

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE IMPRESSÃO SOBRE A EFICIÊNCIA DE
UM MECANISMO FLEXÍVEL OBTIDO POR IMPRESSÃO 3D**

por

Rodrigo Reis e Silva

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, abril de 2023.

CIP - Catalogação na Publicação

e Silva, Rodrigo Reis

Análise da influência do ângulo de impressão sobre a eficiência de um mecanismo flexível obtido por impressão 3D / Rodrigo Reis e Silva. -- 2023.
25 f.

Orientador: Daniel Milbrath De Leon.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Ângulo de Impressão. 2. Gripper Flexível. 3. Impressão 3D. 4. Mecanismo Flexível. 5. Técnica FDM.
I. De Leon, Daniel Milbrath, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE IMPRESSÃO SOBRE A EFICIÊNCIA DE
UM MECANISMO FLEXÍVEL OBTIDO POR IMPRESSÃO 3D**

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS RE-
QUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Daniel Milbrath De Leon

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Daniel Milbrath De Leon (Presidente)

Prof. Dr. Felipe Tempel Stumpf

Profa. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues

Porto Alegre, abril de 2023.

Dedico esse trabalho à minha família, que sempre esteve presente, me apoiando em cada momento da minha vida, e a grandes amigos que me deram suporte e forças para seguir em frente.

e Silva. Rodrigo Reis. *Análise da influência do ângulo de impressão sobre a eficiência de um mecanismo flexível obtido por impressão 3D*. 2023. 27 páginas.
Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso.
Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

RESUMO

O presente trabalho teve o objetivo de analisar a influência do parâmetro ângulo de impressão sobre a eficiência de um mecanismo flexível obtido por meio de um processo de manufatura aditiva, a impressão 3d, em resposta a deslocamentos aplicados em uma de suas extremidades, tendo estes como resposta, um deslocamento perpendicular em sua outra extremidade. Exceto por esse parâmetro, as peças analisadas são totalmente idênticas. O mecanismo trata-se de um gripper flexível, que utiliza transferência de um movimento de entrada longitudinal, em um extremo, em um movimento perpendicular ao primeiro, no outro extremo. Para a obtenção do objetivo, deslocamentos foram aplicados, simulando este movimento de entrada. A análise foi feita sobre o movimento resultante no outro extremo. De acordo com os resultados obtidos, foi possível concluir que o ângulo de impressão exerce influência sobre a eficiência do mecanismo. As peças de análise foram projetadas no software CAD 3d paramétrico “Solidworks” e, para a configuração dos parâmetros de impressão e subsequente impressão, foi utilizado o software “Ultimaker Cura”. O material de impressão utilizado foi o PETG e a técnica de impressão utilizada foi a FDM.

Palavras-chave: Ângulo de Impressão. Gripper Flexível. Impressão 3D. Mecanismo Flexível. Técnica FDM.

e Silva. Rodrigo Reis. *Analysis of the influence of the printing angle on the efficiency of a compliant mechanism obtained by 3D printing*. 2023. 27 pages.

Conclusion of Course Monography.

Mechanical Engineering – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

ABSTRACT

The present work had the objective of analyzing the influence of the printing angle parameter on the efficiency of a compliant mechanism obtained through an additive manufacturing process, 3d printing, in response to displacements applied to one of its extremities, having these as a response, a perpendicular displacement in its other extremity. Except for this parameter, the analyzed pieces are totally identical. The mechanism is a flexible gripper, which uses a transfer of a longitudinal input movement at one end into a perpendicular movement at the other end. To obtain the goal, displacements were applied, simulating this input motion. The analysis was done on the resulting motion at the other end. According to the results obtained, it was possible to conclude that the printing angle has an influence on the efficiency of the mechanism. The analysis parts were designed in the 3d parametric CAD software "Solidworks" and for setting the printing parameters and subsequent printing, the software "Ultimaker Cura" was used. The printing material used was the PETG and the printing technique used was the FDM.

Keywords: Printing Angle. Flexible Gripper. 3D Printing. Compliant Mechanism. FDM Printing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linhas de impressão de um corpo de prova padrão <i>Sheet-Type</i> impresso com ângulo de impressão de 0°.....	3
Figura 2 – Linhas de impressão de um corpo de prova padrão <i>Sheet-Type</i> impresso com ângulo de impressão de 90°.....	4
Figura 3 – Diferentes níveis de preenchimento interno para o mesmo formato.	4
Figura 4 – Peças em STL em seus respectivos ângulos de impressão no software Ultimaker Cura. ..	6
Figura 5 – Ilustração do método FDM de impressão 3d.....	7
Figura 6 – Vista lateral da bancada experimental.	8
Figura 7 – Vista superior da bancada experimental.	8
Figura 8 – Ponto de aplicação (verde) e sentido de aplicação (amarelo) do deslocamento longitudinal.	9
Figura 9 - Sentido de deslocamento resultante das garras (amarelo) e pontos de engaste (vermelho).	10
Figura 10 – Vantagem geométrica.	12

LISTA DE TABELAS

Tab. 1 – Resultados dos deslocamentos para as seis peças analisadas.	11
Tab. 2 – Resultados médios de deslocamentos e de vantagem geométrica.	12

