

## DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICAS PARA FABRICAÇÃO DE ENGRANAGENS POR MANUFATURA ADITIVA

## DEVELOPMENT OF TECHNIQUES FOR MANUFACTURING GEARS BY ADDITIVE MANUFACTURING

Priscila Marques Correa,  
Docente em Engenharia Unisul, Campus de Itajaí / priscila.correa@animaeducacao.com.br

Jonathan da Costa  
Bacharel em Engenharia Mecânica, Campus de Itajaí/jonathandacosta@gmail.com

Mauro Murara  
Bacharel em Engenharia Mecânica, Campus de Itajaí/ mauro2020@gmail.com

Geovanni Guimarães Rocha  
Bacharel em Engenharia Mecânica, Campus de Itajaí/ geovanni.sandrini2001@gmail.com

Mariana Strapazzon Zaduski  
Bacharel em Engenharia Mecânica, Campus de Itajaí/ marizaduski@hotmail.com

Wagner José da Silva  
Bacharel em Engenharia Mecânica, Campus de Itajaí/ wagnerj.silva94@gmail.com

Bruno Cardozo Vieira  
Bacharel em Engenharia Mecânica, Campus de Itajaí/ bruno.cardozovieira@gmail.com

### Resumo:

Este artigo apresenta o desenvolvimento técnico-científico para fabricação de engrenagens por manufatura aditiva (MA). O estudo foi aplicado a uma caixa de engrenagens com capacidade para elevar 3 kg, sendo que as engrenagens foram fixadas em eixos de aço. Também mostra uma revisão sistemática das vantagens que caixas de engrenagens proporcionam, além de abordar duas formas de transmissão: uma sendo a utilização de duas engrenagens e a outra, de um sistema de polias móveis. O resultado deste trabalho apresenta os parâmetros e o processo para fabricação de engrenagens por manufatura aditiva, de forma a permitir a aplicação das peças em sistemas funcionais

**Palavras-chave:** Engrenagem, Manufatura aditiva, Transmissão

### Abstract:

This article presents the technical-scientific development for gear manufacturing by additive manufacturing (AM). The study was designed for a gearbox with a capacity to lift 3 kg, with the gears being fixed on steel shafts. It also shows a systematic review of the advantages that gearboxes provide, in addition to addressing two forms of transmission: one being the use of two gears and the other, a mobile pulley system. The result of the work presents the parameters and the process of this process of manufacturing gears by additive manufacturing, in order to allow the application of parts in supplied systems.

**Keywords:** Additive manufacturing, Transmission

## 1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da manufatura aditiva, há o surgimento de uma alta demanda de bibliografias para definir os parâmetros de processo para diversos objetos, como engrenagens, componentes básicos presentes em diversos maquinários. Logo, se torna imprescindível a boa documentação de experimentos práticos feitos na área.

Algumas das principais vantagens das engrenagens de plástico são: custo relativamente baixo, especialmente para alto volume de engrenagens moldadas por injeção, facilidade e velocidade de fabricação, ampla gama de configurações e complexas formas possíveis, anulação de operações de usinagem e acabamento, capacidade de fabricação com inserções de metal e designs integrais, densidade menor (peso leve e baixa inércia), capacidade de umidificar, choque e impacto moderados, capacidade de se produzir com mínima ou nenhuma lubrificação, operação suave e silenciosa, tolerâncias críticas mais baixas do que com engrenagens de metal, devido em parte à sua maior resiliência e resistência à corrosão (Mitrovic et al. 2021).

Algumas das principais desvantagens são: capacidade máxima de transporte de carga inferior às engrenagens de metal, capacidade reduzida de operar em níveis elevados temperatura, temperatura ambiente e temperaturas na superfície de contato do dente devem ser limitadas, as engrenagens não podem ser fabricadas aditivamente com a mesma precisão que as usinadas/acabadas de alta precisão como engrenagens de metal, engrenagens de plástico estão sujeitas a maiores instabilidades dimensionais devido ao seu maior coeficiente de expansão térmica e absorção de umidade (Mitrovic et al. 2021).

A manufatura aditiva de polímeros tem se tornado mais acessível, sendo mais comum engenheiros possuírem suas próprias impressoras para fazer prototipagem rápida, permitindo testes de parâmetros de forma preliminar.

