



**INSTITUTO
FEDERAL**

Bahia

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DA BAHIA
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO SUPERIOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**

LUIS GABRIEL DE JESUS BELTRÃO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE SOFTWARES PARA APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE
OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA**

JEQUIÉ-BA

2023

LUIS GABRIEL DE JESUS BELTRÃO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE SOFTWARES PARA APLICAÇÃO
DE MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica
do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da
Bahia como requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Esp. Fabiano Borges

Coorientadora: Prof. Ma. Larisse Lima

LUIS GABRIEL DE JESUS BELTRÃO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE SOFTWARES PARA APLICAÇÃO
DE MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA**

A banca examinadora, abaixo listada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso “Análise comparativa de softwares para aplicação de métodos de otimização topológica” elaborado por “Luis Gabriel de Jesus Beltrão” como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia.

Jequié-BA, 13/12/2023

Comissão Examinadora

Prof. Esp. Fabiano Borges
IFBA
(Orientador)

Prof. Ma. Larisse Lima de Souza
IFBA

Prof. esp. Rômulo Trindade Da Silva
IFBA

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha profunda gratidão às pessoas e instituições que tornaram possível a conclusão deste trabalho. Em primeiro lugar, quero expressar meu apreço aos professores que, com dedicação e sabedoria, guiaram-me ao longo desta jornada acadêmica. Suas orientações e insights foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão aos meus orientadores, Larisse Lima e Fabiano Borges, por sua orientação excepcional e apoio ao longo deste trabalho. Sua dedicação e expertise foram fundamentais para o desenvolvimento deste projeto, e estou verdadeiramente agradecido por ter tido a oportunidade de trabalhar sob a orientação de profissionais tão dedicados.

Ao Instituto Federal da Bahia (IFBA), minha sincera gratidão por fornecer um ambiente propício ao aprendizado e à pesquisa. A estrutura e o suporte oferecidos pelo IFBA foram essenciais para a realização deste estudo.

Não posso deixar de reconhecer o apoio incondicional da minha família. Obrigado por serem a fonte constante de amor, incentivo e compreensão. Cada conquista alcançada é, sem dúvida, resultado do apoio e encorajamento que recebi de vocês.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho e para o meu crescimento acadêmico e pessoal, meu mais profundo agradecimento. Este é um marco que compartilhamos juntos, e estou imensamente grato pela colaboração e apoio ao longo desta jornada.

*“Explorando a eficiência: uma jornada na
otimização topológica para o desenvolvimento
sustentável.”*

Resumo

A monografia apresenta um estudo de caso sobre a otimização de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos para transmissão de potência, comparando dois dos softwares mais utilizados na engenharia. A introdução destaca a importância da otimização de estruturas na Engenharia Mecânica, visando projetar componentes mais eficientes, seguros e econômicos em um mercado competitivo. A metodologia adotada envolveu a aplicação de simulação por elementos finitos (FEM) para realizar a otimização topológica da engrenagem. Inicialmente, foi determinado o material escolhido para a peça e as áreas de suporte da engrenagem. Em seguida, a simulação estática foi realizada para calcular as solicitações e definir os pontos fixos da estrutura. Após a obtenção dos resultados da simulação estática, foi aplicada a otimização topológica, utilizando um processo iterativo para determinar as áreas onde a massa poderia ser retirada. A validação da nova geometria foi realizada por meio de uma nova simulação estática, observando se as tensões máximas e o fator de segurança estavam dentro do limite desejado. Os resultados do estudo demonstraram que a massa da estrutura foi reduzida em até 30% no *Ansys* e 23,5% no *Solidworks*, com uma leve redução no fator de segurança em ambos os softwares. Além disso, a nova geometria apresentou características orgânicas e complexas, tornando-a mais adequada para a manufatura aditiva. A velocidade na simulação do *ansys* e a facilidade de aprendizagem e uso do *Solidworks* foi destacada, assim como a geração de gráficos e a qualidade da documentação em ambos os softwares. Em resumo, a metodologia adotada permitiu a redução significativa da massa da engrenagem, demonstrando a eficácia da otimização topológica. Os resultados destacaram o impacto ambiental que o processo de otimização pode causar e a determinação do processo de fabricação mais adequado, além de ressaltar a relevância da otimização estrutural para garantir a eficiência e segurança dos sistemas mecânicos.

Palavras-chave: Engrenagem. Simulação. Fabricação. Ambiental. Redução. Massa.

Abstract

The article presents a case study on the optimization of a spur cylindrical gear for power transmission. The introduction highlights the importance of optimizing structures in mechanical engineering, with the aim of designing more efficient, safe and economical components in a competitive market. The methodology adopted involved the application of finite element simulation (FEM) to carry out the topological optimization of the gear. Initially, the material chosen for the part and the gear support areas were determined. Static simulation was then carried out to calculate the stresses and define the structure's fixed points. After obtaining the results of the static simulation, topological optimization was applied, using an iterative process to determine the areas where the mass could be removed. The new geometry was validated by means of a new static simulation, checking that the maximum stresses and safety factor were within the desired limit. The results of the study showed that the mass of the structure was reduced by up to 30% in *Ansys* and 23.5% in *Solidworks*, with a slight reduction in the safety factor in both software packages. In addition, the new geometry showed organic and complex characteristics, making it more suitable for additive manufacturing. The speed of the *ansys* simulation and the ease of learning and using Solidworks were highlighted, as was the generation of graphics and the quality of the documentation in both software packages. In summary, the methodology adopted allowed for a significant reduction in gear mass, demonstrating the effectiveness of topological optimization. The results highlighted the environmental impact that the optimization process can have and the determination of the most suitable manufacturing process, as well as highlighting the importance of structural optimization in ensuring the efficiency and safety of mechanical systems.

Keywords: Gear. Simulation. Manufacturing. Environmental. Reduction. Mass.

Lista de figuras

Figura 1 – Nomeclaturas do dente.	4
Figura 2 – Engrenamento de ECDR.	6
Figura 3 – Malhas usando método FEA.	9
Figura 4 – Mola linear unidimensional.	9
Figura 5 – Malha com 2 elementos e 3 nós.	10
Figura 6 – Exemplo de otimização topológica.	13
Figura 7 – Áreas de design e não design.	19
Figura 8 – Materiais mais comuns na produção de ECDR's.	21
Figura 9 – Tipos de fixação no <i>Ansys</i>	21
Figura 10 – Tipos de fixação no <i>Solidworks</i>	22
Figura 11 – a)Malha grosseira b)Malha totalmente refinada c) Controle de malha aplicado	22
Figura 12 – Resultados diferentes após a utilização de malhas diferentes.	24
Figura 13 – Fluxograma.	25
Figura 14 – Parâmetros e modelo usados.	26
Figura 15 – Áreas preservadas no <i>solidworks</i>	27
Figura 16 – Áreas preservadas no <i>ansys</i>	27
Figura 17 – Áreas fixadas <i>solidworks</i>	29
Figura 18 – Áreas fixadas <i>ansys</i>	29
Figura 19 – Valor e área de aplicação da força no <i>solidworks</i>	30
Figura 20 – Valor e área de aplicação da força no <i>ansys</i>	30
Figura 21 – Controle e refinamento de malha no <i>solidworks</i>	31
Figura 22 – Controle e refinamento de malha no <i>ansys</i>	31
Figura 23 – Malha h-adaptativa <i>solidworks</i>	32
Figura 24 – Malha adaptativa <i>ansys</i>	32
Figura 25 – Tensão máxima e fator de segurança no <i>solidworks</i>	32
Figura 26 – Tensão máxima e fator de segurança no <i>Ansys</i>	33
Figura 27 – Otimização topológica no <i>solidworks</i>	33
Figura 28 – Otimização topológica no <i>ansys</i>	33
Figura 29 – Peça gerada a partir da otimização do <i>solidworks</i>	34
Figura 30 – Peça gerada a partir da otimização do <i>ansys</i>	34
Figura 31 – Tensões e FOS na peça otimizada no <i>solidworks</i>	35
Figura 32 – Tensões e FOS na peça otimizada no <i>ansys</i>	35
Figura 33 – Tela do esquema de projeto do <i>ansys</i>	37

Lista de tabelas

Tabela 1 – Especificações da engrenagem.	18
Tabela 2 – Propriedades do material utilizado	28
Tabela 3 – Tabela comparativa.	39

Lista de quadros

Quadro 1 – Lista de parâmetros usados.	14
--	----

Lista de abreviaturas e siglas

AGMA	<i>American Gear Manufacturers Association</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
AM	Manufatura aditiva
CAD	<i>computer aided design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
DMLS	<i>Direct metal laser sintering</i>
ECDR	Engrenagem cilíndrica de dentes retos
ESO	<i>Evolutionary Structural Optimization</i>
FEM	<i>Finite element method</i>
IFBA	Instituto Federal da Bahia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
SIMP	<i>Simple Isotropic Material with Penalization</i>
SLA	<i>Service Level Agreement</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
TSA	<i>Topological Sensitivity Analysis</i>

Lista de símbolos

p_c	Passo circular
π	Número pi
d	Diâmetro
N	Número de dentes
p_b	Passo de base
m	Módulo
W	Carregamento
W_r	Carregamento na direção radial
W_t	Carregamento na direção tangencial
T_p	Torque no eixo do pinhão
r_p	Raio primitivo
d_p	Diâmetro primitivo
ω_p	Velocidade angular do pinhão
F	Força

Sumário

1 – Introdução	1
1.1 Motivação	2
2 – Revisão Bibliográfica	3
2.1 Preâmbulo	3
2.2 Engrenagens cilíndricas de dentes retos (ECDR)	4
2.2.1 Fatores importantes de uma ECDR	4
2.2.2 Carregamentos em ECDR's	5
2.2.3 Modos de falha de uma ECDR	6
2.3 Modelagem computacional	7
2.4 Método de elementos finitos	8
2.4.1 Modelagem matemática	9
2.5 Otimização topológica	12
2.5.1 Métodos de otimização topológica	12
2.6 Parâmetros para a comparação dos softwares	14
2.7 Manufatura aditiva	14
2.8 Impacto ambiental	15
3 – Metodologia	17
3.1 Especificações da ECDR	18
3.2 Modelagem computacional	19
3.3 Simulação computacional	20
3.4 Metodologia para a aplicação da otimização topológica	21
3.4.1 Simulação estática	23
3.4.2 Otimização topológica	23
4 – Resultados e discussão	26
4.1 Análise comparativa	36
4.1.1 Flexibilidade na entrada	36
4.1.2 Facilidade de aprendizagem	37
4.1.3 Velocidade de execução	37
4.1.4 Geração de gráficos	38
4.1.5 Qualidade da documentação	38
5 – Conclusão	39

Referências 40

1 Introdução

A otimização de estruturas é importante para a Engenharia Mecânica, pois é um processo que permite projetar estruturas mais eficientes e seguras, ao mesmo tempo em que reduz custos e tempo de produção. Isso é especialmente importante em um mercado cada vez mais competitivo, no qual a redução de custos e a maximização do desempenho são fatores críticos para o sucesso.