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação.....	2
1.1.1	Importância do estudo	2
1.2	Objetivos	2
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1	Ângulo de impressão.....	3
2.2	Preenchimento interno de impressão	4
2.3	Vantagem geométrica	5
2.4	Mecanismos flexíveis.....	5
3	METODOLOGIA	6
3.1	Obtenção do mecanismo	6
3.2	Técnica FDM de impressão 3D	7
3.3	Bancada experimental	7
3.4	Obtenção dos resultados.....	8
3.5	Resultados esperados	10
3.6	Custos totais e materiais de impressão.....	11
4	RESULTADOS	11
4.1	Eficiência do mecanismo	12
5	CONCLUSÃO	12
5.1	Sugestão para trabalhos futuros	14
	REFERÊNCIAS	15

NOMENCLATURA

Letras Representativas

U, V	Deslocamento	[m]
D	Distância	[m]
M	Massa	[kg]
T	Tempo	[s]

Símbolos Gregos

ϵ	Deformação	[-]
Δ	Variação	[-]

Abreviações

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
CAD	Computer-Aided Design
DLP	Digital Light Processing
FDM	Fused Deposition Modeling
PETG	Poliétileno Tereftalato Glicol
PLA	Poliácido Láctico
SI	Sistema Internacional
SLA	Service Level Agreement
STL	Standard Triangle Language
VG	Vantagem Geométrica

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento cada vez mais acelerado da indústria, novas tecnologias e processos de fabricação são desenvolvidos. Este trabalho utilizou os conhecimentos obtidos no curso, aliados a uma técnica cada vez mais crescente, a manufatura aditiva, uma tecnologia que permite a produção rápida e personalizada de peças com geometrias complexas.

A manufatura aditiva é uma técnica que funciona por meio da adição de materiais, camada a camada. A base para esta tecnologia é um modelo digital, a partir do qual os produtos são fabricados. Um modelo em alta no mercado, no qual este trabalho se baseou, é a impressão 3D, uma técnica que, a cada ano, cresce cada vez mais, e que apesar de apresentar um enorme destaque na última década, não é nova, tendo surgido em 1984, inventada pelo engenheiro físico Chuck Hull. Em outras palavras, esta técnica cria modelos tridimensionais por meio da sobreposição progressiva de material em camadas pré estabelecidas, a partir de um modelo tridimensional digital.

Esta tecnologia possui vantagens em relação a outras técnicas de fabricação, como o fato de não necessitar do uso de moldes e também de possibilitar a fabricação de peças com formas que não são viáveis ou práticas de se fabricar por outros métodos. Também possui a vantagem de trabalhar com diversos materiais diferentes, obtendo peças com diferentes propriedades físicas, o que permite a criação de protótipos com boa precisão, excelente acabamento superficial e infinitas funcionalidades e cores.

A orientação das camadas de impressão pode influenciar a força e a rigidez da peça, conseqüentemente atingindo a eficiência e o comportamento estrutural dos componentes impressos. Este trabalho utilizou, especificamente, a técnica FDM (*Fused Deposition Modeling*), que utiliza fio de material, o qual é fornecido para uma extrusora por meio de uma bobina. A extrusora é então aquecida, permitindo a deposição do material, e o bocal possui livre movimento nas direções horizontal e vertical. O material utilizado pode ser tanto plástico quanto metal, sendo o ABS (*Acrilonitrila Butadieno Estireno*) e o PLA (*Poliácido Láctico*) os mais utilizados, tendo sido o PETG o material utilizado neste trabalho. Além desta, existem diversas outras técnicas, como a SLA (*Service Level Agreement*) e a DLP (*Digital Light Processing*), que utilizam luz como fonte de calor.

1.1 **Motivação**

A motivação para este trabalho é a importância da compreensão de como um mecanismo se comporta diante de diferenças nos parâmetros de sua obtenção por impressão 3D. Diversos parâmetros estão envolvidos no processo, dessa forma, entender como cada um influencia em fatores como comportamento estrutural, resistência mecânica, dureza ou eficiência dos mecanismos obtidos é um passo fundamental se queremos que estes sejam funcionais.

1.1.1 **Importância do estudo**

Apesar de bastante usual no projeto de mecanismos flexíveis, muito pouca literatura sobre a influência do ângulo de deposição das fibras na confecção de tais mecanismos é encontrada. Em relação direta à eficiência geométrica do mecanismo analisado (relação entre deslocamento de saída e deslocamento de entrada), nenhuma pesquisa foi encontrada. Esse parâmetro é muito importante, pois na síntese de um mecanismo sua vantagem geométrica é um dos itens que medem a eficiência do projeto. Por isso esse estudo é importante.

Outro motivo que aumenta a importância deste estudo é o fato de os parâmetros exercerem influência direta nos projetos de mecanismos impressos. É importante entender como cada parâmetro influencia o projeto, o que facilita o direcionamento do mesmo. Em outras palavras, o objetivo final de um projeto é determinado pelos parâmetros de impressão. Por exemplo, se quisermos que um mecanismo seja flexível, a escolha do material é determinante; se quisermos que seja resistente a esforços aplicados em algum sentido, o ângulo de impressão é determinante.

