionamento foi desenvolvido para dois efetadores por garra, sistema de redução com quatro engrenagens cilíndricas de dentes retos acionado por motor dc, como é apresentado na Figura 3.9.

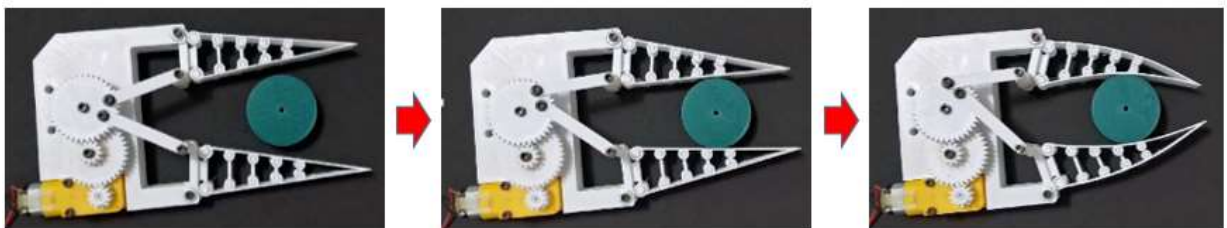
Figura 3.9 - Garra montada



Fonte: Autor (2024)

A Figura 3.10 demonstra como a garra atua ao pegar um objeto de forma circular e exercendo o efeito raio de nadadeira.

Figura 3.10 – Funcionamento da garra

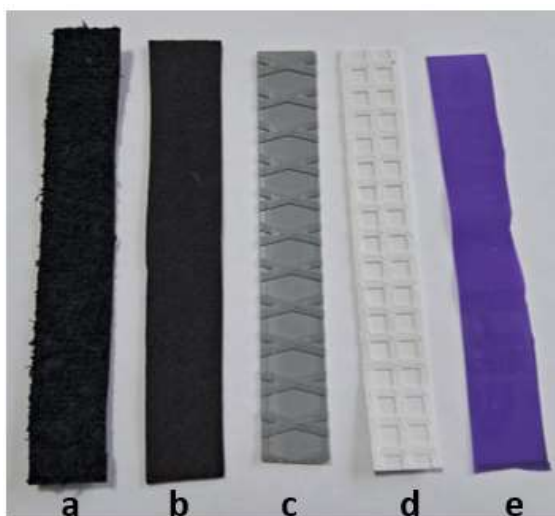


Fonte: Autor (2024)

### 3.5. Seleção e confecção de texturas intercambiáveis

Cinco tipos de texturas foram selecionados de acordo com a geometria e material de fabricação: duas de EVA com superfície atalhada e homogênea (Figuras 3.11a e 3.11b), duas confeccionadas em ABS pela impressora 3D (Figuras 3.11c e 3.11d) e faixa elástica de média intensidade (Figura 3.11e). Os desenhos das texturas produzidas em manufatura aditiva estão no APÊNDICE F.

Figuras 3.11 - Tipos de texturas: a) superfície atalhada em EVA, b) superfície homogênea em EVA, c) relevo entrelaçado em ABS, d) relevo quadriculado em ABS e e) faixa elástica de média intensidade.

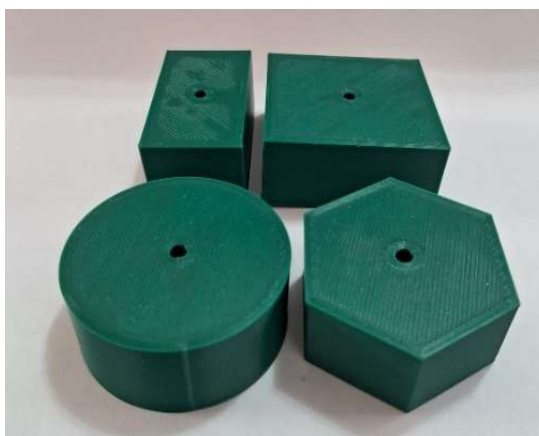


Fonte: Autor (2024)

### 3.6. Realização de ensaios

Os ensaios executados foram feitos para pegar objetos com quatro diferentes geometrias e massas variando de 0,05 até 0,50 kg. Na Figura 3.12 são apresentadas as peças que foram utilizadas no experimento. Os objetos possuem largura máxima de 45mm e altura de 20mm. No APÊNDICE A estão as peças com suas dimensões.

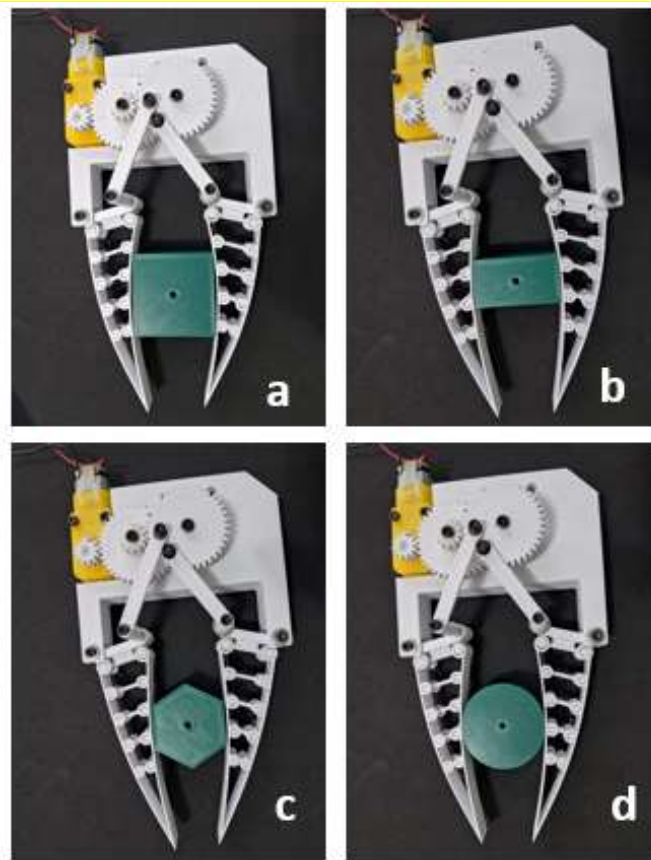
Figura 3.12 - Figuras geométricas.



Fonte: Autor (2024)

A deformação gerada no ato de pegar cada objeto foi constatada em cada ciclo de acordo com a geometria das peças (Figuras 3.13a, 3.13b, 3.13c e 3.13d).

Figura 3.13 - Deformação nos efetuadores com objetos de formatos: a) quadrado, b) retângulo, c) hexágono e d) círculo.



Fonte: Autor (2024)

As texturas foram anexadas na área de contato dos dois efetuadores, coladas com fitas dupla face (Figura 3.14) e trocadas ao término de cada experimento.

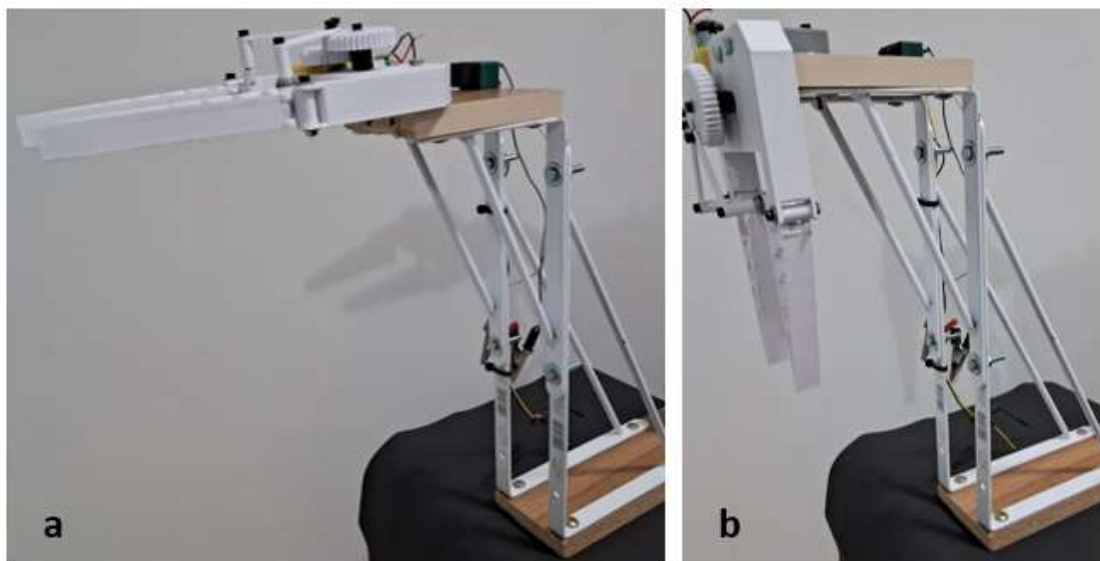
Figura 3.14 - Textura anexada ao efetuador.



Fonte: Autor (2024)

A garra foi disposta nas posições horizontal e vertical em que os experimentos foram elaborados seguindo o mesmo procedimento. O posicionamento da garra é demonstrado nas figuras 3.15a e 3.15b.

Figura 3.15 - Posicionamento da garra nas posições: a) horizontal e b) vertical



Fonte: Autor (2024)

Foram cinco rodadas em que os efetadores pegaram as peças utilizando as cinco texturas e uma sem nenhuma. As massas eram adicionadas 0,05 kg por vez e verificado a atuação da garra posicionada no sentido horizontal e vertical, como demonstrado na Figura 3.16. Com os resultados obtidos, planilhas e gráficos foram gerados.

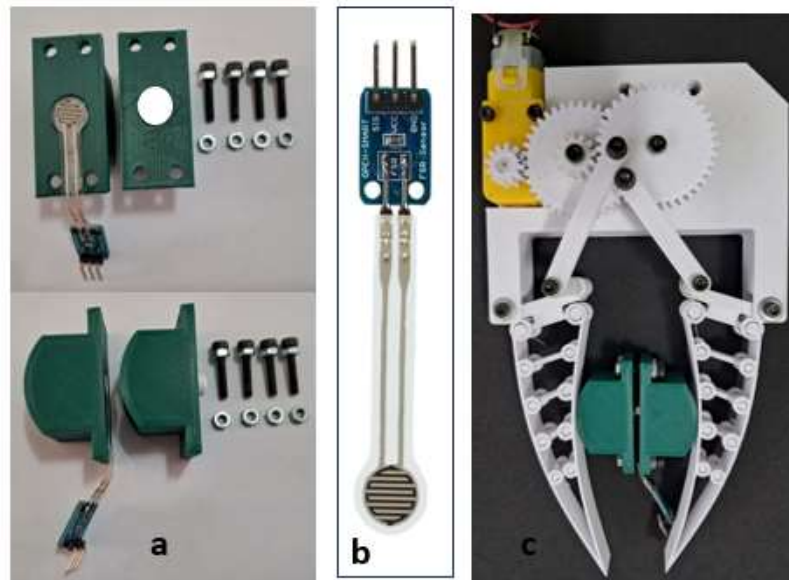
Figura 3.16 - Processo de acoplar massa no objeto nos sentidos: a) horizontal e b) vertical.



