



Universidade Federal do Paraná
Programa de Pós-Graduação Lato Sensu
Experimentação Tridimensional



Matheus dos Santos de Oliveira

**Projeto de um braço RIG de baixo custo usando a manufatura
aditiva**

**CURITIBA
2022**

Matheus dos Santos de Oliveira

**Projeto de um braço RIG de baixo custo usando a manufatura
aditiva**

Monografia apresentada como resultado parcial à obtenção do grau de Especialista em Experimentação Tridimensional. Curso de Pós-graduação Lato Sensu, Setor de Exatas, Departamento de Expressão Gráfica, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Fontana Catapan

**CURITIBA
2022**

RESUMO

Fazer cinema no Brasil é muito difícil, especialmente se for um nicho que não é voltado para um grande público. Querer experimentar novas técnicas pode acabar saindo muito caro. Tendo em vista essas dificuldades este estudo vem com objetivo de fornecer, mesmo que uma pequena parcela, a experiência de se poder trabalhar com um braço rig, ferramenta utilizada no stopmotion para posicionar as marionetes em uma posição específica. Para baratear esse instrumento, foi escolhida a manufatura aditiva e, também, disponibilizar os arquivos prontos para a manufatura em um site voltado para a comunidade de projetos e desenvolvimento de produtos. Como as dimensões utilizadas foram as mesmas de um produto já existentes, os resultados obtidos foram a diferença de força entre o braço rig proposto e o braço rig utilizado como base. Com um coeficiente de segurança alto percebeu-se que a força que pode ser aplicada no protótipo seria muito inferior a que pode ser aplicada no braço base, fazendo com que a marionete que pode ser utilizada tenha que ter menos massa, porém pelo preço aproximado que se pode obter tal ferramenta, torna-se viável para pequenas experimentações.

Palavras-chave: braços rig, manufatura aditiva, stopmotion, design de produto.

ABSTRACT

Making cinema in Brazil is very difficult, especially if it is a niche that is not aimed at a large audience. Wanting to try new techniques can end up being very expensive. In view of these difficulties, this study aims to provide, even if a small portion, the experience of being able to work with a rig arm, a tool used in stopmotion to position the puppets in a specific position. To make this instrument cheaper, additive manufacturing was chosen and also ready-to-manufacture files was uploaded on a website aimed at the product design and development community. As the dimensions used were the same as those of an existing product, the results obtained were the difference in strength between the proposed rig arm and the rig arm used as a base. With a high safety factor, it was noticed that the force that can be applied to the prototype would be much lower than what can be applied to the base arm, making the puppet that can be used lighter, but for the approximate price that this tool can be obtained, it becomes viable for small experiments.

Key words: Rig arm, additive manufacturing stop motion, product design.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura1 - Esquema do processo de fabricação por estereolitografia.....	11
Figura2 - Esquema de como funciona uma impressora por extrusão	12
FIGURA3 - Raven Puppet	13
FIGURA4 - Double Ball Joint	13
FIGURA5 - Basic shape for the bean as he enters the frame	14
FIGURA6 - Fluxograma das principais etapas do trabalho.	14
FIGURA7 - Barras Prismaticas	15
FIGURA8 – Diagrama de forças aplicadas na junta ball-and-socket.....	18
FIGURA9 - Diagrama de forças de uma junta em relação ao conjunto.....	18
Figura10 - Tabela de materiais do material Liqcreate Strong-X	20
FIGURA11 - Placa estimada para os cálculos.	20
Figura 12 - Diagrama de forças em um lado da junta ball-and-socket	22
Figura 13 - Diagrama de forças cortantes.....	23
Figura 14 - Diagrama de momento fletor	23
FIGURA15 - Haste para fixação do junto em uma base	25
FIGURA16 - Haste intermediara proposta	26
FIGURA17 - <i>Grampo proposto</i>	26
FIGURA18 – Chapa de união.....	27
Figura 19 - Montagem do rig arm com apenas uma biela de ligação.....	27
Figura 20 - Simulação ChituBox	28
Figura 21 - Fatiamento dos componentes.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tensão de compressão e torque para parafusos comerciais	19
--	----

CONTEÚDO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	8
1.2. JUSTIFICATIVA.....	9
1.3. HIPÓTESE.....	9
1.4. OBJETIVO	10
1.4.1. Objetivos específicos.....	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1. Manufatura aditiva	10
2.1.1. Estereolitografia.....	11
2.1.2. Extrusão	11
2.2. Stopmotion.....	12
2.2.1. Stopmotion com modelos.	13
2.3. Braço rig.....	14
3. METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	14
3.1. DEFINIÇÕES.....	15
3.1.1. Tensão e deformação.....	15
3.1.2. Torque em parafuso	16
3.1.3. Tensão fletora.....	16
3.1.4. Momento de inercia	17
3.1.4.1. <i>Equação momento de inercia de seção retangular.....</i>	<i>17</i>
3.1.5. Função do braço rig.....	17
3.1.6. Requisitos de um braço rig	17
3.2. Considerações de geometria e material.....	18
3.2.1. Dimensões de uma biela comprada.	18
3.2.2. Característica do material da biela comprada.....	19
3.2.3. Características do parafuso.	19
3.2.4. Características da resina.	19
3.2.5. Chapa de ligação.....	20
3.3. Propriedades do design proposto.	21
3.3.1. Momento de inercia da chapa de ligação.	21
3.3.2. Momento fletor máximo.	21
3.3.2.1. <i>Momento fletor máximo: INOX.</i>	<i>21</i>
3.3.2.2. <i>Momento fletor máximo: Liqcreate Strong-X.....</i>	<i>22</i>

3.3.3. Força máxima.....	22
3.3.3.1. <i>Diagrama de forças cortantes</i>	22
3.3.3.2. <i>Diagrama de momento fletor</i>	23
3.3.3.3. <i>Força máxima: INOX</i>	24
3.3.3.4. <i>Força máxima: Liqcreate Strong-X</i>	24
3.4. Projeto Final.....	25
3.4.1. Braço rig proposto.....	25
3.4.1.1. <i>Biela de fixação</i>	25
3.4.1.2. <i>Biela intermediária</i>	26
3.4.1.3. <i>Grampo</i>	26
3.4.1.4. <i>Chapa de ligação</i>	27
3.4.1.5. <i>Montagem Rig amr</i>	27
3.4.2. Comparação da força máxima INOX x Liqcreate Strong-X.....	28
3.4.3. Simulação do custo da impressão.....	28
3.4.4. Disponibilização do modelo.....	29
4. CONCLUSÕES	29
4.1. Sugestões de trabalhos futuros.....	30
5. Referências	31

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas, socioeconômico e político, brasileiro, parecem não ter muito interesse no ramo das artes plásticas/visuais, seja na área da pintura, escultura, curadoria, multimídia ou até mesmo na área de acadêmica. Cenário muito bem descrito por Samira Ávila, que diz que:

“no Brasil, para se viver da arte talvez seja preciso conviver com algumas adversidades, pois, por mais que tenha crescido, esteja crescendo e surgindo novas políticas de apoio à arte, o mercado artístico ainda é fechado e inseguro. De certo, nem sempre o profissional será reconhecido como deseja ou não terá o retorno financeiro que espera. O artista constantemente encontra dificuldades para se estabelecer no mercado e exercer sua atividade e mesmo com a infinidade de elementos que a arte possui e que, por sua vez, são inerentes à perpetuação cultural, a arte continua tendo um espaço irrelevante nas prioridades para as políticas sociais”. (Ávila, 2010)

Descaso reforçado pela opinião de Marcia Paraiso durante entrevista à revista Carta Capital, onde fala que até 2003 o Ministério da cultura servia mais como uma faixa de distribuição de recurso para os próprios integrantes e financiar coquetéis (Paraiso, 2016).

Marcia também comenta sobre as dificuldades, do ramo do cinema, vividas durante a tentativa de colocar o longa metragem “Lua em Sargitário”, primeiro longe de ficção da diretora, no circuito principal de filmes passados nas salas de cinema no Brasil. Mesmo ganhando prêmios, como Ibermedia, achar uma distribuidora ainda era muito difícil, fazendo com que a primeira parte do longa fosse gravada com recursos muito enxutos, para daí, somente após dois anos, ganhar o prêmio Prodecine 4 – FSA/Ancine e com um aporte maior, vindo da premiação, finalizarem de vez o filme. Mesmo com tudo isso o filme não conseguiu uma distribuidora de grande nome, para colocar o filme no circuito principal de distribuição.