Nesse sentido, o aperfeiçoamento de projetos é fundamental para a Engenharia Mecânica, pois permite criar componentes e sistemas mais leves, resistentes e econômicos. Nessa lógica, vê-se a importância da melhoria dos componentes em aplicações de alta tecnologia, como na indústria aeroespacial, automotiva e em qualquer área em que a relação desempenho-massa seja crucial para a eficiência do sistema. Além disso, a otimização topológica também pode ajudar a reduzir a quantidade de materiais necessários para produzir um componente ou sistema, o que pode resultar em economias significativas em termos de custos e recursos naturais.

A otimização estrutural na Engenharia Mecânica pode ser alcançada por meio de diversas técnicas, como a Engenharia Assistida por Computador (ou CAE, *Computer Aided Engineering*), simulação por método de elementos finitos (ou FEM, *Finite Element Method*) e a otimização topológica, além da seleção de materiais e processos de fabricação adequados, visando o melhor desempenho do sistema.

Filho (2009) define CAE como um conjunto de técnicas e ferramentas de *software* que permitem realizar simulações e análises de projetos e processos industriais, utilizando modelos matemáticos e computacionais. Dessa maneira, essa ferramenta permite aos engenheiros e projetistas analisar o comportamento dos sistemas em diferentes condições, antes mesmo de construí-los fisicamente, possibilitando um processo de desenvolvimento mais rápido, eficiente e econômico.

Dentro do processo CAE a simulação por elementos finitos é o mais importante para entender qual o comportamento da estrutura a partir de carregamentos e fixações pré estabelecidas. Nessa lógica, o FEM é uma técnica de análise numérica utilizada na engenharia para resolver problemas complexos de análise estrutural, térmica, fluidodinâmica, acústica, entre outros. Em suma o Dhatt Gilbert Touzot (2012) explica que este método consiste em dividir um modelo matemático de um sistema em pequenos elementos, como triângulos ou quadriláteros, e calcular as soluções para cada elemento separadamente, usando equações matemáticas conhecidas. Essas soluções parciais são então combinadas para formar uma solução global do problema.

Em posse de informações da estrutura e das solicitações nas quais as partes de um

sistema estão sujeitas surge a otimização topológica, que de acordo com [Wu Ole Sigmund \(2021\)](#) é uma técnica de projeto computacional que utiliza algoritmos de otimização para encontrar a distribuição ideal de material em um modelo estrutural tridimensional, com o objetivo de minimizar o peso ou maximizar a rigidez da estrutura, sujeito a restrições de desempenho, tais como esforços, deslocamentos e fatores de segurança.

Este trabalho teve como **objetivo** comparar os resultados de simulação estática e otimização topológica para minimização de massa de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos (ECDR), a partir da utilização de dois *softwares*: *solidworks* e *ansys*, que são os softwares mais usados na Engenharia Mecânica. O **objetivo** da comparação é definir qual software apresenta melhores resultados de simulação estática e método de otimização, além de definir qual é melhor aplicado dentro em um projeto mecânico.

1.1 Motivação

A motivação para a aplicação da otimização topológica em engrenagens reside na busca por soluções inovadoras e eficientes no projeto desses componentes mecânicos cruciais. As engrenagens desempenham um papel fundamental em uma variedade de máquinas e sistemas, transferindo energia e movimento de forma precisa e confiável. Embora a otimização topológica não seja a técnica padrão para otimizar engrenagens cilíndricas de dentes retos por ter um desenvolvimento muito complexo, ao empregar esta técnica, podemos explorar geometrias de engrenagens não convencionais, buscando a distribuição ideal de material para minimizar o peso, melhorar a eficiência e, ao mesmo tempo, manter a integridade estrutural e a funcionalidade necessária. Isso não apenas pode resultar em engrenagens mais leves e energeticamente eficientes, mas também em designs que se adaptam a requisitos específicos de aplicação, contribuindo assim para a melhoria geral do desempenho dos sistemas mecânicos em que são utilizadas.

Nesse sentido, uma análise comparativa entre métodos de otimização topológica é uma prática valiosa que ajuda a selecionar a abordagem mais adequada para um determinado problema, aprimorar o processo de otimização e contribuir para o desenvolvimento de conhecimento na área. Isso é especialmente importante em projetos de Engenharia e pesquisa, na qual a escolha do método certo pode ter um impacto significativo nos resultados e nos recursos envolvidos.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Preâmbulo

No desenvolvimento contemporâneo de sistemas mecânicos e estruturas, a análise e otimização de componentes desempenham um papel crucial na busca por eficiência, durabilidade e desempenho otimizado. Nesse contexto, este referencial teórico se propõe a explorar e integrar diversos conceitos fundamentais relacionados a engrenagens cilíndricas de dentes retos, modelagem computacional, Método de Elementos Finitos (MEF), otimização topológica e parâmetros de comparação.

As engrenagens cilíndricas de dentes retos representam elementos essenciais em uma variedade de sistemas mecânicos, desempenhando funções vitais na transmissão de torque e movimento. A compreensão aprofundada de seu comportamento, desempenho e otimização torna-se imperativa para o avanço eficaz na concepção de máquinas e dispositivos.

A modelagem computacional surge como uma ferramenta poderosa para a análise preditiva e simulação do comportamento de engrenagens, proporcionando *insights* valiosos que podem orientar o projeto e aprimoramento desses componentes. Neste referencial, explora-se as abordagens e técnicas mais recentes no âmbito da modelagem computacional aplicadas às engrenagens cilíndricas de dentes retos.

Integrado à modelagem computacional, o Método de Elementos Finitos (MEF) se destaca como uma metodologia avançada para a análise estrutural, permitindo a investigação detalhada das tensões, deformações e características de desempenho das engrenagens. Este referencial visa examinar a aplicação específica do MEF na análise de engrenagens cilíndricas, destacando contribuições significativas e desenvolvimentos recentes.

A otimização topológica surge como uma abordagem inovadora na busca por designs eficientes, minimizando material e maximizando o desempenho estrutural. No contexto das engrenagens cilíndricas, exploraremos as metodologias e estratégias empregadas na otimização topológica, visando aprimorar a eficiência e a durabilidade desses componentes essenciais.

Por fim, será abordado os parâmetros de comparação, essenciais para a avaliação crítica de diferentes abordagens de projeto, análise e otimização. Este referencial buscará identificar os critérios-chave para a comparação efetiva de engrenagens cilíndricas, proporcionando uma base sólida para a tomada de decisões informadas no desenvolvimento de sistemas mecânicos avançados.

2.2 Engrenagens cilíndricas de dentes retos (ECCR)

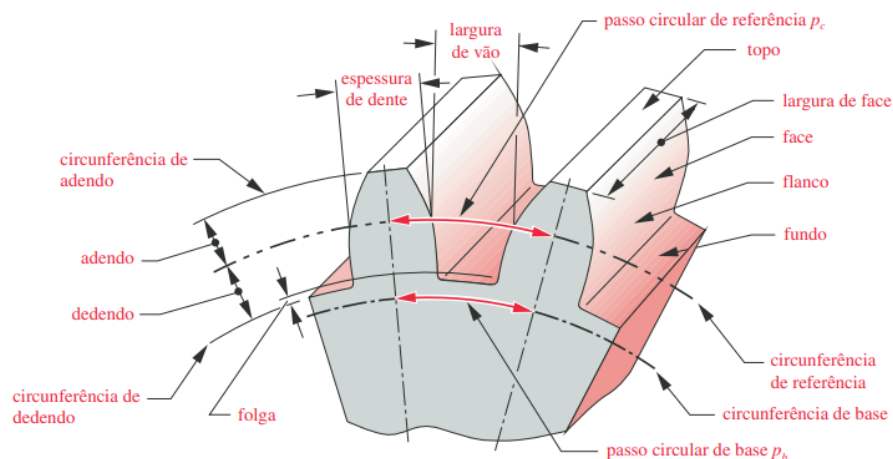
Segundo (G. NEELESH K. J., 2017) engrenagens desempenham um papel crucial na transmissão de torque e velocidade angular em diversas aplicações. Existe uma ampla gama de tipos de engrenagens disponíveis: helicoidais, cônicas, planetárias. No entanto, este capítulo se concentrará no tipo mais simples: a engrenagem cilíndrica reta. Essas engrenagens são projetadas para operar com eixos paralelos e possuem dentes que também são alinhados paralelamente ao eixo de coordenadas do eixo. Outros tipos de engrenagens, como as helicoidais, cônicas e sem-fim, são capazes de acomodar eixos que não são paralelos, mas discutiremos essas em detalhes no próximo capítulo.

Atualmente, as engrenagens são padronizadas em termos de forma dos dentes e tamanho. A Associação dos Fabricantes de Engrenagens dos Estados Unidos (AGMA) desempenha um papel fundamental na promoção de pesquisas relacionadas ao projeto, materiais e fabricação de engrenagens, além de publicar padrões que regem o projeto, fabricação e montagem das mesmas. Seguiremos os métodos AGMA e adotaremos as recomendações estabelecidas nesses padrões.

