

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

PROJETO DE UM DISPOSITIVO FABRICADO EM ONYX PARA IÇAMENTO E  
MANIPULAÇÃO DE PEÇAS NA INDÚSTRIA METAL MECÂNICA

por

Erick Bastos da Rosa

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 2022.

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

### CIP - Catalogação na Publicação

Rosa, Erick Bastos  
PROJETO DE UM DISPOSITIVO FABRICADO EM ONYX PARA  
IÇAMENTO E MANIPULAÇÃO DE PEÇAS NA INDÚSTRIA METAL  
MECÂNICA / Erick Bastos Rosa. -- 2022.  
27 f.  
Orientadora: Leticia Fleck Fadel Miguel.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2022.

1. Fusion 360. 2. método dos elementos finitos. 3.  
otimização topológica. 4. Onyx. I. Fleck Fadel Miguel,  
Leticia, orient. II. Título.

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

Erick Bastos da Rosa

PROJETO DE UM DISPOSITIVO FABRICADO EM ONYX PARA IÇAMENTO E  
MANIPULAÇÃO DE PEÇAS NA INDÚSTRIA METAL MECÂNICA

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. Dr. Cirilo Seppi Bresolin  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientadora: Dra. Letícia Fleck Fadel Miguel

Comissão de Avaliação:

Prof<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup> Letícia Fleck Fadel Miguel

Prof. Dr. Edson Hikaro Aseka

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, abril de 2022.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Cláudio e Carmen, eu devo a vida e todas as oportunidades que nela tive, um dia espero poder retribuir. A minha irmã, Tábada, que sempre esteve pronta para me apoiar e socorrer no que fosse preciso. Sem a força de vocês eu não teria conseguido seguir em frente.

Agradeço à família e a amigos, por sempre estarem presentes. Aos colegas que sempre estiveram comigo, pelo companheirismo e por nunca negarem ajuda durante a minha trajetória acadêmica, em especial a Luana, que esteve presente em praticamente todos os momentos difíceis da graduação. Vocês foram pessoas essenciais nessa jornada.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ao seu corpo docente e demais colaboradores pela excelente educação pública, gratuita e de qualidade

Por fim, agradeço a professora Dra. Letícia Fleck Fadel Miguel, pela disposição em me orientar neste trabalho.

*“Our greatest weakness lies in giving up.  
The most certain way to succeed is  
always to try just one more time.”*

*Thomas A. Edison*

Rosa, Erick Bastos. **PROJETO DE UM DISPOSITIVO FABRICADO EM ONYX PARA IÇAMENTO E MANIPULAÇÃO DE PEÇAS NA INDÚSTRIA METAL MECÂNICA.** 2022. 27p. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

## RESUMO

O presente trabalho desenvolveu, por meio de simulações via método dos elementos finitos e da otimização topológica, uma análise sobre a viabilidade da utilização do Onyx, polímero de engenharia desenvolvido pela Markforged, fabricante de impressoras industriais 3D, no projeto de um dispositivo de içamento de peças na indústria metal mecânica. A geometria inicial foi projetada para acoplar e movimentar uma peça com massa de 21,24 kg. A geometria final apresentou uma redução de massa de 35,71%, quando comparada com o modelo proposto inicialmente. Os coeficientes de segurança obtidos em ambas geometrias ficaram acima de 2, atendendo o critério estabelecido pela norma ASME BTH-1 2017 (*Design of Below-the-Hook Lifting Devices*).

PALAVRAS-CHAVE: Fusion 360, método dos elementos finitos, otimização topológica, Onyx.

Rosa, Erick Bastos. **PROJECT OF A DEVICE MANUFACTURED IN ONYX FOR LIFTING AND HANDLING OF PARTS IN THE METAL MECHANICAL INDUSTRY.** 2022. 27p. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

#### ABSTRACT

The present work developed, through simulations using the finite element method and topological optimization, an analysis of the viability of using Onyx, an engineering polymer developed by Markforged, a manufacturer of industrial 3D printers, in the design of a lifting device for parts in the metal mechanical industry. The initial geometry was designed to couple and move a part with a mass of 21.24 kg. The final geometry showed a mass reduction of 35.71%, when compared to the model initially proposed. The safety coefficients obtained in both geometries were above 2, meeting the criterion established by the ASME BTH-1 2017 (Design of Below-the-Hook Lifting Devices).

**KEYWORDS:** Fusion 360, finite element method, topology optimization, Onyx.

## NOMENCLATURA

### Símbolos

ASME	American Society of Mechanical Engineers	
CS	Coeficiente de segurança	
$E$	Módulo de Young	[MPa]
$F$	Força	[N]
$g$	Aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
M	Massa	[kg]

### Símbolos gregos

$\nu$	Coeficiente de Poisson	
$\rho$	Densidade do material	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Tensão	[MPa]

### Abreviaturas e acrônimos

3D	Tridimensional
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
CAD	Computer-Aided Design
CAE	Computer-Aided Engineering
FDM	Fused Deposition Modeling
MA	Manufatura aditiva
PLA	Ácido Poliláctico

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
2.1.	Normas Aplicáveis.....	1
2.2.	Simulações Computacionais.....	1
3.	OBJETIVOS.....	2
3.1.	Objetivos Gerais.....	2
3.2.	Objetivos Específicos.....	2
4.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
4.1.	Norma ASME BTH-1.....	2
4.2.	Categorias de Projetos.....	3
4.2.1.	Categoria de Projeto A.....	3
4.2.2.	Categoria de Projeto B.....	3
4.2.3.	Categoria de Projeto C.....	3
4.3.	Modelagem por Fusão e Deposição – FDM.....	3
4.4.	Elementos Finitos.....	4
4.5.	Otimização Topológica.....	5
5.	ESTUDO DE CASO.....	5
5.1.	Metodologia.....	5
5.2.	Dispositivo de Içamento.....	6
5.3.	Propriedade do Material.....	6
5.4.	Modelo CAD.....	6
5.5.	Condições de Contorno e Carregamento.....	7
5.6.	Otimização topológica.....	8
6.	RESULTADOS.....	9
6.1.	Análise Estrutural – Geometria Inicial.....	9
6.2.	Otimização Topológica.....	10
6.3.	Remodelação.....	11
6.4.	Análise Estrutural – Geometria Remodelada.....	12
7.	CONCLUSÕES.....	15
8.	REFERÊNCIAS.....	16

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria 4.0, também conhecida como quarta revolução industrial tem como o principal objetivo a produção inteligente. Neste contexto, a manufatura aditiva, também conhecida por impressão 3D (tridimensional), tem um papel importante pois tem revolucionado a maneira de produzir peças. Devido a sua versatilidade é possível reduzir custo e material, quando comparado com os processos tradicionais (Inácio, 2020).