1.2 **Objetivos**

Os objetivos deste trabalho foram a análise da influência do ângulo de impressão sobre a eficiência de um gripper flexível, um mecanismo flexível que utiliza a transferência de um deslocamento de entrada longitudinal em um extremo em um perpendicular, no outro extremo, e, principalmente, definir sob que ângulo de impressão a obtenção deste mecanismo o torna mais eficiente de acordo com o seu funcionamento. O estudo do deslocamento resultante das garras do gripper flexível foi a base sobre a qual a análise sobre sua eficiência foi realizada. Quanto maior esse deslocamento, maior a eficiência do mecanismo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As alterações nos parâmetros de impressão possibilitam diferenças não só de acabamento, mas de projeto. No caso deste trabalho, tratamos do parâmetro ângulo de impressão.

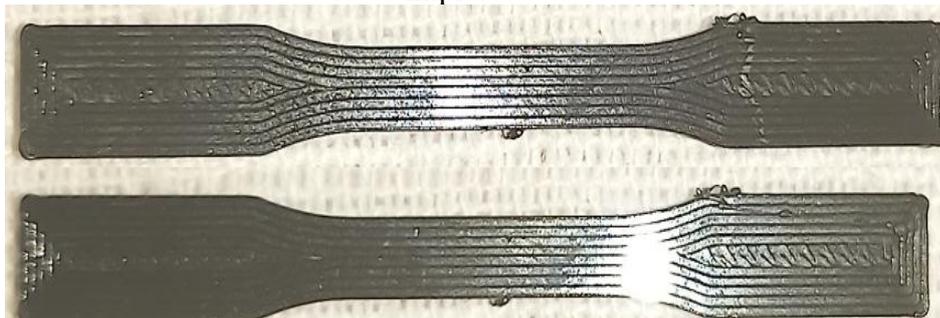
2.1 Ângulo de impressão

Trata-se de um parâmetro bastante importante, que influencia em fatores como resistência mecânica, dureza, eficiência e comportamento estrutural de peças impressas. Ele está relacionado com a anisotropia forçada entre peças, ou seja, para peças impressas sob todos os outros parâmetros iguais, os fatores citados terão resultados diferentes quando esforços na mesma direção forem aplicados em peças impressas com ângulos de impressão diferentes. Os diferentes ângulos de impressão resultam em peças com diferentes sentidos de linhas de impressão, que funcionam como fibras, sendo muito mais difíceis de romper do que de separar.

Para corpos simples, unidirecionais, uma peça impressa com ângulo de impressão de 0° possui suas linhas em seu sentido longitudinal. Espera-se que essa peça seja mais resistente a esforços longitudinais, como tração. Ao contrário, peças impressas a 90° possuem suas linhas de impressão paralelas entre si em seu sentido transversal, ou seja, dispostas em suas seções transversais. Estas peças são menos resistentes a esforços longitudinais, pois a disposição de suas linhas facilita o rompimento (ou descolamento) da peça.

A Fig. 1 mostra um corpo de prova padrão *Sheet-Type* impresso sob ângulo de impressão de 0° . Suas linhas de impressão estão dispostas longitudinalmente à peça, dificultando o descolamento nesse sentido, o que permite que este corpo de prova seja mais resistente a esforços de tração.

Figura 1 – Linhas de impressão de um corpo de prova padrão *Sheet-Type* impresso com ângulo de impressão de 0° .



Fonte: Própria (2023).

A Fig. 2 mostra um corpo de prova padrão *Sheet-Type* impresso sob ângulo de impressão de 90°. Suas linhas de impressão estão dispostas transversalmente à peça, facilitando o descolamento no sentido longitudinal, o que torna este corpo de prova péssimo para ensaios de tração.

Figura 2 – Linhas de impressão de um corpo de prova padrão *Sheet-Type* impresso com ângulo de impressão de 90°.

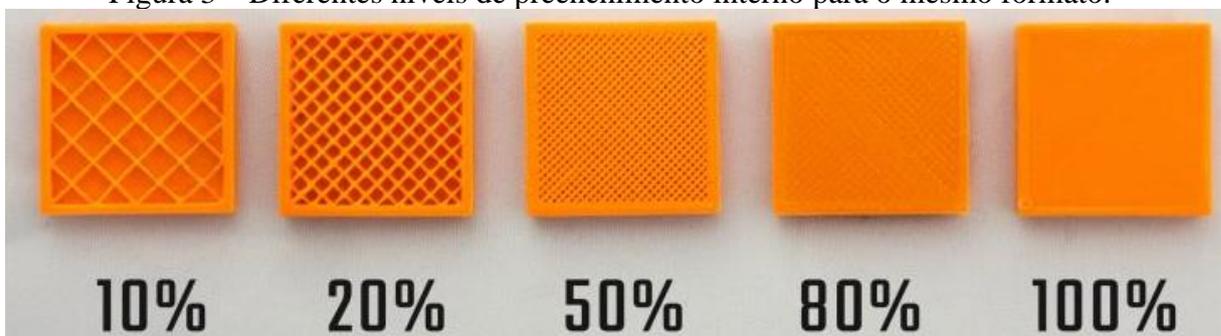


Fonte: Própria (2023).