2.2.1 Fatores importantes de uma ECCR

A Figura 1 ilustra dois dentes de uma engrenagem, com as nomenclaturas padrão claramente definidas. Já foram identificados o círculo de referência (primitivo) e o círculo de base. A altura do dente é determinada pelo adendo, que é adicionado à altura de cabeça, e o dedendo, que é subtraído para encontrar a altura de pé. Essas medidas são referidas em relação ao círculo nominal de referência (primitivo). A altura de pé (dedendo) é ligeiramente maior que a altura de cabeça (adendo) para garantir um pequeno espaço entre a ponta de um dente engrenado (círculo de cabeça) e o fundo do espaço entre dentes do outro (círculo de pé) segundo Olivio (2019).

Figura 1 – Nomeclaturas do dente.



Fonte: Norton (2011).

A profundidade de trabalho do dente equivale a duas vezes o valor do adendo, enquanto a profundidade total é obtida somando-se o adendo e o dedendo. A espessura do dente é medida no círculo de referência, e a largura do espaço entre os dentes é ligeiramente maior que a espessura do dente. A diferença entre essas duas dimensões representa a folga de engrenamento. A largura da face do dente é medida ao longo do eixo da engrenagem, e o passo circular (primitivo) corresponde ao comprimento do arco ao longo da circunferência do círculo de referência, medido de um ponto em um dente até o mesmo ponto no dente seguinte.

Algumas outras grandezas são necessárias para entender o comportamento das engrenagens, como o passo circular p_c mostrado na equação 1 em que d = diâmetro de referência (mm) e N = número de dentes. O passo do dente também pode ser medido ao longo da circunferência do círculo de base e então é chamado de passo de base p_b , equação 2. O sistema SI, usado para engrenagens métricas, define um parâmetro chamado de módulo, equação 3, que recíproco do passo diametral com o diâmetro de referência d medido em milímetros de acordo com [G. Neelesh K. J. \(2017\)](#).

$$p_c = \frac{\pi d}{N} \quad (1)$$

$$p_b = p_c \cos \phi \quad (2)$$

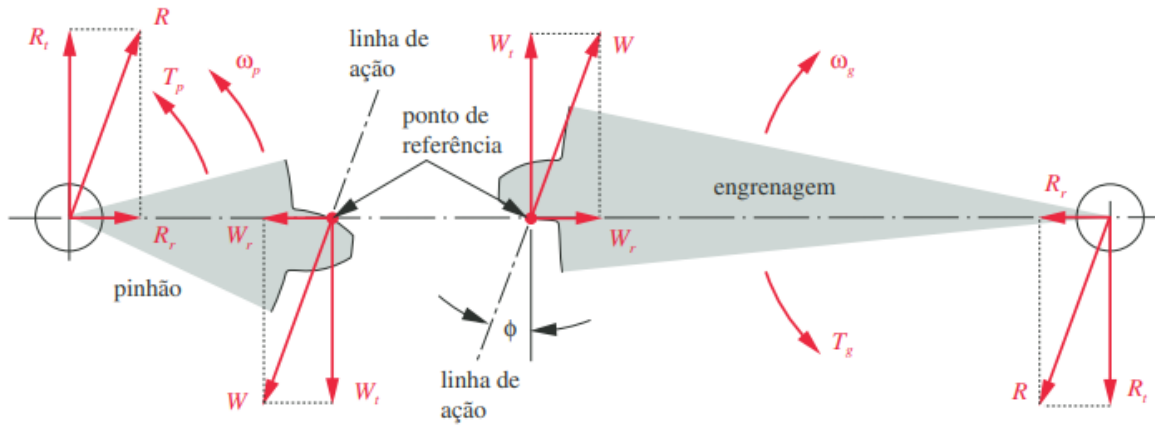
$$m = \frac{d}{N} \quad (3)$$

2.2.2 Carregamentos em ECDR's

A avaliação da carga nos dentes das engrenagens interligadas pode ser realizada através dos procedimentos convencionais de análise de carga. A Figura 2 apresenta um par de dentes de engrenagem. Embora estejam efetivamente engrenados no ponto de referência, são representados separadamente para facilitar a explicação. O torque T_p está sendo transmitido do pinhão para a engrenagem, ambos ilustrados em um diagrama de corpo livre. No ponto de referência, a única força que pode ser transmitida de um dente para o outro, considerando a ausência de atrito, é a força W que atua ao longo da linha de ação no ângulo de pressão. Essa força pode ser decomposta em duas componentes, sendo W_r na direção radial e W_t na direção tangencial. A magnitude da componente tangencial W_t pode ser determinada pela equação 4:

$$W_t = \frac{T_p}{r_p} = \frac{2T_p}{d_p} = \frac{2p_d T_p}{N_p} \quad (4)$$

Figura 2 – Engrenamento de ECDR.



Fonte: Norton (2011).

Em que T_p representa o torque no eixo do pinhão, r_p é o raio de referência (primitivo), d_p é o diâmetro de referência (primitivo), P é a potência no pinhão, ω_p é a velocidade angular do pinhão, N_p é o número de dentes e p_d é o passo diametral do pinhão. A componente radial, W_r , de acordo com Norton (2011) pode ser calculada da seguinte forma:

$$T_p = \frac{P}{\omega_p} \quad (5)$$

$$W_r = W_t \tan \phi \quad (6)$$

$$W = \frac{W_t}{\cos \phi} \quad (7)$$

2.2.3 Modos de falha de uma ECDR

De acordo com Ku (1976) existem dois principais tipos de falhas que afetam os dentes das engrenagens: 1) fratura por fadiga devido às variações de tensão na raiz do dente e 2) fadiga superficial, conhecida como crateração, nas superfícies dos dentes. Ao projetar engrenagens, é fundamental considerar ambos esses modos de falha.

Para prevenir a fratura por fadiga devido à flexão, é necessário um projeto adequado que mantenha o estado de tensão dentro dos limites estabelecidos pela linha modificada de Goodman para o material. Em muitos casos, especialmente em engrenagens altamente carregadas feitas de materiais ferrosos com alta resistência à fadiga por flexão, é possível alcançar uma vida útil praticamente infinita sob cargas de flexão.

No entanto, é importante observar que com relação a fadiga de contato e de acordo com Batista et al. (2000) nenhuma teoria conclusiva foi estabelecida ainda devido à complexidade do material, e pode ser obtida por flexão rotativa e testes de fadiga por torção.

fenômeno, que é influenciado por fatores, por exemplo contato, tensões, espessura específica do filme de lubrificação, superfície. Como o início da trinca por fadiga de contato é um fenômeno local, os critérios de fadiga devem ser aplicados localmente, mantendo a topografia e as interações entre as asperezas tensões residuais e trações superficiais.

Portanto, não é viável projetar engrenagens para uma vida útil infinita contra falhas superficiais. Engrenagens bem projetadas não devem fraturar um dente em condições normais de operação, a menos que sejam submetidas a sobrecargas significativas além de suas capacidades de projeto.

A crateração é o tipo mais comum de falha, mas desgaste por abrasão ou aderência (marcas) também podem ocorrer, especialmente se as engrenagens não forem adequadamente lubrificadas durante o serviço. Conforme Norton (2011) é importante considerar esses mecanismos de desgaste ao projetar e manter engrenagens para garantir um desempenho confiável e durável .

2.3 Modelagem computacional

A modelagem computacional na Engenharia Mecânica é uma abordagem fundamental para projetar, analisar e otimizar sistemas mecânicos complexos usando o poder da computação. Ela envolve a criação de modelos matemáticos e a utilização de software de simulação para estudar o comportamento de sistemas mecânicos em condições diversas.

Como detalhado por Munjiza Earl E. Knight (2012) o primeiro passo é desenvolver um modelo matemático que descreva o comportamento do sistema mecânico em questão. Isso pode envolver a formulação de equações diferenciais que representam as leis da física que regem o sistema, como as equações de Newton para o movimento.

Em muitos casos, as equações diferenciais que descrevem o sistema são complexas demais para serem resolvidas diretamente. Portanto, é comum discretizar o modelo, dividindo o sistema em elementos menores, como elementos finitos em análise de elementos finitos, para simplificar o problema.

Para resolver o modelo matemático discretizado, são utilizados *softwares* de simulação, como o *Ansys*, *Solidworks*, *Inventor*, *Ábacus* e muitos outros. Esses programas permitem que os engenheiros ingressem dados, como propriedades dos materiais, condições de contorno e forças aplicadas, e executem simulações para obter resultados numéricos.

Segundo Norton (2011) os resultados das simulações são analisados para entender o comportamento do sistema. Essa análise pode incluir a determinação de tensões, deformações, fluxos de calor, vibrações e outras características relevantes. Com base nos resultados da análise, é possível realizar otimizações para melhorar o projeto do sistema. Isso pode incluir a busca por geometrias mais eficientes, seleção de materiais adequados

e ajuste de parâmetros de projeto.

A modelagem computacional frequentemente envolve iterações, onde o modelo é refinado com base nos resultados das simulações. Isso ajuda a desenvolver projetos mais precisos e eficientes. Para garantir que os modelos computacionais sejam precisos, os resultados obtidos podem ser comparados com dados experimentais reais. Se houver discrepâncias significativas, o modelo pode ser ajustado para melhorar a correspondência entre os resultados teóricos e experimentais.

A modelagem computacional na Engenharia Mecânica é amplamente utilizada em uma variedade de aplicações, como o projeto de estruturas, análise de componentes automotivos, simulação de processos de fabricação e muito mais. Ela permite que os engenheiros explorem diferentes cenários de projeto de forma eficiente, economizando tempo e recursos, ao mesmo tempo em que ajuda a criar produtos mais seguros, confiáveis e eficientes.

