

ANÁLISE DE SUBSTITUIÇÃO DE ENGRENAGENS DE CELERON POR ENGRENAGENS DE POLIAMIDA PRODUZIDAS PELO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA

Matheus Barone da Silva

Leandro Cardoso da Silva

Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Simonsen”, Rua Monsenhor Andrade, 298 – BRÁS, São Paulo – SP, CEP 13225-350
baronedasilva@gmail.com; leandro.cardoso@sp.senai.br

Antônio Carlos de Carvalho

Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Simonsen”, Rua Monsenhor Andrade, 298 – BRÁS, São Paulo – SP, CEP 13225-350
e-mail: acarvalho@sp.senai.br

Gilmar Batalha

Escola Politécnica Universidade de São Paulo – USP, Av. Prof. Mello Moraes, 223 – São Paulo -SP, CEP 05508-900
e-mail: gfbatalha@gmail.com

Carlos Cesar Pestana

Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Simonsen”, Rua Monsenhor Andrade, 298 – BRÁS, São Paulo – SP, CEP 13225-350
e-mail: carlos.pestana@sp.senai.br

Noberto Gonçalves Neto

Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Simonsen”, Rua Monsenhor Andrade, 298 – BRÁS, São Paulo – SP, CEP 13225-350
e-mail: prof.norberto.neto@gmail.com

Resumo: O mercado global está cada vez mais focado na produção sustentável, buscando sempre produzir produtos em materiais que possam ser reaproveitados posteriormente na cadeia produtiva. A indústria passou a pensar no impacto que seus produtos podem fazer ao meio ambiente fazendo com que repensem seus processos, produtos e até mesmo seus modelos de negócio. Existem materiais empregados em produtos que não podem ser reciclados e ao final de sua utilização ou no meio do seu processamento devem ser descartados, gerando assim resíduos que podem prejudicar o meio ambiente. Um desses materiais é o Celeron, um compósito termofixo formado de tecido de algodão impregnado com resina fenólica, que quando submetido a altas temperaturas e pressão que reage e transforma em um material único, e devido às suas altas propriedades mecânicas e baixa densidade, comparado com o aço, é muito usado na produção de engrenagens para máquinas de açougue. Esse tipo de material não pode ser reciclado, pois diferente dos termoplásticos, os termofixos depois que são curados totalmente não podem ser mais moldados novamente. As engrenagens no geral são amplamente utilizadas na indústria em dispositivos que necessitam transmitir torque e velocidade angular em diversas aplicações. Engrenagens de Celeron são fabricadas pelo processo de usinagem, mais precisamente pelos processos de fresagem e torneamento, gerando assim um volume muito grande de resíduos em sua produção por se tratar de um processo de manufatura extrativa, e não só a quantidade de material, mas a grande quantidade de operações torna a fabricação dessas peças demorada. O objetivo desse artigo é analisar um material que atenda às exigências de projeto com o intuito de substituir o Celeron, atualmente utilizado na fabricação de engrenagens de Celeron. O material proposto para essa substituição é a poliamida 6.6 produzida por manufatura aditiva, esse tipo de material é um termoplástico amplamente utilizado na indústria devido à sua alta resistência mecânica, muitas vezes utilizado para substituir materiais metálicos. O modelamento da engrenagem helicoidal e a análise do projeto será feita no software SolidWorks 2020, onde serão encontrados os dados dos materiais e depois imputados no software para uma análise estrutural de ambos os modelos, fazendo assim a validação da troca do material. Trocando as engrenagens de Celeron produzidas por usinagem pelas engrenagens de poliamida produzidas por manufatura aditiva, é esperada uma redução na produção de resíduos não recicláveis e um ganho na produção através da redução do número de processos, assim reduzindo o custo do produto final sem perder a qualidade.

Palavras-chave: Engrenagens; Celeron; Manufatura Aditiva; Elementos Finitos

1. INTRODUÇÃO

A indústria está em constante busca por novas alternativas de melhorias em produtos ou processos através da troca de materiais ou em novas tecnologias que possibilitem a melhoria no meio produtivo, reduzindo assim os custos na produção ou na matéria prima dos produtos, através da aquisição de materiais mais baratos com propriedades que atendam às necessidades e requisitos dos projetos. Não só o custo como também a preocupação com materiais que possam ser reutilizados no meio produtivo estão cada vez mais em avaliação pelas grandes empresas, com a pauta da sustentabilidade no mundo globalizado cada vez mais em evidência, é necessário que o mercado pense e busque alternativas para tal preocupação.

Uma melhoria em um determinado produto como a troca de material ou processo, ou a troca de material e de processo ao mesmo tempo, requer uma avaliação cuidadosa do projeto como os esforços aplicados, a análise da geometria da peça, as tensões, os momentos e os torques que estão envolvidos na utilização do produto. Para tal avaliação se faz necessário em uma primeira etapa a criação de modelos de engenharia que possibilitem a avaliação do produto em todos esses aspectos. Estes modelos são criados com o auxílio de computadores e softwares, como o SolidWorks, que nos permitem obter um modelo 3D da peça que será avaliada. A partir da obtenção dos esforços envolvidos no projeto e a definição da geometria da peça através do modelamento 3D é possível a utilização do método dos elementos finitos para a avaliação das tensões e deformações do modelo que nos possibilita a validação da peça.