2.2 Preenchimento interno de impressão

Este parâmetro influencia em diversos outros parâmetros de impressão e também em características da peça obtida, como quantidade de material empregado na impressão, tempo de impressão e resistência mecânica da peça. As peças podem ser impressas sob preenchimento interno que varia desde 0% a 100%. É um parâmetro importante que define não só a qualidade e características mecânicas da peça obtida, mas também o custo final da impressão. Trata-se de quanto material será utilizado nas partes internas da peça obtida, ou seja, dentro da peça. Este trabalho utilizou o nível de preenchimento de 20% para a obtenção do mecanismo analisado. As peças podem ser preenchidas de diferentes formas, em diferentes formatos, de acordo com o objetivo desejado. A Fig. 3 mostra diferentes níveis de preenchimento interno para uma mesma peça e para o mesmo formato de impressão.

Figura 3 – Diferentes níveis de preenchimento interno para o mesmo formato.



Fonte: Impressão3dPortugal (2021).

2.3 Vantagem geométrica

O gripper flexível funciona de acordo com o conceito de vantagem ou ganho geométrico, que, conforme a Equação 1, é a razão entre o deslocamento exercido por um mecanismo e o deslocamento aplicado sobre este mecanismo. É uma grandeza adimensional. Em outras palavras, é como um mecanismo se comporta em relação a um deslocamento na porta de entrada.

O objeto de análise deste trabalho é o quanto o mecanismo se desloca, no sentido horizontal, em uma de suas extremidades, em relação a um deslocamento aplicado inicialmente, em outra extremidade, no sentido vertical. As seções no capítulo de metodologia deste trabalho mostram como o mecanismo funciona, como o deslocamento inicial é aplicado e como o mecanismo exerce o deslocamento resultante.

De forma clara, quanto maior for a vantagem geométrica, maior será a eficiência do mecanismo.

$$VG = \frac{U_r}{V_a} \quad (1)$$

Onde VG é a vantagem geométrica do mecanismo, U_r é o deslocamento resultante do mecanismo, e V_a é o deslocamento aplicado.

2.4 Mecanismos flexíveis

Um mecanismo convencional, não flexível, é uma junção de elementos rígidos acoplados por pinos e juntas. Em outras palavras, trata-se de um conjunto de elementos rígidos que se unem por diferentes tipos de junções de modo a transmitir movimentos e forças.

Ao contrário de mecanismos não flexíveis, mecanismos flexíveis são aqueles nos quais a deformação elástica é aproveitada na atuação cinemática (DE LEON, 2015, n.p). Em outras palavras, sua mobilidade é garantida através da deformação concentrada em regiões de baixa rigidez, o que os possibilita transmitir movimentos, função primária dos mecanismos em geral. Dessa forma, não necessitam de juntas para a união de seus elementos, não precisando, portanto, de mais do que um único elemento para que sejam funcionais. Outras vantagens são os fatos de apresentarem movimentos mais precisos e de possuírem mais possibilidades produtivas (como a manufatura aditiva), o que possibilita o baixo custo relativo. Devido a essa

característica, de não possuir acoplamento entre partes, a otimização topológica de estruturas (Bendsoe, M. P. e Kikuchi, N., 1988) é uma técnica que pode ser usada com sucesso para a síntese de mecanismos dessa natureza.

3 METODOLOGIA

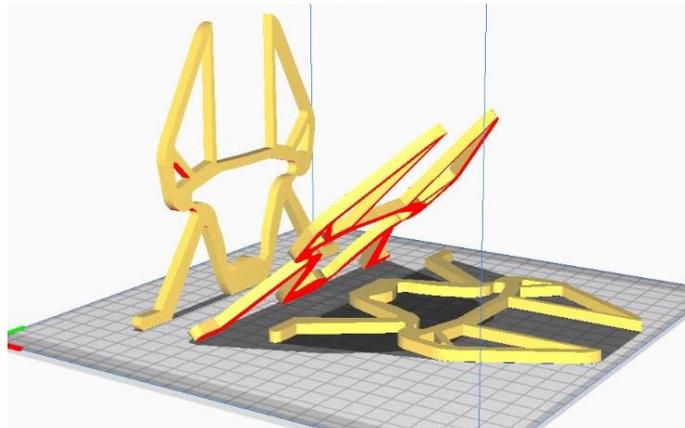
As seções abaixo descrevem, passo a passo, a metodologia utilizada, desde a obtenção dos mecanismos até a obtenção dos resultados. Como suporte, para o projeto prévio do mecanismo, foi utilizado o software CAD 3d paramétrico “Solidworks” e, para a configuração dos parâmetros de impressão e subsequente impressão, foi utilizado o software “Ultimaker Cura”.

3.1 Obtenção do mecanismo

Para avaliar os efeitos do ângulo de impressão no comportamento do mecanismo, foram produzidas peças idênticas por impressão 3D sob três diferentes perspectivas angulares. Duas peças foram impressas em pé, a 90° em relação à sua base, com as camadas de impressão paralelas nas seções transversais da peça. Outras duas foram impressas sob ângulo de 45° com relação à sua base. Finalmente, outras duas foram impressas deitadas, a 0° com relação à sua base, com as camadas paralelas ao comprimento da peça, no sentido longitudinal.