Fonte: Autor (2024)

Buscando mensurar a força de aperto da garra, um dispositivo foi desenvolvido e acoplado um sensor resistivo FSR50N (*datasheet* - ANEXO B) que, ao ser pressionado, há uma variação na resistência mensurada. Utilizando o microcontrolador Arduino (*datasheet* – ANEXO D), dados foram coletados a cada adição de massa, relacionando o valor demonstrado no monitor serial com a carga que pressionava o sensor. A programação desenvolvida é apresentada no APÊNDICE D. Deste modo, estima-se o valor da força que a garra aplica ao pressionar um objeto. O dispositivo elaborado, o sensor FSR50N e o modo como a garra segura o aparelho são demonstrados na Figura 3.17. Os desenhos das peças do dispositivo estão no APÊNDICE C.

Figura 3.17 - Dispositivo para medir força: a) dispositivo, b) sensor FSR50N e c) garra pressionando o sensor.








Fonte: Autor (2024)

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os dados obtidos nos ensaios realizados em bancada, planilhas e gráficos foram gerados para analisar o comportamento do protótipo.

Os dados da Tabela 4.1 são resultados do ensaio em que objetos, com quatro diferentes geometrias, foram pegos pela garra, posicionada horizontalmente, e sustentaram massas variando de 0,05 até 0,50 kg.

Tabela 4.1 – Média da massa e desvio padrão (DP) suportada utilizando texturas em objetos de formatos variados na posição horizontal.

Posição da Garra:		Horizontal							
Tipo de textura		Formato Geométrico							
		Retângulo		Quadrado		Círculo		Hexágono	
		Média (kg)	DP	Média (kg)	DP	Média (kg)	DP	Média (kg)	DP
Eva atalhada		0,08	0,04	0,11	0,04	0,11	0,03	0,15	0,04
EVA homogênea		0,13	0,04	0,18	0,06	0,15	0,05	0,13	0,05
Entrelaçado MA		0,05	0,00	0,05	0,01	0,05	0,01	0,03	0,02
Quadriculado MA		0,05	0,00	0,10	0,03	0,05	0,03	0,04	0,03
Teraband Intensidade média		0,11	0,02	0,11	0,04	0,20	0,06	0,09	0,05
Sem textura		0,07	0,03	0,09	0,03	0,11	0,03	0,05	0,03

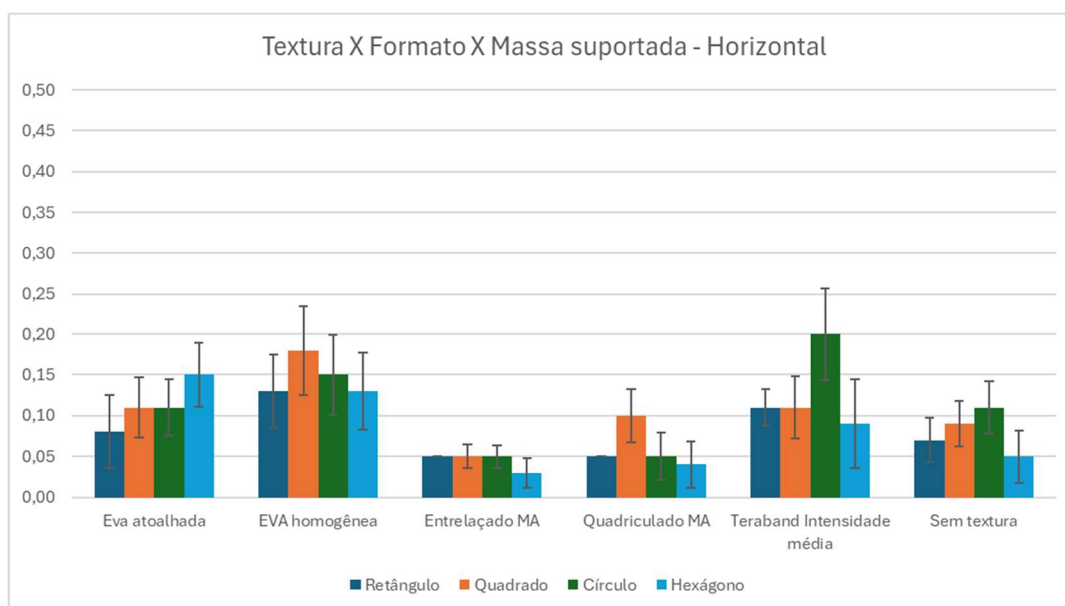
Fonte: Autor (2024)

Analisando os dados da Tabela 4.1, verificou-se que o menor desempenho foi o contato com superfícies produzidas por manufatura aditiva, especificamente a textura entrelaçado MA. As texturas mais maleáveis obtiveram uma performance superior sendo a EVA homogênea a que, em dois formatos geométricos (retângulo e quadrado), suportou maior massa.

Os maiores desvios padrão ocorreram para os seguintes formato geométrico/textura: quadrado/EVA homogênea e círculo/Teraband intensidade média, com valor de 0,06.

Com os valores da planilha Tabela 4.1, foi gerado o Gráfico 4.1 que demonstra a performance da garra na posição horizontal para pegar os objetos, com diferentes texturas e com massas variadas.

Gráfico 4.1 - Média da massa suportada utilizando texturas em objetos de formatos variados, com desvio padrão, na posição horizontal.








Fonte: Autor (2024)

Por meio do Gráfico 4.1, verificou-se que o formato geométrico hexágono foi inferior em praticamente todas as texturas, com exceção da EVA atalhada em que obteve o melhor resultado. Confirmando o que foi analisado pelos dados obtidos, a Entrelaçada MA resultou no menor resultado entre as texturas aplicadas nos ensaios. A textura que obteve a performance mais uniforme foi a EVA homogênea. O formato geométrico que alcançou a maior massa dos ensaios foi o círculo, com a textura Teraband intensidade média, com 0,20kg.

Os dados da Tabela 4.2 são resultados da média dos valores do ensaio em que objetos, com quatro diferentes geometrias, foram pegos pela garra, posicionada verticalmente, e sustentaram massas variando de 0,05 até 0,50 kg. A planilha com os dados totais obtidos estão no APÊNDICE E.

Comparando os resultados das Tabelas 4.1 e 4.2, é possível verificar que na posição vertical os valores da massa suportada foram maiores. Verificou-se que o formato geométrico círculo foi inferior em praticamente todas as texturas, com exceção da Teraband intensidade média em que obteve resultado superior ao hexágono. A EVA homogênea foi a textura com os maiores valores de massa, em todos os formatos, das texturas. O maior desvio padrão encontrado foi do formato geométrico círculo com a textura Entrelaçado MA.

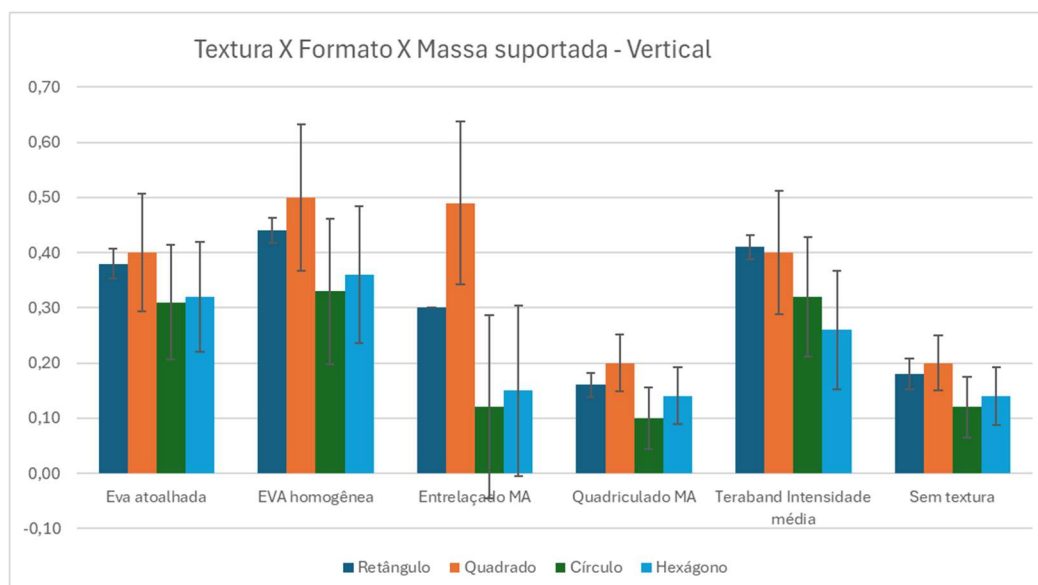
Tabela 4.2 - Média da massa e desvio padrão (DP) suportada utilizando texturas em objetos de formatos variados na posição vertical.

Posição da Garra:		Vertical							
Tipo de textura		Formato Geométrico							
		Retângulo		Quadrado		Círculo		Hexágono	
		Média (kg)	DP	Média (kg)	DP	Média (kg)	DP	Média (kg)	DP
Eva atalhada		0,38	0,03	0,40	0,11	0,31	0,10	0,32	0,10
EVA homogênea		0,44	0,02	0,50	0,13	0,33	0,13	0,36	0,12
Entrelaçado MA		0,30	0,00	0,49	0,15	0,12	0,17	0,15	0,15
Quadrulado MA		0,16	0,02	0,20	0,05	0,10	0,06	0,14	0,05
Teraband Intensidade média		0,41	0,02	0,40	0,11	0,32	0,11	0,26	0,11
em textura		0,18	0,03	0,20	0,05	0,12	0,06	0,14	0,05

Fonte: Autor (2024)

Com os valores da Tabela 4.2, foi gerado o Gráfico 4.2 que demonstra a performance da garra na posição vertical para pegar os objetos, com diferentes texturas e com massas variadas.

Gráfico 4.2 - Média da massa suportada utilizando texturas em objetos de formatos variados, com desvio padrão, na posição vertical.



Fonte: Autor (2024)

Analisando o Gráfico 4.2, verificou-se que o formato geométrico quadrado obteve o melhor desempenho em relação aos demais. As texturas flexíveis evidenciaram massas superiores em relação às rígidas. Dos seis ensaios com texturas

diferentes, o formato cíclico foi o que teve a menor performance.

