

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

SÍNTESE DE UM MECANISMO FLEXÍVEL USANDO TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO  
TOPOLÓGICA

por

Rodinei de Lima Vaz Scărpinski

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

de Lima Vaz Scărpinski, Rodinei  
SÍNTESE DE UM MECANISMO FLEXÍVEL USANDO TÉCNICAS DE  
OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA / Rodinei de Lima Vaz  
Scărpinski. -- 2023.  
15 f.  
Orientador: Daniel Milbrath De Leon.

Coorientador: André Piva Romeu.

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. otimização topológica. 2. mecanismos flexíveis.  
3. simulação numérica. 4. impressão 3D. 5.  
distribuição de material . I. Milbrath De Leon,  
Daniel, orient. II. Piva Romeu, André, coorient. III.  
Titulo.

Rodinei de Lima Vaz Scärpinski

SÍNTESE DE UM MECANISMO FLEXÍVEL USANDO TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO  
TOPOLÓGICA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS 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. Daniel Milbrath De Leon

Co-orientador: André Piva Romeu

Comissão de Avaliação:

Prof. Daniel Milbrath De Leon (Presidente)

Prof. Edson Hikaro Aseka

Prof. Ignacio Iturrioz

Porto Alegre, abril de 2023

## DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a minha família que sempre me apoiou e me incentivou na busca pelo conhecimento.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha gratidão à maior força que rege nosso universo; uns chamam de Deus, mas sinto que não posso defini-lo em uma única palavra. Agradeço a ele pela oportunidade de conhecer e poder buscar na ciência e nos estudos uma forma de aprender mais a respeito dele.

Agradeço ao meu orientador Daniel Milbrath De Leon, que me acompanhou e orientou com muito profissionalismo e dedicação; sou grato ao meu co-orientador André Piva Romeu, que me apoiou e orientou de forma exemplar durante o meu TCC.

Sou grato aos meus pais, Marlene e Valdir, pela confiança, pelas palavras de ânimo quando pensei em desistir ou por me dar aquele apoio nos momentos de desafio. Agradeço pelas oportunidades de me tornar uma pessoa melhor e principalmente por me incentivarem nos estudos e serem essas pessoas maravilhosas.

Agradeço às minhas irmãs, Carine e Graciele, pelo ombro amigo que foram quando as coisas não saíam como planejado. Agradeço a elas por me trazerem muito orgulho e me auxiliarem nessa jornada.

Sou grato à minha esposa, Raquel, por me incentivar a estudar. Por estar comigo nos momentos mais difíceis e por sempre me ouvir e ser essa pessoa incrível que és.

Agradeço à universidade federal do Rio Grande do Sul pelo ensino público gratuito e de excelência que me foi oferecido.

EPÍGRAFE

*A natureza  
usa o mínimo  
possível  
de tudo..*

*Johannes Kepler*

De Lima Vaz Scärpinski, Rodinei. **Síntese de um mecanismo flexível usando técnicas de otimização topológica**. 2023. 15p. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

## RESUMO

A síntese de mecanismos flexíveis é um desafio para a engenharia mecânica, pois envolve a consideração de aspectos geométricos, cinemáticos e dinâmicos. Neste trabalho, propõe-se um método para sintetizar um mecanismo flexível utilizando otimização topológica, que é uma técnica para encontrar a melhor distribuição de material em um domínio. O objetivo deste trabalho é demonstrar a facilidade de implementar o método de otimização topológica usando ferramentas computacionais disponíveis e comparar os resultados obtidos com os experimentais. A metodologia consistiu em elaborar um código em *Python* usando o aplicativo *Spyder* em um computador com *Linux*, modelar o mecanismo em um aplicativo de *CAD*, simular o comportamento do mecanismo usando o método dos elementos finitos, calcular a vantagem mecânica e imprimir o mecanismo em uma impressora 3D. Os resultados mostraram que o método de otimização topológica foi capaz de sintetizar um mecanismo flexível com uma vantagem mecânica satisfatória e que os resultados da simulação numérica foram próximos dos experimentais, com uma diferença relativa menor que 2%. O trabalho contribuiu para a aplicação da otimização topológica na síntese de mecanismos flexíveis e para a validação dos resultados numéricos com os experimentais. As limitações do trabalho foram a simplificação do modelo matemático e a qualidade da impressão 3D.

**PALAVRAS-CHAVE:** otimização topológica; mecanismos flexíveis; simulação numérica; impressão 3D, distribuição de material.

De Lima Vaz Scärpinski, Rodinei. **Synthesis of a compliant Mechanisms using topology optimization techniques**. 2023. 15 p.. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

## ABSTRACT

The synthesis of compliant mechanisms is a challenge for mechanical engineering, as it involves the consideration of geometric, kinematic and dynamic aspects. In this work, a method is proposed to synthesize a compliant mechanism using topological optimization, which is a technique to find the best distribution of material in a domain. The objective of this work is to demonstrate the ease of implementing the topological optimization method using available computational tools and compare the results obtained with the experimental ones. The methodology consisted of developing a code in Python using the Spyder application on a Linux computer, modeling the mechanism in a CAD application, simulating the behavior of the mechanism using the finite element method, calculating the mechanical advantage and printing the mechanism in a 3D printer. The results showed that the topological optimization method was able to synthesize a compliant mechanism with a satisfactory mechanical advantage and that the numerical simulation results were close to the experimental ones, with a relative difference less than 2%. The work contributed to the application of topological optimization in the synthesis of compliant mechanisms and to the validation of numerical results with experimental ones. The limitations of the work were the simplification of the mathematical model and the quality of 3D printing.

**KEYWORDS:** topological optimization; compliant mechanisms; numerical simulation; 3D printing, distribution of materials.



## NOMENCLATURA

### Símbolos

$f$	Campo
$\bar{f}$	Campo suavizado pelo filtro de Hermholtz
$\rho_e$	Densidade do elemento
$\rho$	Densidade relativa do elemento
P	Fator de penalidade
C++	Linguagem de programação
$K_e$	Matriz de Rigidez do elemento
$E_0$	Módulo de Young
E_min	Módulo de Young mínimo
ds_size	Número de elementos que sofrerão a ação das condições de contorno
nu	Poisson
$r_{min}$	Raio de filtragem do filtro de Helmutz
$K_{simp}$	Rigidez global
K_in	Rigidez na entrada
K_out	Rigidez na saída
el_size	Tamanho do elemento
$\sigma_{ij}$	Tensões
E( $\rho_e$ )	Young com relação a densidade do elemento

### Abreviaturas e acrômimos

.stl	Extensão de arquivo
CAD	Desenho assistido por computador (Computer-Aided Design)
MEF	Método dos elementos Finitios
MEMS	Micromecanismos
PRBM	Modelo de Corpo Pseudo Rígido (pseudo-rigid body model)
PETG	Polietileno Tereftalato Glicol
TPU95	Poliuretano termoplástico
SIMP	(Solid Isotropic Material with Penalization)

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>2</b>
<b>3. OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
<b>4. FUNDAMENTAÇÃO</b>	<b>3</b>
4.1 Otimização topológica	3
4.2 Método <i>SIMP</i>	3
4.3 Filtro de Helmholtz	4
<b>5. METODOLOGIA</b>	<b>5</b>
<b>6. CASO DE ESTUDO</b>	<b>6</b>
6.1 Elaboração de código.	6
6.2 Criação da malha	6
6.3. Condições de contorno	7
6.4. Aplicação do <i>SIMP</i> , <i>Helmholtz_filter</i>	7
6.5. Execução do código	8
6.6. Análise dos resultados obtidos na simulação.	8
6.7. Impressão do mecanismo flexível	8
<b>7. RESULTADOS</b>	<b>8</b>
<b>8. CONCLUSÃO</b>	<b>15</b>
<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>16</b>
<b>ANEXO 1: FICHA TÉCNICA DO FILAMENTO TPU 95</b>	<b>18</b>
<b>ANEXO 2: FICHA TÉCNICA DO FILAMENTO PETG</b>	<b>21</b>