Contudo para que os resultados obtidos sejam satisfatórios na validação de uma melhoria em uma determinada peça é necessário avaliar o material a partir do qual ela é produzida, e, no caso de uma possível sugestão de modificação do material, é preciso avaliar as propriedades desse novo composto a ser empregado. As propriedades dos materiais geralmente são obtidas por ensaios destrutivos de corpos de prova que atendem a determinadas normas, onde essas amostras são submetidas a carregamentos controlados que possibilitam reproduzir as solicitações de serviços reais. Hoje em dia é possível obter a propriedade dos materiais nas referências literárias ou em trabalhos e artigos científicos que estudam e ensaiam os mais variados tipos de materiais, os próprios softwares de elementos finitos (FEA) possuem uma ampla biblioteca de materiais com suas propriedades que possibilitam uma rápida análise das tensões e deformações de peças.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para uma melhor compreensão dos métodos utilizados na obtenção dos resultados e discussões, essa seção faz uma breve introdução aos principais assuntos tratados nesse artigo, como o conceito de manufatura aditiva, onde será abordado a história e os principais conceitos por traz da tecnologia, também faremos uma introdução ao conceito e à utilidade das engrenagens no âmbito geral e enfatizaremos o conceito de engrenagens helicoidais, também será discutido o conceito de materiais compósitos, Celeron e a Poliamida 6.6.

2.1 Introdução a Manufatura Aditiva (Impressão 3D)

Nos dias atuais existem vários tipos de processos produtivos dos mais variados tipos, que possibilitam obter peças com diversas geometrias, como os processos que necessitam que o material utilizado atinja seu ponto de fusão para depois ser depositado em um molde com o formato da peça que se deseja, por exemplo os processos de fundição, injeção de plástico e a metalurgia do pó. Podemos citar também os processos em que as peças são obtidas pelo método de manufatura extrativa, ou mais comumente conhecida como usinagem, como por exemplo os processos de fresagem, torneamento, furação, retífica etc. Ou os processos que necessitam da conformação do material para obter a peça final, como o forjamento e a estampagem, também existem os processos que necessitam de uniões entre as partes para formar um conjunto final, como a soldagem ou a brasagem. Contudo esses processos possuem como ponto limitante a geometria da peça, pois quanto mais complexa a geometria de uma peça, o custo de produção aumenta, tornando muitas vezes inviável a produção da mesma, foi então que no final da década de 80 começou a surgir um novo conceito de fabricação que tinha como base o princípio de adição de material, a esse processo se deu o nome de manufatura aditiva, ou mais conhecida atualmente de impressão 3D.

A adição de material não é um conceito novo, tal técnica tem origem no Egito antigo que utilizaram a sobreposição de camadas na construção das pirâmides, porém foram a topografia e a fotoescultura que contribuíram substancialmente para a tecnologia de manufatura aditiva, começando com Blather que por volta de 1890 desenvolveu uma técnica para construção de moldes de mapas topográficos tridimensional, então nos anos que se sucederam outros nomes contribuíram para o aprimoramento da técnica como Perera (1940), Zang (1964), Gaskin (1973), Matsubara (1972), DiMatteo (1974) e Swainson (1968). Porém foi em 1982 que Herbert da empresa 3M propôs um feixe de laser ultravioleta capaz de polimerizar um polímero fotossensível. Esse laser era controlado por um computador que fazia o laser se movimentar nos planos x-y (VOLPATO, 2018).

Segundo VOLPATO (2018) pode ser definida como manufatura aditiva um processo de fabricação que utiliza a adição sucessiva de material no formato de camadas, onde as informações necessárias para o processo são obtidas de um modelo

geométrico 3D modelados por softwares de CAD (“*Computer Aided Design*”), ou em português desenho assistido por computador, que permite a fabricação de peças dos mais variados materiais e das mais variadas geometrias.

O início do processo de manufatura aditiva começa obtendo o modelamento 3D da peça, depois esse modelo é processado em um software que faz o “fatiamento” virtualmente da peça, a partir desse fatiamento são obtidas as curvas de nível em 2D. É preciso então definir se haverá a necessidade de fazer estruturas para suporte da peça e definir qual será o tipo de deposição de material, depois desse planejamento e definições é iniciada a fabricação do modelo físico. Dependendo do tipo de processo faz-se necessário um pós-processamento do modelo, um acabamento mais precisamente, como uma limpeza com algum produto ou uma possível remoção de material excedente do processo (VOLPATO, 2018).