## 2. DESENVOLVIMENTO

### 2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

O protótipo desenvolvido visa abordar diferentes tipos de transmissões, de forma que a força necessária para girar a alavanca seja o menor possível, sendo este transmitido e multiplicado pelo mecanismo, elevando assim, a carga de 3kg, e demonstrando de forma prática o conceito de vantagem mecânica. Para alcançar este feito, as engrenagens terão de suportar as forças aplicadas. Para o desenho tridimensional do projeto foi utilizado o software SolidWorks, que predispõe de ferramentas para o rápido desenvolvimento de engrenagens, Figuras 1 e 2, seguindo os devidos padrões. Tendo como objetivo visar a redução do torque, utilizou-se uma relação entre engrenagens de 3 e módulo de 1,5 mm. O pinhão possui 20 dentes retos e diâmetro primitivo de 30 mm e a coroa possui 60 dentes e diâmetro primitivo de 90 mm. O material para a fabricação das engrenagens foi o políácido láctico (PLA). O software de fatiamento utilizado foi o Ultimaker Cura uma impressora 3D da marca Anycubic, modelo I3 Mega S.

Baseado em estudos anteriores, entende-se que a altura de camada para um bico de 0,4 mm deve ser entre 0,1 mm e 0,3 mm. A altura dos dentes é de 2,63 mm. Uma espessura de parede inferior a 1,2 mm faria com que os dentes não fossem completamente sólidos.

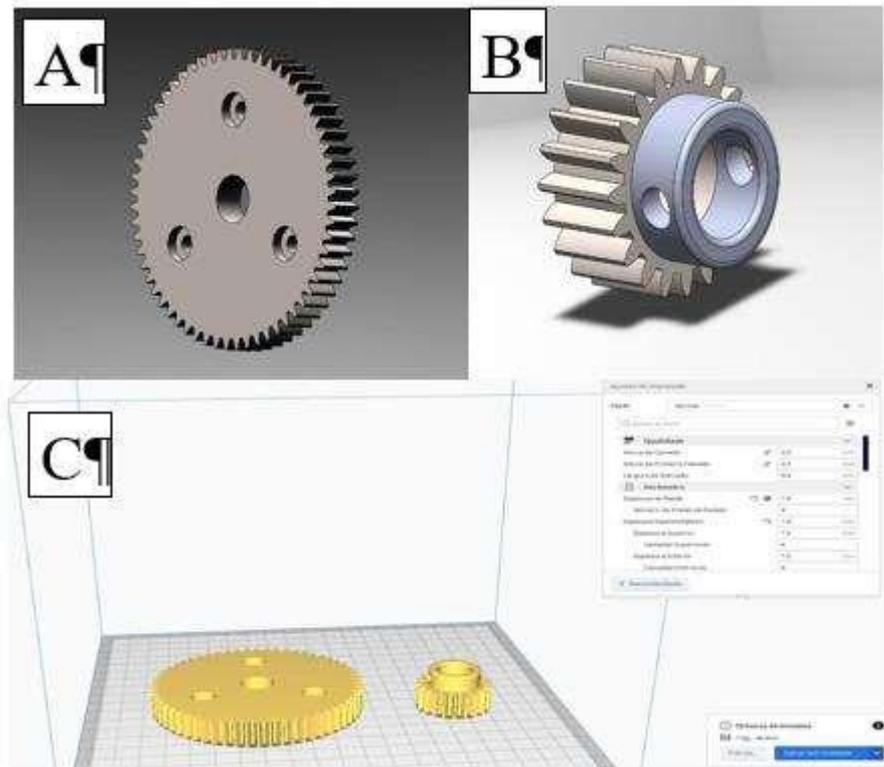
Após debate entre os membros do projeto, chegou-se ao formato e tipo de redução descritos mais à frente, assim como o formato da caixa redutora e seus componentes.

Os parâmetros de impressão e fatiamento utilizados foram baseados em experiências dos membros da equipe e por meio de experimentos empíricos os quais foram fundamentais para atingir o objetivo deste trabalho.