1.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Na matéria: Animação stopmotion vem ganhando seu tão aguardado espaço nas produções brasileiras, para a revista, Revista de Cinema, Jeferson Canesso afirma que o mercado de stopmotion vem crescendo nos últimos 20 anos, já que tivemos por volta de 40 longas metragem, sem contar a infinidade de curtas produzidos. (Revista de Cinema, 2021). Tendo em mente as dificuldades mostradas por Samira e por Marcia, em conjunto, com o cenário que Jeferson destaca, proporcionar estudos dentro

dessa área, parece um passo mais que natural, já que não se encontram muitos estudos para facilitar o acesso a ferramentas para esta modalidade de animação.

1.2. JUSTIFICATIVA

Como destacado várias vezes anteriormente, as dificuldades encontradas por qualquer pessoa que queira seguir no ramo das artes são grandes e a falta de priorização da arte na vida dos brasileiros faz com que ramos menores da arte sejam ainda mais ignorados.

Para fazer uma cena de stopmotion com marionetes, a utilização de um braço rig para marcar a posição e ajudar na sustentação do personagem em cena, facilita o trabalho, assim como Steve Stanchfield exemplifica em seu relato sobre um estudo em cima do stopmotion, utilizando uma marionete. (Priebe, 2011)

Ferramentas muito específicas, como o braço rig, acabam sendo elitizadas por terem preços que podem chegar por volta de R\$193,74 (Cinespark Store, s.d.).

Por conta disso o profissional tem de recorrer a trabalhos manuais para obter uma ferramenta semelhante, assim como demonstrado no vídeo: Como fazer um suporte para bonecos: Rig stopmotion. (Ventapane, 2020)

Tendo esses pontos em vista, ajudar o acesso a mais uma forma de dar voz a artistas, que já passam por muita dificuldade na sua carreira, encaixa muito bem com a frase do juramento do engenheiro mecânico: “colocarei todo o meu conhecimento científico a serviço do conforto e desenvolvimento da Humanidade.” (Pitágoras, 2022)

1.3. HIPÓTESE

Alto valor de investimento e ramo precário com muita instabilidade, são termos que não se correlacionam muito bem, tendo isso em vista, o ideal seria a obtenção do braço rig, com o mínimo de ativo possível. Para a minimização desde custo, teria que haver cortes na precificação do objeto. Sendo assim disponibilizando o projeto em uma base onde o acesso é gratuito, assim como pode ser feito no site *grabcad.com*, o valor agregado a distribuição, estoque, venda e pós-venda seria cortado. Outra redução também seria o retorno das horas de pesquisa e desenvolvimento, mas como objeto de estudo e foco central deste TCC, não há necessidade de um retorno financeiro.

Para a manufatura dos componentes, a manufatura aditiva é uma escolha ideal, já que facilita a fabricação de produtos em baixa escala e é um dos pilares desde curso. Trabalhos que mostram as possibilidades em relação a custo e otimização de processos como: “*PROJETO VOLTADO À MANUFATURA ADITIVA UTILIZANDO IMPRESSÃO 3D SLA E OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA*” (Dadda, 2021) e “*Design de sapatos utilizando tecnologia de impressão 3D*” (FELIN, 2014). Só facilitam a escolha do método de produção.

Sendo assim utilizando uma impressora 3D, qualquer pessoa que desejar experimentar a filmagem de sotpmotion, com braços rigs, tenderia a gastar um valor próximo ao valor dos insumos.

1.4. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é fornecer um modelo de braço rig que possa manufaturado em impressoras 3D SLA e que possa ser encontrado em sites de distribuição de modelos 3D sem custo.

1.4.1. Objetivos específicos.

- Calcular força máxima na junta, para o material base e o material proposto;
- Comparação entre as forças encontradas e constatação do comportamento do material proposto em relação ao material base.
- Escolha do site agregador de modelos, para distribuição dos arquivos “.stl” gratuitamente.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Manufatura aditiva

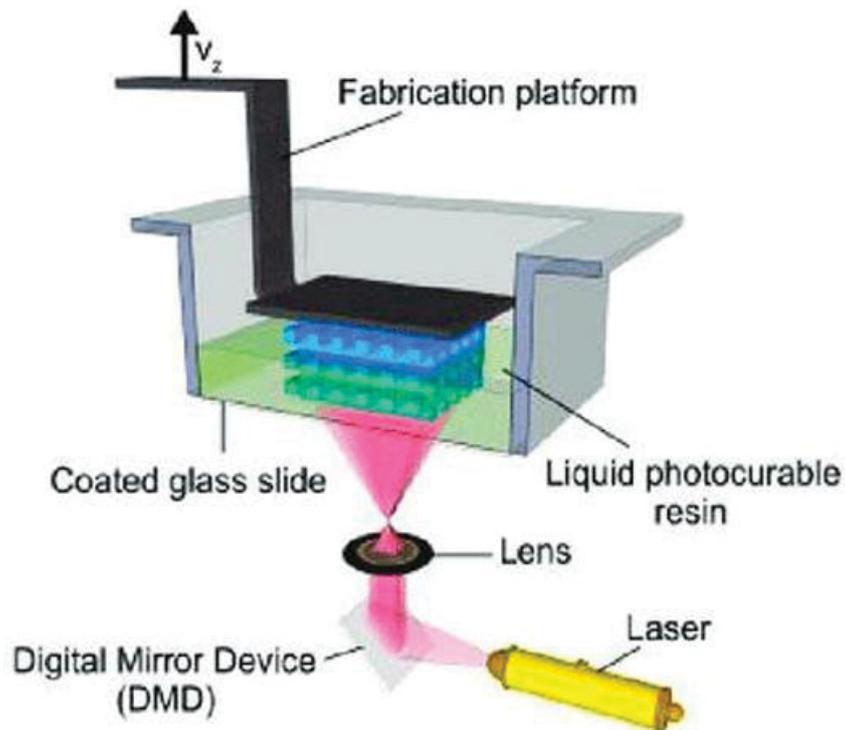
Como descrito na matéria *Entenda como funcionam os diferentes tipos de impressoras 3D*, existem variados tipos deste processo de fabricação, pois não existe um método “coringa”, cada um serve para determinados tipos de aplicação e refinamento de acabamento. Abaixo estará listado dois tipos que foram considerados para serem aplicados para este estudo. (Da Redação, 2016)

2.1.1. Estereolitografia

A estereolitografia ou, simplesmente SLA, é a técnica mais antiga de manufatura aditiva (mais conhecida como impressão 3D). A tecnologia e o termo SLA foram criados em 1986, por Chuck Hull, fundador da empresa 3D Systems.

O processo de SLA (FIGURA1), funciona a partir de um laser que, ao ser direcionado a um tanque ou bandeja com resina líquida fotossensível, endurece a mesma, criando a peça 3D desejada. (Rodrigues, 2018)

Figura1 - Esquema do processo de fabricação por estereolitografia.

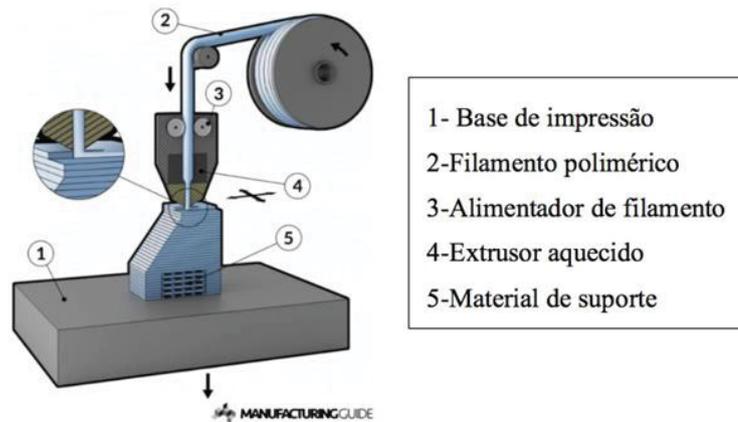


FONTE: Adaptado de (Marin, 2018)

2.1.2. Extrusão

Consiste em aquecer um filamento de polímero e forçá-lo através de um bocal. A seguir, esse polímero derretido é depositado sobre uma plataforma seguindo um caminho pré-estabelecido. Ao se solidificar o polímero estabelece a geometria definida e, assim, o objeto é construído camada a camada, assim como demonstrado na FIGURA2.