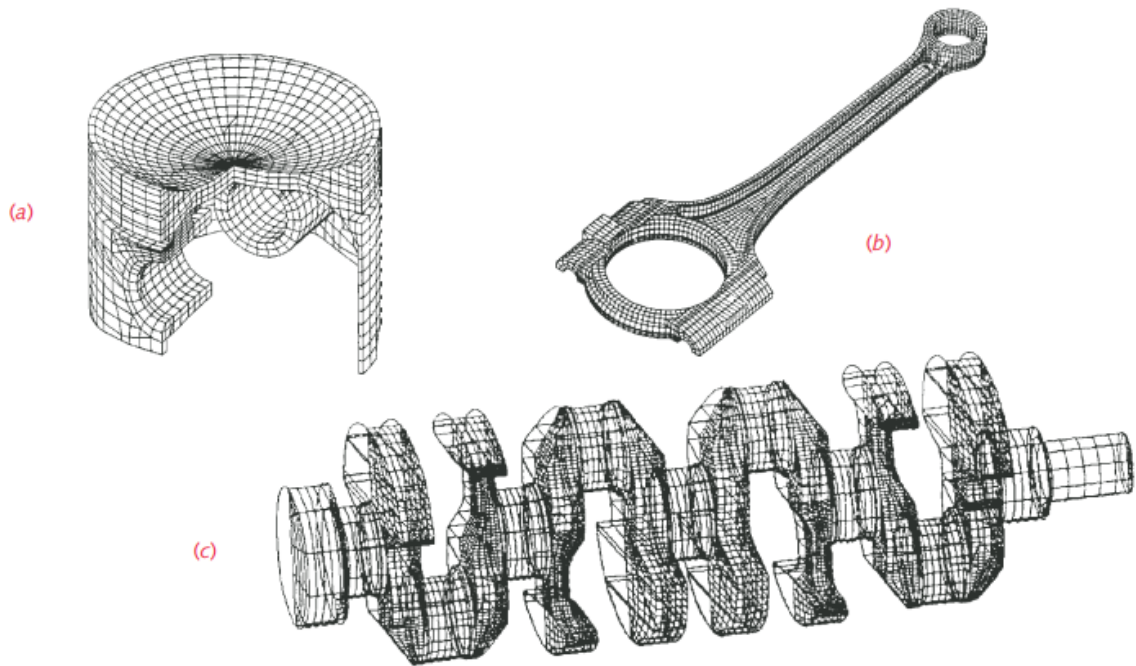
2.4 Método de elementos finitos

Em geral, os problemas de Engenharia costumam ser resolvidos por meio de técnicas tradicionais de solução analítica. Essas abordagens são principalmente aplicáveis a componentes de geometria simples, como cilindros e prismas retangulares. No entanto, muitos componentes de máquinas apresentam formas geométricas mais complexas, o que torna o cálculo de tensões e deflexões difícil, e em alguns casos, até impossível, utilizando o método analítico.

Considere, por exemplo, a complexa forma de um virabrequim, conforme ilustrado na Figura 3c. Para analisar as tensões e deflexões em uma peça com tal complexidade, é necessário dividir o seu volume em um conjunto finito de elementos contíguos e discretos. Em seguida, resolvem-se um grande conjunto de equações, cada uma aplicada a um elemento específico e aos nós que conectam esses elementos entre si. A Figura 3a e 3b apresenta os modelos de elementos finitos de um virabrequim, um pistão e uma biela de motor.

O conceito subjacente à análise por meio do método dos elementos finitos (MEF) é simples, mas os cálculos envolvidos são complexos. Embora a teoria matemática por trás do FEA esteja além do escopo desta pesquisa, é importante compreender como é realizada a discretização e a modelagem para criar uma malha adequada para a estrutura que está sendo analisada.

Figura 3 – Malhas usando método FEA.

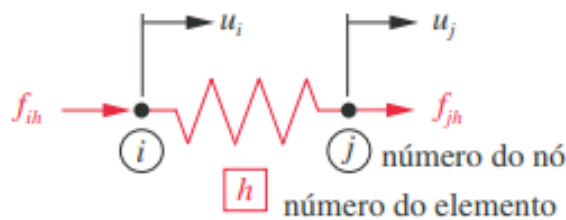


Fonte: Norton (2011).

2.4.1 Modelagem matemática

O processo matemático para a análise de elementos finitos pelo método da rigidez direta é apresentado neste trabalho de forma simples. O conceito é fácil de entender, mas sua implementação é matematicamente mais complexa e requer o processamento de grandes matrizes. A figura 4 mostra um diagrama de corpo livre do elemento finito estrutural mais simples, que é uma mola linear unidimensional. Essa mola possui uma constante de rigidez $k_h = \frac{f}{\Delta u}$, onde um deslocamento cria uma força no nó. Os deslocamentos positivos u_i e u_j são assumidos, e as forças em cada nó são somadas.

Figura 4 – Mola linear unidimensional.



Fonte: Norton (2011).

$$f_{ih} = k_h u_i - k_h u_j \tag{8}$$

$$f_{jh} = -k_h u_i + k_h u_j \tag{9}$$

colocando o sistema na forma matricial obtém-se:

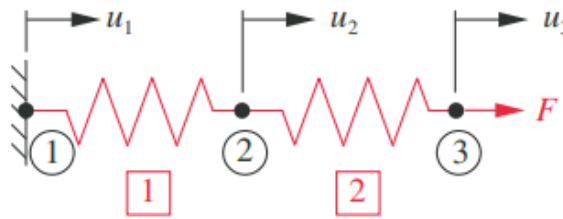
$$\begin{bmatrix} k_h & -k_h \\ -k_h & k_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{jh} \\ f_{ih} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Que pode ser escrito na forma a seguir:

$$[k][d] = [f] \quad (11)$$

A figura 5 ilustra a conexão de dois destes elementos simples com o propósito de construir uma rede de elementos finitos. O primeiro elemento, identificado como "elemento 1", encontra-se fixo, estabelecendo, assim, uma condição de contorno que restringe o movimento. O segundo elemento, denominado "elemento 2", possui uma força aplicada em seu nó 3. A equação 13 pode ser aplicada a esses elementos.

Figura 5 – Malha com 2 elementos e 3 nós.



Fonte: Norton (2011).

$$\begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{12} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{22} \\ f_{32} \end{bmatrix} \quad (13)$$

As forças mencionadas na Equação 13 são forças internas ao elemento e exercem sua ação nos nós. Para garantir o equilíbrio, a soma das forças nodais deve igualar as forças externas aplicadas aos nós. Vamos representar a força externa em cada nó como F_i , onde i é o número que identifica o nó. Portanto, ao somar as forças em cada nó tem-se:

$$\text{nó 1} \rightarrow f_{11} = F_1 \quad (14)$$

$$\text{nó 2} \rightarrow f_{21} + f_{22} = F_2 \quad (15)$$

$$\text{nó 3} \rightarrow f_{32} = F_3 \quad (16)$$

Substituindo as expressões para as forças nos nós tem-se:

$$k_1 u_1 - k_1 u_2 = F_1 \quad (17)$$

$$-k_1 u_1 + (k_1 + k_2) u_2 - k_2 u_3 = F_2 \quad (18)$$

$$-k_2 u_2 + k_2 u_3 = F_3 \quad (19)$$

Que na forma matricial fica:

$$\begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (20)$$

ou:

$$[K][D] = [F] \quad (21)$$

Neste contexto, as forças aplicadas e a matriz de rigidez são conhecidas. No entanto, a matriz de rigidez $[K]$ é singular, o que significa que não tem uma única solução, devido ao grau de liberdade cinemático do sistema descrito pelas Equações 20. Isso implica que o sistema pode estar em equilíbrio em diferentes posições dentro de seu universo unidimensional.

Para resolver adequadamente um problema de elementos finitos estático, é necessário aplicar condições de contorno apropriadas para eliminar os graus de liberdade cinemáticos. Uma abordagem comum é fixar o nó 1, definindo seu deslocamento (u_1) como zero. Isso resulta na anulação da primeira coluna da matriz de rigidez, reduzindo o sistema para três equações e duas incógnitas. Se a força de reação F_1 for conhecida, a primeira equação pode ser eliminada, e as duas equações restantes podem ser usadas para calcular os deslocamentos.

Além disso, a figura 6 indica que nenhuma força externa é aplicada ao nó 2, o que implica que F_2 é igual a zero. Substituindo essa informação na análise, obtemos.

$$\begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F \end{bmatrix} \quad (22)$$

A matriz $[K]$ é denominada matriz de rigidez reduzida e possui uma matriz inversa que não é singular, o que viabiliza a solução para os deslocamentos desconhecidos. Uma vez que os deslocamentos são determinados, é possível calcular as forças internas em cada nó utilizando a Equação 8.2. As equações que envolvem as forças de reação, anteriormente desconhecidas e removidas para simplificar a matriz, agora podem ser resolvidas para determinar essas forças de reação. As deformações são calculadas por meio da derivada

dos deslocamentos, enquanto as tensões são obtidas a partir dessas deformações e das propriedades do material. Muitos pós-processadores exibirão informações como tensões principais, tensões equivalentes de von Mises, deformações e deslocamentos.

Este exemplo simples abrange os passos fundamentais de uma solução para um problema estático utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). Em situações reais, podem ser empregados elementos mais complexos com múltiplos graus de liberdade em seus nós. Existem muitos tipos de elementos disponíveis, alguns dos quais podem lidar com análises envolvendo comportamento não linear.

2.5 Otimização topológica

Segundo [Bendsoe \(2004\)](#) a otimização topológica é uma técnica de Engenharia usada para encontrar a configuração ideal de material em uma estrutura ou componente, com o objetivo de melhorar o desempenho da peça, reduzir seu peso e cumprir critérios de design específicos. Essa abordagem é particularmente relevante em áreas como Engenharia mecânica e aerodinâmica, onde a eficiência estrutural é crucial.

A ideia central da otimização topológica é começar com uma geometria inicial e, em seguida, redistribuir de maneira inteligente o material dentro dessa geometria para atender a requisitos específicos, como resistência, rigidez ou minimização de massa. Isso é feito por meio de algoritmos computacionais que exploram diferentes configurações, adicionando ou removendo material em áreas específicas da estrutura.