Testamos a engrenagem citada submetendo a mesma a uma carga de aproximadamente 3,6 kg em um de seus dentes, e então, verificamos que a mesma não sofreu qualquer deformação. Utilizando os parâmetros do corpo de prova como base, desenvolvemos o restante do projeto, com a certeza de que, dificilmente, haveria algum imprevisto. Para isso, utilizou-se os seguintes parâmetros:

- Temperatura do bico de impressão (hot end): 200 °C;
- Temperatura da mesa: 40 °C;
- Altura de camada: 0,2 mm;
- Velocidade de fatiamento: entre 35 mm/s e 40 mm/s;
- Preenchimento: 80%;
- Espessura de parede: 1,6 mm

**Figura 1** – Modelo tridimensional das engrenagens: (A) Coroa e (B) pinhão no Solidworks; C). Ambos na impressora 3D.



Fonte: Autores

**Figura 2** - Engrenagens na impressora 3D, já finalizadas.



Fonte: Autores

Em sua maioria as peças do protótipo foram fabricadas utilizando o processo de manufatura aditiva, como: as laterais e bases da caixa, Figura 3, a manivela, o carretel, as roldanas, a catraca e a respectiva trava, com exceção dos eixos e parafusos, bem como o manípulo.

**Figura 3** - Laterais e bases do protótipo.



Fonte: Autores

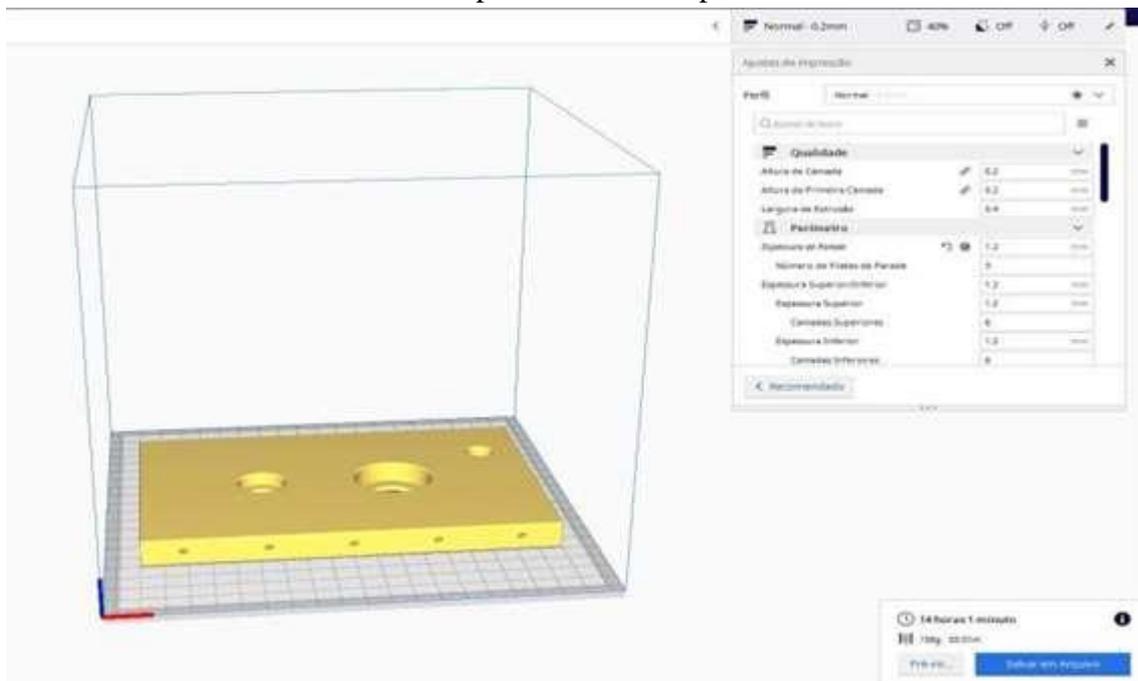
Os eixos foram fabricados em um centro de usinagem da marca Mori Seiki, modelo DuraVertical 5100, e são de aço SAE 1045, com diâmetro predominante de 15mm. Os parafusos das roldanas são do tipo Allen M12 e M16, com alguns ajustes no comprimento e diâmetro, conforme a necessidade. Além dos vários parafusos auto-atarrachantes, utilizados nas fixações das laterais e das bases da caixa, cinco rolamentos de esferas, três com diâmetros internos de 8 mm e dois com 15 mm. Já o manípulo, marca Manafix(R), com 50 mm de comprimento.