Podemos então simplificar o processo de manufatura aditiva em cinco etapas básicas que facilitam o entendimento, a Fig.1 ilustra as etapas do processo.

- Criação do modelo 3D da peça em softwares CAD;
- Fatiamento do modelo 3D através de software específico para manufatura aditiva;
- Planejamento do processo de manufatura aditiva;
- A produção da peça com máquinas específicas de manufatura aditiva;
- O acabamento do modelo pronto quando necessário.

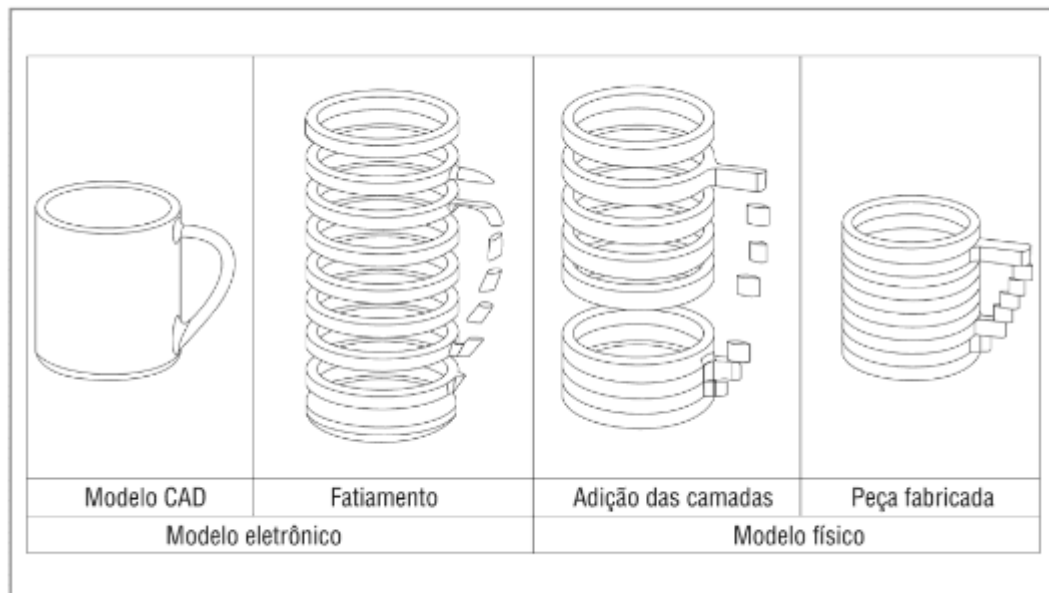


Figura 1 - Etapas do processo de manufatura aditiva (VOLPATO, 2006)

A manufatura aditiva pode ter mais de um tipo de princípio de processamento e pode ter como matéria-prima materiais líquidos, sólidos e em pó, dessa forma visando classificar esse tipo de tecnologia, a norma ISO/ASTM 52900:2015 dividiu em sete principais grupos, sendo eles:

- Fotopolimerização em cuba – Polímeros líquidos fotossensíveis são curados seletivamente em uma cuba por polimerização ativada através da luz;
- Extrusão de material – Material é extrudado através de um bico;
- Jateamento de material – Material é depositado em pequenas gotas;
- Jateamento Aglutinante – Um líquido aglutinante é seletivamente depositado para unir materiais em pó;
- Fusão de Leito de pó – Energia térmica funde regiões de um leito de pó;
- Adição de lâmina – Lâmina recortadas de material são coladas para formar um objeto;
- Depósito com energia direcionada – Energia térmica é usada para fundir material à medida que estes são depositados.

A extrusão de material é o tipo de processamento de manufatura aditiva mais utilizado nesse meio, por se tratar de um processo relativamente barato em relação aos demais, esse tipo de processo é conhecido também como modelagem por fusão e deposição ou em inglês “*fused deposition modeling*” (FDM). Basicamente esse processo consiste em um filamento que é extrudado através de um bico calibrado, esse bico é controlado por um sistema de coordenada de x-y onde material é deposto em camadas na direção do eixo Z, dando o formato e volume da peça desejada (VOLPATO, 2018).

2.2 Engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais.

As engrenagens segundo NORTON (2013) são usadas na transmissão de torque e velocidade angular em uma variedade de aplicações. Existem diversos tipos de engrenagens para cada utilização, as mais comuns são as engrenagens cilíndricas de dentes retos (Fig.2(a)), as engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais (Fig.2(b)), engrenagens cônicas de dentes retos (Fig.2(c)) e as engrenagens sem-fim (Fig.2(d)).