A capacidade de produzir geometrias complexas, que não seriam viáveis pelos processos de fabricação tradicionais, permitiu o crescimento da manufatura aditiva em diversos setores, como automotivo, aeroespacial e de saúde (Babu e Goodridge, 2015).

Durante a manufatura de um produto diversos dispositivos podem ser necessários para auxiliar o operador executar as suas atividades na linha de montagem. Estes dispositivos são customizados para determinado componente ou produto e são usados para realizar operações, como mover ou fixar componentes em uma determinada posição durante a execução de uma atividade. As principais características necessárias nestes dispositivos são alta-precisão dimensional, resistência mecânica para aplicação e baixo peso, visando favorecer a ergonomia e conforto do operador. Este conjunto de características podem ser atendidas através do uso da manufatura aditiva. (Volpato et al, 2017).

A modelagem de deposição fundida, conhecida como FDM (*Fused Deposition Modeling*), é o método mais popular encontrado no mercado, entre os diferentes métodos de impressão 3D, devido a sua simplicidade de funcionamento e componentes facilmente encontrados no mercado, essa tecnologia também possui uma diversidade de filamentos capazes de se adequar em inúmeras aplicações (Santos, 2018). Segundo a Markforged (2022), fabricante de impressoras industriais 3D, o seu filamento de Onyx, possui o dobro da resistência do ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) e oferece alta resistência, tenacidade e resistência química.

Neste estudo, foi realizada uma análise numérica via método dos elementos finitos, visando entender o comportamento mecânico e a viabilidade da utilização do Onyx, na fabricação de um dispositivo de içamento e manipulação de peças na indústria metal mecânica. Também foi realizada uma otimização topológica buscando a redução de material, visando manter a segurança e resistência mecânica necessária para a aplicação final.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Normas Aplicáveis

A norma ASME BTH-1 (2017), define os critérios mínimos para o projeto mecânico, estrutural e de seleção de componentes elétricos, para o desenvolvimento de dispositivos de içamento.

### 2.2. Simulações Computacionais

Patil et al (2021), realizaram um estudo sobre um dispositivo de içamento, para transportar barras de mandril que pesam entre 16 kg e 50 kg, com o objetivo de solucionar os problemas ergonômicos encontrados pelos operadores ao levantar e manipular essas ferramentas. A validação do projeto foi realizada comparando os resultados analíticos com a análise numérica via elementos finitos, que mostraram que o material escolhido o St-52, é

adequado para esta aplicação, ficando com a máxima tensão gerada abaixo do limite de escoamento do material e com fator de segurança acima do determinado.

Gebisa e Lemu (2017), exploraram a otimização topológica e a manufatura aditiva, para reduzir a massa de um componente mecânico. Os autores, conseguiram reduzir 65% da massa do componente original, e a análise de elementos finitos mostrou que os critérios de projeto continuaram atendidos.

A monografia de Dorneles (2021), para a conclusão do curso de Engenharia Mecânica, apresentou um estudo utilizando a manufatura aditiva, e a otimização topológica para reduzir a massa de uma alavanca de freio de estacionamento automotiva. Foi realizado um estudo visando substituir o componente comercial fabricado em aço carbono por um componente otimizado produzido em PLA PRO1. Foram realizados ensaios mecânicos em componentes de diferentes geometrias. A peça final, apresentou uma redução de massa de 70,08%, e o coeficiente de segurança ficou dentro do estabelecido pela norma utilizada.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivos Gerais**

Projetar, simular e otimizar a geometria de um dispositivo de içamento fabricado via manufatura aditiva, que atenda o coeficiente de segurança estabelecido pela norma ASME BTH-1 2017.

#### **3.2. Objetivos Específicos**

- Projetar um dispositivo de içamento, capaz de suportar um carregamento estático de 208,36 N.
- Realizar uma otimização topológica e propor uma nova geometria, com o objetivo de reduzir no mínimo 30% da massa atual do dispositivo.
- Realizar uma nova simulação, com a nova geometria otimizada, aplicando o dobro do carregamento inicial, ou seja, um carregamento estático de 416,72 N, com a finalidade de analisar o comportamento do dispositivo caso ocorra sobrecarregamento durante a operação do dispositivo.

### **4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **4.1. Norma ASME BTH-1**

Existem normas internacionais de projetos de engenharia, que embora o cumprimento não seja de caráter obrigatório no Brasil, podem servir de referência para os critérios de prudência e são capazes de ajudar no alinhamento tecnológico e nas boas práticas com outros países (Krohn, 2017).

Segundo a norma ASME BTH-1 (2017), ela serve como um guia para projetistas, fabricantes, compradores e usuários de dispositivos de içamento abaixo do gancho. Esta norma fornece os critérios mínimos de projeto estrutural e mecânico e de seleção de componentes elétricos para estes dispositivos.

As tensões admissíveis e as faixas de tensões definidas nesta norma são baseadas nos métodos clássicos de resistência dos materiais, embora outros métodos de análise possam ser usados.

As técnicas e modelos de análise utilizados pelo projetista devem representar com precisão as cargas, propriedades do material e a geometria do dispositivo. Os valores das tensões resultantes da análise devem fornecer valores adequados para permitir a correta correlação com as tensões admissíveis definidas na norma.

As definições de projeto desta norma são baseadas no uso de materiais metálicos. Porém, outros materiais podem ser utilizados, desde que as margens de segurança e vida em fadiga sejam iguais ou superiores às exigidas por esta norma.