Para todas as peças fabricadas por MA, seguiu-se a mesma ordem como nas Figuras 1 e 2: projeto em software 3D, configuração de parâmetros de impressão, bem como o posicionamento da(s) peça(s) no software de fatiamento e, por fim, o fatiamento das peças.

Conforme a função e formato de cada componente do protótipo, os parâmetros foram alterados; basicamente, a porcentagem de preenchimento (infill) e a espessura (shell) das paredes foram determinantes, sendo a mesma velocidade de impressão e temperaturas, do bico de impressão e da mesa, para todas as peças.

Como podemos observar, a lateral mostrada na figura 4, demorou mais de 14 horas para ficar pronta. Somando-se o tempo de cada componente, chegamos a aproximadamente, 60 horas de impressão.

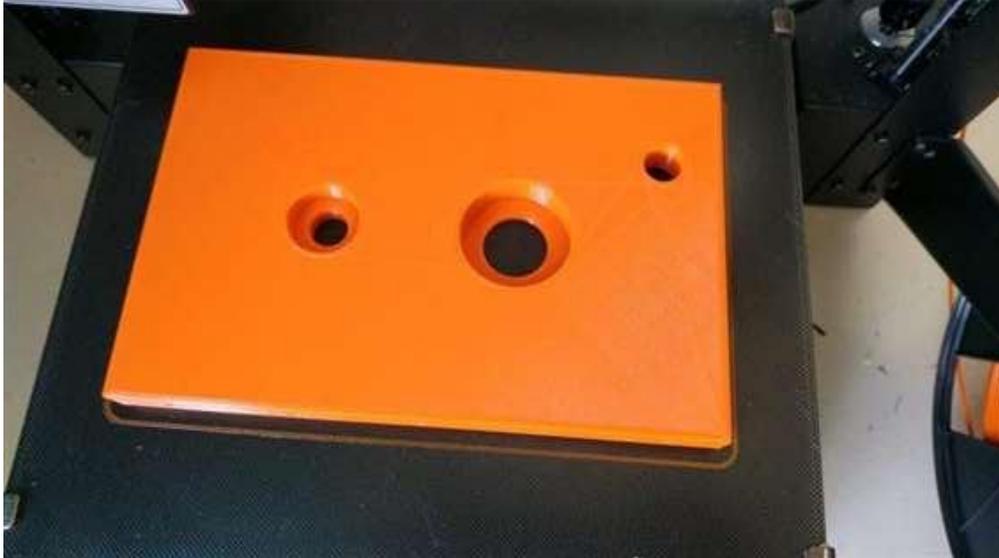
**Figura 4** - Uma das laterais no software de fatiamento, com alguns dos respectivos parâmetros de impressão.



Fonte: Autores

Este foi um dos casos onde a porcentagem de preenchimento foi menor, pois analisando a peça e sua função, não haveria necessidade de a mesma possuir um infill ou shell como as engrenagens. Na Figura 5, a lateral pronta.

**Figura 5** - A lateral já finalizada na mesa da impressora 3D.



Fonte: Autores

### 3. RESULTADOS

Após o projeto e fabricação de todos os componentes, foi iniciada a montagem do protótipo, Figura 6. A engrenagem foi fixada em um dos eixos de aço utilizando parafusos allen M5, prendendo-a no flange do eixo, e o pinhão, através de uma chaveta de 5mm de largura por 19 mm de comprimento e um parafuso allen M6 por possuir um diâmetro primitivo menor. A catraca, também é montada no eixo do pinhão; os eixos serão acoplados a rolamentos esféricos.