Para se determinar a intensidade da força aplicada pelo efetuator, o dispositivo para medir força da Figura 3.14 foi submetido a cinco ensaios de carga por meio de massas conhecidas, resultando nos dados apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Relação entre a massa e os valores de saída do sensor FSR50N

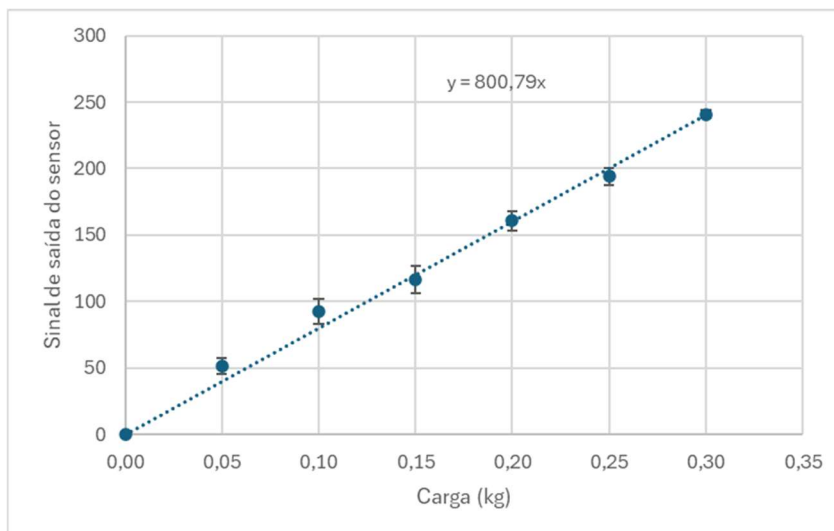
Carga (kg)	Dados obtidos pelo sensor						
	1	2	3	4	5	Média	Desvio Padrão
0,00	0	0	0	0	0	0	0,0
0,05	41	52	55	51	57	51	6,2
0,10	84	82	96	105	94	92	9,4
0,15	107	113	108	131	124	117	10,5
0,20	166	149	167	162	159	161	7,2
0,25	204	188	191	197	191	194	6,4
0,30	241	244	236	242	241	241	2,9

Fonte: Autor (2024)

A Tabela 4.3 atuou como uma calibração do sensor FSR50N determinando o comportamento do sensor ao adicionamento de massa com os valores de saída, demonstrados no monitor serial. Observou-se um aumento do desvio padrão conforme a carga era aumentada até 0,15kg. Após esse valor o desvio padrão começou a diminuir.

Com os valores da Tabela 4.3, um Gráfico 4.3 foi desenvolvido para demonstrar a relação entre a massa aplicada e os valores de saída do sensor.

Gráfico 4.3 - Relação entre a massa e os valores médios de saída do sensor FSR50N



Fonte: Autor (2024)

Apesar do sensor FSR50N não obter dados de forma linear, analisando o Gráfico 4.3, verificou-se uma tendência de reta nos dados de saída do sensor de força, sendo gerado uma função.

A Tabela 4.4 foi elaborada com os valores de saída do sensor FSR50N no ato da garra apertar o dispositivo.

Tabela 4.4 - Valores obtidos pela aplicação de força pela garra no sensor.

Valores obtidos aplicação de força pela garra no sensor							
Medida	1	2	3	4	5	Média	Desv.Padr
Valor	115	117	123	119	121	119	3,16

Fonte: Autor (2024)

Os valores da Tabela 4.4 apresentam o comportamento da garra ao apertar o dispositivo do sensor. Com os dados, a função do Gráfico 4.3, é possível encontrar qual é o valor da massa aplicada, convertendo para força peso e, deste modo, encontrar a força que a garra aplica nos objetos no ato de pegar, como é demonstrado abaixo,

$$y = 800,79 \cdot x \quad (4.1)$$

sendo  $y$  o sinal de saída do sensor e  $x$  a carga aplicada em kg.

Utilizando o valor médio de saída obtido no ensaio de apertar da garra, que é 119, e substituindo na equação 4.1, resulta em  $x = 0,15$  kg. Portanto, a força peso equivalente pode ser determinada por:

$$P = m \cdot g \quad (4.2)$$

sendo,  $P$  a força peso em Newtons (N),  $m$  é a massa (kg) e  $g$  a aceleração da gravidade ( $9,81\text{m/s}^2$ ), resultando em  $P = 1,47$  N.

Considerando a força peso  $P$  como sendo a força de aperto  $F$ , a garra fornece uma força de 1,47 N no ato de apertar os objetos. Para este experimento, devido ao formato do dispositivo, a força encontrada é específica para o formato do dispositivo de calibração empregado.

## 5. CONCLUSÕES

Dispositivos flexíveis, confeccionados por manufatura aditiva, foram estudados para controle e posicionamento de peças, buscando a melhoria da eficiência nas linhas de produção. A pesquisa sobre robôs flexíveis justifica-se devido a distribuição proporcional de forças de contato, a interface segura entre máquinas e humanos em sistemas de manipulação de objetos.

A montagem de mecanismos complexos que possuem juntas multi-articuladas demanda tempo e etapas de processamento. Os processos de manufatura aditiva têm a habilidade de fabricar mecanismos sem a necessidade de montagem em um passo e sem precisar de pós-processamento.

O objetivo principal desse trabalho foi desenvolver um estudo sobre o método de manufatura aditiva de mecanismos sem montagem, aplicado no projeto de efetadores flexíveis voltados a aplicações educacionais, analisando o comportamento mecânico de um protótipo por meio de ensaios de bancada.

Durante o estudo, foram pesquisados diferentes tipos de efetadores flexíveis, incluindo os mecanismos sem montagem, dispositivos de acionamento para robôs flexíveis, visando a definição do sistema que seria desenvolvido. Definiu-se que o efetador a ser elaborado teria como base o da Festo que utiliza o efeito raio de nadadeira (*Fin Ray Effect*) e confeccionado por manufatura aditiva através do método de mecanismos sem montagem. Determinou-se que o material a ser utilizado seria o ABS devido ao fato de que o efeito de raio de nadadeira tornaria uma estrutura rígida em maleável, durante o movimento de pegar um objeto.

Com o protótipo da garra montado e operacional, realizou-se ensaios em bancada de testes para a caracterização do comportamento do sistema desenvolvido. Quatro objetos em formatos geométricos distintos foram produzidos e utilizados nos experimentos. Para auxiliar no processo de pega dos objetos, texturas foram fixadas nas áreas de contato dos efetadores. A garra foi posicionada, durante os ensaios, na posição horizontal e vertical, gerando duas etapas de coletas de dados. Verificou-se que na posição vertical, com a textura de EVA homogênea e em todos os objetos, as massas suportadas foram as maiores contabilizadas nos testes.

Com a análise dos resultados obtidos nos ensaios, verificou-se que a garra consegue sustentar até 0,5 kg, dependendo da posição de trabalho, textura aplicada e geometria do objeto. Foi constatado que a força máxima de aperto do protótipo é de

1,47 N. Com esse histórico pode-se dizer que o protótipo em estudo é viável na utilização em aplicações educacionais no manuseio de objetos com geometrias e massas análogas aos ensaios.

Como sugestão para trabalhos futuros, desenvolver garra com três ou quatro efetadores buscando coletar dados de massas suportadas, objetos com geometrias distintas, posicionamento de trabalho do protótipo, movimentação de carga, ensaios de fadiga e repetibilidade.

Além disso, o projeto pode ser aprimorado aplicando métodos de análise dinâmica para se prever movimentos e esforços envolvidos, bem como de processos de dimensionamento dos elementos do efetador para a utilização com cargas mais elevadas, por exemplo, em aplicações industriais.

## REFERÊNCIAS

AHMADIFAR, M.; BENFRIHA, K.; SHIRINBAYAN, M.; TCHARKHTCHI, A.. Additive Manufacturing of Polymer-Based Composites Using Fused Filament Fabrication (FFF): a review. **Applied Composite Materials**, [S.L.], v. 28, n. 5, p. 1335-1380, 2 ago. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10443-021-09933-8>.

ASTM INTERNATIONAL. **F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies**. Rapid Manufacturing Association, [S. l.], p. 10–12, 2013. DOI: 10.1520/F2792-12A.2. Disponível em: <http://www.ciri.org.nz/nzrma/technologies.html>.

BASSON, C. I.; BRIGHT, G.; WALKER, A. J. Investigating geometric adaptability for flexible grippers in reconfigurable assembly systems: validating object conformity through geometric considerations of gripper mechanisms. In: 24TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS AND MACHINE VISION IN PRACTICE (M2VIP), 2017, Durban. **Proceedings [...]**. Paper. [S.L.] Durban, SA: IEEE, 2017. p. 1-6.

BASSON, C. I.; BRIGHT, G. Active Haptic Control for a Biologically Inspired Gripper in Reconfigurable Assembly Systems Testing Active Haptic Control through Force Feedback. [S. l.], In: 15th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2018). **Proceedings [...]**. v. 2, n. Icinco, p. 81–90, 2018. DOI: 10.5220/0006840800810090.

BIJU, S. M.; BELL, A.; BIJU, S. M.; SHEIKH, H. Z.; MALEK, M. F.; OROUMCHIAN, F.; BELL, A. Design of grip strength measuring system using FSR and flex sensors using SVM algorithm. **IAES International Journal of Artificial Intelligence (IJ-AI)** Vol.10, No.3, September2021, pp. 676~686. DOI: 10.11591/ijai.v10.i3.pp676-686.

BLANES, C.; MELLADO, M.; BELTRAN, P. Novel Additive Manufacturing Pneumatic Actuators and Mechanisms for Food Handling Grippers. **Actuators**, [S.L.], v. 3, n. 3, p. 205-225, 9 jul. 2014. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/act3030205>.

CHEN, Feifei; WANG, Michael Yu. Design Optimization of Soft Robots: a review of the state of the art. **Ieee Robotics & Automation Magazine**, [S.L.], v. 27, n. 4, p. 27-43, dez. 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/mra.2020.3024280>.

CHEN, Y.; GUO, S.; LI, C.; YANG, H.; HAO, L. Size recognition and adaptive grasping using an integration of actuating and sensing soft pneumatic gripper. **Robotics and Autonomous Systems**, [S. l.], v. 104, p. 14–24, 2018. DOI: 10.1016/j.robot.2018.02.020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.02.020>.

ÇIVICI, Umut Serdar et al. Locomotion Control of Soft Robot with Surface Texture. In: 5<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL SCIENCE AND ENGINEERING (ICCESSEN), 2018, Kemer-Antalya. **Proceedings [...]**. Kemer-Antalya: 2018.Iccesen.Org, 2018. p. 324-327.