## **4.2. Categorias de Projetos**

A norma ASME BTH-1 (2017), destinada à indústria e construção em geral, estabelece três categorias de projeto para dispositivos de içamento com base na magnitude e variação da carga e nas condições operacionais e ambientais. As três categorias seguintes de projeto forneceram diferentes fatores de segurança, para determinação dos limites de tensão estática permitidos.

### **4.2.1. Categoria de Projeto A**

- A categoria de projeto A, deve ser utilizada quando a magnitude e variação das cargas são previsíveis, onde a carga e as condições ambientais são definidas com precisão ou não são severas.
- O coeficiente de segurança para a categoria de projeto A deve ser igual ou superior a 2.

### **4.2.2. Categoria de Projeto B**

- A Categoria de projeto B, deve ser utilizada quando a magnitude e a variação das cargas não forem previsíveis, quando as condições de carga e ambientais forem severas ou não forem definidas com precisão.
- O coeficiente de segurança para a categoria de projeto B deve ser igual ou superior a 3.

### **4.2.3. Categoria de Projeto C**

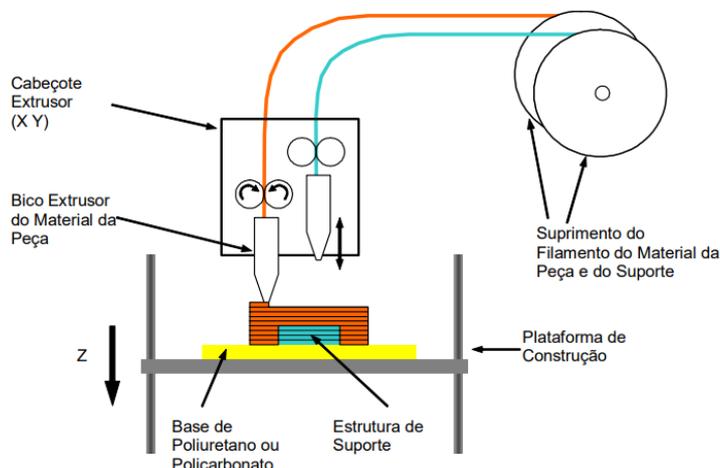
- A categoria de projeto C, deve ser utilizada para o projeto de dispositivos de içamento que possuem aplicações especiais, para os quais um determinado coeficiente de segurança é especificado.
- O coeficiente de segurança para a categoria C deve ser igual ou superior a 6.

## **4.3. Modelagem por Fusão e Deposição – FDM**

O processo de FDM (*Fused Deposition Modeling*), é uma das tecnologias de manufatura aditiva. Neste processo a impressora 3D, possui um cabeçote extrusor que faz a deposição do material base, compondo camadas paralelas no eixo z. O bico extrusor percorre os eixos de

coordenadas (X, Y), fazendo a deposição de material (Volpato et al, 2009). Na Figura 1, encontra-se esquematizado o processo FDM.

Figura 1- Esquema representativo do processo FDM.



Fonte: Volpato et al (2005).

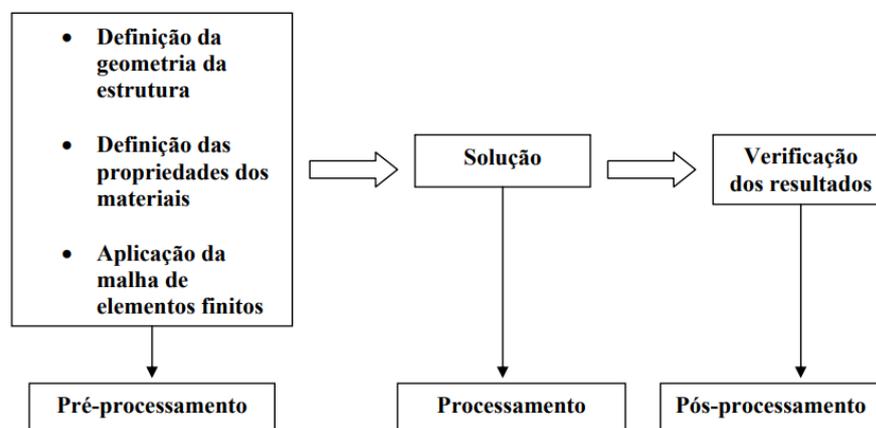
#### 4.4. Elementos Finitos

O método dos elementos finitos é uma poderosa ferramenta CAE (*Computed Aided Engineering*), para determinar o comportamento mecânico e evitar falhas de componentes. Diversas empresas estão desenvolvendo seus produtos através do método dos elementos finitos para problemas estruturais e em outras aplicações mecânicas (Filho, 2013).

O método dos elementos finitos é baseado na discretização do sistema em elementos, os quais são conectados por nós. Geralmente, o aumento do número elementos e nós, tendem aumentar a acurácia da solução, mas em consequência aumenta o custo e tempo computacional da análise. (Fish, 2009).

Os softwares comerciais que utilizam o método dos elementos finitos, seguem uma sequência lógica de etapas para que o usuário possa ter uma visão clara sobre o problema físico, pois, caso haja uma entrada incorreta de dados, o resultado pode ser catastrófico (Oliveira, 2007). A Figura 2, mostra as etapas utilizadas pelos softwares comerciais.

Figura 2 - Sequência lógica utilizada pelos softwares comerciais de elementos finitos.

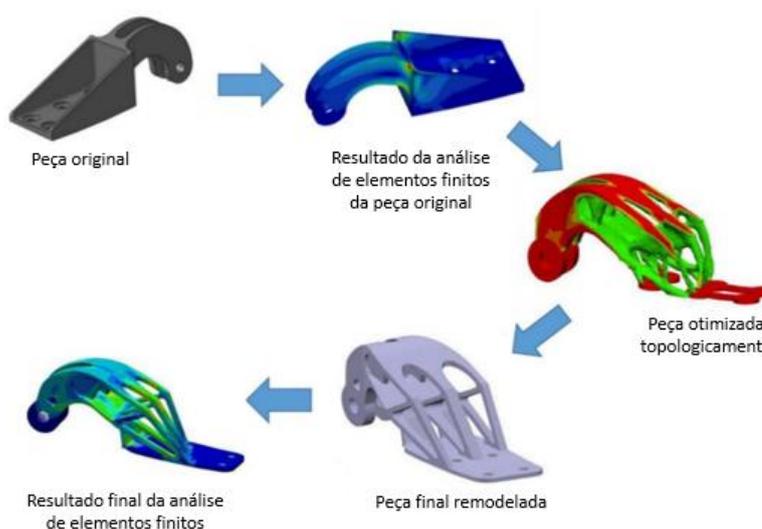


Fonte: Oliveira (2007).