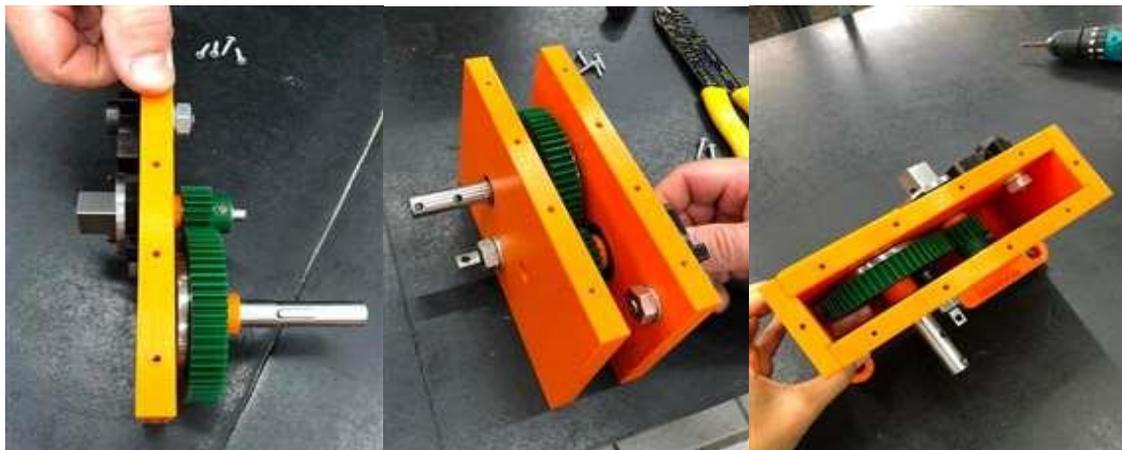
**Figura 6** - Montagem da engrenagem, pinhão e catraca nos eixos.



Fonte: Autores

O próximo passo foi encaixar os conjuntos anteriores nas duas laterais principais, Figura 7. Com algumas das partes cruciais montadas, a montagem das bases e das outras laterais puderam ser feitas sem maiores dificuldades.

**Figura 7** - Sequência de montagem de alguns dos principais componentes.



Fonte: Autores

Na figura 8, os componentes do sistema de içamento e o mesmo montado. É nesta parte que a carga será içada.

**Figura 8** - Sistema de içamento.



Fonte: Autores

No decorrer da elaboração do protótipo, melhorias foram sugeridas por membros da equipe de projeto. Foi feita a substituição de uma das laterais menores por um conjunto de peças, Figura 9, que possui o objetivo de facilitar a operação, e a fabricação de uma manivela menor, como mostrado na Figura 10A.

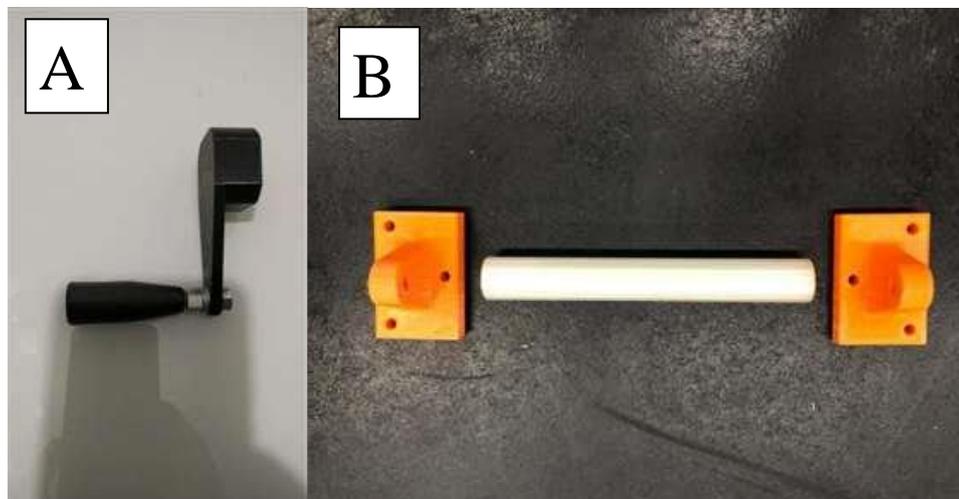
**Figura 9** - Peças utilizadas na modificação do projeto.



Fonte: Autores

O conjunto mostrado na Figura 10B, tem como objetivo facilitar o transporte e o manuseio da caixa, proporcionando melhor segurança.