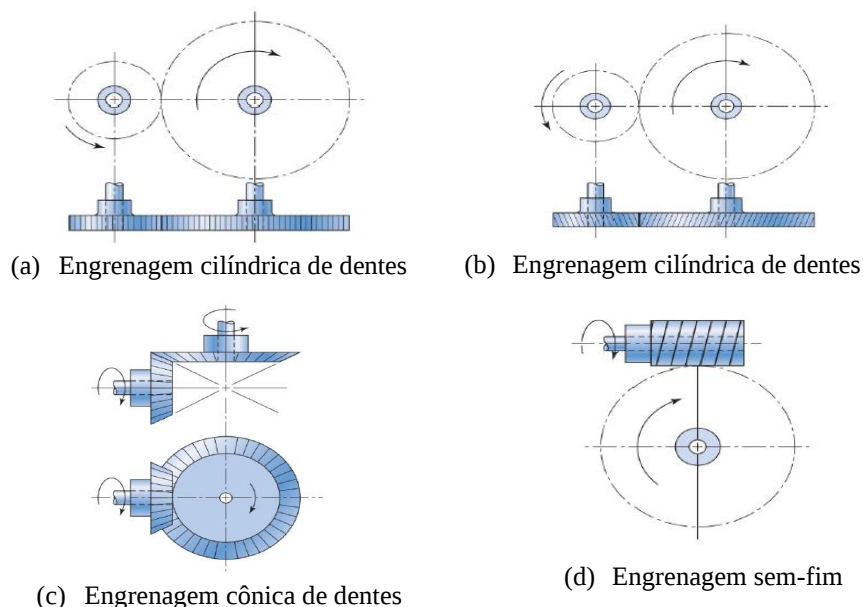


Figura 2 - Os tipos mais comuns de engrenagens (SHIGLEY, 2016)

Engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais são muito parecidas com as engrenagens cilíndricas de dentes retos, como podemos ver na Fig.2 (a) e (b), porém seus dentes são inclinados em relação ao eixo de rotação, de modo a formar helicoides paralelos (COLLINS,2015). O ângulo de hélice pode variar entre 10° e 45° e podem formar uma hélice tanto para a direita quanto para a esquerda, engrenagens que fazem o engrenamento com direções opostas tem o seu eixo paralelo, conforme ilustrado na Fig.3(a), já engrenagens com direções no mesmo sentido tem a configuração do seu eixo cruzado, conforme apresentado na Fig.3(b). Devido a esse ângulo de hélice, esse tipo de engrenagem tende a gerar tanto forças axiais quanto forças radiais nos rolamentos, mas é devido a esse ângulo que conforme a engrenagem gira, a região de contato do engrenamento inicia em um lado e vai aumentando gradativamente ao longo da diagonal do dente, proporcionando uma operação mais suave e silenciosa comparado com as engrenagens de dentes retos (NORTON,2013)

Esse tipo de operação suave acontece apenas nas engrenagens que possuem uma configuração paralela que proporciona uma redução nas vibrações e uma maior capacidade de transmissão de potência. Já nas operações que possuem uma configuração de eixos cruzados, sua capacidade de carga é muito reduzida devido ao contato ser teoricamente pontual, ao contrário do contato em linha que ocorre nas engrenagens de configuração paralela. O tipo de configuração cruzada não é recomendado para projetos que necessitem transmitir um elevado torque ou potência (NORTON,2013)

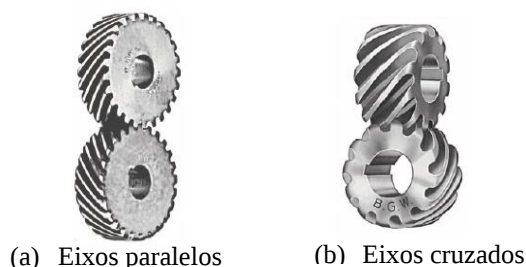


Figura 3 – Imagem de engrenamento paralelo e cruzado
(NORTON,2013)

As forças que agem em uma engrenagem cilíndrica de dentes helicoidais precisam ser bem definidas, uma vez que as forças nos dentes precisam ser decompostas devido ao ângulo de hélice. Segundo COLLINS (2015) a força normal (W) demonstrada na Fig.4 não só é decomposta em uma força tangente (W_t) e uma força radial (W_r), que segundo ele não tem nenhum propósito, ela também apresenta uma componente de empuxo axial (W_a) que deve ser levado em consideração na escolha do mancal de suporte.

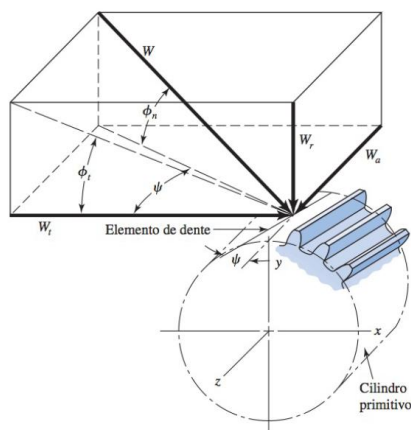


Figura 4 - Esquema de decomposição de forças engrenagem helicoidal
(SHIGLEY, 2016)