CUELLAR, J. S.; SMIT, G.; PLETTENBURG, D.; ZADPOOR, A. Additive manufacturing of non-assembly mechanisms. **Additive Manufacturing**, [S. l.], v. 21, n. May 2017, p.150–158, 2018. DOI:10.1016/j.addma.2018.02.004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.02.004>.

CUELLAR, J. S.; SMIT, G.; A ZADPOOR, A.; BREEDVELD, P. Ten guidelines for the design of non-assembly mechanisms: the case of 3d-printed prosthetic hands. Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part H: **Journal of Engineering in Medicine**, [S.L.], v. 232, n. 9, p. 962-971, 16 ago. 2018. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0954411918794734>.

DENG, E.; TADESSE, Y. A Soft 3D-Printed Robotic Hand Actuated by Coiled SMA. **Actuators**, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 6, 29 dez. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/act10010006>.

EGAN, P. F. Design for Additive Manufacturing: recent innovations and future directions. **Designs**, [S.L.], v. 7, n. 4, p. 83, 29 jun. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/designs7040083>.

ELGENEIDY, K.; LIGHTBODY, P.; PEARSON, S.; NEUMANN, G. Characterizing 3D-printed Soft Fin Ray Robotic Fingers with Layer Jamming Capability for Delicate Grasping. 2019. In: 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), [S.l.], **Proceedings [...]**. p. 143–148, 2019.

FRAZIER, W. E. Metal Additive Manufacturing: a review. **Journal of Materials Engineering and Performance**, [S.L.], v. 23, n. 6, p. 1917-1928, 8 abr. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing**. 2. Ed. New York: Springer Science+Business Media, 2015.

GORISSEN, B.; REYNAERTS, D.; KONISHI, S.; YOSHIDA, K.; KIM, J. W.; DE VOLDER, M. Elastic Inflatable Actuators for Soft Robotic Applications. **Adv Mater**. 2017 Nov; 29(43). doi: 10.1002/adma.201604977. Epub 2017 Sep 26. PMID: 28949425.

IN, H.; LEE, H.; JEONG, U.; KANG, B. B.; CHO, K. J. Feasibility study of a slack enabling actuator for actuating tendon-driven soft wearable robot without pretension. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA), 2015, Seattle. **Proceedings [...]**, [S.L.] Seattle, US: IEEE, 2015. p. 1229-1234.

ISO/ASTM 52900:2021. Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary. Genebra: ISO, 2021. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>

KENETH, E. S.; KAMYSHNY, A.; TOTARO, M.; BECCAI, L.; MAGDASSI, S. 3D Printing Materials for Soft Robotics. **Adv. Mater**. 2021, 33, 2003387. <https://doi.org/10.1002/adma.202003387>.

KIM, W.; EOM, J.; CHO, K. A Dual-Origami Design that Enables the Quasisequential Deployment and Bending Motion of Soft Robots and Grippers. 2022. **Adv. Intell. Syst.**, 4: 2100176. <https://doi.org/10.1002/aisy.202100176>.

LEUNG, W. K.; RAZA, M. H.; ZHONG, R. Y. Optimization of structure in joints of support support structure joints of of non- assembly mechanisms assembly mechanisms. **Procedia CIRP**, [S. I.], v. 100, p. 726–731, 2021. DOI: 10.1016/j.procir.2021.05.085. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.085>.

LUSSENBURG, K.; BREEDVELD, P; SAKES, A. Design of non-assembly mechanisms: A state-of-the-art review, **Additive Manufacturing**, Volume 39, 2021, 101846, ISSN 2214-8604, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101846>.

MUNA, M.; ARIYANTO, M.; SETIAWAN, J. D.; NANIWA, T. MULTI-GAIT STRATEGIES FOR A QUADRUPEDAL STARFISH SOFT ROBOT INCORPORATING MOTOR-TENDON ACTUATOR. **Journal of Engineering Science and Technology**. [S.I.], p. 2248-2269. ago. 2020.

PAGOLI, A.; CHAPELLE, F.; CORRALES-RAMON, J. A.; MEZOUAR, Y.; LAPUSTA, Y. Review of soft fluidic actuators: classification and materials modeling analysis. **Smart Materials And Structures**, [S.L.], v. 31, n. 1, p. 013001, 7 dez. 2021. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1361-665x/ac383a>.

PASTRE, M.; QUINSAT, Y.; LARTIGUE, C. Effects of additive manufacturing processes on part defects and properties : a classification review Binder jetting. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, [S. I.], v. 16, n. 4, p. 1471–1496, 2022. DOI: 10.1007/s12008-022-00839-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12008-022-00839-8>.

RODRIGUES, V. P.; ZANCUL, E. S.; MANÇANARES, C. G.; GIORDANO, C. M.; SALERNO, M. S. Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações. GEPROS. **Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Bauru, Ano 12, nº 3, 2017, p. 1-34. DOI: 10.15675/gepros.v12i3.1657.

ROELS, E.; TERRY, S.; BRANCART, J.; VERHELLE, R.; ASSCHE, G. V.; VANDERBORGHT, B. Additive Manufacturing for Self-Healing Soft Robots. **Soft Robot**. 2020 Dec;7(6):711-723. doi: 10.1089/soro.2019.0081. Epub 2020 Mar 10. PMID: 32160110.

ROTH, M.; SCHLEICH, B.; GOETZ, S.; WARTZACK, S. Optimization of Build Time and Support Material Quantity for the Additive Manufacturing of Non-Assembly Mechanisms. **Procedia CIRP**, [S. I.], v. 84, n. September, p. 271–276, 2019. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.197. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.197>.

SCHAECHTL, P.; GOETZ, S.; SCHLEICH, B.; WARTZACK, S. Knowledge-based product and process design synthesis of additively manufactured non- assembly mechanisms additively manufactured non-assembly mechanisms. **JOURNAL OF ENGINEERING DESIGN**, 2024, v. 35, n. 7, 818–848 <https://doi.org/10.1080/09544828.2024.2339162>.

SÖRENSEN, P.; MOURATIDIS, M.; ENGEL, B. ScienceDirect Design of non-assembly joints incorporating randomness generated through a publicly accessible 3D print farm. **Procedia CIRP**, [S. I.], v. 120, n. January, p. 129–134, 2024. DOI: 10.1016/j.procir.2023.08.024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.08.024>.

STANO, G.; PERCOCO, G. Additive manufacturing aimed to soft robots fabrication: A review. **Extreme Mechanics Letters**, [S. I.], v. 42, p. 101079, 2021. DOI: 10.1016/j.eml.2020.101079. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eml.2020.101079>.

TAWK, C.; ALICI, G. A Review of 3D-Printable Soft Pneumatic Actuators and Sensors: research challenges and opportunities. **Advanced Intelligent Systems**, [S.L.], v. 3, n. 6, p. 1-18, 8 fev. 2021. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/aisy.202000223>.

TAWK, C., PANHUIS, M. in het; SPINKS, G. M.; ALICI, G. 3D printed soft pneumatic bending sensing chambers for bilateral and remote control of soft robotic systems. In: IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM **Proceedings [...]**. (pp. 922-927), 2020.

WALLIN, T. J.; PIKUL, J.; SHEPHERD, R. F. 3D printing of soft robotic systems. **Nature Reviews Materials**, [S. I.], 2018. DOI: 10.1038/s41578-018-0002-2. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41578-018-0002-2>.

WANG, J.; CHORTOS, A. Control Strategies for Soft Robot Systems. 2022. **Adv. Intell. Syst.**, 4: 2100165. <https://doi.org/10.1002/aisy.202100165>.

VIKAS, V.; COHEN, E.; GRASSI, R.; SOZER, C.; TRIMMER, B. Design and locomotion control of soft robot using friction manipulation and motor-tendon actuation. In: *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 32, no. 4, pp. 949-959, Aug. 2016, **Proceedings [...]**. doi: 10.1109/TRO.2016.2588888.

VOLPATO, N.; AHRENS, C. H.; FERREIRA, C. V.; PETRUSH, G.; CARVALHO, J.; SANTOS, J. R. L.; SILVA, J. V. L. **Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações**. 1. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2017.

YAP, Y. L.; SING, S. L.; YEONG, W. Y. A review of 3D printing processes and materials for soft robotics. **Rapid Prototyping Journal**, 26(8), 1345-1361. doi:10.1108/RPJ-11-2019-0302.

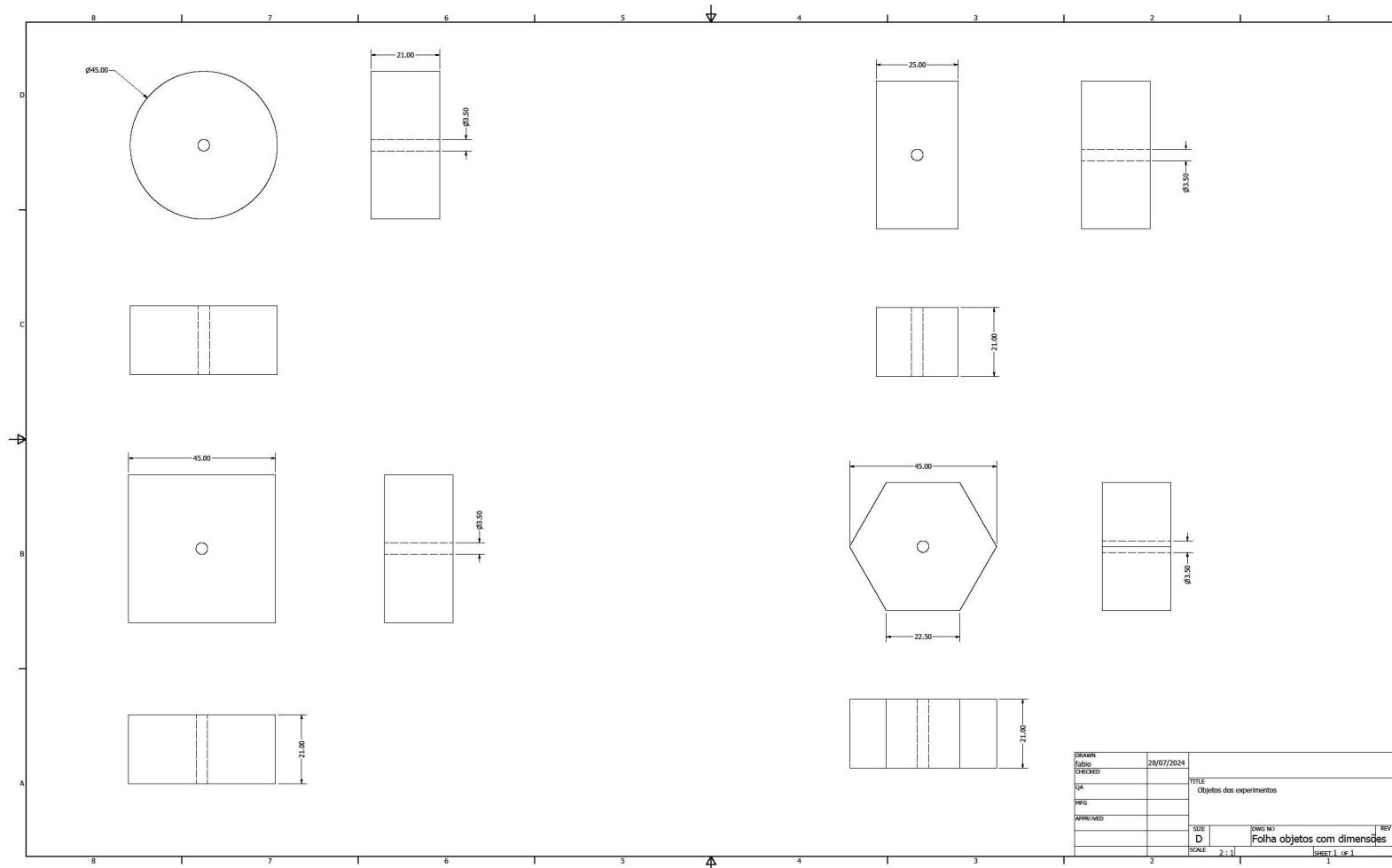
ZBROJA, Piotr; SZYKIEDANS, Ksawery; CREDO, Wojciech. Flexible grippers for industrial robots – comparison of features of low-cost 3D printed component. In: XXIII POLISH-SLOVAK SCIENTIFIC CONFERENCE ON MACHINE MODELLING AND SIMULATIONS (MMS 2018), 254, 2019, Rydzyna. **Proceedings [...]** [S.I.]: EDP Sciences, 2018. v. 2, p. 1-10.