Todos os outros parâmetros foram exatamente iguais e todas as peças foram impressas com preenchimento interno de 20%. Não foram feitas alterações estruturais em relação à peça projetada, de modo que sua obtenção não alterou sua função original. A Fig. 4 mostra a disposição das peças em seus respectivos ângulos de impressão.

Figura 4 – Peças em STL em seus respectivos ângulos de impressão no software Ultimaker Cura.

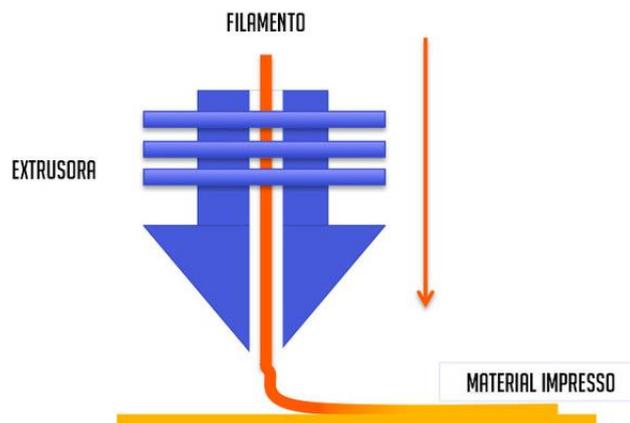


Fonte: Própria (2023).

3.2 Técnica FDM de impressão 3D

Conforme descrito em seções anteriores, a técnica de impressão utilizada neste trabalho foi a FDM, a qual se trata de um método de fabricação aditiva no qual um objeto é criado por meio da fundição de camadas de materiais em um determinado padrão. Este material é derretido após a temperatura de transição vítrea e, em seguida, criando um objeto camada por camada, é extrudado em um padrão próximo ou acima das extrusões anteriores, conforme a Fig. 5. Em outras palavras, a impressora FDM pega um filamento de plástico e, em seguida, o comprime através de uma extremidade quente, de forma que ele seja derretido e depositado em camadas no leito de impressão. Após isso, ocorre a fundição das camadas e consequente acumulação em toda a impressão.

Figura 5 – Ilustração do método FDM de impressão 3d.



Fonte: EngiPrinters (2023).

3.3 Bancada experimental

Para analisar a eficiência do mecanismo sob a influência do ângulo de impressão, uma bancada foi obtida. Esta bancada consiste em uma tábua de madeira, sobre a qual, para auxiliar na obtenção dos resultados dos ensaios, uma folha quadriculada foi colada. Cada quadrado da folha possui lados de 2 milímetros de comprimento. A tábua possui peças de metal presas em seu sentido perpendicular (fixadas com parafusos nas extremidades inferiores), as quais foram utilizadas para a fixação dos pés do mecanismo, conforme a Fig. 6, que mostra a vista lateral da bancada experimental, e a Fig. 7, que mostra a vista superior. Para auxiliar na fixação, dois grampos sargentos tipo C foram utilizados.

Figura 6 – Vista lateral da bancada experimental.



Fonte: Própria (2023).

Figura 7 – Vista superior da bancada experimental.



Fonte: Própria (2023).

3.4 Obtenção dos resultados

Após a montagem da bancada, deslocamentos iguais foram aplicados no sentido longitudinal dos mecanismos testados, conforme a Fig. 8. O deslocamento aplicado foi de 1 milímetro. Esse deslocamento aplicado inicialmente foi medido com o auxílio de uma régua simples de acrílico.

Figura 8 – Ponto de aplicação (verde) e sentido de aplicação (amarelo) do deslocamento longitudinal.



Fonte: Própria (2023).

Após a aplicação do deslocamento longitudinal, conforme o funcionamento previsto do mecanismo, suas garras sofreram deslocamento no sentido do fechamento, perpendicular ao sentido do deslocamento aplicado, conforme a Fig. 9. Quanto maior o deslocamento das garras, maior a eficiência do mecanismo. O tempo de aplicação do deslocamento inicial não influenciou nos resultados.

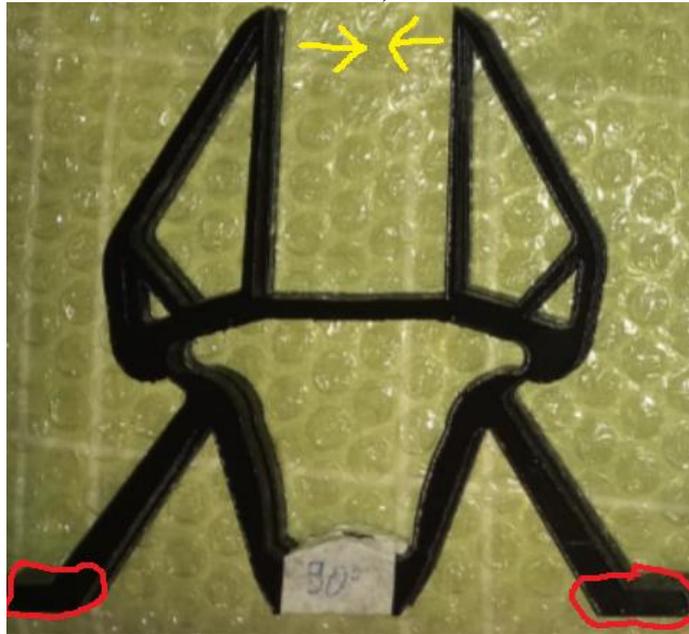
O deslocamento das garras foi medido pela diferença entre suas distâncias, conforme a Eq. 2. Inicialmente, todos os mecanismos possuíam 16,5 quadrados de distância entre suas garras, ou seja, 33 milímetros. Após a aplicação do deslocamento longitudinal inicial, mediu-se a nova distância entre as garras, obtendo-se, pela diferença entre suas distâncias inicial e final, o deslocamento resultante do mecanismo.

$$U_r = d_i - d_f \quad (2)$$

Onde U_r é o deslocamento resultante do mecanismo, no sentido horizontal, d_i é a distância inicial entre as garras e d_f é a distância final entre as garras.