## 4.5. Otimização Topológica

A otimização topológica é uma das técnicas de otimização estrutural que otimiza a distribuição de material dentro de um espaço de projeto especificado para um determinado carregamento e condições de contorno, ao mesmo tempo em que atende aos requisitos de desempenho do produto, ou seja, é gerada uma nova geometria com base nos objetivos e restrições definidas no projeto (Gebisa e Lemu, 2017). A figura 3, mostra o processo de otimização topológica de um componente.

Figura 3 - Processo de otimização de topológica.



Fonte: Adaptado de Gebisa e Lemu (2017).

De acordo com Nágera (2020, apud Yang, 2010). A formulação matemática genérica de um problema de otimização, pode ser definida conforme a equação abaixo:

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimizar: } f(x) \\
 &\text{Sujeito à: } g_j \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \\
 &\quad \quad \quad h_k = 0, \quad k = 1, 2, \dots, p \\
 &\quad \quad \quad x_i^L \leq x_i \leq x_i^H, \quad i = 1, \dots, p
 \end{aligned} \tag{1}$$

Em que  $f(x)$  é a função objetivo a qual deseja-se minimizar,  $g(x)$  e  $h(x)$  são vetores com as restrições de desigualdade e igualdade, respectivamente, e  $x_i^L$  e  $x_i^H$  são os limites inferiores e superiores, respectivamente.

## 5. ESTUDO DE CASO

### 5.1. Metodologia

Visando a substituição de materiais metálicos por polímeros impressos, é realizado um estudo para a definição de uma geometria para um dispositivo de içamento, fabricado em Onyx, que atenda os critérios de projeto da norma ASME BTH-1 2017. A análise numérica será

realizada via método dos elementos finitos e também será realizada uma otimização topológica, ambas simulações serão realizadas através da versão estudantil do *software* Fusion 360 da Autodesk, visando analisar a viabilidade do uso da manufatura aditiva para fabricação de dispositivos de içamento e manipulação de peças na indústria metal mecânica, explorando a versatilidade da manufatura aditiva.

## 5.2. Dispositivo de Içamento

O dispositivo estudado no presente trabalho possui uma massa de 0,70 kg, e foi projetado para realizar o içamento e a manipulação de uma carcaça de diferencial de um trator, que possui uma massa de 21,24 kg. Presume-se que os dispositivos impressos em Onyx e os modelos simulados possuem as mesmas propriedades mecânicas. A magnitude e a variação da carga são consideradas previsíveis, portando o coeficiente de segurança utilizado será 2, conforme estabelecido pela norma ASME BTH-1 (2017). O conjunto montando com ambos componentes é mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Conjunto montado.



Fonte: O autor.

## 5.3. Propriedade do Material

As propriedades mecânicas adotadas nas simulações do dispositivo feito em Onyx, foram 2400 MPa para o módulo de Young, tensão de escoamento de 40 MPa, densidade de 1200,0 kg/m<sup>3</sup> e coeficiente de Poisson de 0,28. A geometria inicial possui 0,70 kg.

## 5.4. Modelo CAD

Desenhou-se o modelo tridimensional do dispositivo de içamento visando o acoplamento com a carcaça de diferencial. A Figura 5, mostra a geometria desenhada em *software* CAD 3D.

Figura 5 – Modelo tridimensional do dispositivo de içamento.

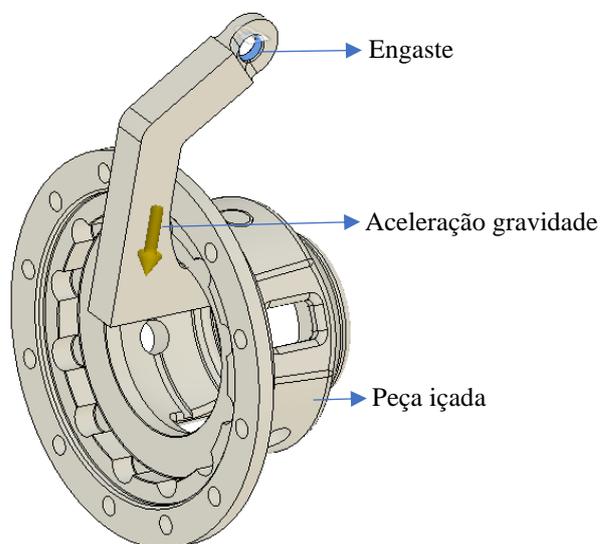


Fonte: O autor.

### 5.5. Condições de Contorno e Carregamento

A geometria do dispositivo posteriormente foi inserida no *software* de CAE. A Figura 6, mostra as condições de contorno e de carregamento, usadas no modelo para a realização das simulações numéricas via método dos elementos finitos e da otimização topológica.

Figura 6 – Condições de contorno e carregamento.



Fonte: O autor.

A região em azul, mostra o engastamento na região que acontece o contato com o gancho da talha durante o içamento. O vetor em amarelo representa a aceleração da gravidade, cuja o valor é de  $9,81 \text{ m/s}^2$  e a massa da peça içada é de  $21,24 \text{ kg}$ , ou seja, o dispositivo está submetido a uma força peso distribuída de  $208,36 \text{ N}$ .

## 5.6. Otimização topológica

O objetivo da otimização topológica neste estudo é reduzir no mínimo 30% da massa da geometria inicial, mantendo o coeficiente de segurança igual ou superior a 2. A Figura 7, mostra os objetivos globais utilizados dentro do *software* Fusion 360, onde foi definido uma redução de massa menor ou igual a 50% e outro critério adotado foi a maximização da rigidez do dispositivo. A porcentagem usada na redução de massa nos objetivos globais ultrapassa em 20% o objetivo definido para o projeto, para produzir uma margem para eventuais alterações durante a etapa de remodelação do dispositivo.