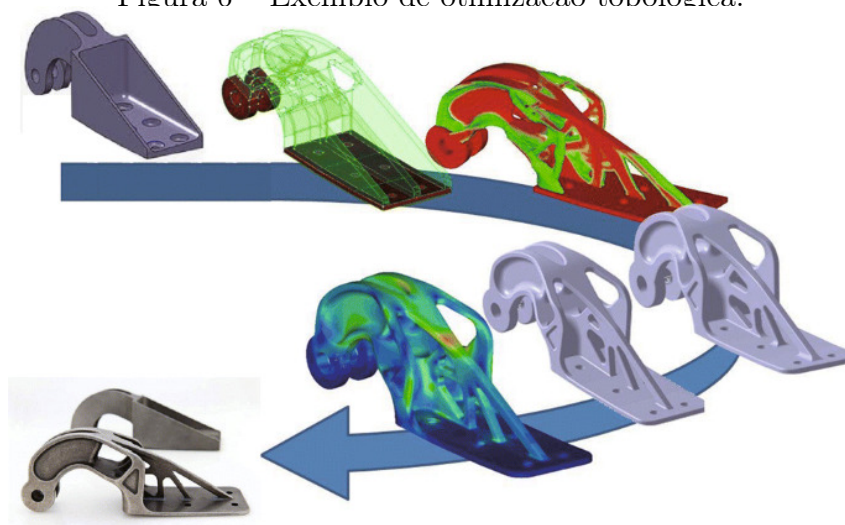
Os principais passos envolvidos na otimização topológica incluem a definição do problema, a geração da malha da estrutura, a formulação de uma função objetivo, o uso de algoritmos de otimização para iterativamente modificar a geometria, a análise estrutural em cada iteração, a atualização da geometria com base nos resultados e a continuação do processo até que uma solução satisfatória seja alcançada ou os critérios de convergência sejam atendidos de acordo com [Eschenauer \(2001\)](#).

O resultado final da otimização topológica é uma geometria que representa a distribuição ideal de material para atender aos requisitos do projeto, reduzindo o desperdício de material e, frequentemente, diminuindo o peso da estrutura. Essa abordagem é aplicada em diversos campos, como automotivo, aeroespacial, construção civil e dispositivos médicos, resultando em projetos mais eficientes e econômicos, um exemplo de otimização topológica é mostrada na Figura 6.

2.5.1 Métodos de otimização topológica

Os métodos de otimização topológica têm como objetivo alcançar a solução ideal, manipulando a configuração da estrutura, ou seja, a topologia, especialmente em relação a

Figura 6 – Exemplo de otimização topológica.



Fonte: Saldanha (2021).

estruturas contínuas. Esses métodos podem ser categorizados em duas principais abordagens, conforme Eschenauer (2001): a abordagem micro, também conhecida como baseada no material, e a abordagem macro, que é baseada na geometria.

Na abordagem micro, que foi a primeira a ser desenvolvida, o foco reside na existência de uma microestrutura porosa. Essa microestrutura define as propriedades constitutivas do material com base em sua geometria e na densidade volumétrica de uma célula unitária que representa o material. Essa célula unitária é representada por variáveis contínuas, distribuídas no espaço do domínio fixo estendido, que representa uma região do espaço onde a estrutura pode existir, sujeita a cargas específicas, condições de fixação e uma quantidade determinada de material (VIEGAS, 2006).

O domínio fixo estendido é discretizado por uma malha de elementos finitos que permanece constante ao longo do processo de otimização, possibilitando o cálculo das respostas mecânicas. A otimização visa determinar quais partes da estrutura devem conter material e quais devem permanecer vazias. Nesse processo, a distribuição das densidades é parametrizada, permitindo que cada ponto no domínio fixo estendido varie de 0 (indicando ausência de material) a 1 (indicando presença de material). Os algoritmos baseados nessa técnica buscam otimizar a distribuição de material, visando minimizar ou maximizar uma função de custo. Um exemplo dessa abordagem é o método *Simple Isotropic Material with Penalization* (SIMP).

Na abordagem macro, ou abordagem geométrica, a topologia da estrutura é modificada pela introdução de vazios no domínio. Exemplos de métodos nessa categoria incluem o *Evolutionary Structural Optimization* (ESO), que se baseia no cálculo da função objetivo ao remover elementos da malha de elementos finitos, e o *Topological Sensitivity Analysis* (TSA), que utiliza uma função escalar conhecida como Derivada Topológica para

avaliar a sensibilidade da função de custo quando pequenos furos são criados na estrutura (LABANOWSKI, 2004).

2.6 Parâmetros para a comparação dos softwares

A escolha adequada de parâmetros em uma análise comparativa de softwares de simulação é crucial para garantir que a avaliação seja relevante, precisa e alinhada com as necessidades específicas do usuário. Banks (1991) propôs uma série de critérios para a avaliação de softwares de simulação de eventos discretos, organizados em cinco categorias: Critérios de Entrada; Critérios de Processamento; Critérios de Saída; Critérios de Suporte; Critérios de Custo.

Banks (1991) enfatiza a importância de discernir quais critérios são relevantes e quais não são adequados para situações específicas. Por exemplo, a avaliação da animação tridimensional só é necessária se o modelo de simulação a utilizar. Além disso, alguns recursos não podem ser simplesmente classificados como presentes ou ausentes. Tomando como exemplo o critério de interface com outras linguagens (Fortran, C ou Pascal), a avaliação de um software de simulação pode depender de sua capacidade de evitar a necessidade de programação de sub-rotinas em Fortran, em vez de apenas considerar a possibilidade de interação com essa linguagem.

Conforme indicado pelo Banks (1991), os critérios delineados no quadro ?? são aplicáveis à avaliação tanto de softwares quanto de linguagens de simulação. No entanto, planilhas eletrônicas e ferramentas de modelagem rápida não possibilitam a construção de modelos detalhados, tornando-as inaptas para serem avaliadas com base nos critérios mencionados no 1.

Quadro 1 – Lista de parâmetros usados.

Critérios analisados
Flexibilidade de entrada
Facilidade de aprendizagem e uso
Velocidade de execução
Geração de gráficos
Qualidade da documentação

Fonte: (BANKS, 1991).

2.7 Manufatura aditiva

Conforme Wong e Hernandez (2012) a Manufatura Aditiva (AM) é uma técnica de fabricação que utiliza a adição de material, camada por camada, para criar objetos

tridimensionais. Essa técnica é realizada a partir de modelos digitais em 3D, que são transformados em instruções que controlam a deposição do material. Os termos "impressão 3D", "prototipagem rápida", "manufatura digital direta", "manufatura rápida" e "fabricação sólida de forma livre" são frequentemente usados para descrever a AM.

Existem vários métodos de Manufatura Aditiva, cada um com suas próprias técnicas e processos. Alguns dos métodos mais comuns incluem a Estereolitografia (SLA), que usa um laser para solidificar camadas de resina líquida sensível à luz, a Sinterização Seletiva a Laser (SLS), que utiliza um laser para fundir camadas de pó, e a Fusão a Laser de Metal (DMLS), que utiliza um laser para fundir camadas de metal em pó.

A AM é particularmente útil para a produção de peças complexas, com formas que seriam difíceis ou impossíveis de serem criadas com as técnicas tradicionais de fabricação. Além disso, é capaz de produzir peças em pequenas quantidades, o que a torna adequada para prototipagem rápida e fabricação personalizada. No entanto, a precisão e a velocidade de construção podem ser limitadas em comparação com as técnicas

2.8 Impacto ambiental

É essencial destacar que o emprego dessas técnicas tem um alcance que transcende a mera otimização do design mecânico de uma peça. Se estende por toda a cadeia produtiva da empresa, uma vez que produtos mais leves implicam em menor consumo de material, possibilitam um aumento na produção, facilitam o transporte, entre outras vantagens. Isso resulta em uma significativa redução dos custos totais finais da peça (SILVA, 2001).

Produtos com menor peso têm um impacto ambiental reduzido em termos de transporte, uma vez que a eficiência do transporte é influenciada pelo peso, distância percorrida e pela quantidade de carbono incorporada no veículo. A busca pela redução de peso pode contribuir de maneira significativa para a sustentabilidade ambiental da cadeia produtiva, tornando o transporte de produtos mais eficiente e com menor impacto ambiental (LEE et al., 2023).

Tanto o setor automotivo quanto o aeroespacial estão em constante busca por maneiras de aprimorar o conforto e maximizar o espaço disponível, no entanto, esse esforço resultou em um aumento do peso estrutural, levando a um maior consumo de combustível, emissões elevadas, instabilidade dinâmica e aumento dos custos dos materiais utilizados. Por esse motivo, uma iniciativa deliberada foi tomada para produzir estruturas mais leves a fim de minimizar os problemas mencionados (AHMAD et al., 2021).

A produção de peças otimizadas topologicamente pode trazer benefícios ambientais significativos, mas é fundamental estar atento ao seu impacto ambiental, especialmente quando a produção não é adequadamente gerenciada. A fabricação dessas peças geral-

mente envolve tecnologias avançadas que consomem grandes quantidades de energia e geram resíduos.

Para minimizar esse impacto, as empresas precisam adotar práticas de fabricação sustentáveis, como a utilização de fontes de energia renovável e a reciclagem de resíduos. Na usinagem, é crucial adotar práticas de uso, reuso e reciclagem, como a afiação de ferramentas e a filtragem de fluidos refrigerantes para reutilização. Quando não é mais viável reutilizá-los, os resíduos devem ser adequadamente descartados em aterros sanitários ou em usinas de reciclagem especializadas. Dessa forma, é possível reduzir o impacto ambiental da usinagem e promover a sustentabilidade (LU et al., 2011).