Figura2 - Esquema de como funciona uma impressora por estrusão



FONTE: Adaptado de (TOFFOLI, 2018)

Por se tratar do método mais popular de manufatura aditiva, a extrusão de material apresenta como principal vantagem seu elevado custo-benefício. Ademais, apresenta excelentes resultados estéticos, devido à possibilidade de utilizar filamentos de diferentes cores. Impressoras 3D atuais que fazem uso desse método permitem, inclusive, a fabricação de objetos formados compostos por diferentes materiais.

Por outro lado, a deposição do material em filamentos combinada ao fato de que possibilita, exclusivamente, o trabalho de polímeros, limita as propriedades mecânicas finais da peça. Por isso, é um método utilizado principalmente para prototipação. (Carvalho, 2019)

2.2. Sotpmotion.

Como descrito na matéria How to Make Your Own Sotpmotion Animation, Sotpmotion é a técnica em que se vai capturando objetos estáticos, quadro a quadro, onde a cada quadro os objetos vão sofrendo pequenas alterações, para que ao final, quando todas as imagens forem compiladas, dará a ilusão de movimento, para isso, um mínimo de 12 imagens devem ser tiradas. (MasterClass, 2021)

Conforme Pedro (2017), dentro do stopmotion existem algumas variações de técnicas que podem ser utilizadas, se elencarmos algumas delas, estas seriam:

- Animação de Objetos;
- Animação de Barro;
- Animação de Lego;
- Pixelização;

- Recortes;
- Animação com Modelos;
- Animação em Stopmotion com Silhuetas;
- Animação de Grãos de Areia;
- Animação de Pintura;
- Luz e Sombra.

2.2.1. Stopmotion com modelos.

Dentro desta técnica são usados modelos, em escala, dos personagens e para buscar mais realismos, estruturas (FIGURA3) para simular a anatomia dos mesmos são construídas e inserida na parte interna dos modelos.

FIGURA3 - Raven Puppet



FONTE: Adaptado de (Read, 2011).

As articulações internas são uma das mais importantes partes em um modelo para stopmotion, quem chegou ao modelo que é mais utilizado hoje, as articulações ball-and-socket (FIGURA4), foi o russo Ladislav Starewicz um dos pioneiros a potencializar a animação como stop-motion. (FRANCO, 2009)

FIGURA4 - Double Ball Joint

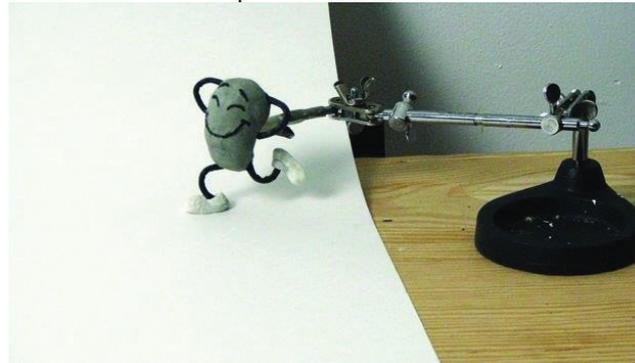


FONTE: Adaptado de (Flynn, 2011).

2.3. Braço rig.

O braço rig (FIGURA5) é uma estrutura, adicional ao método de animação com modelos, usada para ajudar a marcar a posição do personagem no frame. Esta estrutura é formada por uma base, hastes, em uma quantia que se adéque ao modelo utilizado, uma extremidade que possibilite prender o personagem e em cada encontro de haste existe uma união ball-and-socket, para permitir uma ampla movimentação.

FIGURA5 - Basic shape for the bean as he enters the frame

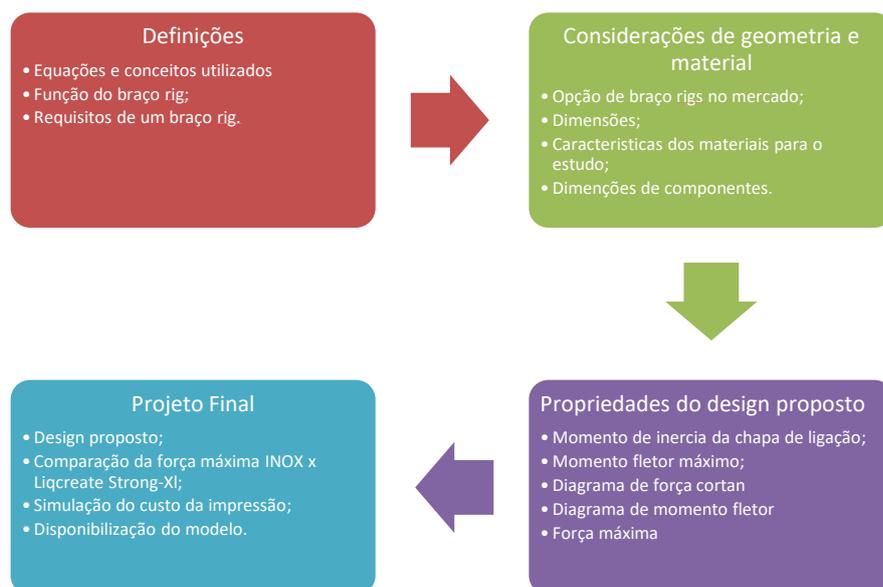


FONTE: (Priebe, 2011)

3. METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Durante o estudo, o planejamento ilustrado no fluxograma da FIGURA6 será seguido para a definição do design final.

FIGURA6 - Fluxograma das principais etapas do trabalho.

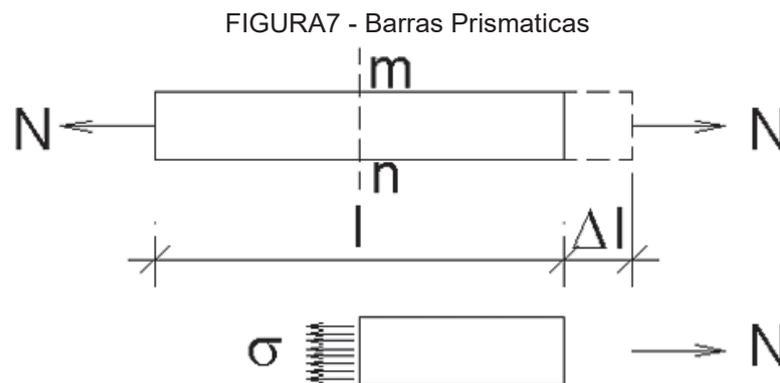


FONTE: O autor (2022)

3.1. DEFINIÇÕES

3.1.1. Tensão e deformação

Como o professor doutor Nilson Tadeu Mascia define, quando uma barra prismática, com seção constante é submetida a forças axiais que produzem alongamento uniforme ou tração na barra. Fazendo-se um corte mn, têm-se a Figura7. que por equilíbrio obtém-se:



FONTE: (PROF DR. MASCIA, 2006)

$$\sigma_x A = N$$

com N aplicada no C.G. da seção, ou

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (1)$$

sendo σ denominado tensão normal e com a hipótese da tensão ser distribuída uniformemente na seção transversal.

Se N tiver sentido oposto ao da Figura5 ter-se-ia **compressão** na barra.

Portanto se: $N > 0 \rightarrow \sigma > 0 \equiv$ Tração

$N < 0 \rightarrow \sigma < 0 \equiv$ Compressão

O alongamento total da barra será designado de Δl . Assim o alongamento por unidade de comprimento ou alongamento específico denominado deformação normal será:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Esta equação é válida para alongamento uniforme ao longo da barra.