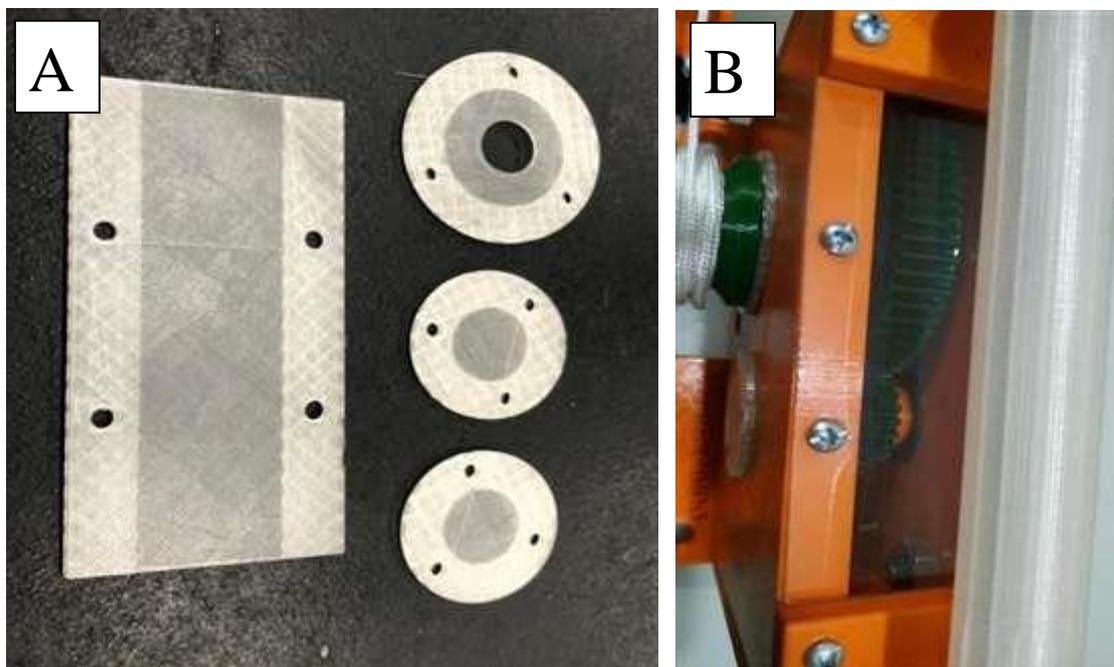
**Figura 10** – A) manivela em suas dimensões finais; B) Suportes e alça para transporte.



Fonte: Autores

Por fim, para efeito estético, algumas tampas de proteção, Figura 11. A tampa maior, por não ter ficado translúcida como o esperado, foi substituída por uma de policarbonato, deixando à mostra, a engrenagem e o pinhão.

**Figura 11** – A) tampas superior e dos rolamentos; B) a tampa superior de policarbonato, com o visual das engrenagens.



Fonte: Autores

Nas Figuras 12 e 13, uma comparação do protótipo antes e depois das modificações. Quanto aos testes, ambos tiveram resultados positivos, com ênfase para o protótipo modificado devido à maior facilidade do seu posicionamento na mesa.

**Figura 12** - Imagens da primeira versão da caixa com a montagem finalizada.



Fonte: Autores

Analisando a figura 12, podemos notar a dificuldade no posicionamento da caixa redutora na mesa para que o sistema de içamento funcione corretamente, sem obstáculos. Já na figura 13, a modificação fez com que o sistema de içamento fosse posicionado mais à frente da caixa, possibilitando um melhor funcionamento do mesmo; com a manivela menor, a operação do protótipo ficou mais fácil, melhorando também sua estética.

**Figura 13** - Imagens da versão definitiva da caixa com a montagem finalizada.



Fonte: Autores

### 3.1 TESTES

Na primeira versão do protótipo, foram realizados testes de aplicação de carga conforme objetivo do projeto, que é içar 3kg na ponta do eixo. Junto a este objetivo, determinamos os seguintes critérios quanto a eficiência do nosso dispositivo antes de darmos início ao içamento da carga:

- Leveza de operação da carga;
- Sistema de segurança para a carga não retornar após içada;
- Praticidade de transporte;
- Fixação do protótipo;
- Manutenção;
- Baixo custo;

Logo após concluídos estes requisitos, foram realizados os testes práticos de transporte e içamento:

**Etapa 1** – Realizou-se o levantamento da carga conforme objetivo de 3kg;

**Etapa 2** – Realizou-se o transporte do equipamento;

**Etapa 3** – Realizou-se o teste da fixação do conjunto na mesa.

O içamento da carga de 3kg foi um sucesso, levando-se em consideração que a carga de teste foi 33% maior do que o exigido, Figura 14, não havendo nenhum defeito visual de deformação nas peças de transmissão e nem na estrutura, e com a facilidade de operação na manivela com sistema de segurança de catraca, permitindo que o operador fizesse o içamento com segurança e ergonomia.