Os ensaios foram realizados nas seis peças obtidas. Para cada ângulo de análise, duas peças foram ensaiadas. O deslocamento de análise final das garras para cada ângulo foi obtido por meio da média entre os deslocamentos das garras das peças para seus respectivos ângulos.

Figura 9 - Sentido de deslocamento resultante das garras (amarelo) e pontos de engaste (vermelho).



Fonte: Própria (2023).

3.5 Resultados esperados

A análise aprofundada dos corpos de prova rígidos, apresentados na seção 2.1, induz a esperar que o mecanismo analisado neste trabalho se comporte da mesma forma. Dessa forma, fazendo uma analogia, espera-se que os mecanismos impressos a 0° sejam menos eficientes, pois o deslocamento aplicado é no sentido longitudinal, o que levaria à necessidade de mais esforço para o deslocamento. Porém, é preciso entender que o mecanismo em questão não é rígido, funcionando, portanto, de forma totalmente diferente. Dessa forma, é impossível, sem a análise aprofundada descrita em toda a metodologia, chegar a alguma conclusão sobre este ou sobre qualquer outro mecanismo flexível apenas com base na análise de corpos rígidos.

Também se faz necessária a compreensão de que a obtenção de um mecanismo complexo a 0° por impressão 3D é totalmente diferente da de um mecanismo simples como os corpos de prova padrão *sheet-type*. Estes últimos são mecanismos unidirecionais, o que significa que o bocal da impressora percorre um único sentido, coisa que não acontece nos mecanismos complexos. A obtenção destes últimos obriga o bocal a criar a peça percorrendo mais de um sentido, tratando os caminhos longos como longitudinais, por partes, portanto. Em outras palavras, o sentido das linhas em mecanismos complexos depende não só das linhas de impressão, mas também do próprio mecanismo. Por outro lado, os mecanismos, mesmo que complexos, obtidos sob ângulo de impressão de 90° , apresentarão suas linhas de impressão

sempre no sentido transversal aos seus comprimentos, pois as peças obtidas por impressão 3D são produzidas camada a camada.

3.6 Custos totais e materiais de impressão

O material utilizado foi o filamento PETG, que se caracteriza por apresentar boa resistência térmica e facilidade de impressão. Além disso, apresenta outras vantagens, como facilidade de extrusão, boa flexibilidade, elevada dureza superficial, boa durabilidade e altas resistências ao desgaste, ao impacto e à corrosão. Além disso, apresenta excelente adesão entre as camadas e pouca deformação durante a impressão.

Os custos de impressão estão relacionados à quantidade de material utilizado e à mão de obra empregada. Segundo a empresa contratada, 1 kg de filamento PETG custa R\$ 110. O custo total das seis peças impressas foi de R\$ 140, onde cada peça possui uma massa de 17g, o que resultou em, aproximadamente, 1 kg de material utilizado. Portanto, o custo de mão de obra somado ao custo de tempo de impressão foi de, aproximadamente, R\$ 129.

4 RESULTADOS

As tabelas a seguir mostram os resultados dos ensaios. A Tab. 1 mostra os resultados obtidos de todas as peças ensaiadas, enquanto que a Tab. 2 mostra as médias dos resultados das peças ensaiadas para cada ângulo de impressão. Os resultados mostrados na segunda tabela foram os utilizados para análise do objetivo e consequente conclusão deste trabalho. Como o deslocamento inicial aplicado foi de 1 mm, de acordo com a Equação 1, as vantagens geométricas para cada ângulo de impressão são os próprios deslocamentos médios, portanto, a Tab. 2 também mostra os resultados das vantagens geométricas.

Tab. 1 – Resultados dos deslocamentos para as seis peças analisadas.

Ângulo de Impressão	Distância Inicial	Distância Final	Deslocamento
0° (Peça 1)	33,0	32,0	1,0
0° (Peça 2)	33,0	32,2	0,8
45° (Peça 1)	33,0	31,6	1,4
45° (Peça 2)	33,0	32,0	1,0
90° (Peça 1)	33,0	31,0	2,0
90° (Peça 2)	33,0	31,4	1,6

Tab. 2 – Resultados médios de deslocamentos e de vantagem geométrica.