Se: $N > 0 \rightarrow \sigma > 0 \equiv$ Tração

$N < 0 \rightarrow \sigma < 0 \equiv$ Compressão

Notar que tem dimensão de $[F] \cdot [L]^{-2}$ e a deformação normal é adimensional $[L] \cdot [L]^{-1}$ (mm/mm, $\mu\epsilon$). (PROF DR. MASCIA, 2006)

3.1.2. Torque em parafuso

Como muito bem explicado por Fabricio Lainat no vídeo: Dica Rápida #03 - A forma mais simples de se calcular o torque em um parafuso, após toda dedução de conceitos de superfície onde a força está aplicada, convenções sobre como será o aperto nós temos a seguinte equação:

$$T = F \cdot k \cdot \phi \quad (2)$$

Onde:

T \rightarrow Torque;

F \rightarrow Força de tração;

$\phi \rightarrow$ Diâmetro do parafuso;

K \rightarrow Constante referente a condições de ambiente, que por convenção podem ser subdivididas em:

Uniões lubrificadas $\rightarrow K = 0,15$;

Uniões com elementos de ficção extras (Ex: arruelas) $\rightarrow K = 0,20$;

Uniões sem lubrificantes nem elementos extras de fixação $\rightarrow K = 0,25$.

(Leinat, 2018)

3.1.3. Tensão fletora

Utilizando conceitos de de lei de Hook e momento de curvatura a professora Salete Souza de Oliveira Buffoni equaciona a tensão fletora como:

$$\sigma_x = \frac{M \cdot y}{I} \quad (3)$$

Onde:

σ_x : Tensão fletora;

M_y : Momento fletor máximo;

I : Momento de inercia.

(BUFFONI).

3.1.4. Momento de inercia

“O **momento de inércia** é um tipo de grandeza física associada diretamente a inércia de rotação. Esse indicador da inércia aponta para a tendência que um determinado corpo massivo possui em se manter em movimento ou em seu estado inicial.” (calculareconverter, 2018)

3.1.4.1. Equação momento de inercia de seção retangular

Para cada formato que a viga possa ter, existe uma equação predeterminada para calcular se calcular a inercia da mesma. No caso de seções retangulares, podemos usar a equação:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (4)$$

Onde:

I : Inercia;

b : Base do retângulo;

h : Altura do retângulo.

(calculareconverter, 2018)

3.1.5. Função do braço rig

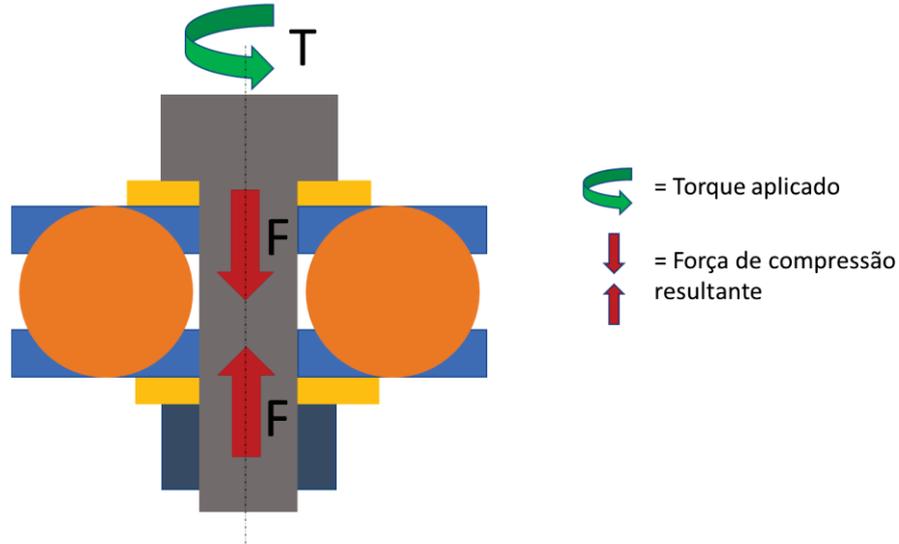
Como já descrito a função do braço rig é manter uma marionete fixa em uma posição específica para cada frame.

3.1.6. Requisitos de um braço rig

Sabendo que o braço não deve se mexer, podemos assumir que as juntas ball-and-socket sempre serão submetidas ao aperto máximo que a menor seção pode

aguentar sem que haja deformação plástica do material (FIGURA8). Para isso apenas por questões de cálculo um fator de segunda de $C_s=2$.

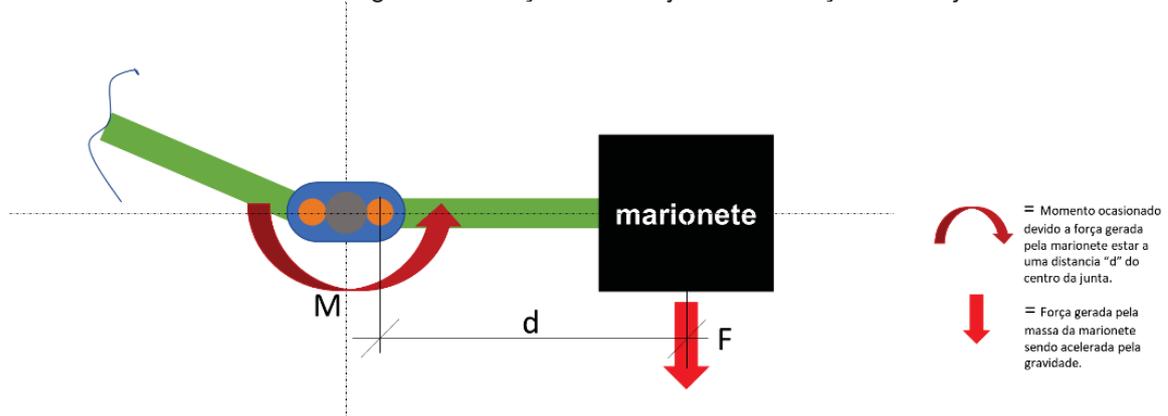
FIGURA8 – Diagrama de forças aplicadas na junta ball-and-socket



FONTE: (AUTOR,2022)

Esse aperto irá impedir que o momento que o peso da marionete pode gerar, por exemplo em uma cena em que uma marionete precise ficar estática no ar, seja suficiente para mudar a posição dela, assim fixando-a em sua posição (FIGURA9).

FIGURA9 - Diagrama de forças de uma junta em relação ao conjunto.



FONTE: (AUTOR,2022)

3.2. Considerações de geometria e material.

3.2.1. Dimensões de uma biela comprada.

As principais características dimensionais que caracterizam o braço rig foram retiradas da biela de aço inoxidável tipo um, outro produto da loja cinespark:

- Comprimento total da haste: 90 mm;
- Tanho da bola da ponta: Ø 6 mm;
- Tamanho da haste: 3mm;
- Material: Aço inoxidável.

(Cinespark store, s.d.)

3.2.2. Característica do material da biela comprada.

Como descrito por Gelson Luz no Blog, materiais, no artigo: Aço inoxidável AISI 304 Propriedades Químicas e Mecânicas rev. 2022, o valor de tensão de tração para este aço é:

σ : 505 Mpa.

(Luz, 2018)

3.2.3. Características do parafuso.

Valores de torque máximo e tensão de um aparafuso M3 comercial, foram retirados da tabela abaixo.