O transporte do protótipo, que possui massa de aproximadamente 2kg foi prático, devido à sua alça de transporte, que foi projetada para a melhor posição do fechamento das mãos ao manusear o equipamento, sem que haja quaisquer fadigas musculares.

A fixação do conjunto ficou a critério do cliente. O mesmo já vem com a base perfurada, para que seja fixado no local ao qual serão executados os serviços de içamento.

Logo de início, tivemos dificuldades somente no enrolar do barbante na roldana, o qual escapava, e no nosso sistema de içamento não havia nenhum sistema de fixação adequado para que se fizesse o auxílio correto do enrolar do barbante, Figura 12. Logo, definimos melhorias para o sistema, melhorando a fixação do sistema de içamento. Ao realizar as devidas inspeções visuais, não houve nenhuma deformação ou trincas nos suportes, estrutura e transmissões.

**Figura 14** - Teste de capacidade com a primeira versão do protótipo.



Fonte: Autores

Na segunda versão do protótipo, testou-se o mesmo com uma carga 66% maior, Figura 15. Sabendo-se das modificações executadas, concluímos que as expectativas foram superadas, pois o esforço feito ao girar a manivela foi baixo, mesmo tendo seu tamanho reduzido. Também se notou maior facilidade no manuseamento da mesma, pois o protótipo não precisou ser posicionado na extremidade da superfície de apoio para que fosse girada.

**Figura 15** - Teste de capacidade com a segunda versão do protótipo.



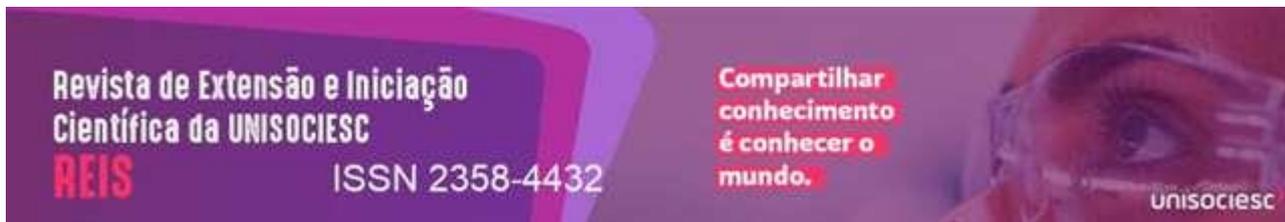
Fonte: Autores

No caso da segunda e definitiva versão, com a substituição do barbante por outro mais fino, não houve problemas que impedissem o seu enrolamento. A roldana adicional fixada na lateral modificada, projetou o sistema de içamento, melhorando a sua funcionalidade.

Também não foram detectadas quaisquer avarias nas engrenagens ou outras partes do protótipo, uma vez que os testes realizados foram os mesmos da primeira versão. Os demais resultados como praticidade no transporte, manutenção, sistema de segurança, fixação e baixo custo, permaneceram inalterados.

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Ao decorrer desse projeto, durante o período de desenvolvimento e fabricação do protótipo, houve um excelente processo de aprendizagem, por parte dos autores, além de garantir o aperfeiçoamento do modelo que está sendo apresentado neste artigo.



Para a fabricação do modelo descrito no presente trabalho, afirma-se que houve a confecção das peças a partir de impressão 3D (FDM), com suas peças parafusadas umas nas outras, afim de realizar a junção das mesmas e garantir a montagem e finalização do protótipo.

O teste de capacidade foi realizado a partir do içamento de objetos que têm massa entre 33% e 66% maior que o exigido. Estes objetos foram encaixados no sistema de fixação, e com a manivela, foram elevados, se mantendo içados por 10 minutos.

No momento do teste, as peças se mostraram resistentes às forças exercidas, sem alterações ou falhas, comprovando a eficácia do equipamento.

O resultado do estudo nos mostra muito sobre as importantes propriedades dos materiais utilizados e da técnica de impressão empregada, onde podemos concluir que o presente trabalho poderá contribuir para futuros estudos a serem realizados na área.

A análise das propriedades mecânicas dos materiais corrobora com a literatura estudada e citada no trabalho em questão, principalmente em relação à resistência dos filamentos utilizados na construção. Dessa forma, conseguiu-se comprovar que o presente protótipo apresentou uma ótima resposta aos testes propostos, resistindo assim, à carga estipulada pelo desafio.