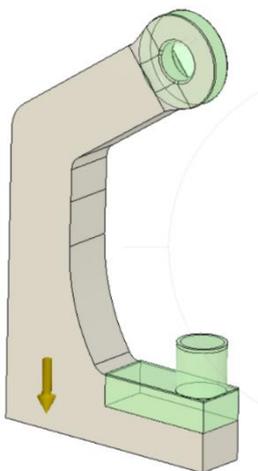
Figura 7 – Objetivos globais da otimização topológica.

	Parameter	Expression	Value	Units
Global Objectives +				
	Target Mass	< OR =	50	%
	Stiffness	Maximize		

Fonte: O autor.

A otimização topológica, distribui o material dentro das limitações geométricas dos componentes analisados, onde é retirado material das regiões que possuem tensões baixas, resultando em uma nova geometria considerada ideal. Porém, o software muitas vezes retira material de regiões necessárias para o correto funcionamento do componente, como regiões de contato. Em decorrência disso, foram definidas algumas regiões de preservação buscando manter a integridade do componente. A Figura 8, mostra estas regiões em verde.

Figura 8 – Regiões de preservação de massa (regiões em verde).



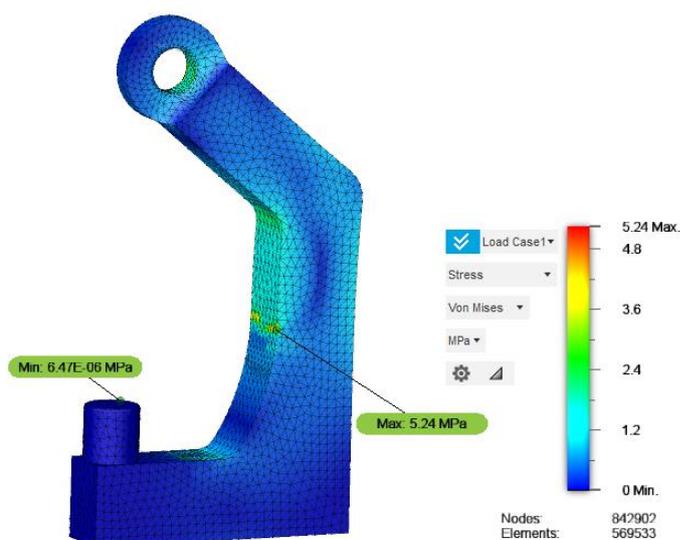
Fonte: O autor.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Análise Estrutural – Geometria Inicial

A Figura 9, apresenta o resultado da análise de tensão equivalente de von Mises. A malha utilizada nas análises é constituída por elementos tetraédricos quadráticos, onde foi composta por 569533 elementos e 842902 nós.

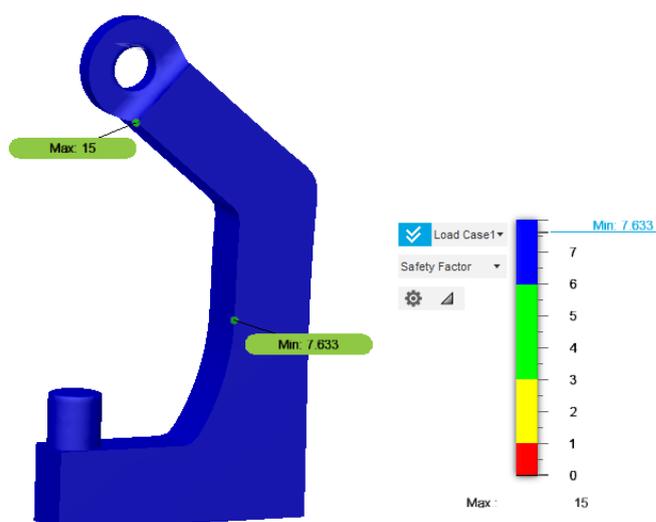
Figura 9 – Resultado das tensões encontradas no dispositivo.



Fonte: O autor.

Observa-se que as tensões geradas no dispositivo estão abaixo da tensão de escoamento do material, a tensão máxima obtida é de 5,24 MPa. A Figura 10, mostra o coeficiente de segurança igual a 7,63.

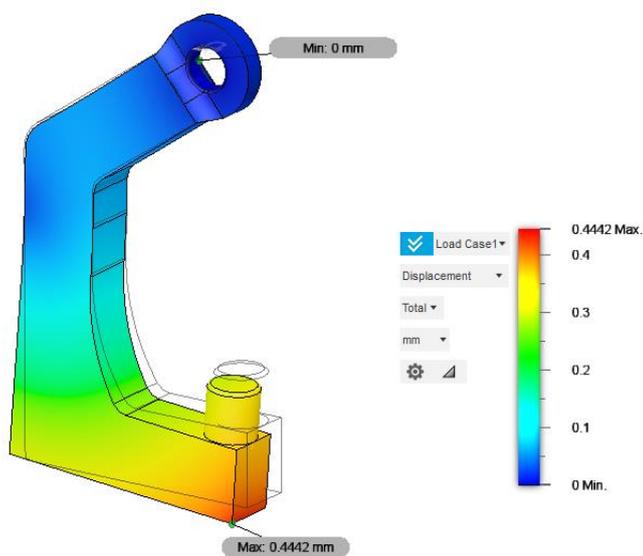
Figura 10 – Resultado do coeficiente de segurança.



Fonte: O autor.

Devido às baixas tensões encontradas e valor do coeficiente de segurança muito superior ao determinado na norma ASME BTH-1, é possível concluir que o modelo está superdimensionado, sendo recomendando o uso da otimização topológica para redução de massa. A Figura 11, mostra que o deslocamento máximo obtido é de 0,44 mm ao realizar o içamento.

Figura 11 – Resultado dos deslocamentos.