Tabela 1 - Tensão de compressão e torque para parafusos comerciais

Rosca métrica	8,8		10,9		12,9	
	Tensão N	Torque N.m	Tensão N	Torque N.m	Tensão N	Torque N.m
M2x0,4	863	0,371	1216	0,523	1461	0,628
M2,3x0,4	1245	0,598	1755	0,842	2099	1,008
M2,6x0,45	1598	0,863	2246	1,213	2697	1,456
M3x0,5	2206	1,346	3109	1,896	3727	2,273

FONTE: Modificado de (InduFix, 2017)

3.2.4. Características da resina.

Todas as características de material que foram utilizadas para o cálculo da maior massa que a marionete pode ter, seguem a FIGURA10, mostrada abaixo:

Figura10 - Tabela de materiais do material Liqcreate Strong-X

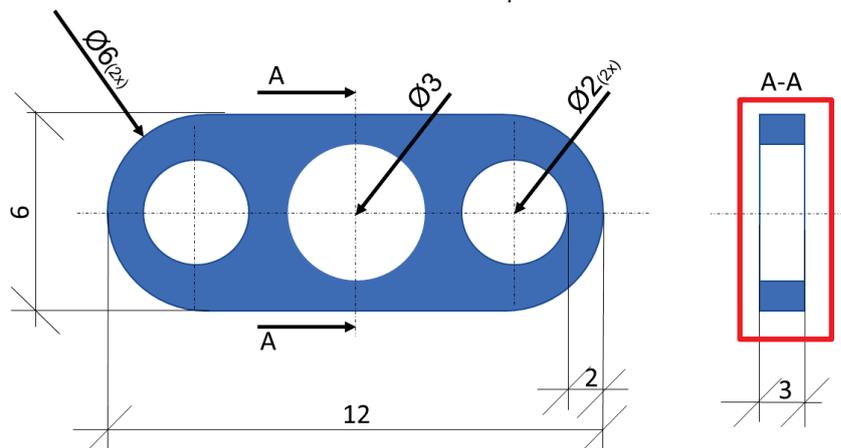
Polymer properties			
Mechanical Properties		UV post-curing	
Description	ASTM Method	High power LED curing	High power LED curing
		(30 minutes at 60°C)	(120 minutes at 60°C)
Tensile strength	D638M	52 – 70 MPa	60 – 84 MPa
Tensile modulus	D638M	2.9 – 3.2 GPa	3.1 – 3.4 GPa
Elongation at break	D638M	4 – 8%	3 – 6%
Flexural Strength	D790M	121 – 130 MPa	134 – 140 MPa
Flexural modulus	D790M	3.1 – 3.3 GPa	3.3 – 3.5 GPa
IZOD Impact (notched)	D256A	20 J/m	17 J/m
Shore D Hardness	D2240	87	90
Water sorption	D570-98	0.45%	0.39%
Tg	D7028	n/a	128°C

FONTE: Modificado de Liqcreate (Liqcreate, 2019)

3.2.5. Chapa de ligação.

Estimando uma placa com 3mm de espessura, com três furos, onde os furos da extremidade têm $\varnothing 2\text{mm}$ e o furo central tem $\varnothing 3\text{mm}$. Sendo assim a menor seção transversal que será utilizada para calcular o momento de inercia se encontra destacado na FIGURA11:

FIGURA11 - Placa estimada para os cálculos.



FONTE: (AUTOR,2022)

3.3. Propriedades do design proposto.

3.3.1. Momento de inercia da chapa de ligação.

Para o cálculo do momento inercia precisamos retirar a área do furo central sendo assim $[I_F = I_{ex} - I_{in}]$, utilizando a equação (4), podemos encontrar um momento de inercia:

Externa:

$$I_{ex} = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$I_{ex} = \frac{0,006 \cdot (0,003)^3}{12}$$

$$I_{ex} = 1,35 e^{-11}$$

Interna:

$$I_{ex} = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$I_{ex} = \frac{0,003 \cdot (0,003)^3}{12}$$

$$I_{ex} = 6,75 e^{-12}$$

Inercia final:

$$I_F = I_{ex} - I_{in}$$

$$I_F = 1,35 e^{-11} - 6,75 e^{-12}$$

$$I_F = 6,75 e^{-12}$$

3.3.2. Momento fletor máximo.

Para o momento fletor ser isolado, a tensão de tração do material, com um coeficiente de segurança de $C_s=2$, será considera como tensão fletora máxima, assim garantindo que o material não irá deformar durante o aperto.

3.3.2.1. Momento fletor máximo: INOX.

Utilizando o valor de tensão do item 3.2.2 e o momento de inercia do item 3.3.1, obtém-se:

$$\frac{\sigma_{inox}}{C_s} = \frac{M_{inox} \cdot y}{I}$$

$$\frac{505}{2} = \frac{M_{inox} \cdot 0,0015}{6,75 e^{-12}}$$

$$M_{inox} = 1,136 e^{-6} N.m$$

3.3.2.2. Momento fletor máximo: Liqcreate Strong-X

Utilizando o valor de tensão da FIGURA8, na coluna de cura de 120 minutos a 60°C e o momento de inercia do item 3.3.1, obtém-se:

$$\frac{\sigma_{LSX}}{C_s} = \frac{M_{LSX} \cdot y}{I}$$

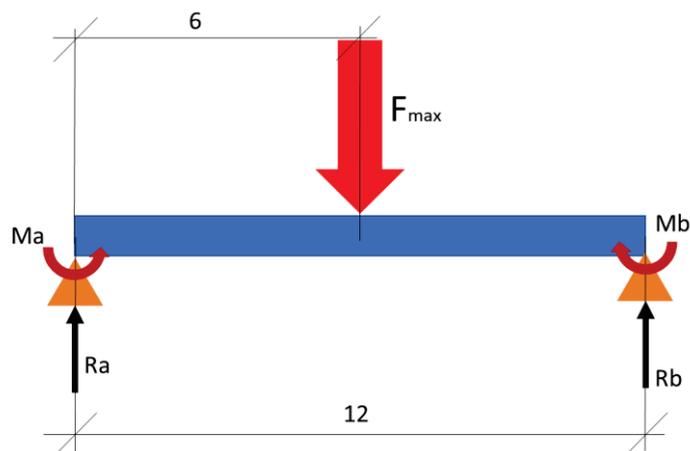
$$\frac{84}{2} = \frac{M_{LSX} \cdot 0,0015}{6,75 e^{-12}}$$

$$M_{LSX} = 1,890 e^{-07} N.m$$

3.3.3. Força máxima.

Analisando o diagrama de forças da Figura12, pode-se afirmar que $[F_{max} = R_a + R_b]$ e que $\sum M = 0$.

Figura 12 - Diagrama de forças em um lado da junta ball-and-socket

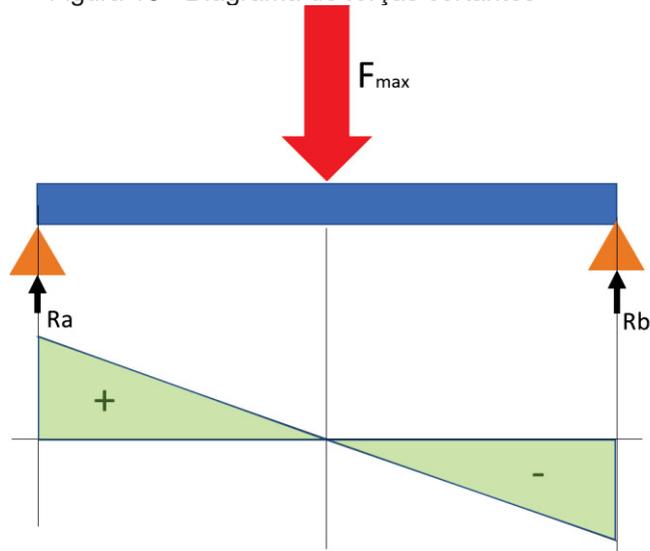


FONTE: (AUTOR,2022)

3.3.3.1. Diagrama de forças cortantes

Sabendo que F_{max} é uma força aplicada em um ponto, pode ser afirmado que o diagrama de força cortante (FIGURA13) teria o seguinte formato:

Figura 13 - Diagrama de forças cortantes

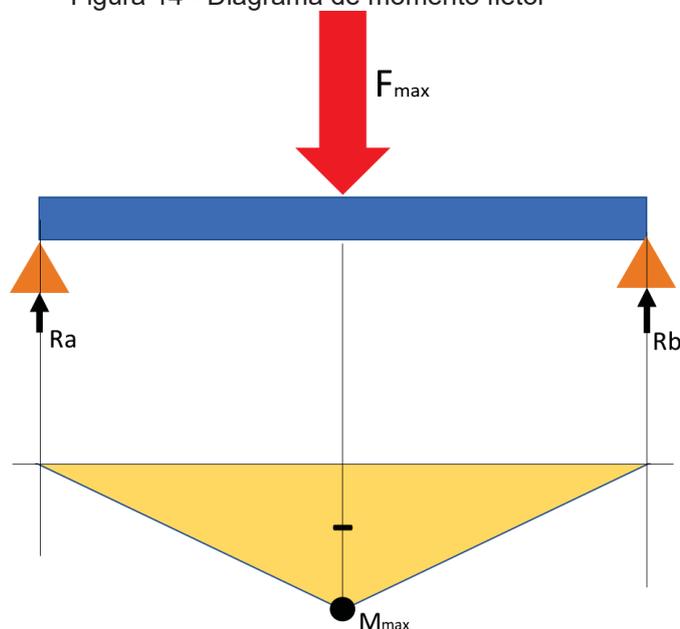


FONTE: (AUTOR,2022)

3.3.3.2. Diagrama de momento fletor.

O diagrama de momento fletor (FIGURA14) seria negativo (compressão) devido ao sentido da força aplicada.