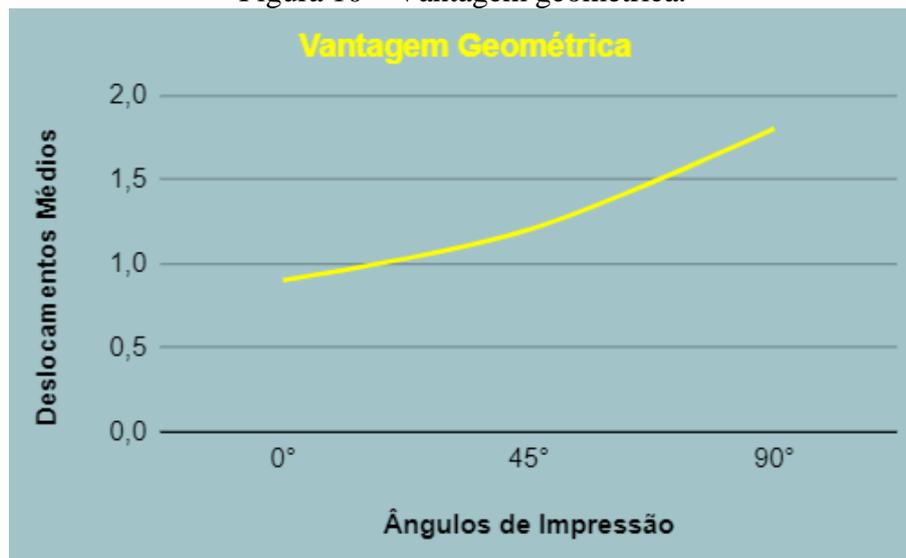
Ângulo de Impressão	Deslocamento Médio e Vantagem Geométrica
0°	0,9
45°	1,2
90°	1,8

- Distância e Deslocamento estão em milímetros.
- Vantagem Geométrica é adimensional.

4.1 Eficiência do mecanismo

A Fig. 10 mostra um gráfico com a relação entre o ângulo de impressão e o deslocamento médio das garras. A linha do gráfico indica a vantagem geométrica.

Figura 10 – Vantagem geométrica.



Fonte: Própria (2023).

5 CONCLUSÃO

Este trabalho possibilitou a conclusão de que o ângulo de impressão é um importante parâmetro para o projeto de mecanismos flexíveis obtidos por meio de manufatura aditiva utilizando a técnica FDM de impressão 3D. Esta forma de impressão é a mais comum na indústria, o que possibilitou a obtenção das peças de forma rápida e simples. Sendo assim, é importante entender que este estudo utilizou parâmetros específicos e que a alteração do método de impressão requer estudos mais avançados. De forma clara, é possível que a técnica de impressão utilizada também influencie nos resultados obtidos.

A eficiência não é um parâmetro quantitativo, de forma que não se deve atribuir valores a esse fator, que é puramente qualitativo. Em outras palavras, não se deve falar que um mecanismo é “n” vezes mais ou menos eficiente, apenas que ele é mais ou menos eficiente. Além disso, a eficiência está relacionada com a vantagem geométrica, sendo este fator quantitativo. Portanto, a comparação entre as vantagens geométricas de diferentes mecanismos se dá de forma numérica.

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, de forma quantitativa, os mecanismos impressos sob ângulo de impressão de 90° apresentaram 100% a mais de vantagem geométrica do que os obtidos sob ângulo de impressão de 0° , ou seja, o dobro. De forma qualitativa, os primeiros se mostraram mais eficientes do que os últimos. Portanto, a eficiência deste mecanismo sofre bastante influência do ângulo de impressão, sendo maior conforme se aumenta este parâmetro.

Os resultados foram obtidos e concluídos com base, especificamente, no mecanismo analisado, o gripper flexível. Portanto, para outros mecanismos, é possível que os resultados sejam diferentes para os ângulos de análise, o que poderia resultar em conclusões diferentes em relação à eficiência para determinado ângulo. De forma mais clara, é possível que, em análises em outros mecanismos, o ângulo de impressão que proporcione maior eficiência seja 0° ou até mesmo um ângulo intermediário.

Esperava-se, de acordo com a observação das características dos corpos de prova rígidos e unidirecionais apresentados na seção 2.1, que os mecanismos impressos a 0° se mostrassem menos eficientes, pois o deslocamento aplicado é no sentido longitudinal, o que levaria à necessidade de mais força para o deslocamento. Esta foi a hipótese adotada para os resultados obtidos, porém, como explicado na seção 3.5, não existe correlação entre os resultados obtidos para o mecanismo analisado e a análise dos corpos de prova citados, pois o gripper flexível é um mecanismo complexo. Desta forma, era impossível prever como ele funcionaria apenas com base na análise de corpos de prova rígidos sem que a metodologia descrita neste trabalho fosse aplicada apenas, pois estes funcionam de forma não conclusiva se utilizados para prever o funcionamento de mecanismos flexíveis.