3 Metodologia

O desenvolvimento eficaz de estruturas mecânicas e componentes demanda uma metodologia rigorosa e abrangente que permita a análise detalhada, simulação precisa e otimização dos elementos envolvidos. Nesse contexto, delineamos uma metodologia estruturada em diversas etapas fundamentais, cada uma contribuindo para o aprimoramento do processo de concepção. A seguir, foram detalhadas as etapas propostas:

- Etapa 1 - Definição de Parâmetros

A primeira etapa consiste na definição cuidadosa dos parâmetros relevantes para o projeto em questão. Esses parâmetros incluem especificações técnicas, requisitos de desempenho, restrições de espaço e outros fatores cruciais. Estabelecer claramente esses elementos é essencial para direcionar as etapas subsequentes da metodologia, proporcionando uma base sólida para o desenvolvimento do componente.

- Etapa 2 - Modelagem Computacional

A modelagem computacional emerge como uma ferramenta crucial no processo de concepção. Nesta etapa, utilizamos software especializado para criar representações virtuais precisas do componente em análise. A modelagem computacional permite uma compreensão abrangente das características geométricas e estruturais, proporcionando uma plataforma inicial para análises subsequentes.

- Etapa 3 - Definição de Áreas de Design e Não Design

A delimitação de áreas de design e não design é uma etapa vital para a aplicação da otimização topológica. Identificar as regiões críticas que devem ser preservadas ou modificadas durante o processo de otimização é essencial para garantir que as características estruturais desejadas sejam mantidas, ao mesmo tempo em que se busca a eficiência e a redução de material nas áreas não essenciais.

- Etapa 4 - Definição do Material

A seleção adequada do material é um fator determinante para o desempenho final do componente. Nesta etapa, são consideradas as propriedades mecânicas, térmicas e outras características relevantes para a aplicação específica. A escolha do material é crucial para garantir a integridade estrutural e o cumprimento dos requisitos de desempenho.

- Etapa 5 - Simulação Computacional

A simulação computacional envolve a aplicação de métodos numéricos avançados para analisar o comportamento do componente em condições operacionais. Essa etapa permite a avaliação das tensões, deformações e outros parâmetros críticos, contribuindo para a validação da robustez do design proposto.

- Etapa 6 - Otimização Topológica

A última etapa da metodologia concentra-se na otimização topológica, onde algoritmos avançados são empregados para refinar a geometria do componente, buscando a distribuição ideal de material para atender aos requisitos de desempenho com eficiência máxima. Esta fase visa aprimorar a eficiência estrutural, reduzir o peso e maximizar a durabilidade do componente.

Ao seguir essas etapas de maneira sequencial e integrada, essa metodologia proporciona uma abordagem abrangente e sistemática para o desenvolvimento, análise e otimização de componentes mecânicos, visando a excelência em desempenho e eficiência estrutural.

3.1 Especificações da ECDR

Para desenvolvimento do projeto foi utilizado um estudo de caso analisando-se o processo de desenvolvimento do design e estrutura de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos (ECDR), esse tipo de peça é utilizada em sistemas de transmissão de potência. Nessa lógica, a engrenagem escolhida faz parte de uma transmissão de motor de popa de 20Hp e trabalha a 2500rpm, a tabela 1 indica as especificações e parâmetros da engrenagem a ser modelada.

Tabela 1 – Especificações da engrenagem.

Dados	valor
Ângulo de pressão	20°
Passo circular	6.5 mm
Espessura dos dentes	20 mm
Número de dentes	60
Diâmetro primitivo	125 mm
Módulo	2
Diâmetro nominal do eixo	20 mm

Fonte: O Autor (2023).

Os parâmetros de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos desempenham um papel crítico na operação de sistemas mecânicos. A seleção adequada desses parâmetros

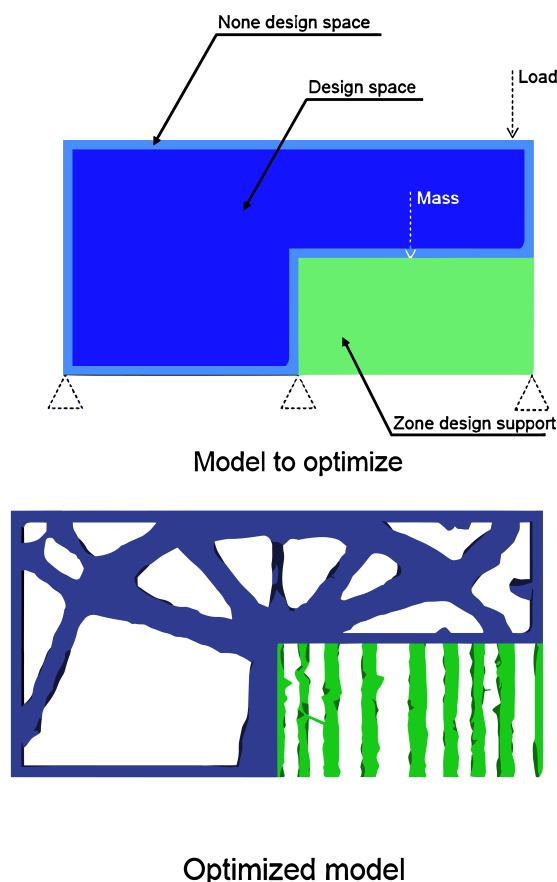
é vital para garantir a eficiência, a confiabilidade e a durabilidade do sistema, bem como para evitar problemas como o desgaste prematuro, o ruído e as falhas mecânicas. Portanto, é essencial escolher esses parâmetros ao projetar e fabricar engrenagens para aplicações específicas.

3.2 Modelagem computacional

Primeiramente foi necessário a modelagem em *computer aided design* (CAD) de uma engrenagem primitiva, utilizando as curvas evolventes responsáveis pelo perfil do dente. esse desenho é feito de forma que a estrutura apresente geometrias poligonais simples. Para isso será utilizada a ferramenta e criação automática de elementos de máquina do software *Solidworks*.

Em seguida é feita a determinação das áreas de *design* e não *design*, isto é, as regiões nas quais podem e não podem ser realizadas as otimizações topológicas, como as regiões de fixação e as regiões de aplicação de força como determinado por [G. Neelesh K. J. \(2017\)](#). Um exemplo desse processo é mostrado na figura 7.

Figura 7 – Áreas de design e não design.



Fonte: ([GARDAN, 2015](#)).

Procura-se sempre encontrar um equilíbrio entre as áreas de *no design*, onde a concentração de material é maximizada para atender às exigências de desempenho, e as áreas de *design*, onde o material é minimizado para reduzir o peso. Isso resulta em designs mais eficientes, com uma melhor relação entre peso e desempenho, sendo particularmente valiosos em setores como aeroespacial, automotivo e engenharia estrutural, onde a redução de peso é uma consideração crítica.

Selecionar corretamente as áreas de *design* e *no design* na otimização topológica é crucial para evitar problemas como desempenho inadequado, excesso de peso, ineficiência de material, complexidade de fabricação, dificuldades de validação, sensibilidade a erros no modelo e custos adicionais de engenharia. Uma seleção inadequada pode levar a designs que não atendem aos requisitos de desempenho, aumentam os custos de produção, tornam a fabricação mais complexa e comprometem a validação estrutural, resultando em potenciais falhas e atrasos no projeto. Portanto, é essencial que engenheiros considerem cuidadosamente a definição dessas áreas desde o início do processo de otimização topológica.

3.3 Simulação computacional

Logo após, com o objetivo de realizar a simulação por elementos finitos fez-se necessário a determinação do material escolhido para a peça analisada. Na figura 8 é apresentada uma lista dos materiais mais comuns na produção de ECDR's, é importante salientar que a escolha do material deve ser feita baseada na aplicação da engrenagem dentro da máquina, e também o processo de fabricação que realizado na produção da geometria obtida ao final do processo, uma vez que ao selecionar materiais que se adéquam ao processo de fabricação escolhido, a economia na fabricação da peça será extremamente relevante.

Figura 8 – Materiais mais comuns na produção de ECDR's.

			Properties	Applications
Cast iron	Gray iron		Good machinability, sound dampening properties, good resistance to wear, low impact strength	Large-size mill gears; moderate power-rating applications; low shock applications; and machine tools
	Ductile iron		Fair to good machinability, sound dampening properties, better impact and fatigue strength than gray iron	Transportation; railroad and military vehicles; girth gears for mills
Plain carbon steels	Carburizing gear steels	Low-carbon steels (1010, 1015, 1020, 1021, 1022, 1025)	Excellent machinability, good combination of strength and ductility, heat treatable, can be case carburized	Low to medium duty applications
	Through-hardening gear steels	Medium-carbon steel (1035, 1040, 1045)	Good machinability	Moderate to high power-ratings application
		High-carbon steel (1060)	High strength and durability	High-power rating applications
Alloy steels	Carburizing steel	Nickel–chrome–molybdenum carburizing steel (SAE8620)	Good wear characteristics/ high wear resistance	Automotive transmissions; farm machineries; earth movers
		20MnCr5 (SAE5120)	Case-hardening imparts hard case with good wearing properties and tough core	Automobile gear boxes; heavy-duty transmission gears; hoisting; and cranes
	Through-hardening gear steels	Chrome–molybdenum alloy steel (4140)	High toughness, good torsional strength, good fatigue strength	Differential systems of automobiles; and tractors

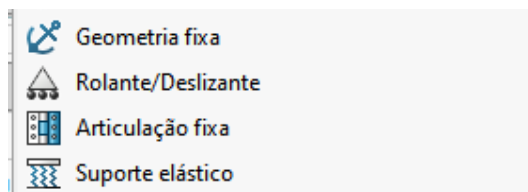
Fonte: G. Neelesh K. J. (2017)

3.4 Metodologia para a aplicação da otimização topológica

Nesse sentido, foi preciso determinar as áreas de suporte da peça, essa fixação pode ser escolhida de acordo como acontece o acoplamento da estrutura estudada com os outros componentes do sistema, as opções mais comuns encontradas nos *softwares* utilizado são mostradas nas Figuras 9 e 10.

Figura 9 – Tipos de fixação no *Ansys*.

Fonte: Autor (2023).