2.3 Introdução aos materiais compósitos, Celeron e Poliamida.

Os materiais compósitos são amplamente utilizados na indústria nas mais variadas áreas, desde componentes elétricos e eletrônicos até na indústria aeronáutica e naval. Esse tipo de material tem diversas configurações desde polímeros reforçados com fibras, até materiais que possuem matriz metálica ou cerâmica. Segundo NETO E PARDINI (2018) a característica básica do compósito é combinar pelo menos duas fases distintas denominadas de matriz e reforço. Os reforços têm em sua maioria a forma filamentar, podemos citar como exemplo as fibras de vidro, fibra de carbono, tecidos de algodão, entre outros. Já as matrizes têm em sua característica a forma aglutinante, pode-se citar como exemplos matrizes poliméricas. A ideia por trás desse tipo de material é a união de dois componentes para a obtenção de um produto superior a qualquer um dos dois isoladamente.

Celeron é um tipo de material compósito, ele pode ser fabricado em chapas, tubos ou tarugos que podem ser usinados em peças como buchas, mancais, placas de desgaste, entre outros. Esse material é produzido com tecido de algodão impregnado por uma resina fenólica. O material impregnado é cortado em finas placas com comprimento e largura de acordo com o processo, essas finas placas são empilhadas uma a uma, formando um tipo de “sanduíche”, esse material é então colocado em uma prensa onde são adicionadas temperatura e pressão para a compactação e cura. A resina fenólica é um material termofixo, ou seja, depois que a resina é curada o processo se torna irreversível, é por isso que quando o Celeron é moldado não é mais possível reprocessá-lo novamente. Esse tipo de material sofre com a não reciclagem dos resíduos que surgem com o processo de usinagem e muitas vezes é necessário um alto custo para o descarte desse tipo de material.

Existe uma outra categoria de material que pode ser utilizado e reciclado, são os chamados materiais termoplásticos. Para NETO E PARDINI (2018), os termoplásticos são polímeros com alta massa molar molecular, que são constituídos por grandes cadeias lineares que podem apresentar ramificações. Diferente dos termofixos, os termoplásticos quando são submetidos a temperatura se fundem e quando são resfriados se solidificam, ou seja, com a elevação da temperatura os termoplásticos tendem a ficar maleáveis e se deformam com facilidade.

A poliamida é um termoplástico extremamente atraente para aplicações na engenharia, pois possui ótimas propriedades de resistência à tração e à flexão, tem resistência ao desgaste e é de fácil processamento. A poliamida sintética foi criada em 1935 pelo químico Wallace Hume Carothers e foi comercializada em 1939 pela empresa Dupont através de sua forma têxtil. Ela tem uma cadeia linear que possui segmentos de polietileno $(CH_2)_n$ separados por unidades de peptídeos $(NH-CO)$ que podem estar paralelos ou antiparalelos. Existe vários tipos de poliamidas sendo as mais usuais a Poliamida 6 e a 6.6.

3. METODOLOGIA

Para fazermos a análise da engrenagem de Celeron primeiramente foi selecionado um modelo como base para o estudo. O modelo adotado para a análise foi a engrenagem de 42 dentes utilizada em um moedor picador modelo CAF 10 conforme ilustrado na Fig.5.



Figura 5 - Engrenagem selecionada para análise (Elaborado pelo autor)

Com as informações obtidas de número de dentes, módulo, ângulo de hélice e ângulo de pressão é possível fazer os cálculos para a determinação da geometria da engrenagem e o posterior modelamento do modelo 3D no software SolidWorks 2020. Para os cálculos da geometria da engrenagem foram utilizadas as fórmulas conforme PROVENZA, 1991, a Tab.1 apresenta os valores obtidos dos cálculos para a geometria da engrenagem e a Tab.2 apresenta os valores para o modelamento dos dentes da engrenagem.

Tabela 1 - Tabela com os valores para modelamento da engrenagem (elaborada pelo autor)

VALORES PARA MODELAMENTO ENGENHAGEM HÉLICOIDAL			
Símbolo	Descrição	Formula	Pinhão
(Z)	Número de dentes		42,00
(M)	Módulo Normal		1,50
(Dp)	Diâmetro primitivo	$M \cdot Z$	67,04
(De)	Diâmetro externo	$D_p + 2 \cdot M$	70,04
(Db)	Diâmetro Base	$D_p \cdot \cos(\theta)$	63,00
(Di)	Diâmetro interno	$D_p - 2,334 \cdot M$	63,54
(Ph)	Passo de hélice	$Z \cdot P_n / \sin \beta$	578,68
(θ)	Ângulo de Pressão		20,00
(β)	Ângulo de inclinação de hélice		20,00
(α)	ângulo do dente	$90^\circ - Z$	2,14

Tabela 2 - Tabela de raios para modelamento dos dentes da engrenagem (elaborado pelo autor)

		Pinhão
(M)	Modulo	1,5
f	Fator 1	4,63
f'	Fator 2	4,63
r	f.M	6,945
r1	f'.M	6,945
r2	2,1.M	3,15
r3	m/6	0,25

Depois de calcular e achar os parâmetros para modelamento da engrenagem é demonstrado na Fig.6 o modelo 3D da engrenagem cilíndrica de dentes helicoidais.