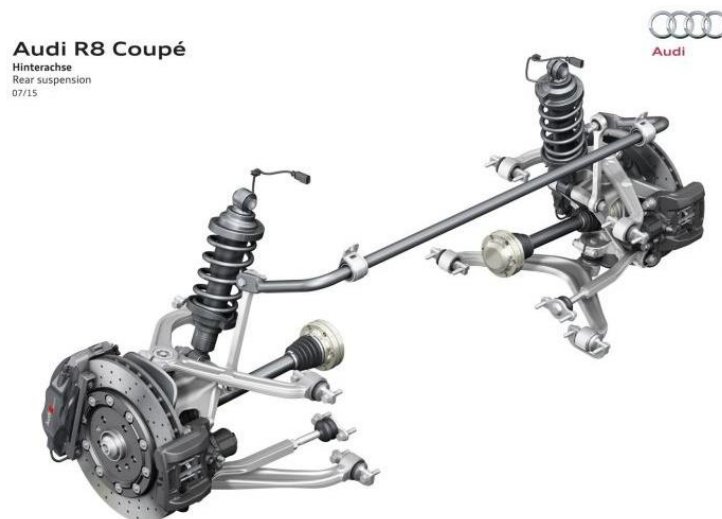
## 1. INTRODUÇÃO

Para atender a demanda por equipamentos menores, os cientistas e engenheiros buscaram simplificar a produção, reduzir custos, folgas, atritos, desgaste e tamanho dos mecanismos. Assim, eles estudaram métodos alternativos para obter seus resultados com menos desperdício de material e eliminar alguns custos de produção. Os mecanismos flexíveis não têm pinos e rótulas para fazer os movimentos. Isso permite que a indústria use mecanismos mais precisos e confiáveis.

Os mecanismos são dispositivos que convertem um tipo de movimento ou força em outro, em um ponto diferente do mecanismo. Os mecanismos rígidos são formados por materiais rígidos (que podem ser móveis ou fixos) conectados por rótulas, eixos ou pinos. Os mecanismos flexíveis são compostos por peças únicas que visam substituir os mecanismos rígidos para diminuir os problemas de desgaste, atrito ou folga. Na figura 1 pode ser visto um mecanismo de baixa complexidade, já na figura 2 pode ser visto um mecanismo mais complexo.



**Figura 1: Alicates: Um exemplo de mecanismo rígido de baixa complexidade**  
Fonte: <https://www.lfmaquinaseferramentas.com.br/alicate-universal-tramontina-8/>



**Figura 2: Mecanismo da suspensão de um veículo automotivo**  
Fonte: <https://www.diariomotor.com/que-es/mecanica/tipos-esquemas-suspension/>

Um exemplo de mecanismo flexível é apresentado na figura 3.



**Figura 3: Mecanismo flexível**

Fonte: [https://www.researchgate.net/figure/Compliant-plier-27\\_fig2\\_353422442](https://www.researchgate.net/figure/Compliant-plier-27_fig2_353422442)

Mecanismos flexíveis podem ser usados em áreas da mecânica que requerem muita precisão, instrumentos cirúrgicos, máquinas fotográficas e robótica.

Algumas vantagens dos mecanismos flexíveis são:

- Os mecanismos flexíveis não têm rótulas ou eixos como os mecanismos rígidos.
- Os mecanismos flexíveis podem ser feitos de um único material, sem problemas de fricção ou necessidade de lubrificação.
- Eles não apresentam folgas, o que os torna muito precisos.
- Eles podem ser facilmente impressos em 3D.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Segundo Howell (2001) os mecanismos flexíveis possuem várias vantagens, mas a principal é reduzir o número de componentes em sua montagem, pelo fato de não conter rótulas ou pinos. Isso resulta em mecanismos que sofrem menos desgaste e não necessitam ser lubrificados que por sua vez gera economia na manutenção dos equipamentos.

De Leon (2013) em seu trabalho afirma que a maior dificuldade encontrada nesses projetos é de conciliar a resistência mecânica da estrutura de estudo com os requisitos de movimentos. No trabalho é citado que mecanismos flexíveis utilizam da deformação elástica para gerar movimentos e há uma vasta empregabilidade desse tipo de mecanismos na engenharia biomédica, e mais recentemente em Sistemas Micro-Eleto-Mecânicos (mais conhecidos pela sigla em inglês *MEMS*).

Sochacki (2020) aplicou otimização topológica através de um *software* altamente difundido na indústria para reduzir o peso de um veículo industrial. Com o objetivo de reduzir o consumo de combustível e aumentar a sua eficiência.

Bahia (2005) desenvolveu um procedimento para a determinação de projetos ótimos de mecanismos flexíveis, utilizando o método de otimização topológica. Segundo Bahia (2005) mecanismos flexíveis pertencem a uma categoria de mecanismos que obtém sua mobilidade usando somente da deformação elástica e não possui juntas ou pinos.

Abram (2019) sintetizou um mecanismo flexível capaz de exercer as mesmas funções de um mecanismo rígido utilizando o Modelo de Corpo Pseudo Rígido (conhecido pela sigla *PRBM*,

do inglês *pseudo-rigid body model*) esse modelo substitui rótulas e pino por molas torcionais. Ele validou seu mecanismo com o uso de simulações numéricas em um software comercial.

### 3. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é sintetizar um mecanismo flexível utilizando o método SIMP de penalização do material, estudando os diversos parâmetros existentes em um problema de otimização. Mais precisamente, o fator de penalização “p” e o efeito do filtro de Helmholtz serão estudados a fim de entender o papel de cada um na otimização topológica. Adicionalmente, para a melhor topologia obtida um estudo da eficiência do mecanismo será realizado. Um gripper flexível será gerado com a técnica de penalização material e será impresso usando tecnologia de impressão 3D, mais precisamente *Fused Deposition Modeling* (FDM).

### 4. FUNDAMENTAÇÃO

#### 4.1 Otimização topológica

Otimização topológica é uma área da otimização estrutural que visa maximizar uma função objetivo sujeita a restrições. Quando se trata de mecanismos flexíveis, uma boa função objetivo para o problema de otimização é maximizar as relações entre os deslocamentos de entrada e de saída do mecanismo, chamada de vantagem geométrica. O método de otimização topológica distribui o material dentro de um domínio pré-estabelecido e respeita as condições de contorno do problema. Um dos métodos mais usados em otimização topológica para determinar a presença ou ausência de material em cada ponto do domínio é o método conhecido como Solid Isotropic material with Penalization (SIMP). Esse método, usando a informação da derivada da função objetivo com relação à presença ou não de material base naquele ponto determina quais pontos do domínio de projeto receberá material e quais pontos serão considerados vazios.

#### 4.2 Método SIMP

Leuck Filho (2015) fez uma pesquisa sobre o método de otimização SIMP, que é um método para encontrar a melhor distribuição de material em estruturas. Ele comparou as soluções numéricas que o método SIMP gerou com as soluções analíticas para o peso ótimo de treliças planas. Ele mostrou que o método SIMP era eficiente e robusto.

O método SIMP foi desenvolvido por Bendsoe e Kikuchi (1988) e Rozvany e Zhou (1992). Ele determina a presença ou ausência de material em cada elemento da estrutura, de acordo com as restrições, as condições de limite e as cargas aplicadas. Ele usa uma variável chamada de pseudo-densidade ( $\rho_e$ ), que pode ter valores entre 0 e 1. Se o valor for 1, significa que há material no elemento. Se o valor for 0, significa que não há material no elemento.

No método SIMP, a pseudo-densidade ( $\rho_e$ ) afeta a resistência mecânica do material base. Ela pode multiplicar a matriz de rigidez do elemento ou o módulo de Elasticidade (Módulo de Young) do elemento, dependendo do autor. A relação entre o módulo de Young e a pseudo-densidade é dada pela lei de potência, que é definida por:

$$E(\rho_e) = \rho_e^p E_0 \quad (1)$$

onde na equação 1 o  $E(\rho_e)$  é o módulo de Young penalizado,  $\rho_e$  é a pseudo-densidade, o expoente p é o fator de penalização que sua influência no mecanismo proposto neste trabalho

será avaliada pelo autor e  $E_0$  o módulo de Young. A Figura 4 mostra o efeito da penalização SIMP para duas escolhas de  $p$ .

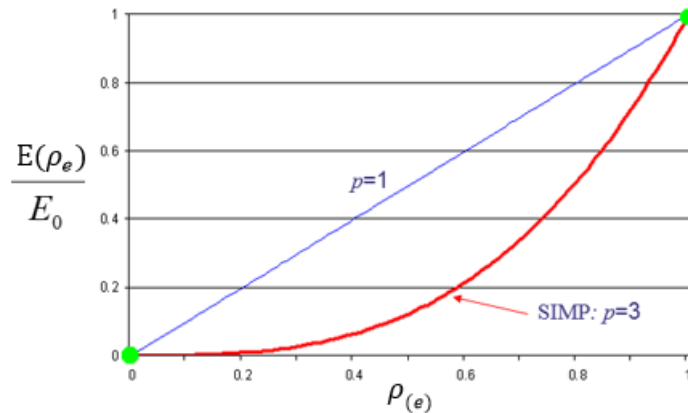


Figura 4: Fator de penalização  $p=3$  em comparação a  $p=1$ .