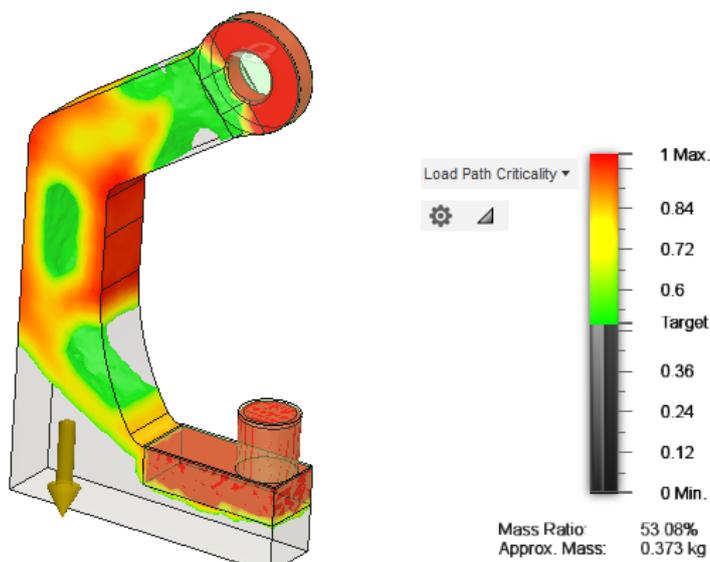


Fonte: O autor.

## 6.2. Otimização Topológica

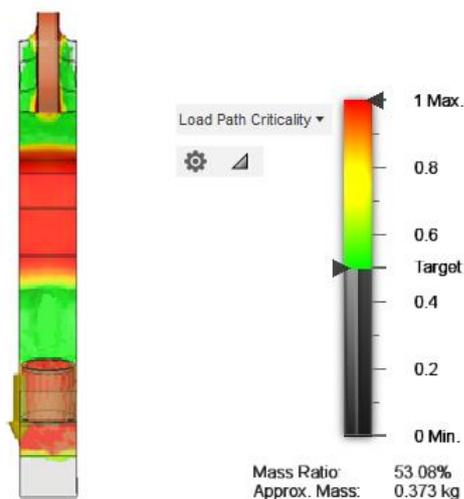
As Figuras 12 e 13, mostram o resultado do estudo de otimização topológica no Fusion 360. A massa do novo modelo gerado é de 0,37 kg.

Figura 12 – Resultado da otimização topológica.



Fonte: O autor.

Figura 13 – Vista frontal do dispositivo otimizado.



Fonte: O autor.

Com o resultado obtido é possível observar que a geometria gerada pelo *software* apresenta uma forma irregular, o que não é esteticamente agradável, portanto, é importante realizar uma remodelação do dispositivo.

### 6.3. Remodelação

A Figura 14, mostra a remodelação da geometria do dispositivo que foi desenhada com base no resultado da otimização topológica. Espera-se que ela atenda os mesmos requisitos de projeto estabelecidos pela norma ASME BTH-1. A massa da geometria remodelada é de 0,45 kg, o aumento de massa em relação da geometria otimizada deve-se a correção das regiões irregulares. Porém, a geometria remodelada apresentou uma redução de massa em 35,71% quando comparado em relação a geometria inicial

Figura 14 – Geometria remodelada.

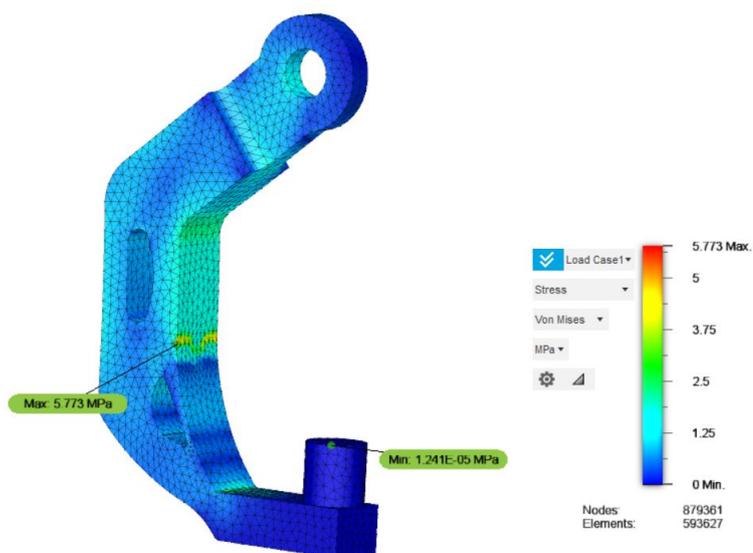


Fonte: O autor.

#### 6.4. Análise Estrutural – Geometria Remodelada

A malha com elementos tetraédricos quadrática utilizada para simulação contém 593627 elementos e 879361 nós. A Figura 15, mostra que a tensão equivalente máxima obtida no modelo remodelado é de 5,77 MPa, ficando abaixo da tensão de escoamento do material.

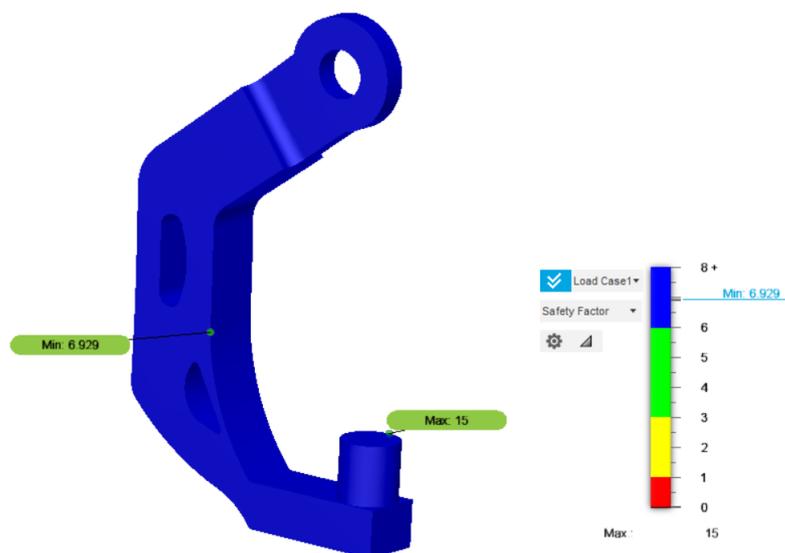
Figura 15 – Resultado das tensões encontradas na geometria remodelada.