Figura 14 - Diagrama de momento fletor



FONTE: (AUTOR,2022)

Com os valores de momento máximo obtidos nos itens 3.3.2.1 e 3.3.2.2 e sabendo que a área do triângulo retângulo obtido no diagrama de forças cortantes é igual ao momento fletor máximo, ao fazer as devidas deduções obtém-se:

$$A = \frac{b \cdot h}{2}$$

$$h = \frac{A \cdot 2}{b}$$

Onde:

$h \rightarrow$ Força resultante = $\frac{F_{max}}{2}$

$A \rightarrow$ Momento máximo (Area do triangulo)

$B \rightarrow$ distância ente os pontos zero (base do triangulo)

3.3.3.3. Força máxima: INOX.

Para o inox a força máxima aplica é igual a:

$$h = \frac{A \cdot 2}{b}$$

$$h = \frac{1,136 e^{-6} \cdot 2}{0,006}$$

$$\frac{F_{max}}{2} = \frac{1,136 e^{-6} \cdot 2}{0,006}$$

$$F_{max} = \frac{1,136 e^{-6} \cdot 4}{0,006}$$

$$F_{max} = 7,573 e^{-4} N$$

3.3.3.4. Força máxima: Liqcreate Strong-X

Para o inox a força máxima aplica é igual a:

$$h = \frac{A \cdot 2}{b}$$

$$h = \frac{1,890 e^{-07} \cdot 2}{0,006}$$

$$\frac{F_{max}}{2} = \frac{1,890 e^{-07} \cdot 2}{0,006}$$

$$F_{max} = \frac{1,890 e^{-07} \cdot 4}{0,006}$$

$$F_{max} = 1,260 e^{-4} N$$

3.4. Projeto Final

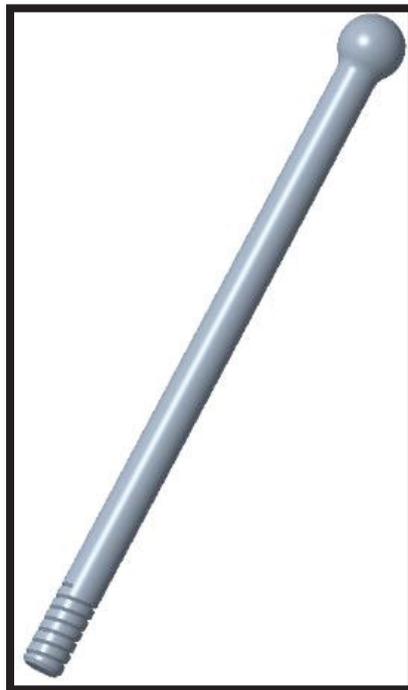
3.4.1. Braço rig proposto.

O braço rig final proposto, é baseado no sistema ball-and-socket, sendo composto por 4 peças. Dois tipos de biela, uma biela de fixação (FIGURA15), que contém uma extremidade com o design de esfera e uma outra extremidade que com rosca M3, já que o diâmetro da biela é de 3mm. Uma biela intermediária (FIGURA16), com duas extremidades contendo as esferas do ball-and-socket. Já os outros dois componentes são o grampo (FIGURA17) para prender a marionete e a chapa de ligação que deve ser manufaturada em pares para conectar uma haste na outra (FIGURA018), no meio da união há um furo que recebera um parafuso comercial M3, que irá gerar o aperto do conjunto, juntamente com uma arruela e uma porca. O conjunto final está exemplifica na FIGURA19.

3.4.1.1. *Biela de fixação*

A biela segue as medidas citadas no item 3.2.1 e 3.3.3.

FIGURA15 - Haste para fixação do junto em uma base

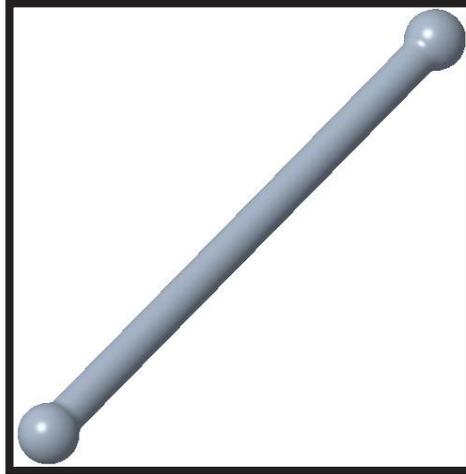


FONTE: Autor (2022)

3.4.1.2. *Biela intermediária*

A biela intermediária segue as medidas citadas no item 3.2.1.

FIGURA16 - Haste intermediária proposta

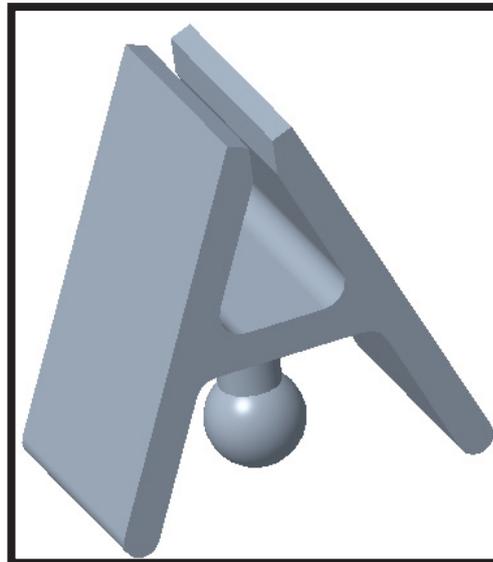


FONTE: Autor (2022)

3.4.1.3. *Grampo*

O grampo não foi um item muito destacado dentro do estudo, pois pode ser facilmente substituído por qualquer outro objeto que mantenha a marionete presa ao rig arm, como por exemplo, até mesmo, uma fita adesiva.

FIGURA17 - *Grampo proposto*

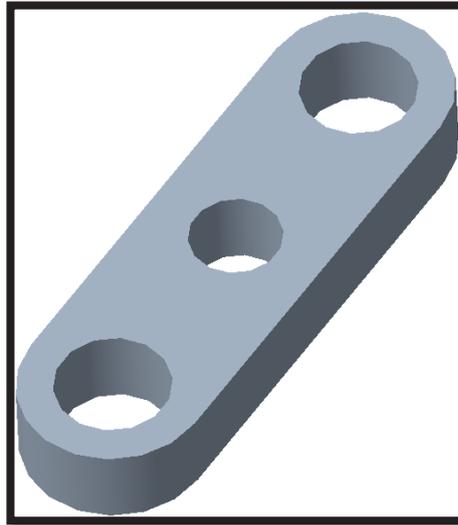


FONTE: Autor (2022)

3.4.1.4. Chapa de ligação

A chapa de ligação segue as medidas citadas no item 3.2.4.

FIGURA18 – Chapa de união.

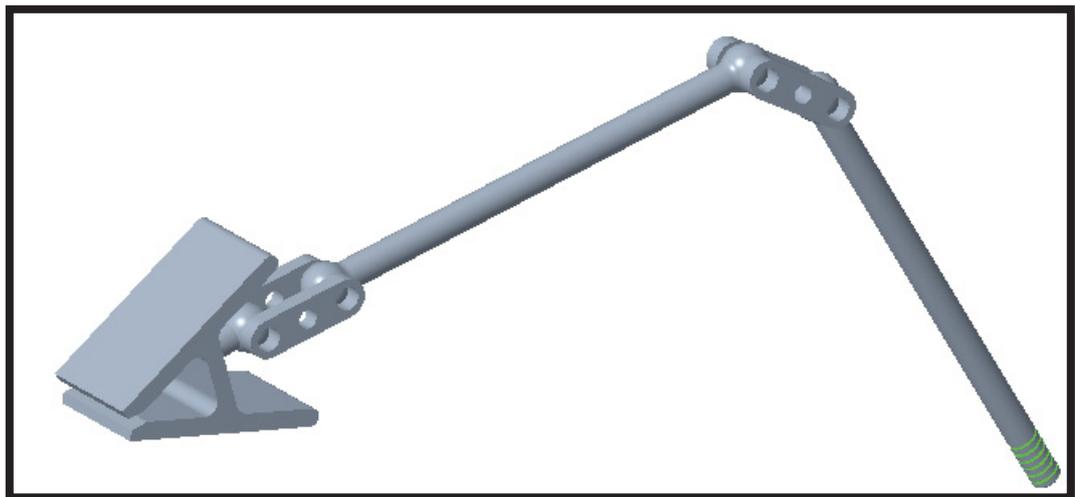


FONTE: Autor (2022)

3.4.1.5. Montagem Rig armr.

Em uma montagem simples com apenas uma biela de ligação, o rig arm está representado na Figura19:

Figura 19 - Montagem do rig arm com apenas uma biela de ligação.