As medições dos deslocamentos (tanto o aplicado inicialmente quanto o resultante) foram feitas com o auxílio de uma régua simples. O papel quadriculado foi utilizado apenas como uma base. Dessa forma, o resultado está sujeito a erros de medição relacionados à incerteza do instrumento de medição. A obtenção destes erros não faz parte do escopo deste trabalho, ficando apenas como sugestão para trabalhos futuros a análise com algum método com uma incerteza menor do que a de uma régua comum.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Sugere-se para trabalhos futuros a análise de como a mudança em outros parâmetros afeta a influência angular sobre a eficiência do mecanismo. Um bom exemplo é o estudo de como a alteração no preenchimento interno das peças afeta a influência angular. Para isso, os mesmos testes realizados neste trabalho deverão ser realizados em peças idênticas, com as mesmas diferenças angulares de impressão, mas com preenchimento interno diferente. Como explicado anteriormente, a análise de parâmetros de impressão em outros tipos de mecanismos também é uma boa sugestão para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

DE LEON, D.M. **Otimização topológica de mecanismos flexíveis com controle da tensão máxima considerando não linearidades geométrica e material.** 2015. Tese (obtenção do título de Doutor em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MAEDA, Willian. **Impressão 3D: o que é e como ela está revolucionando o mundo.** Vulcanoej. Disponível em <https://vulcanoej.com.br/2019/02/28/o-que-e-a-impresao-3d/?utm_source=blogpost&utm_medium=googleads&utm_campaign=impresao3d&gclid=Cj0KCQjwlPWgBhDHARIsAH2xdNf6RdqIFgSxF1c5JgCDq2yRMMeEYJHIYQrNlyczXjHV4FxPNonfDslaAtpSEALw_wcB>. Acesso em: 24 mar 2023.

DIAS, Brayam. **FILAMENTO PETG: VANTAGENS, CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES.** Wishbox. Disponível em <<https://www.wishbox.net.br/blog/filamento-petg-vantagens/>>. Acesso em: 24 mar 2023.

Equipe EngiPrinters. **O QUE É E COMO FUNCIONA A IMPRESSÃO 3D.** EngiPrinters. Disponível em: <<https://engiprinters.com.br/o-que-e-e-como-funciona-a-impresao-3d/>>. Acesso em: 24 mar 2023.

Equipe EngiPrinters. **O QUE É E COMO FUNCIONA A IMPRESSÃO 3D FDM?** EngiPrinters. Disponível em: <<https://engiprinters.com.br/impresao-3d-fdm-o-que-e-e-como-funciona-d58/>>. Acesso em: 24 mar 2023.

Equipe TOTVS. **O que é manufatura aditiva, tecnologias, vantagens e muito mais!** Totvs. Disponível em <<https://www.totvs.com/blog/gestao-industrial/manufatura-aditiva/#:~:text=O%20que%20%C3%A9%20manufatura%20aditiva%3F>>. Acesso em: 24 mar 2023.

Equipe Filament2Print. **Que é o PETG?** Filament2Print. Disponível em <https://filament2print.com/pt/blog/49_petg.html#:~:text=O%20PETG%20como%20material%20utilizado,ser%20impresso%20como%20o%20PLA.>. Acesso em: 24 mar 2023.

Wikipédia, a enciclopédia livre. **Impressão 3D.** Wikipedia. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Impress%C3%A3o_3D>. Acesso em: 24 mar 2023.

Equipe ITENSP. **ENSAIOS MECÂNICOS.** Itensp. Disponível em <<https://www.itensp.com.br/ensaios-mecanicos#:~:text=Os%20ensaios%20mec%C3%A2nicos%20s%C3%A3o%20m%C3%A9todos,em%20v%C3%A1rias%20condi%C3%A7%C3%B5es%20de%20uso.>>. Acesso em: 24 mar 2023.

Equipe 3DLAB. **Aprenda como escolher o tipo e percentual de preenchimento na impressão 3D!** 3dlab. Disponível em <<https://3dlab.com.br/preenchimento-na-impresao-3d/>>. Acesso em: 27 mar 2023.

Wikipédia, a enciclopédia livre. **Ganho mecânico.** Wikipedia. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Ganho_mec%C3%A2nico#:~:text=Ganho%20mec%C3%A2nico%20\(ou%20Vantagem%20Mec%C3%A2nica,formado%20por%20corda%20e%20roldana.](https://pt.wikipedia.org/wiki/Ganho_mec%C3%A2nico#:~:text=Ganho%20mec%C3%A2nico%20(ou%20Vantagem%20Mec%C3%A2nica,formado%20por%20corda%20e%20roldana.)>. Acesso em: 27 mar 2023.

Equipe Impressão 3D Portugal. **O que é o preenchimento de uma Impressão 3D?**. impressão3dportugal. Disponível em: <<https://impressao3dportugal.pt/o-que-e-o-preenchimento-de-uma-impressao-3d/>>. Acesso em: 28 mar 2023.

Dicionário Online de Português. **Significado de Mecanismo**. Dicio. Disponível em <<https://www.dicio.com.br/mecanismo/>>. Acesso em 28 mar 2023.

Wikipédia, a enciclopedia livre. **Mecanismo**. Wikipedia. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Mecanismo>>. Acesso em: 28 mar 2023.

Equipe Montaggio Engenharia Industrial. **Mecanismos Flexíveis**. LinkedIn. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/mecanismos-flex%C3%ADveis-montaggio-engenharia-industrial/?originalSubdomain=pt>>. Acesso em: 28 mar 2023.

KIKUCHI, Noboru. GENERATING OPTIMAL TOPOLOGIES IN STRUCTURAL DESIGN USING A HOMOGENIZATION METHOD Martin Philip BENDS~ E. **Computer methods in applied mechanics and engineering**, v. 71, p. 197-224, 1988.