Fonte: O autor.

A Figura 16, mostra que o coeficiente de segurança obtido na nova geometria é de 6,92.

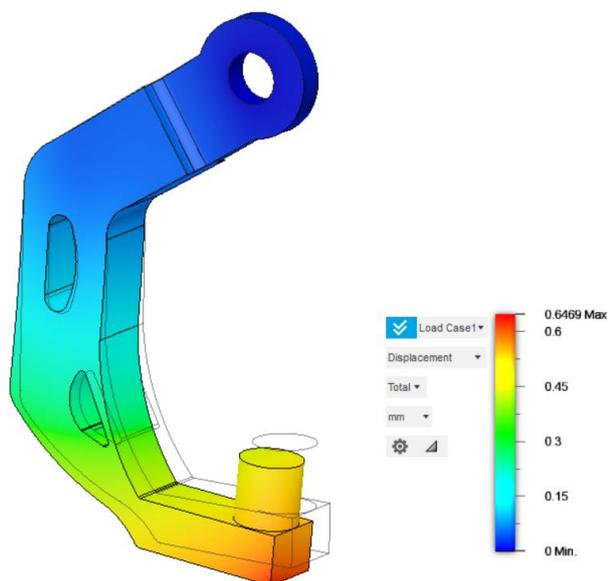
Figura 16 – Coeficiente de Segurança da geometria remodelada.



Fonte: O autor.

A Figura 17, mostra que o deslocamento obtido na geometria remodelada é de 0,64 mm.

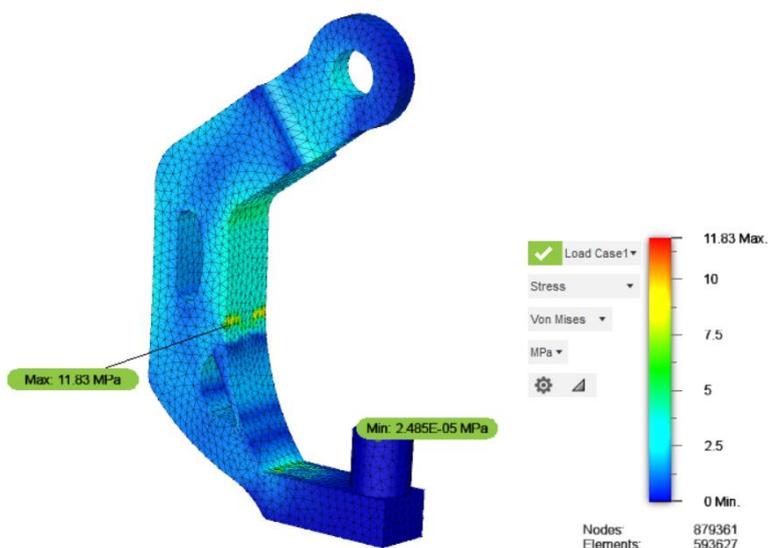
Figura 17 – Deslocamentos obtidos na geometria remodelada.



Fonte: O autor.

A análise do comportamento do dispositivo com o dobro de carregamento foi um dos objetivos estabelecidos no trabalho, para entender o comportamento do dispositivo caso ocorra um sobrecarregamento ou uso incorreto do dispositivo durante a sua operação, para isso foi aplicado no dispositivo um carregamento estático de 416,72 N. A Figura 18, mostra a tensão máxima de 11,83 MPa, obtida durante a simulação.

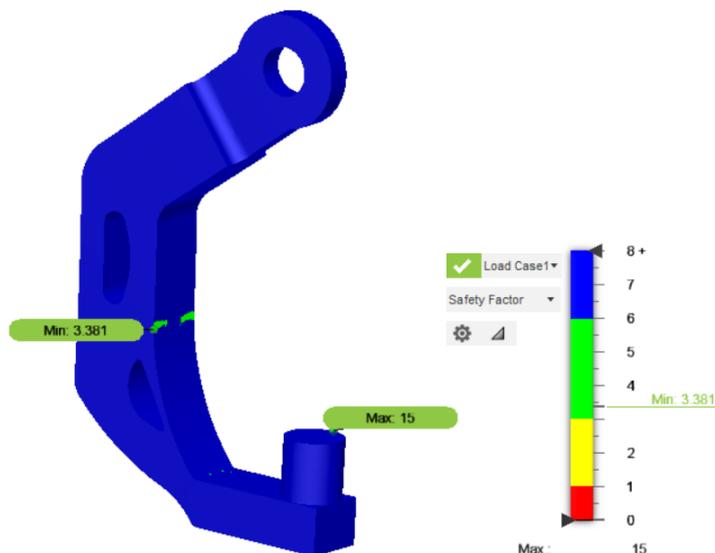
Figura 18 - Resultado das tensões com o dobro do carregamento estático.



Fonte: O autor.

A Figura 19, mostra o coeficiente de segurança de 3,38, obtido com dobro do carregamento estático inicial.

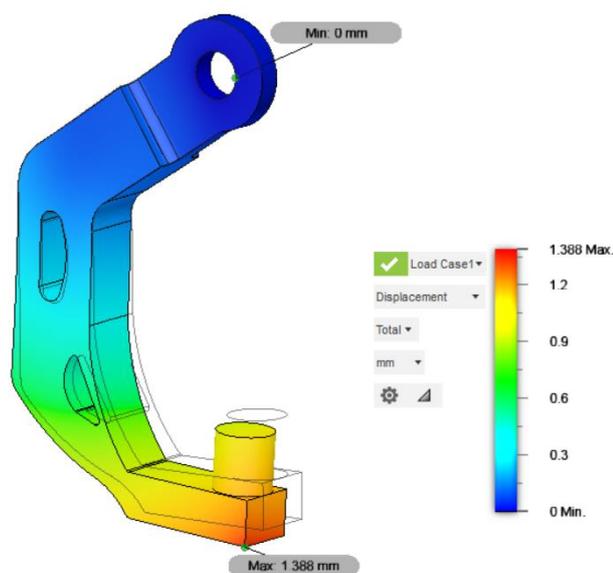
Figura 19 - Resultado do coeficiente de segurança com o dobro do carregamento.