O modelamento das peças do protótipo foi realizado pelos autores de forma empírica e palpável, colocando à prova seus conhecimentos, conforme detalhado anteriormente.

O desenvolvimento das peças, bem como o design do presente protótipo, deixa claro a possibilidade de fabricação de componentes com boas propriedades mecânicas. No futuro, serão feitos estudos mais detalhados das propriedades obtidas, utilizando-se como base estes parâmetros de impressão, encontrando assim, informações como as tensões máximas de cisalhamento e torção que as engrenagens poderão sofrer, gráficos de tensão x deformação dos componentes, dentre outros.

Esta conclusão pode auxiliar na fabricação de peças futuras utilizando-se manufatura aditiva com o polímero PLA, especialmente no design e impressão de engrenagens.

### ***Agradecimentos***

Agradecemos a Unisul e aos professores pelo apoio ao trabalho.

## REFERÊNCIAS

DIMIĆ Aleksandar, MIŠKOVIĆ Žarko, MITROVIĆ Radivoje et al. **The**

Fernandes, J., Deus, A. M., Reis, L., Vaz, M. F., & Leite, M. (2018). **Study of the influence of 3D printing parameters on the mechanical properties of PLA.**

FERNANDES, João *et al.* STUDY OF THE INFLUENCE OF 3D PRINTING PARAMETERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PLA. **Proceedings Of The 3Rd International Conference On Progress In Additive Manufacturing (Pro-Am)**, Singapore, p. 547-552, 2018.

G. D. Goh, Y. L. Yap, H. K. J. Tan, S. L. Sing, G. L. Goh & W. Y. Yeong:

GOH, G. D. *et al.* Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing via Material Extrusion: a review. **Critical Reviews In Solid State And Materials Sciences**, [S.L.], v. 45, n. 2, p. 113-133, 24 Jan. 2019. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10408436.2018.1549977>.

Gustavo Ghizoni e Gesser Fábio Peruch. **Análise De Viabilidade Técnica Para Substituição De Magazines Fabricados Em Alumínio Por Pla Utilizando Manufatura Aditiva.** STAC Educação, Tecnologia e Inovação.2018

### **Influence Of Material On The Operational Characteristics Of Spur Gears**

International Conference on Progress in Additive Manufacturing , 547-552. doi:10.25341/D4988C

**Manufactured By The 3d Printing Technology.** Journal of MECHANICAL ENGINEERING – Strojnícky časopis. VOL 68, NO 3, 261 - 270. 2018

MAO, Ken *et al.* **A new method for testing polymer gear wear rate and performance.** Elsevier: **Polymer Testing.** Al, United Kingdom, p. 2-7. dez. 2019. Disponível em: <http://www.elsevier.com/locate/polytest>. Acesso em: 18 mar. 2021.

MITROVIC, Radivoje. *et al.* **Determination of optimal parameters for rapid prototyping of the involute gears.** The Electrochemical Society. Orlando F. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Oct. 2021.

Proceedings of the 3rd

**Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing via Material Extrusion: A Review,** Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 2019. DOI: 10.1080/10408436.2018.1549977.

ramaniam, M. Samykano, S. K. Selvamani et al. **3D printing: Overview of PLA progress.** AIP Conference Proceedings 2059, 020015 .2019.; <https://doi.org/10.1063/1.5085958>

S. R. Sub. S. R. Subramaniam, M. Samykano, S. K. Selvamani et al. **3D printing: Overview of PLA progress.** AIP Conference Proceedings 2059, 020015 .2019. <https://doi.org/10.1063/1.5085958>



SUBRAMANIAM, S. R. Samykano. M *et al.* **Preliminary investigations of polylactic acid .(PLA) properties** Conf. AIP .Conference Proceedings 2059, January. 2021.

Tanmay Kotkar, Prashant Masure, Pundalik Modake<sup>1</sup> et al. (2018). **Modelling and Testing of Spur Gear made of Different 3D Printed Materials**. Mechanical Engineering, Mumbai University/MGM Collage of Engineering & Technology, Navi Mumbai.

Ye Zhang & Ken Mao & Simon Leigh et al. (2020). **A parametric study of 3D printed polymer gears**. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05270-5>

ZHANG, Ye *et al.* A parametric study of 3D printed polymer gears. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 107, n. 11-12, p. 4481-4492, abr. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-020-05270-5>.