Fonte: [https://help.solidworks.com/2019/Portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c\\_simp\\_method\\_topology.htm?format=P&value=#:~:text=O%20m%C3%A9todo%20SIMP%20prediz%20a,fabrica%C3%A7%C3%A3o%20e%20requisitos%20de%20desempenho.](https://help.solidworks.com/2019/Portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm?format=P&value=#:~:text=O%20m%C3%A9todo%20SIMP%20prediz%20a,fabrica%C3%A7%C3%A3o%20e%20requisitos%20de%20desempenho.)

O fator de penalização  $p$  é muito importante, pois de certa forma obriga os elementos com densidade intermediária a se tornarem 1 ou 0, ou seja, vazios ou material base. Esse fator reduz os elementos com densidade intermediária e é comprovado experimentalmente que o seu melhor valor está atribuído em 3 essa comprovação será realizada também nesse trabalho. Um dos objetivos principais da otimização topológica é satisfazer uma função objetivo. A função objetivo pode ser a função de rigidez global descrita pela equação 2:

$$K_{SIMP} = \sum_{e=1}^N [\rho_{mín} + (1 - \rho_{mín})\rho_e^p] K_e \quad (2)$$

A função global de rigidez é apresentada pela equação 2, que mostra a relação entre os deslocamentos e as forças externas que atuam na estrutura. Essa equação leva em conta as propriedades do material e as densidades artificiais de cada elemento finito. Ela também utiliza uma função de penalização na rigidez de cada elemento, visando aumentar a rigidez. Enquanto houver iterações (as iterações definidas no código) de otimização as restrições funcionais do projeto devem ser respeitadas integralmente. Durante cada iteração, é realizada uma análise de sensibilidade para obter o impacto da variação de densidade do elemento sobre a função objetivo. Durante essa análise é possível eliminar os elementos que possuem pouca relevância nos cálculos (elementos com densidades intermediárias).

### 4.3 Filtro de Helmholtz

Neste trabalho, usamos um otimizador matemático que decide a presença ou ausência de material em cada ponto do domínio, baseado nas sensibilidades da função objetivo e das restrições em relação às pseudo densidades. Um problema numérico comum em otimização topológica e elementos finitos é o efeito tabuleiro de xadrez, que não será detalhado aqui. Uma

solução eficaz para esse problema é aplicar filtros espaciais, que consideram as sensibilidades dos elementos vizinhos.

Neste trabalho, um filtro do tipo Helmholtz é aplicado para resolver o problema da rigidez artificial gerada pela interpolação de baixa ordem das funções do elemento finito aplicado.

Como apresentado no trabalho de Leuck Filho (2015) a equação de Helmholtz quando aplicada a um campo  $f$  gera outro campo suavizado  $\bar{f}$  como pode ser conferido na equação 3. A equação é uma equação modificada da equação de Helmholtz. A equação 3 é utilizada para filtrar a sensibilidade da função objetivo e das restrições de relação as pseudo densidades. Onde:  $\bar{f}$  é o campo suavizado,  $f$  é o campo original,  $r_{min}^2$  é o raio mínimo de um elemento estrutural e  $\nabla^2$  é o operador laplaciano.

$$\bar{f} - r_{min}^2 \nabla^2 \bar{f} = f \quad (3)$$

## 5. METODOLOGIA

O estudo parte de uma revisão bibliográfica sobre a linguagem *Python*, sistema *Linux* e mecanismos flexíveis. Ao longo da revisão bibliográfica foram consultadas dissertações, teses, artigos científicos e monografias de trabalho de conclusão de cursos de outros autores.

Foi adaptado um código em *Python* utilizando o software *Spyder* em um computador com o sistema Operacional *Linux*. Definida a malha para a criação da geometria é realizada a aplicação das condições de contorno. A condição de contorno pode ser vista na figura 5.

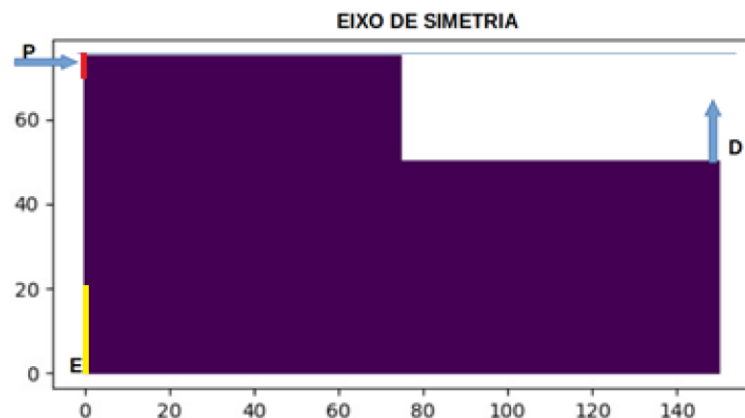


Figura 5: Condições de Contorno do estudo.

Fonte: O autor

Deve-se observar que a geometria abordada no código se trata da metade do mecanismo de estudo. Há um eixo de simetria que corta a figura na altura do ponto P ( $Y=75$ ), o ponto E foi fixado e um deslocamento é aplicado no ponto P. Após a aplicação de deslocamento no ponto P é gerado um deslocamento no ponto D e igualmente na outra parte simétrica espelhada do mecanismo.

Como parte do estudo é proposto a avaliação da influência da penalização *SIMP* utilizando as penalizações 1, 2 e 3. Será também avaliada a influência do Filtro de Helmholtz utilizando os parâmetros 0,1, 1,1, 2,1 e 3,1. Após variar o filtro de Helmholtz e a penalização *SIMP* será comparado o melhor valor para criar a geometria através do código.

Com o resultado obtido pelo código é criado um desenho 3D do mecanismo. As propriedades do material do mecanismo são obtidas na ficha técnica do filamento *TPU*. Com o desenho concluído será realizada a avaliação numérica da vantagem mecânica do mecanismo. Quando

a vantagem mecânica for maior que 20% o mecanismo poderá ser impresso em impressora 3D, caso não for maior é necessário refazer o projeto.

Após avaliada a vantagem mecânica na simulação numérica é realizada a impressão do mecanismo utilizando uma impressora 3D e material *TPU*. Com o material já impresso é realizado medidas para conferir se o mecanismo impresso possui as mesmas medidas do mecanismo projetado. Após a confirmação das medidas é realizado o experimento aplicando um deslocamento de 5mm para calcular a vantagem mecânica do mecanismo físico e posteriormente se comparara as vantagens mecânicas e deslocamentos de saídas obtidos experimentalmente com os obtidos na análise numérica do mesmo problema. Vale destacar a dificuldade de se aplicar um deslocamento de exatamente 5mm na prática.

## 6. CASO DE ESTUDO

O mecanismo flexível de estudo foi construído com o auxílio de técnicas de otimização topológica, Métodos dos Elementos Finitos, Linguagem de programação *Python*, criação de um desenho 3D e em seguida impresso.