ZHANG, B.; XIE, Y.; ZHOU, J.; WANG, K.; ZHANG, Z. State-of-the-art robotic grippers, grasping and control strategies, as well as their applications in agricultural robots : A review. **Computers and Electronics in Agriculture**, [S. I.], v. 177, n. April, p. 105694, 2020. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105694. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105694>.

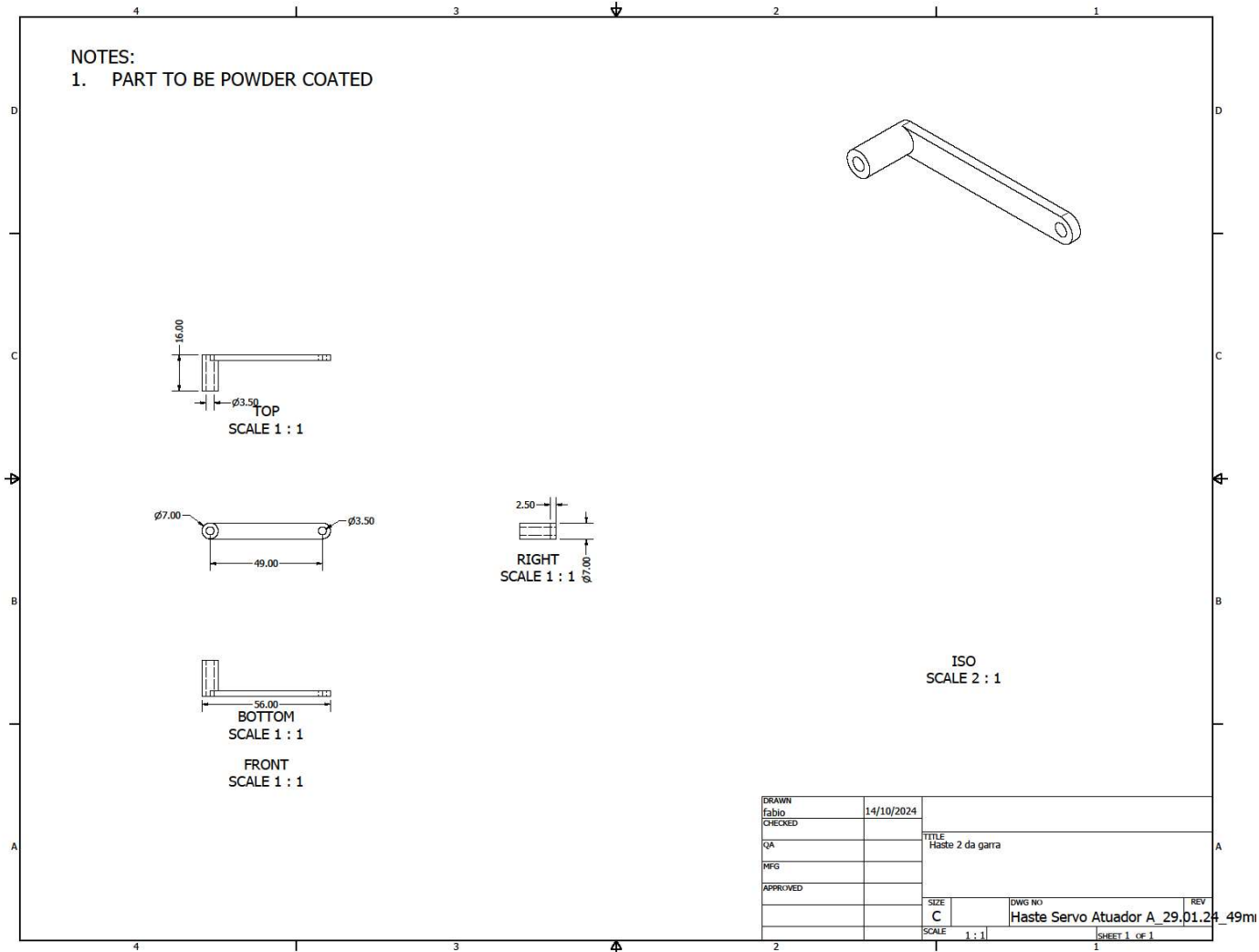
ZONGXING, L.; WANXIN, L.; LIPING, Z. Research development of soft manipulator: A review. **Advances in Mechanical Engineering**. 2020;12(8). doi:10.1177/1687814020950094.

## APÊNDICES

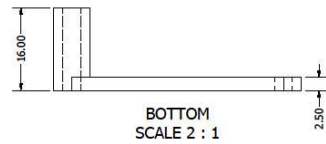
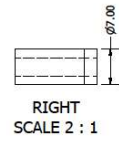
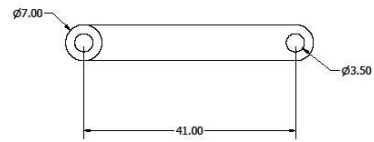
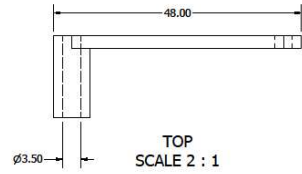
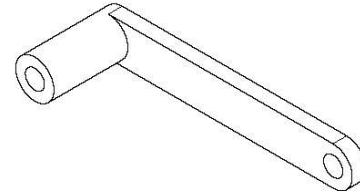
APÊNDICE A – Objetos produzidos por manufatura aditiva para serem utilizados nos experimentos.



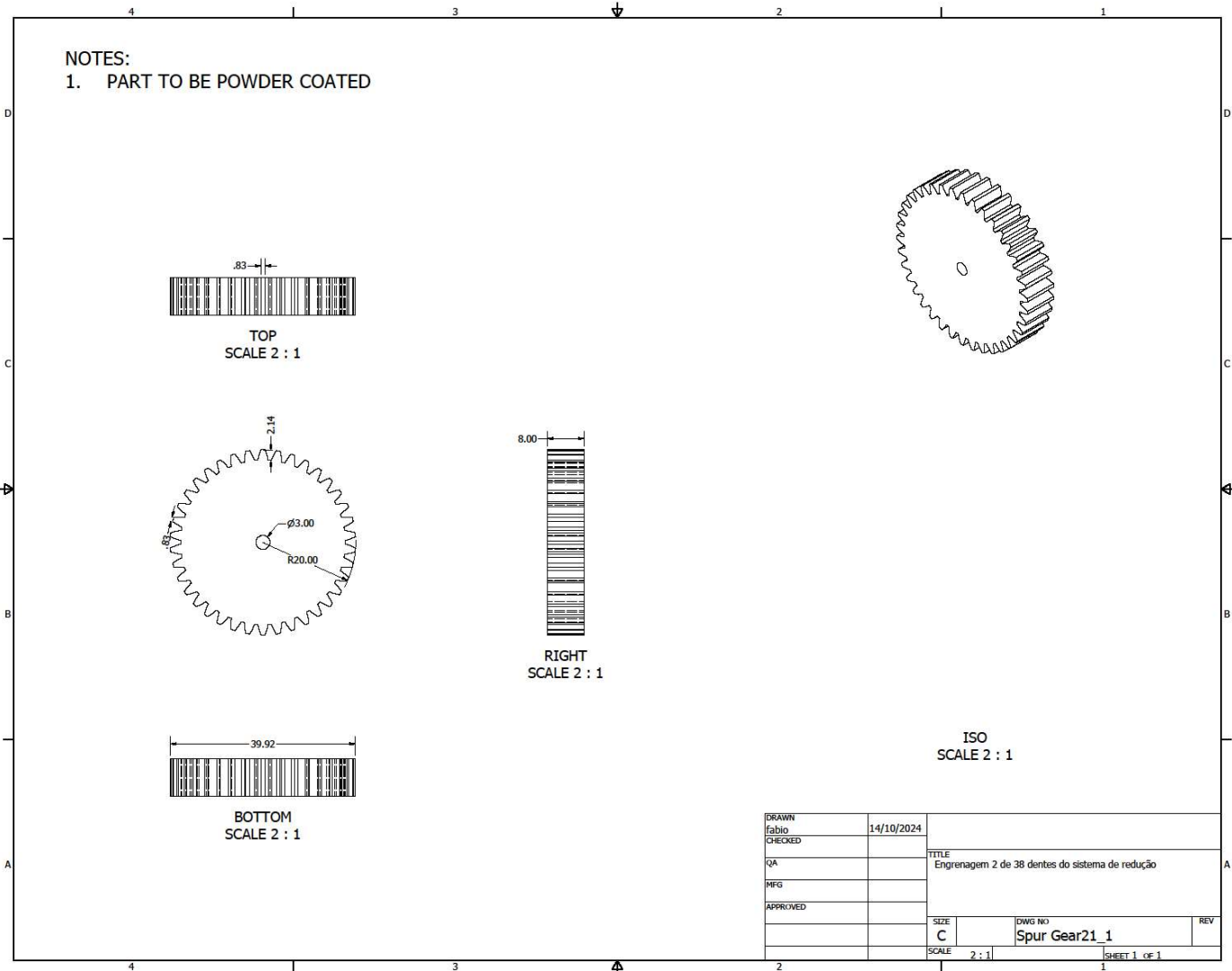
APÊNDICE B – Componentes da garra desenvolvidos no software Autodesk Inventor 2024.