Figura 10 – Tipos de fixação no *Solidworks*.

Fonte: Autor (2023).

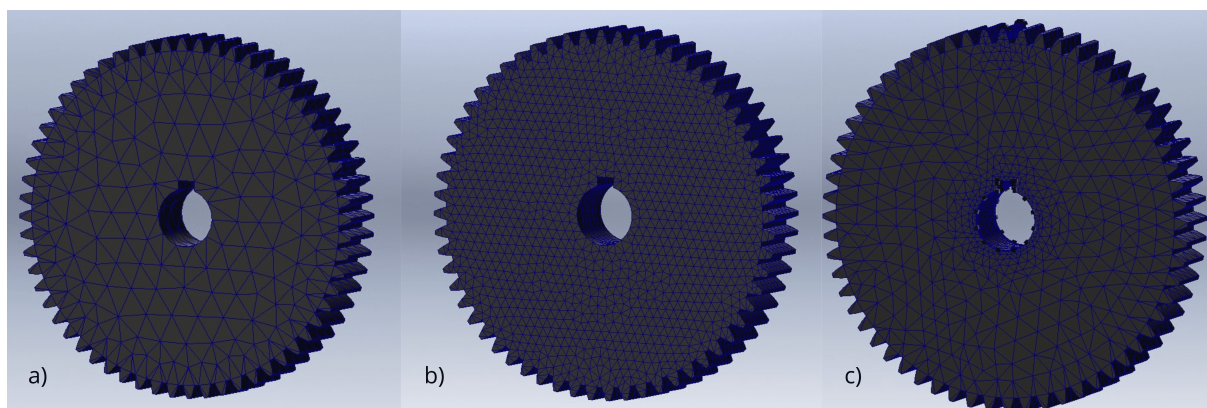
Em posse das informações citadas foi preciso estabelecer as cargas aplicadas à peça e onde essas cargas serão empregadas. Para isso, utilizou-se a modelagem de (G. NEELESH K. J., 2017) que detalha a maneira em que acontece o contato entre as ECDR's e onde essas cargas são efetuadas, no solidworks para que a simulação seja realizada é necessário inserir o valor dos carregamentos que serão calculados usando as equações 13 e 16, além disso é necessário simular a área de onde será feita o engrenamento e a angulação da aplicação da força, com o objetivo de simular o funcionamento do sistema.

Em específico para o *software Ansys* é necessário calcular as componentes de força, para que o vetor resultante seja o valor encontrado no contato entre as engrenagens, a decomposição é feita usando o ângulo de pressão do engrenamento.

O próximo passo é a criação da malha utilizada na simulação, essa malha foi escolhida de acordo com o tipo de superfície da peça, e o refinamento da malha é de crucial importância para a futura otimização topológica (BENDSOE, 2004), uma vez que quanto mais refinada for a malha, melhores serão os resultados da superfície resultante no final do processo.

No processo de criação da malha no *solidworks* e no *ansys* pode ser escolhida uma malha grosseira para o sistema por inteiro, é possível escolher uma malha totalmente refinada para toda a peça e uma última opção é escolher que o refinamento da malha só aconteça em regiões onde pode ser gerado concentradores de tensões.

Figura 11 – a) Malha grosseira b) Malha totalmente refinada c) Controle de malha aplicado



Fonte: Autor (2023)

Enfim, para a aplicação do MEF foi escolhido um processo de malha adaptativa que pode ser do tipo p ou h , esse passo é importante para garantir que durante a simulação estática não aconteça uma divergência de tensões durante a geração dos resultados, e dessa forma obtendo um resultado confiável.

3.4.1 Simulação estática

Depois da definição da melhor malha para o corpo analisado faz-se necessário iniciar simulação estática. Primeiramente, é preciso fazer o cálculo das solicitações para a aplicação escolhida, definir os pontos fixos da estrutura analisada e por fim definir o tipo de carregamento de entrada e adotar a área de contato entre os dentes para a aplicação dessas solicitações. nesse sentido definir corretamente o ângulo de aplicação da força é de extrema importância visando uma simulação de engrenamento entre duas engrenagens.

Logo após obter os resultados de simulação estática foi preciso analisar as plotagens de tensões e do fator de segurança associado à estrutura e a partir desse resultado pode-se definir se a otimização topológica é necessária. Para esse fim, [Norton \(2011\)](#) indica que o fator de segurança mínimo em uma estrutura projetada, em que não se conhece todos os dados do material, deve ser de 5.

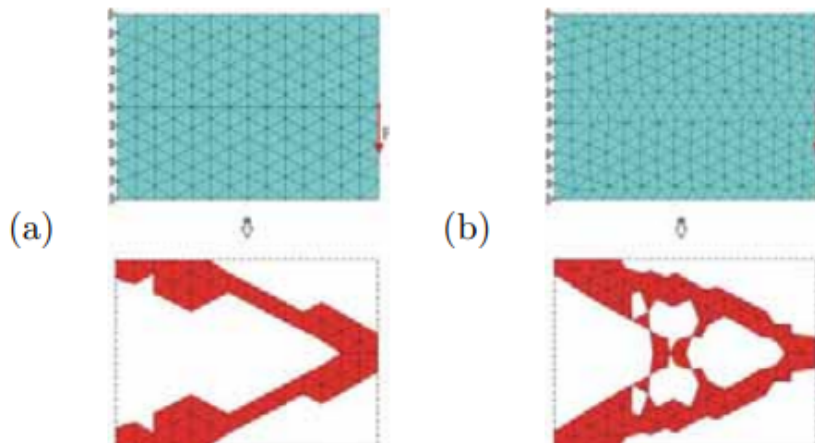
3.4.2 Otimização topológica

Para a realização topológica foi feita uma simplificação descrita por [Lisle et al. \(2017\)](#), a simplificação se baseia em aplicar a análise em apenas 3 dentes da engrenagem e não na engrenagem completa e conseqüentemente obtendo um tempo computacional menor e mesmo assim obtendo um resultado confiável, e para definição do design final é feito um padrão circular da geometria obtida.

Por fim, foi feito o estudo de topologia e para isso determinou-se as áreas preservadas e foi escolhido o método de minimização de massa, ou seja, o software irá reduzir ao máximo a massa do sistema e manter o coeficiente de segurança dentro do estabelecido. Além disso, para o caso analisado a simetria é essencial, então definir os planos de simetria para o estudo de projeto é importante para obter um resultado final aceitável. A aplicação de otimização topológica é um processo iterativo. O fluxograma da figura 13 mostra como é feito todo o ciclo de processo para que se chegue no resultado final.

Nesse sentido, a dependência da malha surge resultando em soluções finais distintas para diferentes discretizações. De maneira intuitiva, espera-se que uma malha de elementos finitos mais refinada conduza a uma topologia ótima mais nítida da estrutura. No entanto, em alguns casos, malhas mais refinadas podem gerar estruturas complexas, com topologias mais detalhadas e qualitativamente diferentes em comparação com modelos resultantes de malhas mais grosseiras, como ilustrado na figura 12.

Figura 12 – Resultados diferentes após a utilização de malhas diferentes.

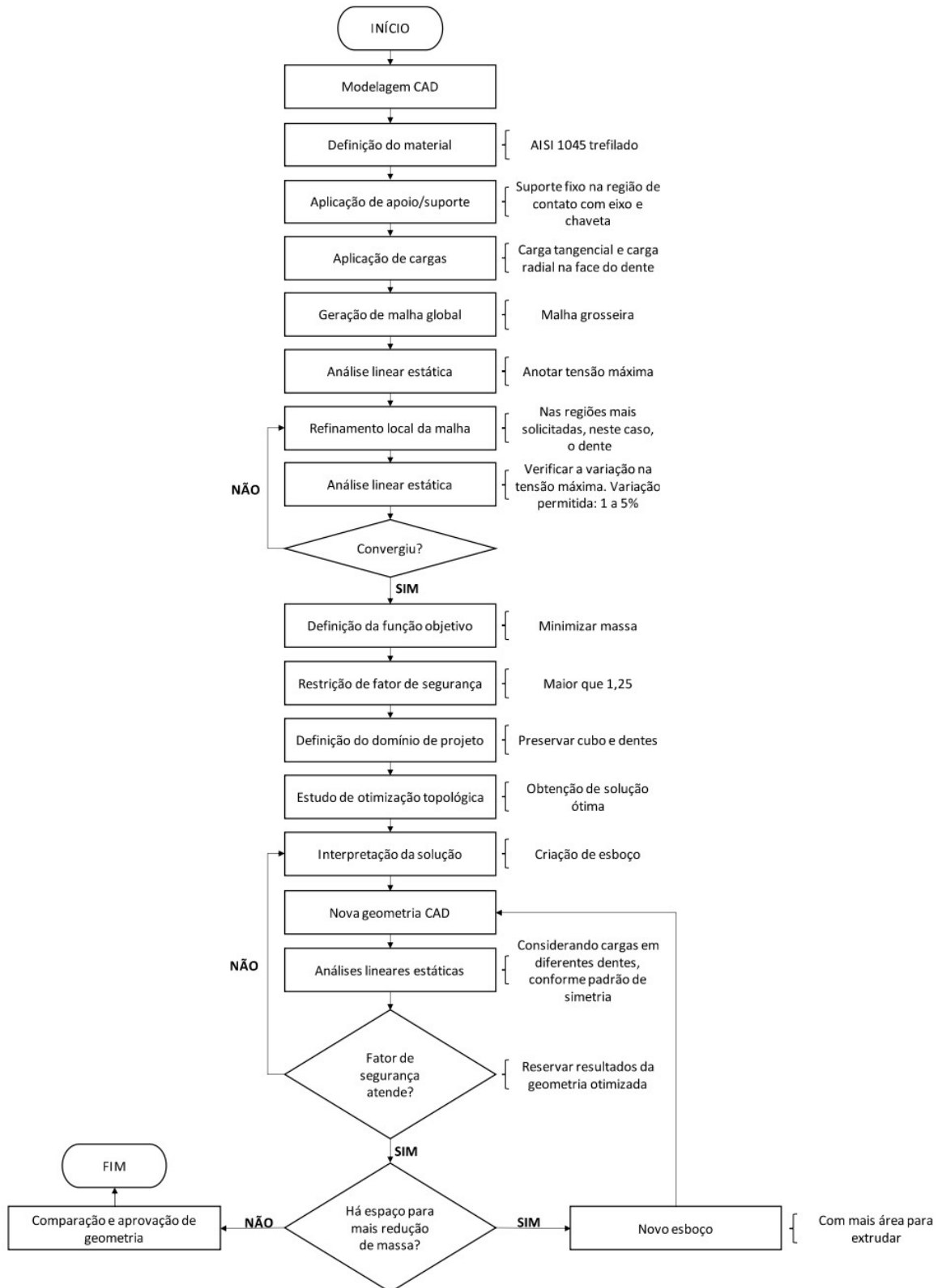


Fonte: (COUTINHO, 2006).