### 6.1 Elaboração de código.

Para a elaboração do código foi necessário instalar o sistema operacional Linux na máquina onde posteriormente foi instalado o software *Anaconda e Spyder* (ambos em suas versões gratuitas). Foram instaladas as bibliotecas *dolphin\_adjoint, numpy, matplotlib.pyplot; ufl, mshr, pylab*. Os parâmetros adotados no problema são:

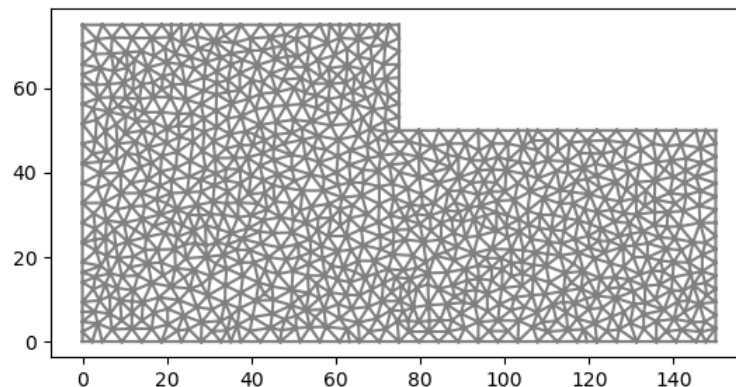
- Iterações (quantidade de vezes que irá ocorrer os cálculos nos nós) = 200
- L (comprimento) = 150 mm
- $K_{in}$  (Rigidez na entrada) = 1.0
- P (Força para o deslocamento de entrada) = 1;
- $K_{out}$  (Rigidez na saída) =
- $E_0$  (Módulo de Young do material) = 1;
- $E_{min}$  (Módulo de Young mínimo, não pode ser zero) = 0,001;
- $\epsilon = 1e-6$
- $\nu$  (Poisson) = 0,2;
- $\epsilon_{tas}$  (Penalização do método SIMP) = constant (3.0);
- $el\_size$  (tamanho do elemento) = 1;
- $ds\_size$  (Número de elementos que sofrerão a ação das condições de contorno)= 10;
- $\rho$  (Helmholtz Type fitro de peso) = 2,1. A palavra rho foi escolhida para facilitar na hora de escrever o programa;

### 6.2 Criação da malha

A malha foi criada em duas partes, utilizando o recurso de subtração de malhas.

A primeira parte é responsável pela área maior e a segunda malha criada será subtraída da maior, dessa forma será realizada uma simples subtração entre as duas malhas. O resultado da subtração pode ser visto na figura 6.





**Figura 6: Malha de elementos irregulares.**

Fonte: o autor

Ao avaliar a malha criada após a subtração de uma pela outra observou-se que a malha é composta por elementos irregulares. No entanto os tamanhos dos elementos foram reduzidos e a malha refinada para se obter a melhor solução do problema. Elementos grandes reduzem a confiabilidade da solução. A penalidade de trabalhar com elementos tão pequenos é o custo computacional, que no caso não foi algo que restringiu o uso de malhas tão refinadas a malha do estudo teve 20 662 elementos.

### 6.3. Condições de contorno

Uma das restrições possíveis para um problema de otimização topológica é a restrição para a fração volumétrica utilizada. Esse valor é definido pela divisão do volume de material utilizado pelo volume total do espaço de projeto. Essa restrição limita a quantidade de material que pode ser utilizada no projeto, nesse trabalho foi adotado o valor de 0,25 que significa que haverá material em no mínimo 25% do espaço de projeto. Após definido essa restrição e essas funções vetoriais se realizou a aplicação das condições de contorno no projeto. Condições de contorno já foram vistas na figura 5.

Considerando o eixo X na horizontal e Y na vertical as condições de contorno são:

Eixo de simetria entre os pontos  $X=0$  e  $X=150$ . Quando  $Y=75$ . O eixo de simetria serve para reduzir o custo computacional.

E: Engaste. No ponto de engaste há a restrição de movimento em Y e X. Nesse ponto o mecanismo não sofre rotação. O Engaste é aplicado em uma região da peça. Quando  $X=0$  e  $Y=0$  até  $Y=20$  (linha amarela na figura 5).

P: Local de força aplicada. A força aplicada não pode ser em um ponto específico e sim em uma área. A área de atuação da força será:  $Y=75$  até  $70$  e  $X=0$  (linha em vermelho na figura 5).

D: Deslocamento. O deslocamento é desejado em Y no sentido positivo. Uma forma de medir o deslocamento é inserir uma mola virtual no código. Assim, a deformação da mola corresponde ao deslocamento que queremos calcular. Essa é uma prática que simplifica a construção do código.

### 6.4. Aplicação do *SIMP*, *Helmholtz\_filter*

Após escolhida a malha é aplicado o método de otimização topológica do tipo SIMP. O método consiste em escolher valores para os elementos de malha. Esses valores definem se haverá material ou não no elemento de malha. Para obter melhores resultados é necessário aplicar uma penalização do método.

Após aplicar o método de otimização do *SIMP* é necessário aplicar o filtro Helmholtz para o código. O filtro é responsável por reduzir o problema de tabuleiro de xadrez. Utilizando ele é possível melhorar a resposta. Em resultados será discutido a influência da penalização do método *SIMP* e da escolha do Filtro de Helmholtz.

#### 6.5. Execução do código

O código é então executado aplicando os métodos descritos anteriormente. Ao aplicar os métodos é possível obter um gráfico com a geometria do mecanismo proposto.

#### 6.6. Análise dos resultados obtidos na simulação

Os deslocamentos obtidos após a execução do código podem ser consultados em um *software* conhecido como *Paraview*. Esse *software* é gratuito e pode ser encontrado facilmente na internet. Abrindo o arquivo criado pelo *Spyder* no *Paraview* é possível modificar a visualização do resultado da aplicação do código e obter a relação percentual entre o deslocamento aplicado na entrada e o retornado na saída uma boa relação é superior a 20%.

#### 6.7. Impressão do mecanismo flexível

Após essa análise do mecanismo foi criado um modelo 3D do mecanismo em um *software* específico. O modelo 3D teve a forma especificada no desenho apresentado pelo *Spyder* após rodar o código. Após a modelagem do desenho o arquivo é salvo em formato *.stl* esse formato serve para a impressora poder interpretar as informações contidas nele.

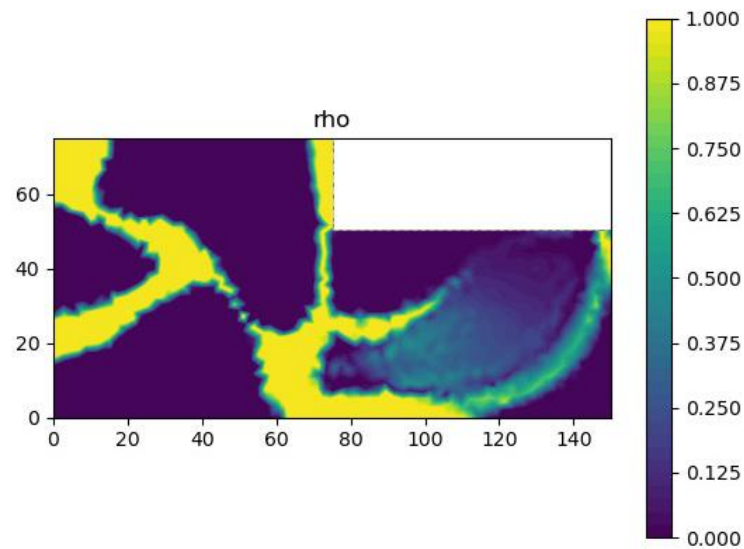
Após converter a modelagem do desenho foi utilizado o *software* cura para configurar os parâmetros de impressão 3D. Nessa etapa é realizada o fatiamento do desenho, pois a impressão será realizada em camadas.

O arquivo fatiado que foi criado no *Software Cura* foi enviado para a impressora Ultimaker 5S e realizada a impressão. Para imprimir a impressora aquece o filamento e o deposita sobre a bancada em pequenas camadas até a conclusão do mecanismo.

## 7. RESULTADOS

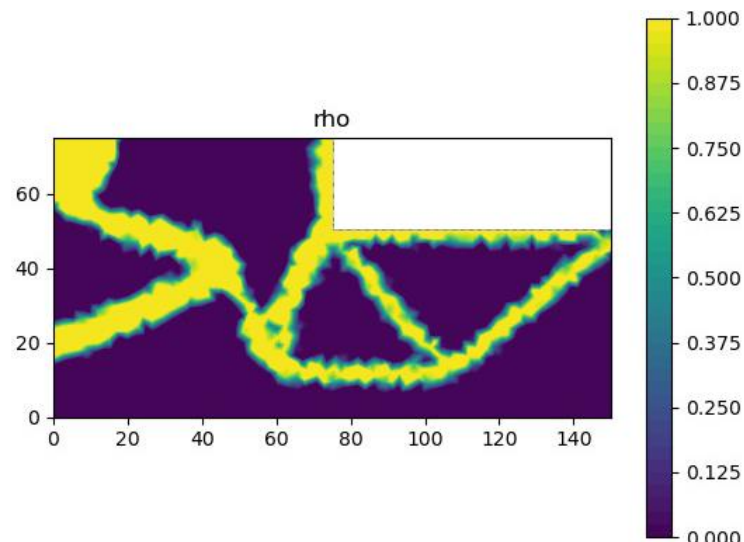
A penalização do método *SIMP* causa um impacto na estrutura gerada pelo código. Uma penalização muito baixa gera áreas com densidades intermediárias o que acarreta em uma difícil interpretação da geometria do mecanismo e a impossibilidade de construir o mecanismo. Na figura 7 é possível analisar o efeito de penalização utilizando o valor de 1,0.