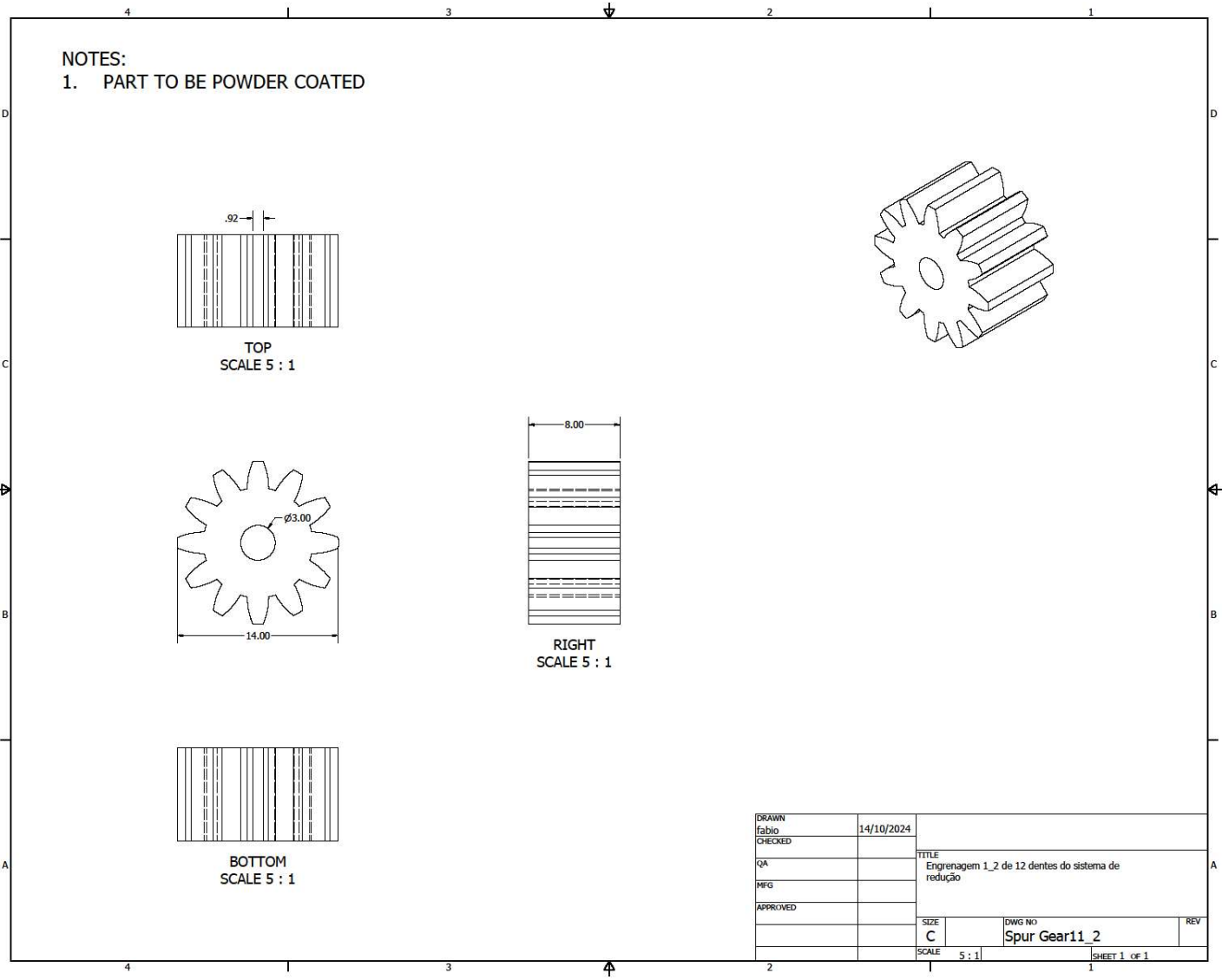


NOTES:  
 1. PART TO BE POWDER COATED

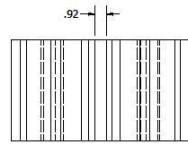


DRAWN	14/10/2024		
CHECKED		TITLE	
QA		Haste 1 da garra	
MFG			
APPROVED			
		SIZE	DWG NO
		ISO C	Haste Servo Atuador A_29.D1.24
		SCALE 2 : 1	SHEET 1 OF 1

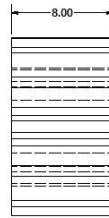
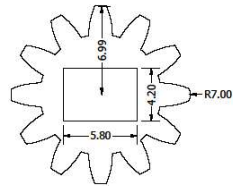
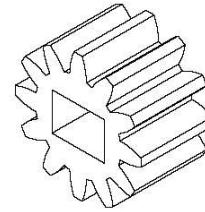




NOTES:  
 1. PART TO BE POWDER COATED



TOP  
 SCALE 5 : 1



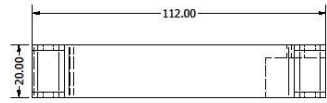
RIGHT  
 SCALE 5 : 1



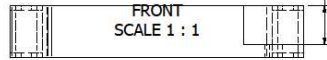
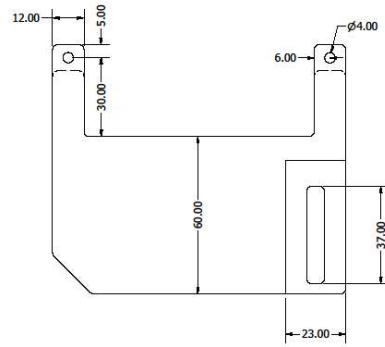
BOTTOM  
 SCALE 5 : 1

DRAWN	fabio	14/10/2024		
CHECKED				
QA			TITLE	
MFG			Engrenagem 1 do sistema de redução	
APPROVED			SIZE	DWG NO
			C	Spur Gear11_1
			SCALE	SHEET 1 OF 1
			5 : 1	

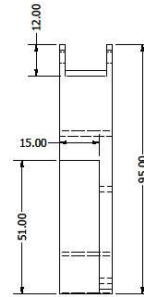
NOTES:  
 1. PART TO BE POWDER COATED



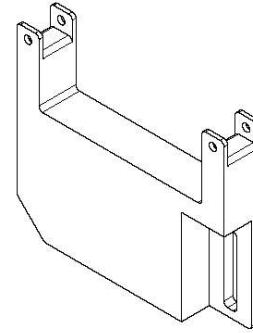
TOP  
SCALE 1 : 1



FRONT  
SCALE 1 : 1



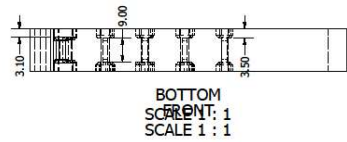
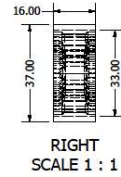
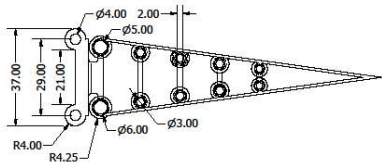
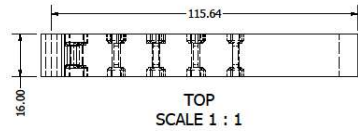
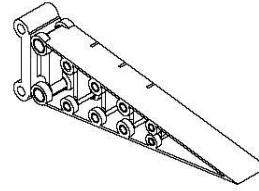
RIGHT  
SCALE 1 : 1



ISO  
SCALE 1 : 1

DRAWN	fabio	12/10/2024		
CHECKED				
QA			TITLE Base da garra	
MFG				
APPROVED				
			SIZE C	DWG NO Base da garra escala real_02.03.24
			SCALE 1 : 1	REV SHEET 1 OF 1