Fonte: O autor.

A geometria remodelada quando submetida ao dobro do carregamento estático apresentou um coeficiente de segurança superior a 2, portanto o componente possui uma margem de segurança considerável caso ocorra algum sobrecarregamento inesperado durante a operação do dispositivo, considerando que o dispositivo opera com uma carga de trabalho previsível. O deslocamento máximo obtido foi de 1,38 mm, e pode ser visualizado na Figura 20.

Figura 20 - Resultado do deslocamento obtido com o dobro do carregamento estático.



Fonte: O autor.

O dispositivo otimizado apresenta resultados satisfatórios para tensão, coeficiente de segurança e deslocamento para os dois casos analisados. A simulação que utilizou o dobro da carga estática também atende os requisitos de projeto da categoria A, da norma ASME BTH-1.

## **7. CONCLUSÕES**

Os objetivos propostos para o projeto foram concluídos com sucesso, ambos modelos do dispositivo de içamento fabricado em Onyx, simulados no *software* Fusion 360, mostraram-se seguros podendo ser operados dentro da norma ASME BTH-1, quando assumidos que os modelos simulados possuem as mesmas propriedades mecânicas que os dispositivos físicos. Demonstrando assim que alguns dispositivos de içamento podem vir a ser produzidos em Onyx, através do processo de manufatura aditiva, utilizando a técnica de modelagem por fusão e deposição. Porém, deve ser realizados ensaios mecânicos para validar os resultados obtidos através do método dos elementos finitos, devido ao fato que as propriedades das peças fabricadas através da manufatura aditiva serem altamente sensíveis aos parâmetros utilizados no processo.

## 8. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME BTH-1, Design of Below-the-Hook Lifting Devices**, 2017.

BABU, S; GOODRIDGE, R. **Additive Manufacturing**, 2015. Materials Science and Technology. DOI: 0.1179/0267083615Z.000000000929. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/0267083615Z.000000000929>>. Acesso em: 4 fev. 2022.

DORNELES, N. **Otimização Topológica de Alavanca de Freio de Estacionamento Veicular Produzida em PLA PRO1 Via Manufatura Aditiva**, 2021. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/234134>>. Acesso em: 11 fev. 2022

FILHO, A. A. **Elementos Finitos - A Base da Tecnologia CAE**. São Paulo: Editora Saraiva, 2013. 9788536519708. Disponível em: <<https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536519708/>>. Acesso em: 19 fev. 2022

FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **Um Primeiro Curso em Elementos Finitos**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2009. 978-85-216-1941-3. Disponível em: <<https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-1941-3/>>. Acesso em: 26 fev. 2022

GEBISA, A.W., LEMU, H.G, **A Case Study On Topology Optimized Design For Additive Manufacturing**, 2017. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. DOI: 10.1088/1757-899x/276/1/012026. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/321771366\\_A\\_case\\_study\\_on\\_topology\\_optimized\\_design\\_for\\_additive\\_manufacturing](https://www.researchgate.net/publication/321771366_A_case_study_on_topology_optimized_design_for_additive_manufacturing)>. Acesso em: 26 fev. 2022.

INÁCIO, D. et al. **A Importância da Manufatura Aditiva Como Tecnologia Digital Para A Indústria 4.0: Uma Revisão Sistemática**. Revista Competitividade e Sustentabilidade, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 653–667, 2020. DOI: 10.48075/comsus.v7i3.23861. Disponível em: <<https://e-revista.unioeste.br/index.php/comsus/article/view/23861>>. Acesso em: 4 fev. 2022.

KROHN, M. **Análise dos Requisitos de Segurança e Projeto de Um Equipamento Para Elevação e Instalação de Vidros Planos Com Ventosas a Vácuo**, 2016. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016 Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/149196>>. Acesso em: 19 fev. 2022

MARKFORGED, **Onyx**, 2022. Disponível em: <<https://markforged.com/materials/plastic/onyx>>. Acesso em: 4 fev. 2022.

NÁGERA, M. **Otimização Paramétrica de Estruturas Reticuladas do Tipo Pórticos Tridimensionais Utilizando Algoritmo TLBO Modificado**, 2020. Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/20318>>. Acesso em: 26 fev. 2022

OLIVEIRA, F. **Contribuição ao Desenvolvimento de Uma Estrutura Veicular Tipo Spaceframe Usando o Método dos Elementos Finitos e Métodos Heurísticos de Otimização Numérica**. 2007. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007. Disponível em: < <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14872> >. Acesso em: 26 fev. 2022

PATIL, S. et al, **Design and Analysis of Below-The-Hook Device For Loading and Unloading for Boring Bars**, 2021. ISSN 2214-7853, DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.112. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321071170>>. Acesso em: 11 fev. 2022.

SANTOS, V. **Estudo e Desenvolvimento de Uma Impressora 3D FDM**. Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018. Disponível em: <<https://monografias.ufma.br/jspui/handle/123456789/2440>>. Acesso em: 5 fev. 2022

VOLPATO,N et al. **A Process Planning Applicative For Rapid Prototyping Technology**, 2005. 18th International Congress of Mechanical Engineering. Disponível em: <<https://www.abcm.org.br/anais/cobem/2005/PDF/COBEM2005-2027.pdf>> Acesso em: 19 fev. 2022

VOLPATO,N et al. **Modelos de Fatiamento Adaptativo em Processo de Prototipagem Rápida**, 2009. V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Disponível em: <<https://www.abcm.org.br/anais/cobef/2009/busca/artigos/131001181.pdf>> Acesso em: 19 fev 2022

VOLPATO,N et al. **Manufatura Aditiva; Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D**. São Paulo: Editora Blucher, 2017. 9788521211518. Disponível em: <<https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521211518/>>. Acesso em: 4 fev 2022

YANG, X. **Engineering Optimization: An Introduction With Metaheuristic Applications**. John Wiley & Sons, 2010.