É possível notar vários pontos onde há valores intermediários de densidade. Como no método *SIMP* não é desejável haver um valor intermediário de material em um espaço definido, ou tem ou não tem. A escolha da penalização  $P=1$  não é adequada para os propósitos deste trabalho.



**Figura 7: Distribuição de material utilizando penalização = 1.**  
**Fonte: O autor**

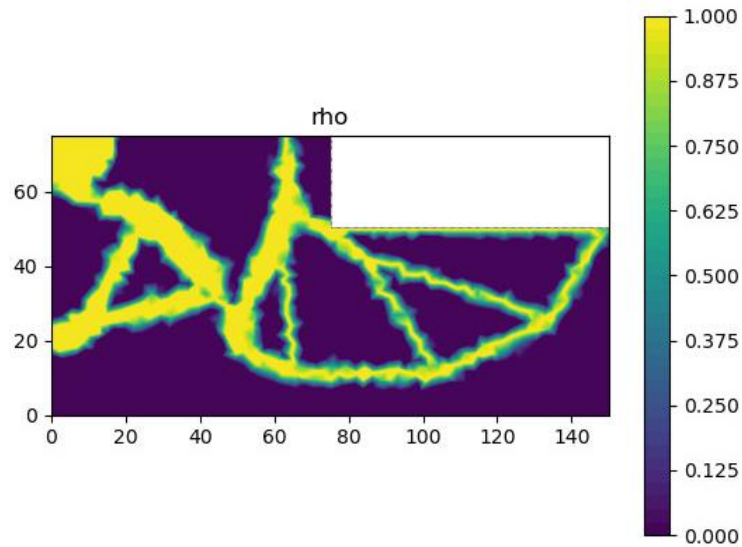
Com o intuito de melhorar a distribuição de material foi utilizado uma penalização de 3. Conforme pode ser visto na figura 8.



**Figura 8: Distribuição de material utilizando penalização = 3.**  
**Fonte: O autor**

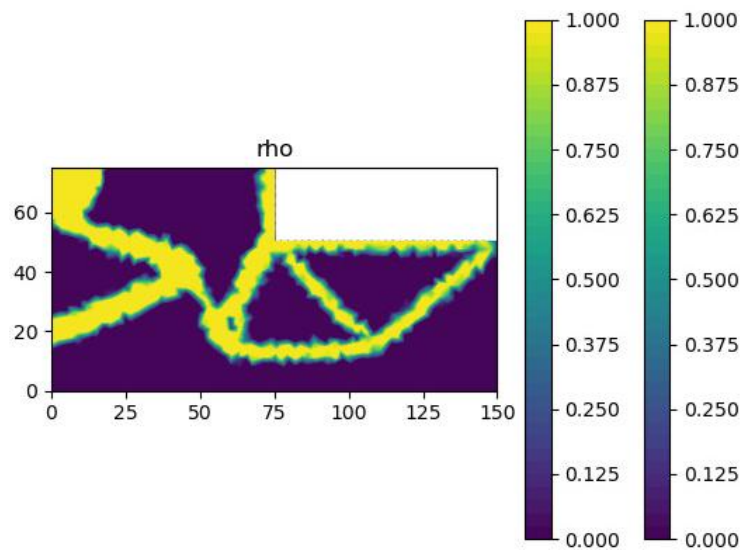
Nota-se que ao aumentar o valor da penalização a estrutura se torna mais compreensível e possível de execução. O material se distribui de melhor forma e elimina o problema de densidade intermediária.

Uma das análises realizadas neste trabalho foi a de como o Filtro de Helmholtz afeta a configuração final da estrutura. Para isso, utilizou-se o Filtro ( $\rho$  (Helmholtz Type filtro de peso)) com valor de 0,1. A figura 9 mostra que esse valor produz o chamado efeito Xadrez na estrutura.



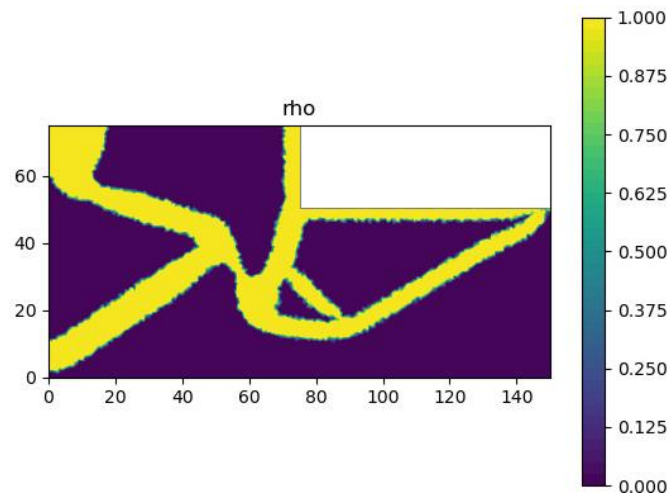
**Figura 9: Distribuição de material utilizando Filtro de Helmholtz ( $\rho$ ) = 0,1.**  
**Fonte: O autor**

Na figura 9 é possível analisar que o material não se distribui de forma uniforme, mas deixa muitos espaços vazios. Isso dificulta a fabricação do produto. Por isso, se busca uma geometria mais compacta e sem vazios. A figura 10 mostra que isso pode ser conseguido usando o Filtro de Helmholtz com valor de 2,1.



**Figura 10: Distribuição de material utilizando Filtro de Helmholtz ( $\rho$ ) = 2,1.**  
**Fonte: O autor**

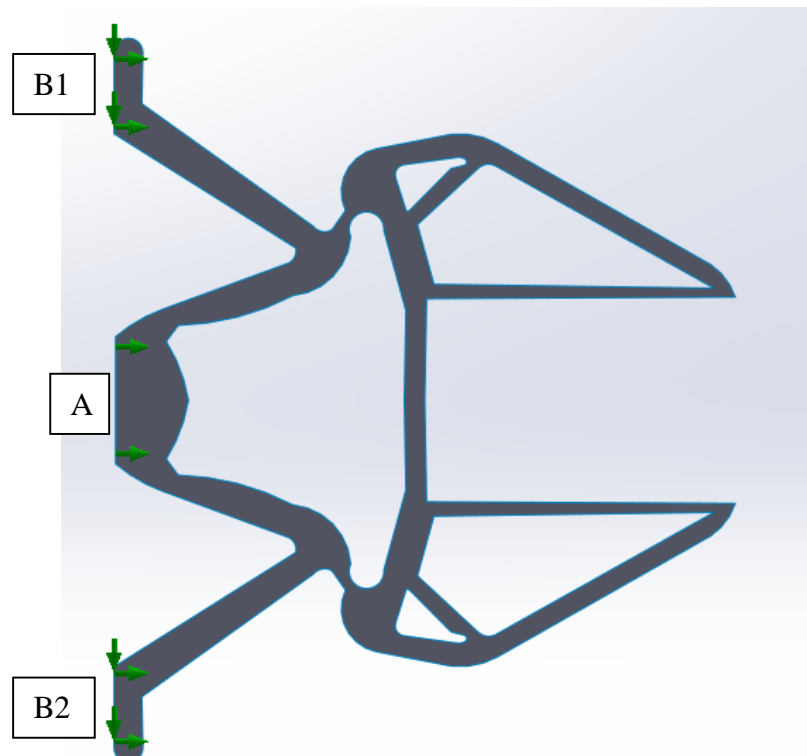
No presente trabalho foram utilizados a penalização (expoente  $p$  da equação 1) = 3 e o Filtro de Helmholtz ( $\rho$ ) no valor de 2,1, pois com esses valores foi encontrada a melhor distribuição de material que resulta em uma maior facilidade de produção do item. A figura 11 mostra a geometria obtida após aplicada a Otimização Topológica utilizando o método SIMP e aplicação do filtro para reduzir o efeito tabuleiro de xadrez.