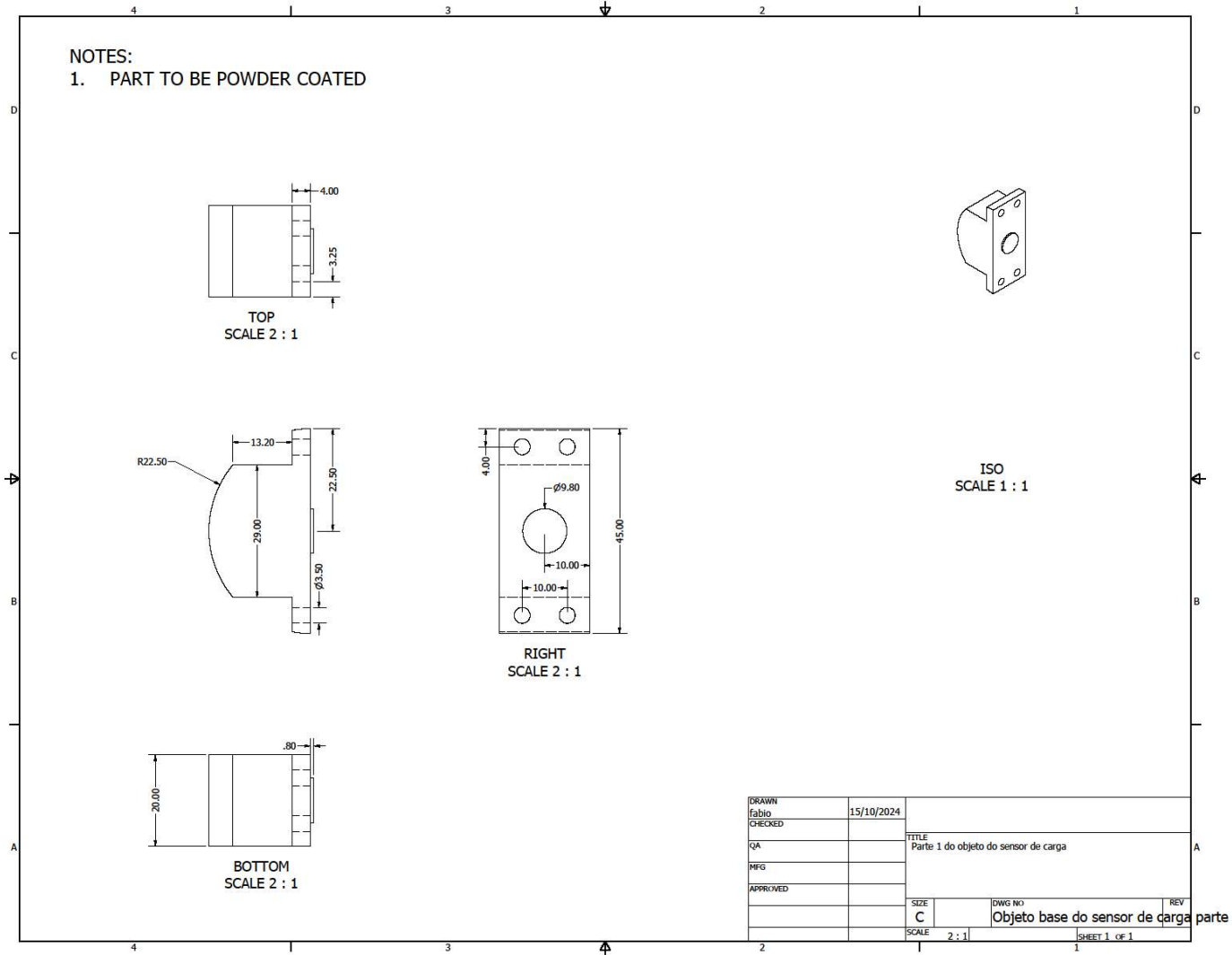
NOTES:  
 1. PART TO BE POWDER COATED



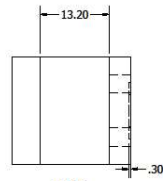
ISO  
SCALE 1 : 1

DRAWN	fabio	12/10/2024		
CHECKED				
QA			TITLE	
MFG			Efetuador	
APPROVED				
			SIZE	DWG NO
			C	Peça teste Impressão 3D Atuador com
			SCALE	REV
			1 : 1	
				SHEET 1 OF 1

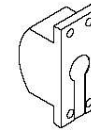
APÊNDICE C – projeto do dispositivo de medição de força aplicada



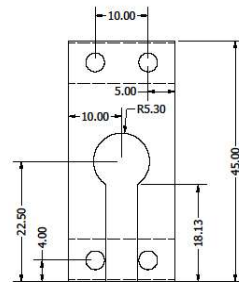
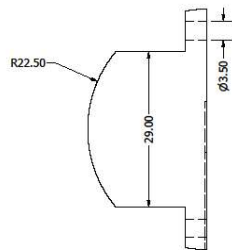
NOTES:  
 1. PART TO BE POWDER COATED



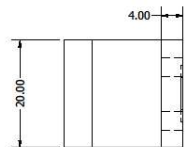
TOP  
 SCALE 2 : 1



ISO  
 SCALE 1 : 1



RIGHT  
 SCALE 2 : 1



BOTTOM  
 SCALE 2 : 1

DRAWN	Fabio	15/10/2024	
CHECKED			
QA			TITLE
MFG			Parte 2 do objeto do sensor de carga
APPROVED			
		SIZE	DWG No
		C	Objeto base do sensor de carga parte
		SCALE	2 : 1
			SHEET 1 OF 1

APÊNDICE D – Programação do sensor de força FSR50N utilizado para mensurar a força aplicada pela garra.

```
int IRD0 = 5;
int IRA0 = 0;

int ddata = 0;
int adata = 0;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  pinMode(IRD0, INPUT);

  Serial.begin(9600);
}






void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  ddata = digitalRead(IRD0);
  adata = analogRead(IRA0);






  if (ddata == 1){
    Serial.println("LIGADO");
  }
  else{
    Serial.println("DESLIGADO");
  }

  Serial.println(adata);

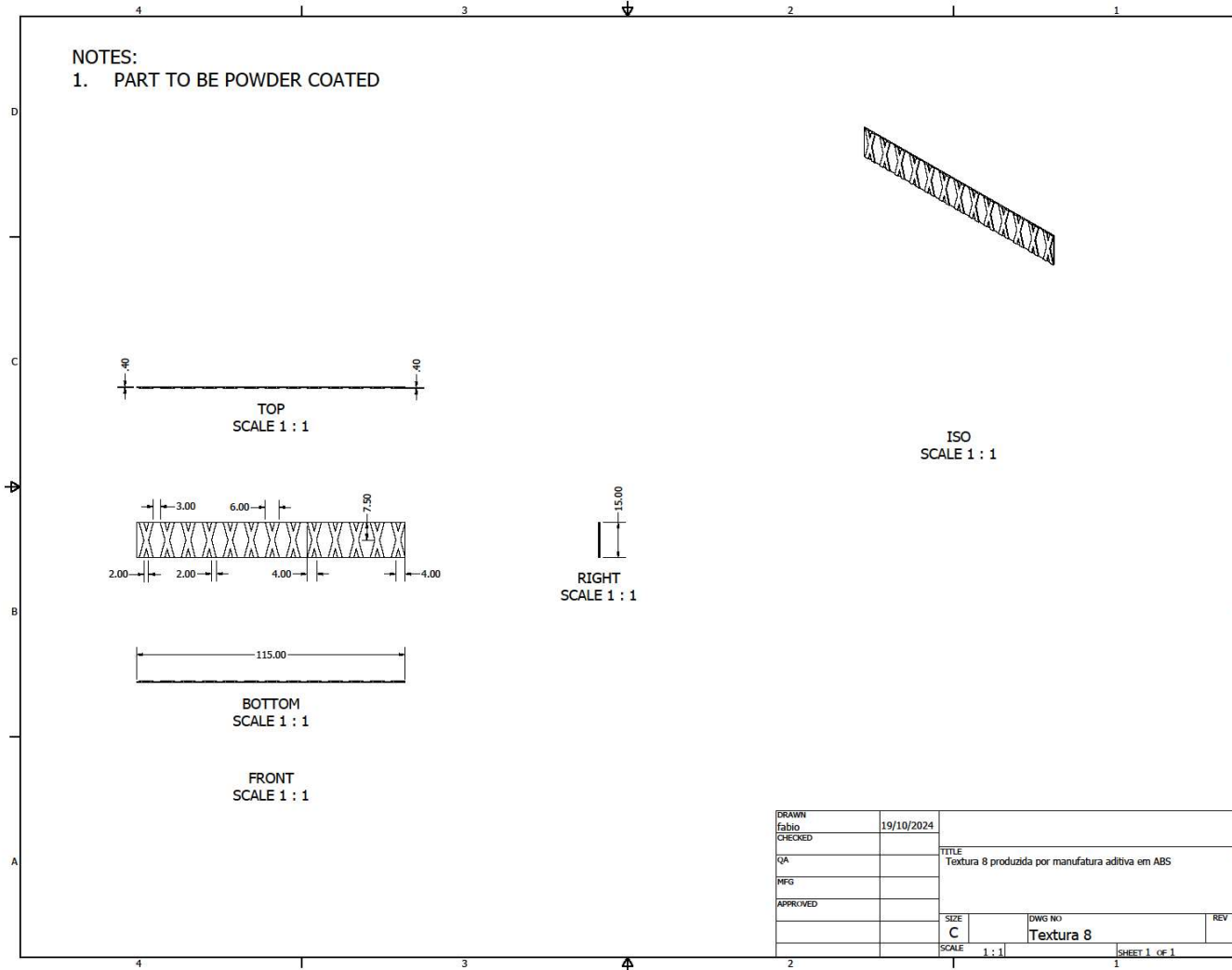
  delay(1000);
}
```

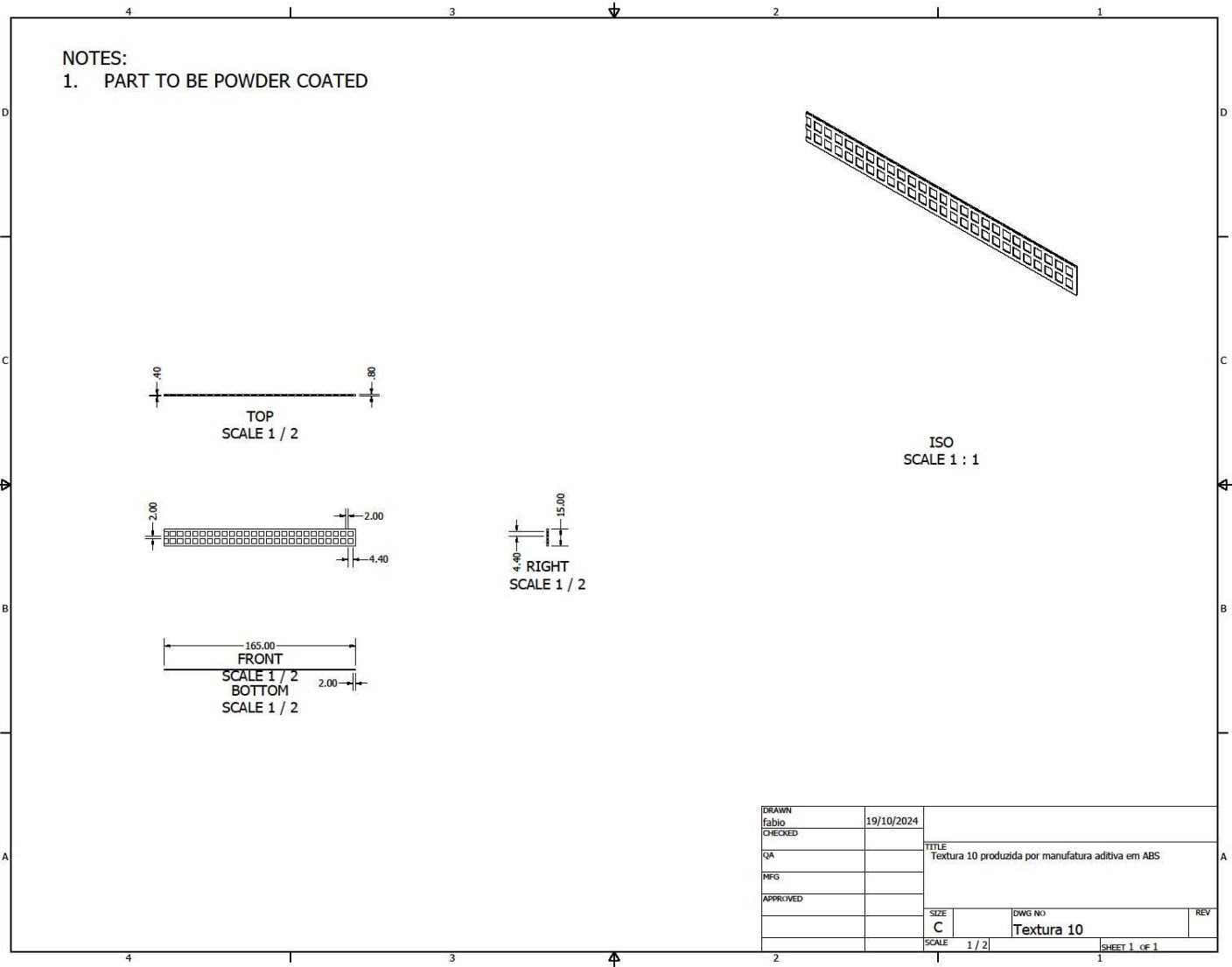
## APÊNDICE E – Planilha dos dados obtidos nas práticas de sustentagem de carga