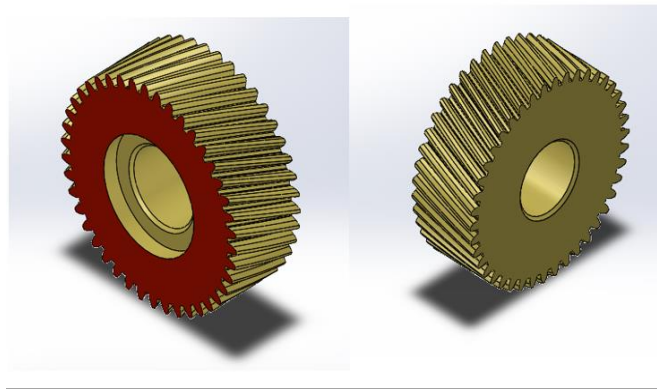


Figura 6 - Modelo 3D Engrenagem Helicoidal no SolidWorks 2020 (Elaborado pelo autor)

Com a engrenagem modelada precisamos fazer os cálculos da força tangente que vai atuar no dente. Para achar essa força primeiro vamos encontrar o torque que será aplicado. A equação para encontrar o torque na engrenagem foi calculada de acordo com MELCONIAN,2008, e é apresentada abaixo conforme Equação 1.

$$Mt = \frac{30000}{\pi} \cdot \frac{P}{n} \quad (1)$$

Onde:

M_t = Torque [N.mm]

P = Potência [W]

n = Rotação (RPM)

Foi considerado como premissa um motor de 0,37kW (0,5CV) com rotação de 1800 RPM, aplicando esses valores na Eq.1 obtivemos os seguintes resultados ilustrados na Equação 2.

$$Mt = \frac{30000}{\pi} \cdot \frac{370}{1800} \quad (2)$$

O valor de torque na engrenagem considerando os parâmetros do motor escolhido como premissa foi de 1963 N.mm. Sabendo o torque aplicado é necessário encontrar a força tangente no dente (F_t), a forças radial (F_r) e axial (F_a) resultantes. Para esse cálculo foram utilizadas as equações conforme MELCONIAN, 2008, a equação de força tangente está demonstrada na Eq.3 e as equações de força radial e axial estão demonstradas nas Eq.4 e Eq.5 respectivamente.

$$F_t = \frac{Mt}{rp} \quad (3)$$

$$F_r = F_t \cdot \tan \alpha \quad (3)$$

$$F_a = F_t \cdot \tan \beta \quad (4)$$

Onde:

F_t = Força Tangente [N]

F_r = Força Radial [N]

F_a = Força Axial [N]

α = Ângulo de Pressão

β = Ângulo de Hélice

Aplicando as equações descritas acima encontramos o valor da força tangente de 59 N, a força radial de 21 N e a força axial de 21 N, contudo para fazermos a análise de elementos finitos vamos desconsiderar a força radial, pois se trata de uma força de separação entre as engrenagens e por isso não tem nenhuma influência nos dentes, podendo ser então desprezada.

4. RESULTADOS

Depois foram levantados os valores para o material de Celeron através do datasheet do material encontrando no site de um dos fabricantes desse tipo de material. O Celeron escolhido para a análise foi o Celeron TC-300 fabricado pela empresa Eletrisol, os valores do material se encontram na Fig.7 conforme demonstrado.

Propriedades Mecânicas	
Resistência à flexão - longitudinal	16000 Psi (110 MPa)
Resistência à tração - longitudinal	10500 Psi (72 MPa)
Resistência à compressão - perpendicular	37000 Psi (255 MPa)
Resistência ao impacto Izod - longitudinal	> 1.9 ft.lb/in
Resistência à delaminação	1800 lb

Figura 7 - Propriedades do material TC-300 (Eletrisol, 2022)

Imputando os dados do material no SolidWorks 2020, considerando como limite de escoamento o limite de resistência a tração de 72 Mpa conforme encontrado no datasheet do material, e aplicando as forças calculadas de 59N para tangente e 21N para a axial chegamos aos resultados ilustrados na Figura 8.