**Figura 11: Geometria final do trabalho.**  
**Fonte: O autor**

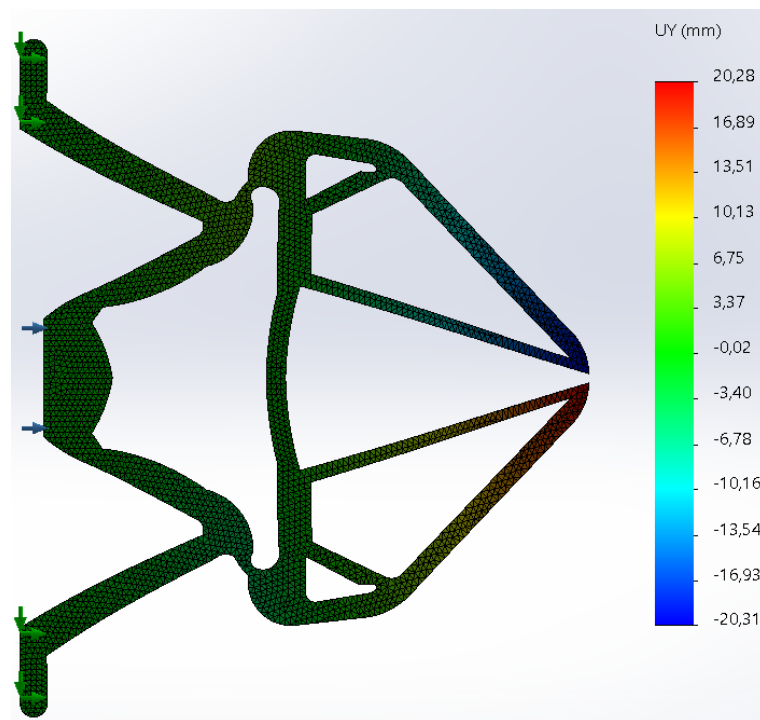
O código no *Spyder* nos permitiu obter a distribuição de material da figura 11 e verificar se a relação de deslocamento era suficiente (mínimo de 20%). Além disso, se realizou estudos teóricos para calcular a vantagem mecânica do mecanismo. Foi medido o deslocamento de saída do mecanismo quando aplicamos um deslocamento de entrada de 5mm.

O autor buscou realizar uma análise de elementos finitos e comparar os valores de deslocamento de entrada e saída. O mecanismo foi modelado em CAD e então realizou-se o estudo do material utilizando as propriedades disponíveis no anexo 1. O mecanismo antes de ser deformado pode ser visto na figura 12.



**Figura 12: Mecanismo flexível não deformado em CAD.**  
**Fonte: O autor**

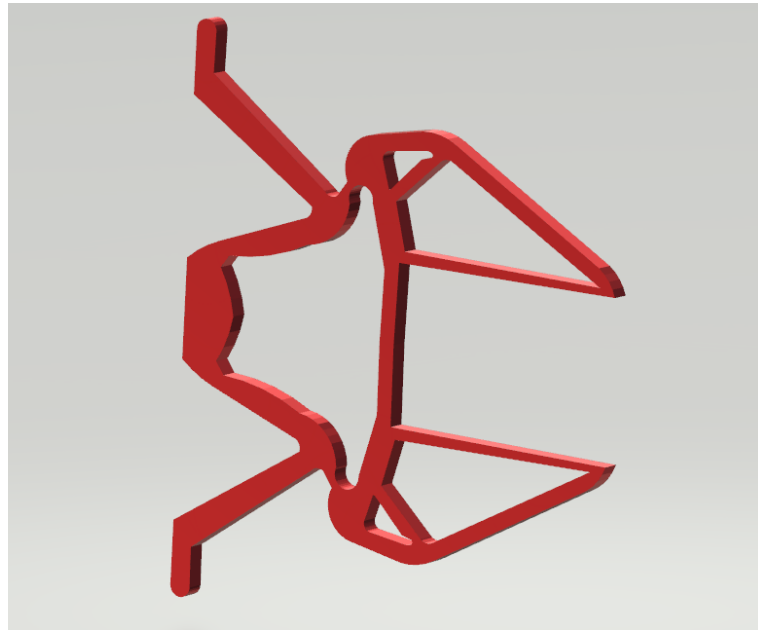
Com as condições de contorno bem definidas (fixação do ponto B1 e B2) e aplicação de deslocamento do ponto A foi criada a malha para o estudo com 4966 elementos. O resultado da aplicação de deslocamento de 5 mm no ponto A pode ser visto na figura 13. Na figura 13 é possível verificar que os deslocamentos de saída da simulação numérica foram de aproximadamente 20mm (20,28 mm para a pinça inferior e 20,31mm para a superior). Com esses resultados é possível calcular a vantagem mecânica. Tendo então o deslocamento de saída aproximadamente 4 vezes maior que o de entrada logo é possível afirmar que o modelo está pronto para ser projetado para a impressão 3D.



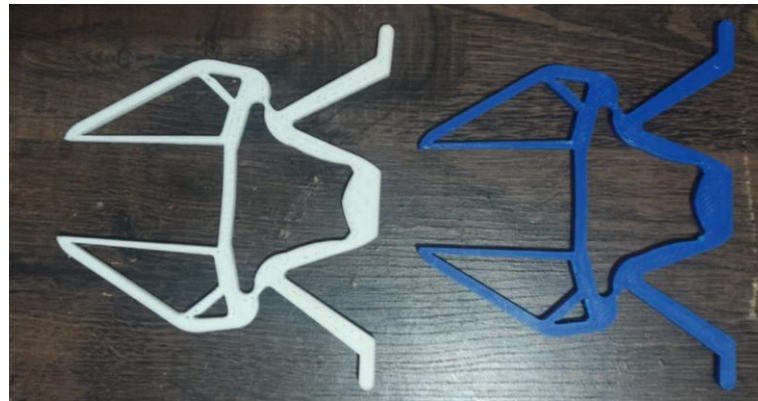
**Figura 13: Mecanismo flexível deformado em CAD.**

**Fonte: O autor**

Após a avaliação do mecanismo flexível projetado. O mecanismo foi modelado em um *software* 3D em CAD e convertido para *.stl*. Na figura 14 é possível visualizar o mecanismo projetado renderizado e na figura 15 é possível visualizar o mecanismo flexível impresso em 3D. O mecanismo branco foi impresso utilizando filamento do tipo TPU95 da *Ultimaker* e o mecanismo em azul foi utilizado filamento PETG da F3D ambos os mecanismos foram impressos em uma impressora da *Ultimaker* modelo S5.

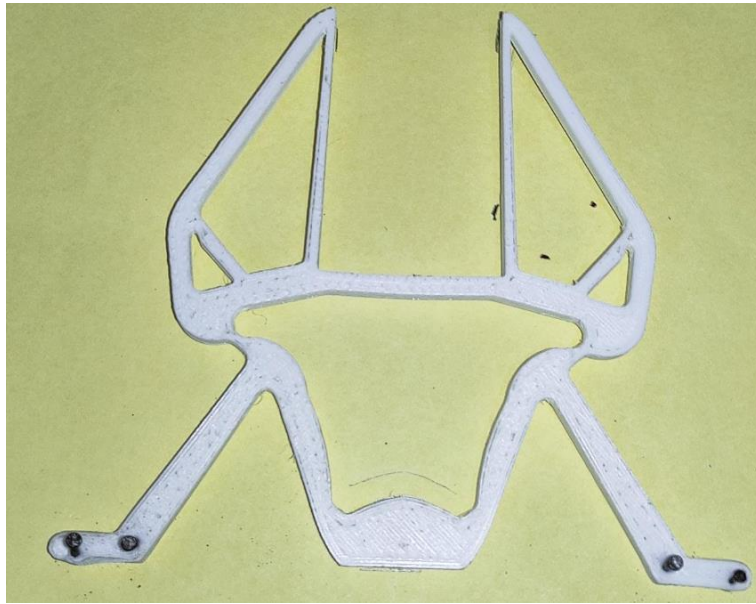


**Figura 14: Mecanismo flexível projetado pronto para a impressão.**  
Fonte: O autor



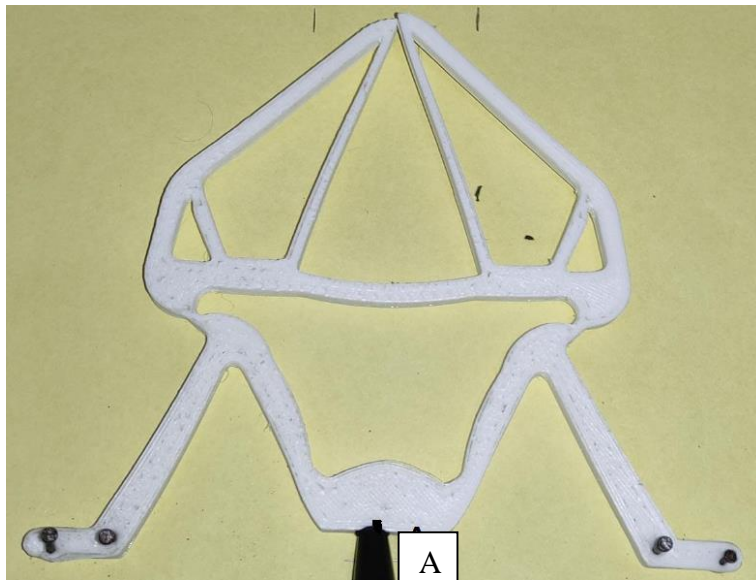
**Figura 15: Mecanismo flexível projetado em materiais diferentes.**  
Fonte: O autor