Posição da Garra:		Horizontal																												
Tipo de textura		Formato Geométrico																												
		Retângulo							Quadrado							Círculo							Hexágono							
		Massa Suportada (kg)							Massa Suportada (kg)							Massa Suportada (kg)							Massa Suportada (kg)							
		1	2	3	4	5	Média	DP	1	2	3	4	5	Média	DP	1	2	3	4	5	Média	DP	1	2	3	4	5	Média	DP	
Eva atalhada		0,15	0,10	0,05	0,05	0,05	0,08	0,04	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,04	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,03	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,04
EVA homogênea		0,05	0,15	0,15	0,15	0,15	0,13	0,04	0,10	0,20	0,20	0,20	0,20	0,18	0,06	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,05	0,10	0,15	0,15	0,15	0,10	0,13	0,05	
Entrelaçado MA		0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,01	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,01	0,00	0,05	0,05	0,00	0,05	0,03	0,02	
Quadriculado MA		0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,00	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	
Teraband Intensidade média		0,15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,02	0,10	0,05	0,10	0,15	0,15	0,11	0,04	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,06	0,05	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,05	
Sem textura		0,05	0,10	0,10	0,05	0,05	0,07	0,03	0,05	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,03	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	

Posição da Garra:		Vertical																											
Tipo de textura		Formato Geométrico																											
		Retângulo							Quadrado							Círculo							Hexágono						
		Massa Suportada (kg)							Massa Suportada (kg)							Massa Suportada (kg)							Massa Suportada (kg)						
		1	2	3	4	5	Média	DP	1	2	3	4	5	Média	DP	1	2	3	4	5	Média	DP	1	2	3	4	5	Média	DP
Eva atalhada		0,35	0,40	0,40	0,40	0,35	0,38	0,03	<b>0,40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,11</b>	0,35	0,30	0,30	0,30	0,30	0,31	0,10	<b>0,35</b>	<b>0,30</b>	<b>0,35</b>	<b>0,30</b>	<b>0,30</b>	<b>0,32</b>	<b>0,10</b>
EVA homogênea		0,45	0,45	0,45	0,45	0,40	0,44	0,02	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,13</b>	0,30	0,35	0,30	0,35	0,35	0,33	0,13	<b>0,40</b>	<b>0,35</b>	<b>0,35</b>	<b>0,35</b>	<b>0,35</b>	<b>0,36</b>	<b>0,12</b>
Entrelaçado MA		0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,00	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,45</b>	<b>0,50</b>	<b>0,49</b>	<b>0,15</b>	0,10	0,15	0,15	0,10	0,10	0,12	0,17	<b>0,15</b>	<b>0,15</b>	<b>0,15</b>	<b>0,15</b>	<b>0,15</b>	<b>0,15</b>	<b>0,15</b>
Quadriculado MA		0,15	0,20	0,15	0,15	0,15	0,16	0,02	<b>0,20</b>	<b>0,20</b>	<b>0,20</b>	<b>0,20</b>	<b>0,20</b>	<b>0,20</b>	<b>0,05</b>	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,06	<b>0,10</b>	<b>0,15</b>	<b>0,15</b>	<b>0,15</b>	<b>0,15</b>	<b>0,14</b>	<b>0,05</b>
Teraband Intensidade média		0,40	0,45	0,40	0,40	0,40	0,41	0,02	<b>0,40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,11</b>	0,35	0,30	0,35	0,30	0,30	0,32	0,11	<b>0,25</b>	<b>0,30</b>	<b>0,25</b>	<b>0,25</b>	<b>0,25</b>	<b>0,26</b>	<b>0,11</b>
Sem textura		0,15	0,20	0,20	0,20	0,15	0,18	0,03	<b>0,20</b>	<b>0,20</b>	<b>0,20</b>	<b>0,20</b>	<b>0,20</b>	<b>0,20</b>	<b>0,05</b>	0,10	0,15	0,15	0,10	0,10	0,12	0,06	<b>0,10</b>	<b>0,15</b>	<b>0,15</b>	<b>0,15</b>	<b>0,15</b>	<b>0,14</b>	<b>0,05</b>

APÊNDICE F – desenhos das texturas confeccionadas em manufatura aditiva no material ABS

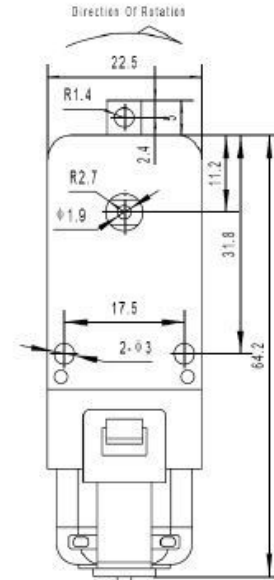
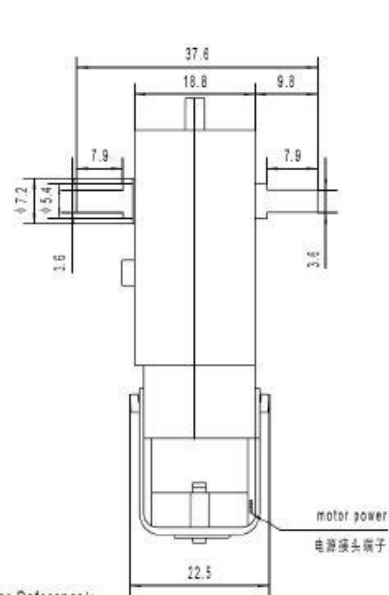




## ANEXOS

## ANEXO A

## DG01D-A130GEARMOTOR



GEAR BOX Specification(For Reference):

Suggested Voltage: 4.5V DC

1、No Load Speed:  $90 \pm 10$ rpm

2、No Load Current: 190mA (250mA MAX)

3、Allowable max. Torque: 800gf.cm min

DAGU Hi-Tech Electronic Co., LTD

Web sites: [www.arenx.com.cn](http://www.arenx.com.cn)

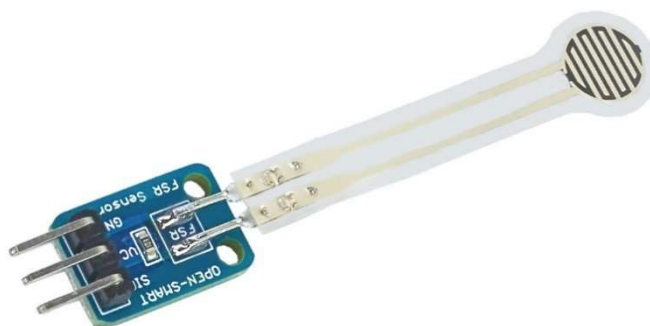
## ANEXO B

## DATASHEET FSR 50N

**ESPECIFICAÇÕES:**

- Modelo: FSR50N;
- Tensão De Trabalho: 5V;
- Corrente De Trabalho: 1mA;
- Escala De Pressão: 0-50N;
- Tempo De Resposta: <10ms;
- Tempo De Recuperação: <40ms;
- Área de Detecção: 9mm;
- Comprimento total do resistor FSR: 40mm;
- Peso Máximo Suportado: 5Kg;
- Temperatura de trabalho: -30 à +70°C;
- Comprimento do cabo: Dimensões: 10mm x 60mm x 0,5mm;
- Peso: 5g.

Fonte: <https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-pressao-arduino/sensor-de-forca-resistivo-fsr50n-8547.html>



## ANEXO C

Product Parameters			
<b>Machine model</b>	Ender-3	<b>File format</b>	STL, OBJ, AMF
<b>Molding technology</b>	FDM(Fused Deposition Molding)	<b>Slicing software</b>	Cura, Repetier-Host, simplify3D
<b>Printing size</b>	220*220*250mm	<b>Power supply</b>	input: AC 115V/230V output: DC 24V 270W
<b>Printing speed</b>	≤180mm/s, normal 30-60mm/s	<b>Filament</b>	PLA, ABS, TPU, wood, copper, gradient, etc.
<b>Printing precision</b>	±0.1mm	<b>N.W.</b>	6.62kg
<b>Nozzle diameter</b>	standard 0.4mm, can be in 0.3 or 0.2mm	<b>Machine size</b>	440*440*465mm
<b>Hotbed temperature</b>	≤100°C	<b>G.W.</b>	8.1kg
<b>File transfer</b>	Online or SD card offline	<b>Packaging size</b>	570*380*205mm

Fonte: <https://www.creality.com/products/ender-3-3d-printer>

## ANEXO D

## DATASHEET ARDUINO UNO



Arduino® UNO R3

Product Reference Manual  
SKU: A000066



### Description

The Arduino® UNO R3 is the perfect board to get familiar with electronics and coding. This versatile development board is equipped with the well-known ATmega328P and the ATmega 16U2 Processor.

This board will give you a great first experience within the world of Arduino.

### Target areas:

Maker, introduction, industries

### Features

- **ATmega328P Processor**
  - **Memory**
    - AVR CPU at up to 16 MHz
    - 32 kB Flash
    - 2 kB SRAM
    - 1 kB EEPROM
  - **Security**
    - Power On Reset (POR)
    - Brown Out Detection (BOD)
  - **Peripherals**
    - 2x 8-bit Timer/Counter with a dedicated period register and compare channels
    - 1x 16-bit Timer/Counter with a dedicated period register, input capture and compare channels
    - 1x USART with fractional baud rate generator and start-of-frame detection
    - 1x controller/peripheral Serial Peripheral Interface (SPI)
    - 1x Dual mode controller/peripheral I2C
    - 1x Analog Comparator (AC) with a scalable reference input
    - Watchdog Timer with separate on-chip oscillator
    - Six PWM channels
    - Interrupt and wake-up on pin change
- **ATmega16U2 Processor**
  - 8-bit AVR® RISC-based microcontroller
- **Memory**
  - 16 kB ISP Flash
  - 512B EEPROM
  - 512B SRAM
  - debugWIRE interface for on-chip debugging and programming
- **Power**
  - 2.7-5.5 volts