FONTE: Autor (2022)

3.4.2. Comparação da força máxima INOX x Liqcreate Strong-X.

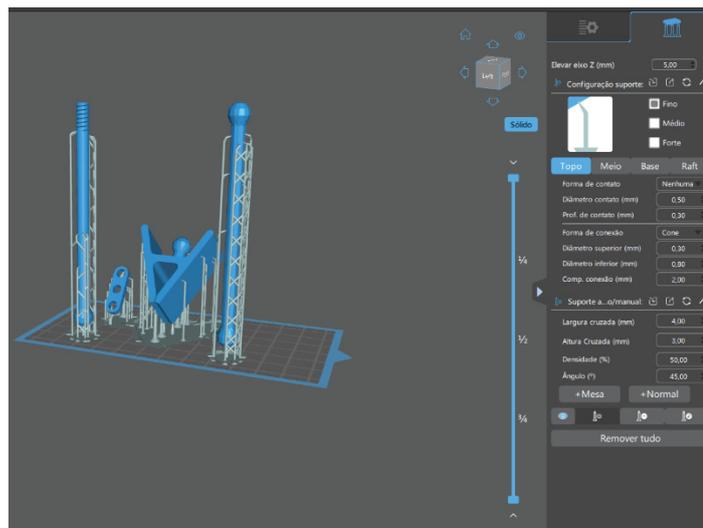
Devido aos valores encontrados é constatado que, em condições equivalente, há uma queda de 83,3% na força máxima que pode ser aplicada na junta. Com um ajuste no coeficiente de segurança, um valor de força mais alto seria encontrado.

3.4.3. Simulação do custo da impressão.

Para simulação do preço, foi feita uma simulação de impressão SLA, pois foi material que foi utilizado para os cálculos e tendo em mente que a estereolitografia tem como pontos fracos o tempo de produção e o custo mais elevado (3D Lab, 2018).

O programa de simulação da impressão utilizado foi o Chitubox. Na Figura 20 pode-se verificar a simulação de todos os componentes com seus, respectivos, suportes adicionais para a impressão.

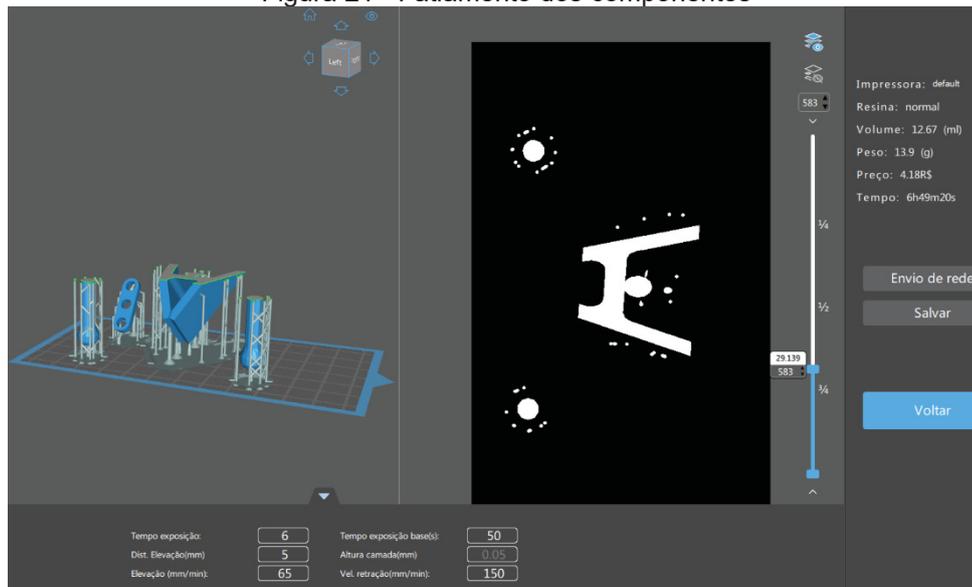
Figura 20 - Simulação ChituBox



FONTE: Autor (2022)

Logo abaixo, na figura 21, se encontra uma simulação do fatiamento, mostrando a densidade dos componentes, juntamente com a o tempo e preço estimado da impressão do conjunto.

Figura 21 - Fatiamento dos componentes



FONTE: Autor (2022)

Com essa simulação pode-se estimar que o preço do conjunto completo ficaria por volta de R\$ 4,18, levando cerca de 6 horas 49 minutos e 20 segundos, levando em consideração apenas as partes impressas. Somando com o valor de alguns parafusos, porcas e arruelas lisa comerciais, o conjunto, possivelmente, não deve passar de R\$10,00 já que respectivamente, os componentes, de forma unitária, podem ser comprados por R\$0,21 (Parafuso Fácil, s.d.), R\$0,06 (Loja Brafer, s.d.) e R\$0,05 (Mega Lojista, s.d.).

3.4.4. Disponibilização do modelo.

O modelo estudado neste trabalho de conclusão de curso está disponibilizado gratuitamente dentro do site grabcad.com (<https://grabcad.com/library/rig-arm-for-stop-motion-1>). Assim qualquer pessoa interessada pode baixar os arquivos em formato “.Stl”.

4. CONCLUSÕES

A utilização do SLA para impressão do braço rig se mostra viável pelo preço simulado e pelo tempo de impressão também. Em conjunto com o upload dos modelos, em arquivos “.stl”, em um site voltado a disponibilizar modelos gratuitos para sua comunidade pode-se afirmar que o objetivo principal do projeto foi alcançado em conjunto com o terceiro objetivo específico, respondido no item 3.4.4.

Mesmo sabendo que o modelo não é a prova de falhas e que a reprodução exata deste estudo consiste em utilizar o mesmo material que foi considerado para os cálculos, pode-se dizer que o estudo poderá servir como base para outros estudos comparativos, já que o conceito para fazer a relação com os produtos disponibilizados no mercado será o mesmo.

Por fim é correto afirmar que o braço rig deste estudo mostra-se inferior ao que está disponibilizados no mercado hoje já que foi visto que, levando em consideração um $C_s = 2$, a força que pode ser aplicada na junta, valor calculado nos tópicos 3.3.3.3, 3.3.3.4, para responder o primeiro objetivo específico, cairá aproximadamente 83,3%, comportamento que foi procurado devido ao objetivo específico dois e constatado no item 3.4.2. Porém para pequenos experimentos e um primeiro contato com a ferramenta mostra-se bem promissor.

4.1. Sugestões de trabalhos futuros

Durante a análise e discussão dos resultados surgiram alguns questionamentos que não puderam ser confirmados neste trabalho, mas que serviram para apontar sugestões para a continuidade dos estudos. Essas sugestões são listadas na sequência:

- Verificar uma gama maior de resinas.
- Verificar a utilização de manufatura aditiva por extrusão.
- Mudar a geometria de alguns componentes para terem um melhor comportamento diante das forças aplicadas.