Com o objetivo de confirmar as dimensões do mecanismo impresso foram realizadas as medições do mecanismo com o uso de um paquímetro. As dimensões foram confirmadas e foi possível passar para a etapa de comparação dos resultados de vantagem mecânica e deslocamento de saída da simulação numérica com o deslocamento e vantagem mecânica encontrados no experimento. O experimento foi realizado no mecanismo impresso em *TPU*, pois foi o mesmo material que foi avaliado na análise numérica. O mecanismo foi fixado como pode ser visto na figura 16.



**Figura 16: Mecanismo flexível não deformado, com as fixações realizadas.**  
Fonte: O autor

Após o mecanismo ser fixado se aplicou uma força no ponto A do mecanismo (ver figura 17). O mecanismo sofreu uma deformação como pode ser visto na figura 17 e as pinças se deslocaram. Ao medir o deslocamento de cada pinça foram encontrados os valores de 20mm para cada uma.



**Figura 17: Mecanismo flexível deformado, com a aplicação de 5mm de deslocamento.**  
Fonte: O autor

Os deslocamentos das pinças inferior e superior obtidos na simulação numérica foram de 20,28 mm e 20,31 mm, respectivamente. Esses valores apresentam uma diferença de apenas 1,4% e 1,55% em relação aos valores experimentais, o que garante a eficiência do método de otimização topológica, SIMP, Filtro de Helmholtz e impressão 3D para produzir mecanismos flexíveis. A diferença entre as figuras 17 e 13 é pequena e pode ser desprezada. Esse trabalho



contribui para a comunidade acadêmica e as indústrias ao mostrar a facilidade e a redução de componentes na elaboração de mecanismos flexíveis.

## 8. CONCLUSÃO

Mecanismos são utilizados com frequência na indústria e no dia a dia da população, seja em máquinas fotográficas, *MEMS*, ou então em veículos automotores. Os mecanismos flexíveis surgiram com o propósito de reduzir gastos com manutenção e manufatura, pois não possuem rótulas, eixos ou pinos e podem ser feitos com apenas uma única peça. Possuem flexibilidade e rigidez balanceada com o objetivo de atender a flexibilidade exigida pelo problema e também a rigidez.

Após a síntese do mecanismo flexível ficou evidente a facilidade em produzir o mecanismo em uma impressora 3D. Foi também evidenciado a influência da penalização do método *SIMP* no resultado. Quando os valores da penalização são baixos há a criação de áreas com densidades intermediárias já o filtro de HemotHoltz reduz o efeito tabuleiro de xadrez na peça a ser impressa. Uma escolha errada da penalização e do filtro pode resultar em um mecanismo flexível de difícil ou até mesmo impossível fabricação.

A criação da malha refinada, a escolha ideal das condições de contornos e uso de simetria no problema facilitaram a síntese do mecanismo. É fácil notar que os métodos de simulação numérica estão bem evoluídos e trazem resultados muito próximos aos obtidos no experimento. O que também evidencia a confiabilidade em seu uso para o cálculo da vantagem mecânica, fator que serve como parâmetro para a fabricação ou não do componente.

Outro fator a se destacar é a confiabilidade do mecanismo flexível, que por não possuir rótulas, pinos e eixos não necessita de lubrificação, o que reduz sensivelmente os custos de manutenção e desgaste evitando dessa forma a criação de folgas. Após a conclusão desse trabalho se recomenda a análise entre a vida útil de um mecanismo flexível e de um mecanismo rígido para a mesma aplicação, comparando posteriormente o custo benefício de seu uso.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAM, V. **SÍNTESE E ANÁLISE DE MECANISMOS FLEXÍVEIS**. Curitiba, 2019

BAHIA, M. **Otimização Topológica aplicada ao projeto de mecanismos flexíveis**. Universidade Federal de Santa Catarina.

BENDSOE, M.P. **Optimal shape design as a material distribution problem**. Lungby, Denmark, 1989

DE LEON, D. **OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE MECANISMOS FLEXÍVEIS COM CONTROLE DA TENSÃO MÁXIMA CONSIDERANDO NÃO LINEARIDADES GEOMÉTRICA E MATERIAL**.

DE LIMA, C. **PROJETO DE MECANISMOS FLEXÍVEIS USANDO O MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA**.

FILHO, R. **AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS SIMP E BESO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE ESTRURAS**. Porto Alegre, 2015.

GOMES, J. (ED.). **Sistema de suspensión: definición, tipos de suspensiones y principales elementos**. Disponível em: <Sistema de suspensión: definición, tipos de suspensiones y principales elementos. Disponível em:>. Acesso em: 18 fev. 2023.

Howel,L.L., 2001, “**Compliant Mechanisms**”, John Wiley & Sons, New York.

**Método SIMP para otimização de topologia**. Disponível em: <[https://help.solidworks.com/2019/Portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c\\_simp\\_method\\_topology.htm?format=P&value=#:~:text=O%20m%C3%A9todo%20SIMP%20prediz%20a,fabrica%C3%A7%C3%A3o%20e%20requisitos%20de%20desempenho.](https://help.solidworks.com/2019/Portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm?format=P&value=#:~:text=O%20m%C3%A9todo%20SIMP%20prediz%20a,fabrica%C3%A7%C3%A3o%20e%20requisitos%20de%20desempenho.)>. Acesso em: 28 fev. 2023.

**Por que as janelas dos aviões são arredondadas e possuem furinhos?** Disponível em: <<https://flightconsultoria.com.br/por-que-as-janelas-dos-avioes-sao-arredondadas-e-possuem-furinhos/#:~:text=As%20janelas%20dos%20avi%C3%B5es%20s%C3%A3o%20arredondadas%20para%20minimizar%20as%20chances%20de%20trincas.>>. Acesso em: 21 fev. 2023.

**SOCHACKI, L. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE VEÍCULO INDUSTRIAL UTILIZADO NA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA.** Porto Alegre, 2020

**STACECHEN, R. MODELAGEM E ANÁLISE DE MECANISMOS FLEXÍVEIS.** Curitiba, 2017

## ANEXO 1: FICHA TÉCNICA DO FILAMENTO TPU 95

# Ficha técnica TPU 95A

## Ultimaker

Nome químico	Poliuretano termoplástico
Descrição	Altamente versátil para aplicações industriais, o filamento TPU 95A é a escolha indicada para uma ampla variedade de projetos de fabrico que exigem as qualidades tanto da borracha, como do plástico. Concebido para uma impressão 3D consistente, o TPU 95A é um filamento semiflexível com resistência química dotado de forte capacidade de ligação entre camadas. Adicionalmente, tem maior facilidade e rapidez de impressão do que outros filamentos de TPU.
Características principais	Resistência excepcional ao desgaste, elevada resistência ao impacto, dureza Shore A de 95, alongamento na rutura até 580% e boa resistência à corrosão de muitos óleos e produtos químicos industriais comuns.
Aplicações	Protótipos funcionais, pegas, guias, dobradiças, mangas, peças de encaixe e caixas protetoras.
Não adequado para	Aplicações em contacto com alimentos e aplicações in vivo. Exposição prolongada aos UV e/ou humidade e aplicações em que a peça impressa está exposta a temperaturas superiores a 100 °C.