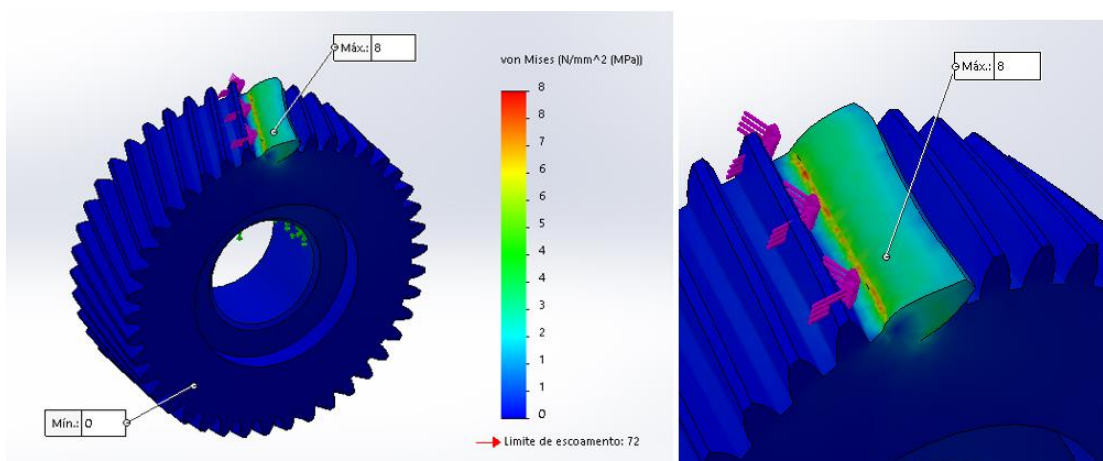


Figura 7 - Resultados da análise para o material de Celeron (Elaborado pelo autor)

Avaliando os resultados, observamos que o material está superdimensionado para essa aplicação, pois a tensão de Von Mises de 8Mpa corresponde a aproximadamente 11% do limite de escoamento do material que é de 72 Mpa. Nota-se também que conforme esperado o maior ponto de tensão está no pé do dente.

Logo após essa avaliação prévia do modelo da engrenagem de Celeron, precisamos aplicar esse mesmo procedimento na análise com o material de poliamida produzido por manufatura aditiva, e para tal processo foram imputados os dados do fabricante de peças impressas Imprimakers, onde podemos obter o limite de resistência a tração do material conforme ilustrado na Fig.9. Foram considerados como parâmetros de análise o material poliamida PA12 produzido por manufatura aditiva e as informações do material foram retiradas diretamente do fabricante desse tipo de material.

TECHNICAL DATA

General Properties

MEASUREMENT	METHOD/CONDITION	METRIC	U.S.
Specific Gravity	ASTM D792	1.00 g/cm ³	1.00 g/cm ³
Moisture Absorption - 24 hours	ASTM D570	0.07 %	0.07 %

Mechanical Properties

MEASUREMENT	METHOD/CONDITION	METRIC	U.S.
Tensile Strength, Yield	ASTM D638	N/A*	N/A*
Tensile Strength, Ultimate	ASTM D638	43 MPa	6237 psi
Tensile Modulus	ASTM D638	1586 MPa	230 ksi
Elongation at Yield	ASTM D638	N/A*	N/A*
Elongation at Break	ASTM D638	14 %	14 %
Flexural Strength, Yield	ASTM D790	N/A*	N/A*
Flexural Strength, Ultimate	ASTM D790	48 MPa	6962 psi
Flexural Modulus	ASTM D790	1387 MPa	201 ksi
Hardness, Shore D	ASTM D2240	73	73
Impact Strength (notched Izod, 23°C)	ASTM D256	32 J/m	0.6 ft-lb/in
Impact Strength (unnotched Izod, 23°C)	ASTM D256	336 J/m	6.3 ft-lb/in
Gardner Impact	ASTM D5420	2.7 J	2.0 ft-lb

Figura 8 - Valores para material poliamida PA12 produzida por manufatura aditiva (IMPRIMAKERS,2022)

Os dados do material foram imputados no SolidWorks 2020 e aplicando as mesmas forças de 59N para tangente e 21N para a axial obtemos os resultados apresentados na Figura 10.

Podemos observar que a tensão de Von Mises é de 9Mpa, cerca de 21% do limite de escoamento considerado para o material de PA12 impresso, ou seja, mesmo trocando o material o projeto fica bem dimensionado a resistência a flexão no pé do dente.