6. Referências

- BUFFONI, S. S. (s.d.). *Tensões de Flexão nas Vigas*. Apostila, ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL METALÚRGICA DE VOLTA REDONDA, VOLTA REDONDA. Acesso em 20 de Agosto de 2022, disponível em https://www.academia.edu/40208634/ESCOLA_DE_ENGENHARIA_INDUSTRIAL_METAL%C3%9ARGICA_DE_VOLTA_REDONDA_PROFESSORA_SALET_E_SOUZA_DE_OLIVEIRA_BUFFONI_DISCIPLINA_RESIST%C3%8ANCIA_D_OS_MATERIAIS_Tens%C3%B5es_de_Flex%C3%A3o_nas_Vigas?from=cover_page
- 3DLab. (25 de Out de 2018). *Conheça os tipos de impressão 3D e os seus benefícios!* Acesso em 10 de Dez de 2021, disponível em [3dlab.com.br: https://3dlab.com.br/tipos-de-impressao-3d-e-beneficios/](https://3dlab.com.br/tipos-de-impressao-3d-e-beneficios/)
- Ávila, S. (28 de Out de 2010). *Dificuldades do Artista*. (N. Queiroz, Entrevistador) Acesso em 20 de Nov de 2021, disponível em <http://desafiodoartista.blogspot.com/p/dificuldades-do-artista.html>
- calculareconverter. (12 de Setembro de 2018). *Momento de Inércia Retângulo (calculadora online)*. Acesso em 25 de Agosto de 2022, disponível em [calculareconverter.com.br: https://calculareconverter.com.br/momento-de-inercia-retangulo/](https://calculareconverter.com.br/momento-de-inercia-retangulo/)
- Carvalho, A. C. (06 de Jun de 2019). *Métodos de impressão 3D: mecanismos e características*. Acesso em 12 de Nov de 2021, disponível em UFSC: <https://via.ufsc.br/metodos-de-impressao-3d/>
- Cinespark store. (s.d.). *Biela de aço inoxidável usinada em cnc, biela esférica dupla para junta de soquete para batente de movimento ou equipamento*. Acesso em 10 de Agosto de 2022, disponível em [pt.aliexpress.com: https://pt.aliexpress.com/item/32997641315.html?spm=a2g0o.detail.1000013.7.167a3857xl4XAW&gps-id=pcDetailBottomMoreThisSeller&scm=1007.13339.300834.0&scm_id=1007.13339.300834.0&scm-url=1007.13339.300834.0&pvid=1eb3ea85-cfb0-4390-9415-3ba1079d1739&_t=gps-i](https://pt.aliexpress.com/item/32997641315.html?spm=a2g0o.detail.1000013.7.167a3857xl4XAW&gps-id=pcDetailBottomMoreThisSeller&scm=1007.13339.300834.0&scm_id=1007.13339.300834.0&scm-url=1007.13339.300834.0&pvid=1eb3ea85-cfb0-4390-9415-3ba1079d1739&_t=gps-i)
- Cinespark Store. (s.d.). *Equipamento de aço inoxidável pronto para montar MR-1 para fotografia macro*. Acesso em 20 de Jul de 2022, disponível em [pt.aliexpress.com: https://pt.aliexpress.com/item/4000004100890.html?spm=a2g0o.detail.0.0.5e3](https://pt.aliexpress.com/item/4000004100890.html?spm=a2g0o.detail.0.0.5e3)

- Loja Brafer. (s.d.). *Porca Sextavada M3 Rosca Grossa MA 0,50 Classe 6 Zincada*. Acesso em 25 de Jul de 2022, disponível em www.lojabrafer.com.br: <https://www.lojabrafer.com.br/porca-sextavada-m3-rosca-grossa-ma-0-50-classe-6-zincada/p/4122?c=13&t=636>
- Luz, G. (01 de 08 de 2018). *Aço AISI 304 Propriedades Químicas e Mecânicas*. Acesso em 15 de Agosto de 2022, disponível em www.materiais.gelsonluz.com: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2018/08/aco-aisi-304-propriedades-quimicas-e.html#:~:text=O%20limite%20de%20escoamento%20ou,215%20MPa%20ou%2031200%20psi>.
- Marin, D. (2018). *Aplicação de diferentes métodos pós-cura em peças produzidas por impressão 3D*. Trabalho de conclusão de curso, Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de materiais) - Universidade Federal de Pelotas, CENTRO DE DES ENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO - CDtec, Pelotas.
- MasterClass. (30 de Ago de 2021). *How to Make Your Own Stop Motion Animation*. Acesso em 13 de Nov de 2021, disponível em MasterClass: <https://www.masterclass.com/articles/how-to-make-your-own-stop-motion-animation#what-is-stop-motion>
- Mega Lojista. (s.d.). *Arruela Lisa M3 Inox A2 - Unidade*. Acesso em 20 de Jul de 2022, disponível em <https://www.megalojista.com.br>: <https://www.megalojista.com.br/fixadores/arruelas/arruela-lisa/arruela-lisa-m3-inox-a2-unidade.html>
- Parafuso Fácil. (s.d.). *DIN 912 Parafuso Allen Cilíndrico MA 3 X 10 Inox 304/A2 Classe 70 Passivado*. Acesso em 20 de Jul de 2022, disponível em <https://www.parafusofacil.com.br>: https://www.parafusofacil.com.br/ProdutosDetalhes.php?Codigo=1112395&gclid=CjwKCAjwrZOXBhACEiwA0EoRD4HV7qKY3m1AXU0nVazjELLhKzUm4yoOSUuq7LPvyNhid5v6KfFVBoC7BIQAvD_BwE
- Paraíso, M. (21 de Setembro de 2016). A dificuldade de fazer cinema no Brasil. (CARTACAPITAL, Entrevistador) Acesso em 05 de Agosto de 2022, disponível em <https://www.cartacapital.com.br/cultura/a-dificuldade-de-fazer-cinema-no-brasil/>
- Pedro, J. (05 de Jul de 2017). *Tipos de videos em stop motion*. Acesso em 12 de Nov de 2021, disponível em [Filmora.wondershare](http://www.filmora.wondershare.com):

<https://filmora.wondershare.com.br/dicas-edicao-de-videos/tipos-de-videos-em-stop-motion.html>

Pitagoras. (18 de Maio de 2022). *Como é o juramento do curso de Engenharia Mecânica?* Acesso em 20 de Agosto de 2022, disponível em Pitagoras.com.br: <https://blog.pitagoras.com.br/juramento-engenharia-mecanica/>

Priebe, K. (18 de Mar de 2011). *The Advanced Art of Stop-Motion Animation': Building Puppets: Part 4.* Acesso em 2021, disponível em <https://www.awn.com/>: <https://www.awn.com/animationworld/advanced-art-stop-motion-animation-building-puppets-part-4>

PROF DR. MASCIA, N. T. (2006). *TRAÇÃO, COMPRESSÃO E LEI DE HOOKE.* Artigo, FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, Departamento de Estruturas, CAMPINAS.

Read, G. (17 de Jan de 2011). *Ball & Socket Stop-Motion Raven Puppet.* Acesso em 20 de Nov de 2021, disponível em graham-skinbones: <http://graham-skinbones.blogspot.com/2011/01/raven-puppet.html?m=0>

Revista de Cinema. (15 de Setembro de 2021). *Animação stopmotion vem ganhando seu tão aguardado espaço nas produções brasileiras.* Acesso em 05 de Agosto de 2022, disponível em revistadecinema.com.br: <https://revistadecinema.com.br/2021/09/animacao-stopmotion-vem-ganhando-seu-tao-aguardado-espaco-nas-producoes-brasileiras/>

Rodrigues, A. (30 de Out de 2018). *O que é Estereolitografia – Como essa tecnologia está revolucionando a joalheria.* Acesso em 10 de Nov de 2021, disponível em [joias com rinoceros](http://www.joiascomrhinoceros.com): <https://www.joiascomrhinoceros.com/o-que-e-estereolitografia/>

TOFFOLI, H. T. (2018). *PROJETO, MELHORIA E CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA - "IMPRESSORA 3D".* Trabalho de conclusão de curso, Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Controle e Automação (Mecatrônica)) - UniCesumar – Centro Universitário de Maringá, Centro de Ciências Exatas Tecnológicas e Agrárias, Maringá.

Ventapane, D. (01 de Jul de 2020). *1 Vídeo (15 minutos e 45 segundos). COMO FAZER UM SUPORTE PARA BONECOS - RIG STOP MOTION.* Acesso em 29 de Jul de 2022, disponível em Publicado pelo canal Os Bonequinhos: <https://www.youtube.com/watch?v=8kD93Ylhp6l&t=1s>