### Especificações do filamento

	<u>Valor</u>	<u>Método</u>
Diâmetro	2,90±0,13 mm	medidor laser de 2 eixos
Desvio máx. de circularidade	0,07 mm	medidor laser de 2 eixos
Peso líquido do filamento	750 g	-
Comprimento do filamento	-96 m	-

### Informação sobre cores

<u>Cor</u>	<u>Código da cor</u>
TPU 95A branco	RAL 9010
TPU 95A preto	RAL 9005
TPU 95A vermelho	RAL 3031
TPU 95A azul	RAL 5002

<u>Propriedades mecânicas (*)</u>	<u>Moldagem por injeção</u>		<u>Impressão 3D</u>	
	Valor típico	Método do teste	Valor típico	Método do teste
Módulo de tração	-	-	26,0 MPa	ASTM D638
Resistência à tração no limite	-	-	8,6 MPa	ASTM D638
Resistência à tração na ruptura	-	-	39,0 MPa	ASTM D638
Alongamento no limite	-	-	55,0%	ASTM D638
Alongamento na ruptura	-	-	580,0%	ASTM D638
Resistência à flexão	-	-	4,3 MPa	ISO 178
Módulo de flexão	-	-	78,7 MPa	ISO 178
Resistência ao impacto Izod, com entalhe (a 23 °C)	-	-	34,4 kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180
Resistência ao impacto Charpy (a 23 °C)	-	-	-	-
Dureza	-	-	95 (Shore A) 46 (Shore D)	ASTM D2240 Durómetro
Resistência à abrasão	-	-	0,06 g	ASTM D4060 (perda de massa, 10000 ciclos)

<u>Propriedades térmicas</u>	<u>Valor típico</u>	<u>Método do teste</u>
Taxa de fluxo de massa fundida (MFR)	15,9 g/10 min.	ISO 1133 (225 °C, 1,2 kg)
Deflexão térmica (HDT) a 0,455 MPa	74 °C	ASTM D648
Deflexão térmica (HDT) a 1,82 MPa	49 °C	ASTM D648
Transição vítrea	-24 °C	DSC
Coefficiente de expansão térmica	100·10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	ASTM E693
Temperatura de fusão	220 °C	DSC
Retração térmica	-	-

<u>Propriedade elétricas</u>	<u>Valor típico</u>	<u>Método do teste</u>
Resistividade volumétrica	10 <sup>11</sup> Ω·m	IEC 60093
Resistência superficial	2·10 <sup>14</sup> Ω	IEC 60093

(\*) Ver notas.

<u>Outras propriedades</u>	<u>Valor típico</u>	<u>Método do teste</u>
Gravidade específica	1,22	ASTM D782
Classificação da chama	Classificação HB	ICE 60695-11-10
Absorção de humidade	0,18%	ASTM D570 (24 h)

### Notas

As propriedades reportadas no presente documento correspondem à média de um lote típico. As barras para o teste de tração foram impressas com uma espessura de 2 vezes o tamanho do bocal, fluxo de material de 107%, temperatura do bocal de 260 °C, temperatura da base de 45 °C, bocal com diâmetro de 0,8 mm, velocidade de enchimento de 40 mm/s, velocidade de impressão de 30 mm/s e altura da camada de 0,3 mm. As barras para os testes de flexão e impacto foram impressas no plano XY, utilizando o perfil de qualidade normal no Cura 2.1, uma Ultimaker 2+, um bocal de 0,4 mm, 90% de enchimento, temperatura do bocal de 235 °C e da placa de impressão de 70 °C. Os valores representam a média de 5 amostras brancas e 5 amostras pretas para os testes de flexão e impacto. A dureza de Shore D foi medida num quadrado com uma espessura de 7 mm impresso no plano XY, utilizando o perfil de qualidade normal no Cura 2.5, uma Ultimaker 3, um núcleo de impressão de 0,4 mm e 100% de enchimento. A Ultimaker está constantemente a trabalhar na expansão dos dados da ficha técnica.

### Isenção de responsabilidade

Qualquer assistência ou informação técnica constante no presente documento é fornecida e aceite à responsabilidade do utilizador; a Ultimaker e as suas afiliadas não dão qualquer garantia relacionada ou derivada da mesma. A Ultimaker e as suas afiliadas não serão responsáveis pela utilização destas informações nem de nenhum produto, método ou aparelho mencionado, tendo o utilizador de fazer a sua própria determinação da adequação e exequibilidade para a sua própria utilização, para a proteção do ambiente e para a saúde e a segurança dos seus funcionários e dos compradores dos seus produtos. Não é dada nenhuma garantia de comerciabilidade ou adequação de nenhum produto; nada no presente documento revoga nenhuma das condições de venda da Ultimaker. As especificações estão sujeitas a alterações sem aviso prévio.

## ANEXO 2: FICHA TÉCNICA DO FILAMENTO PETG



FICHA TÉCNICA PETG			
PROPRIEDADES FÍSICAS	VALOR	UNIDADE	MÉTODO/NORMA
DENSIDADE	1,27	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D792
DUREZA	106	ROCKWELL	ASTM D785
FLUIDEZ		g /10 min - (210° C - 2,16 Kg)	
PONTO DE FUSÃO		° C	
TEMPERATURA de DEFLEÇÃO TÉRMICA	70	° C @0,455 Mpa	ASTM D648
TEMPERATURA de DEFLEÇÃO TÉRMICA	64	° C @1,82 Mpa	ASTM D648
PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALOR	UNIDADE	MÉTODO/NORMA
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO ESCOAMENTO	50	M Pa	ASTM D638
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO RUPTURA	28	M Pa	ASTM D 638
ALONGAMENTO NA RUPTURA	130,0	%	ASTM D638
RESISTÊNCIA AO IMPACTO (IZOD)	101	J/m	ASTM D256
CARACTERÍSTICAS DO FILAMENTO	VALOR	UNIDADE	MÉTODO/NORMA
<b>1,75 mm</b>			
DÍAMETRO	1,75 ± 3%	mm	PRÓPRIO
OVALIZAÇÃO	1,75 ± 3%	mm	PRÓPRIO
100 % do filamento eletronicamente verificado e controlado			

Parâmetros de impressão			
	MIN.	MÁX	
Temperatura Nozzle	220	250	° C
Temperatura Mesa	25	60	° C
Velocidade	20	70	mm/s
Tempo min. Camadas	10	20	s
Camada ligar Ventilador	1		
Extrusion Multiplier	0,95	1,05	

Parâmetros para nossa máquina- para serem usados como guia.



## COMENTÁRIOS

É um polímero que se mostrou mais fácil de imprimir que o PLA, e muito mais fácil de imprimir que o ABS sempre com ótima aderência na placa, nunca teve separação entre camadas, ótimo acabamento e permitiu velocidades muito boas de impressão.

Densidade  $1,27\text{g/cm}^3$ , semelhante ao PLA ( $1,25\text{g/cm}^3$ ). Isto permite usar os mesmos programas de fatiamento apenas variando a temperatura.

Pode ser colado ou mesmo ser tratado para retirar os riscos de impressão, usando os mesmos solventes do ABS, ou Cloroeto de metileno, que foi mais rápido e mais efetivo.

Pode ser pregado, pois não racha e não trinca.

Antes de quebrar ele escorre, aumentando seu tamanho em 130% antes de quebrar.

Sua resistência mecânica é semelhante ao ABS

Nos parece um ótimo material para peças que devam ser unidas posteriormente, agregando facilidade de impressão e ótimas propriedades para manuseio.

Quanto à impressão, em nossos testes usamos temperatura do nozzle entre  $220\text{ }^\circ\text{C}$  e  $250\text{ }^\circ\text{C}$ . Normalmente preferimos usar a temperatura de  $240\text{ }^\circ\text{C}$  para o hot end e  $60\text{ }^\circ\text{C}$  para a mesa. Usamos o fan de resfriamento a partir da segunda camada.

A velocidade depende da impressora, normalmente trabalhamos com 40 a 70 mm/s.

Como a densidade de PETG é de  $1,27\text{ g/cm}^3$ , um metro de filamento perfeitamente redondo de PETG com 1,75mm de diâmetro irá pesar 3,03 gramas. Deste modo um rolo de 1 Kg de PETG deve ter mínimo 328 m de comprimento.

Como trabalhamos com uma tolerância de 3% aceitamos diâmetros entre 1,70mm e 1,80mm, nos extremos um metro de PETG deverá pesar mínimo entre 2,88 gramas por metro até 3,23 gramas/m.

Cada rolo por nós fabricado é pesado, verificado quantos metros estão presentes e qual o diâmetro médio do filamento calculado a partir do peso médio do metro de filamento.

Nosso controle de Diâmetro e Ovalização é feito por instrumento eletrônico, com alarmes, durante a produção, em 100% do filamento.