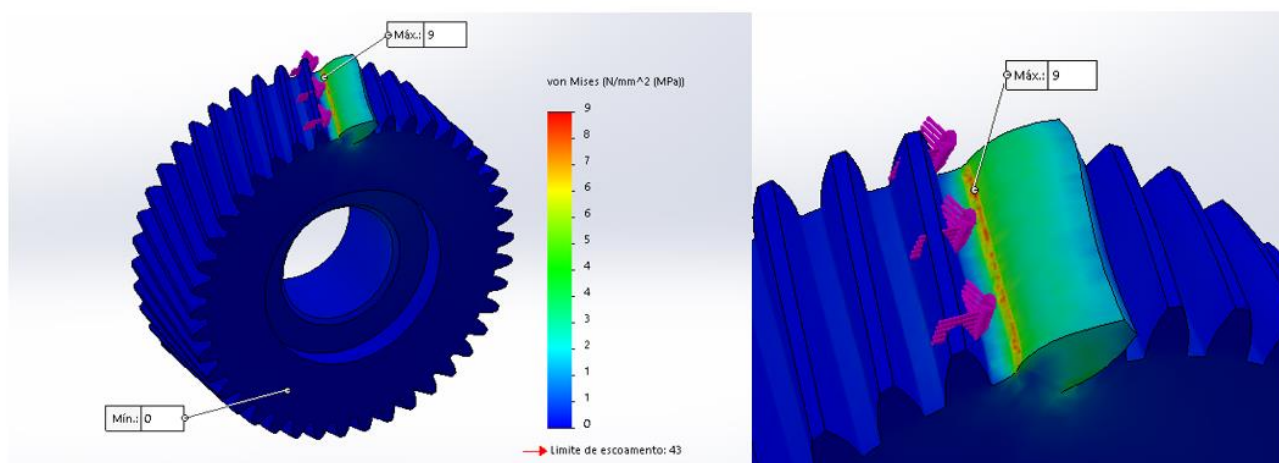


Figura 9 - Resultado para análise do material poliamida PA12 Impresso (Elaborado pelo autor)

Depois de fazermos a análise em ambos os materiais foi construído a Tab.3 para melhor visualizar os valores obtidos da tensão de Von misses e os limites de escoamento considerados dos materiais.

Tabela 3 – Tabela de comparação dos resultados

	Limite de escoamento do material (Mpa)	Tensão de Von mises (Mpa)	% do Limite de Escoamento
Engrenagem de Celeron TC-300	72	8	11
Engrenagem de PA12 Impresso	43	9	21

5. CONCLUSÃO

É possível dizer que análise preliminar da tensão no pé do dente da engrenagem helicoidal, foi de grande valia para a tomada de decisão na possível troca do material de Celeron para a poliamida PA12 produzida por manufatura aditiva, uma vez que foi observado que o resultado da tensão de Von Mises para o material impresso corresponde a apenas 21% do limite de escoamento adotado, com isso é possível concluir que o material atende aos esforços ao qual é solicitado.

Vale lembrar também que como a impressão 3D é um processo que possibilita a produção de geometrias complexas de forma rápida, pode-se levar em consideração em estudos futuros a otimização do modelo de engrenagem através de análise topológica proporcionando uma redução de massa e consequentemente uma redução de custo, sem a preocupação de afetar a funcionalidade do produto.

Contudo é preciso destacar que é de extrema importância a análise do modelo com relação a fadiga para validar a troca do material, e para isso é necessário fazer uma avaliação detalhada do material impresso, fazendo o levantamento da curva S-N e avaliando o impacto que o processo de impressão tem sobre as propriedades de fadiga do material, para depois imputar os dados no software para uma validação completa do modelo final.

6. REFERENCIAS

- Collins, Jack A., 2015 – “Projeto mecânico de elementos de máquina: Uma perspectiva de prevenção da falha” / Jack A. Collins: tradução Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco...[et al]. – [Reimpr.]. – Rio de Janeiro: LTC, 2015. II.
- Eletrisol, 2022 – “Datasheet Material Celeron TC-300” – Disponível em: <https://www.eletrisol.com.br/pt-br/produtos/fenolite-celeron/tc300>. Acesso em: 12 de Novembro 2022.
- Imprimakers, 2022 – “Datasheet Nylon PA12 impresso por manufatura aditiva” – Disponível em: https://imprimakers.com/wp-content/themes/imprimakers/docs/datasheet_pa12.pdf. Acesso em: 12 de Novembro 2022.
- Melconian, Sarkis., 2008 – “Elementos de máquinas” / Erica, Melconian – 9ª Edição, Saraiva Educacional, 2008.
- Neto, Flaminio Levy e Pardini, Luiz Claudio, 2018 – “Compósitos estruturais: Ciência e tecnologia” – 1ª Edição – 2018, Editora Edgard Blucher Ltda.
- Norton, Robert L., 2013 “Projeto de máquinas: uma abordagem integrada” / Robert L. Norton;[tradução:Konstantinos Dimitriou Stavropoulos ... et al.]. – 4. ed.– Porto Alegre: Bookman, 2013.
- Provenza, Francisco., 1991 – “Desenhista de máquinas” – Edição 46ª – completamente revisada, corrigida e ampliada - Editora F.Provenza, 1991.
- Shigley, 2016. “Elementos de máquina de Shigley” / Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett, tradução: João Batista de Aguiar, José Manoel de Aguiar, José Benaque Rubert. – 10.ed. – Porto Alegre: AMGH, 2016.
- Volpato, Neri, 2018. “Manufatura aditiva – Tecnologias e aplicações da impressão 3D”, 1ª Edição Digital 2018 – Editora Edgar Blucher Ltda.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores Matheus Barone da Silva, Leandro Cardoso da Silva, Antônio Carlos de Carvalho, Gilmar Batalha, Carlos Cesar Pestana e Noberto Gonçalves Neto são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.