A última etapa é validar o processo de retirada de massa, realizando-se uma nova simulação estática com a nova geometria obtida e então pode-se observar as novas tensões e os fatores de segurança associados às regiões da estrutura estudada, caso não atenda às especificações a otimização é refeita com novos parâmetros.

De acordo com Coutinho (2006) o método de otimização topológica tem viabilizado diversas aplicações industriais; no entanto, enfrenta desafios relacionados à instabilidade numérica. Em linhas gerais, esses problemas numéricos podem ser categorizados em três grupos: dependência da malha, instabilidade de tabuleiro e mínimos locais, conforme discutido por Eschenauer (2001) e Bendsøe (1989).

Figura 13 – Fluxograma.

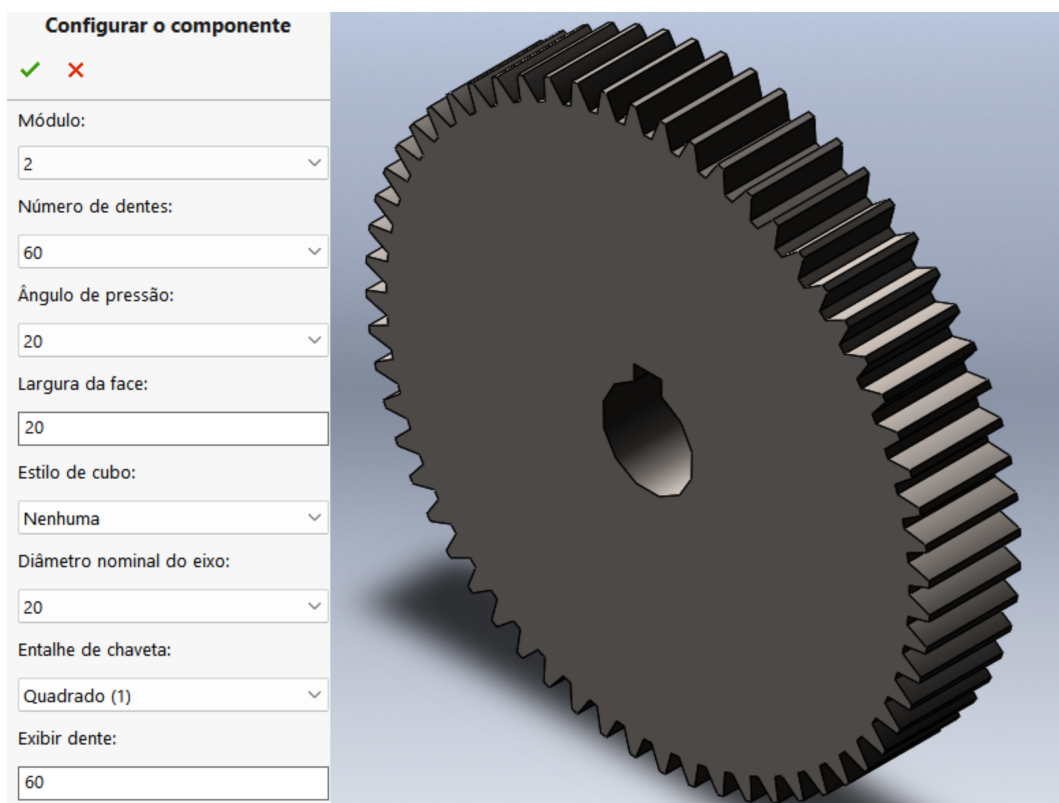


Fonte: (CASTRO, 2023).

4 Resultados e discussão

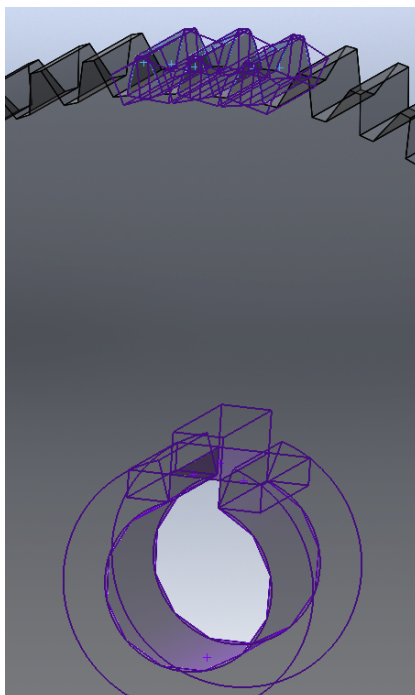
Primeiramente, utilizando a ferramenta *toolbox* do *Solidworks* foi criada uma ECDR, nesse utilitário é possível apenas inserir os parâmetros desejados e é gerada automaticamente uma engrenagem com geometria simples e padronizada de acordo com as normas vigentes, é válido destacar que como o *ansys* não apresenta essa ferramenta de geração automática, o modelo gerado será utilizado em ambos os *softwares*. No sistema escolhido foi escolhido um eixo de acoplamento de 20mm de diâmetro com um rasgo de chaveta, além de usar a norma ISO 53:1998 (GEARS, 2021) para determinação de todos os parâmetros necessários para criação da modelagem CAD. A modelagem realizada pode ser observada na Figura 14.

Figura 14 – Parâmetros e modelo usados.



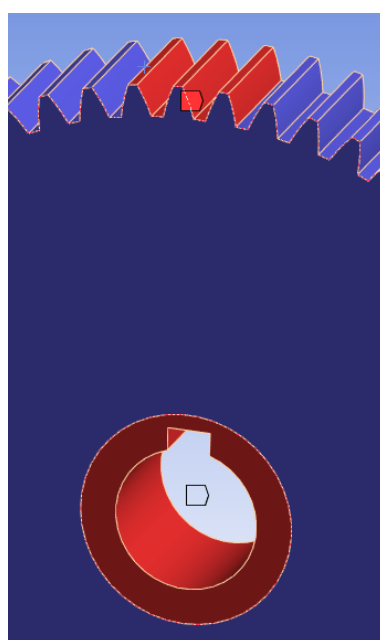
Fonte: Autor (2023)

Definido o modelo de estudo faz-se necessário definir as áreas de *design* e de não *design*, para isso foi definido que as áreas de fixação da estrutura e as áreas de aplicação dos carregamentos devem ser sempre preservadas. Na figura 15 pode-se observar e roxo as partes que não serão otimizadas para que o funcionamento do mecanismo não seja afetado.

Figura 15 – Áreas preservadas no *solidworks*.

Fonte: Autor (2023).

Nesse caso, é válido mostrar que no *ansys* não se faz necessário definir uma profundidade para a área preservada, o próprio software entende as áreas selecionadas como corpos que precisam de massa durante o processo de otimização. As áreas preservadas para esse software podem ser visualizadas na Figura 16.

Figura 16 – Áreas preservadas no *ansys*.

Fonte: Autor (2023).

Em posse das informações citadas foi preciso estabelecer as cargas aplicadas à peça e onde essas cargas serão empregadas. Para isso, utilizou-se a modelagem de [G. Neelesh K. J. \(2017\)](#) que detalha a maneira em que acontece o contato entre as ECDR's e onde essas cargas são efetuadas, o valor referente ao carregamento depende da sua aplicação, o sistema escolhido trabalha com uma velocidade angular de 4200RPM em um motor de 2900W de potência, o cálculo dos carregamentos estão descritos nas equações 23 e 24.

$$T_p = \frac{P}{\omega_p} = \frac{2900W}{4200RPM} = 41,42N.m \quad (23)$$

$$W_t = \frac{2T_p}{d_p} = \frac{2 \cdot (41,42N.m)}{125mm} = 662,72N \quad (24)$$

Para o *ansys* é necessário realizar uma decomposição de forças para gerar o carregamento resultante desejado, essa decomposição pode ser vista nas equações 25 e 26.

$$W_{tx} = W_t \cdot \cos\theta = 662,72 \cdot \cos(20^\circ) = 622,75N \quad (25)$$

$$W_{ty} = W_t \cdot \sin\theta = 662,72 \cdot \sin(20^\circ) = 226,66N \quad (26)$$

Para realização da simulação estática foi preciso determinar de que material é composto o componente analisado, a partir da tabela 1 e a ISO 53:1998 ([GEARS, 2021](#)) o material escolhido foi o aço treilado AISI 1045 que apresenta uma alta usinabilidade e é normalmente utilizado para sistemas de alta potência. as propriedades utilizadas estão dispostas na tabela 2

Tabela 2 – Propriedades do material utilizado

Propriedade	Valor
Módulo elástico	205 Gpa
Coefficiente de Poisson	0,29
Módulo de cisalhamento	80 Gpa
Resistência a tração	625 Mpa
Limite de escoamento	530 Mpa

Fonte: Autor (2023).

Para que a simulação por MEF seja executada é apropriado aplicar as conexões da engrenagem, o tipo de acoplamento escolhido foi o de geometria fixa, refere-se a uma técnica que permite fixar as faces ou arestas de um componente em relação a outras faces, arestas ou planos de referência no ambiente de montagem. Isso é importante para criar

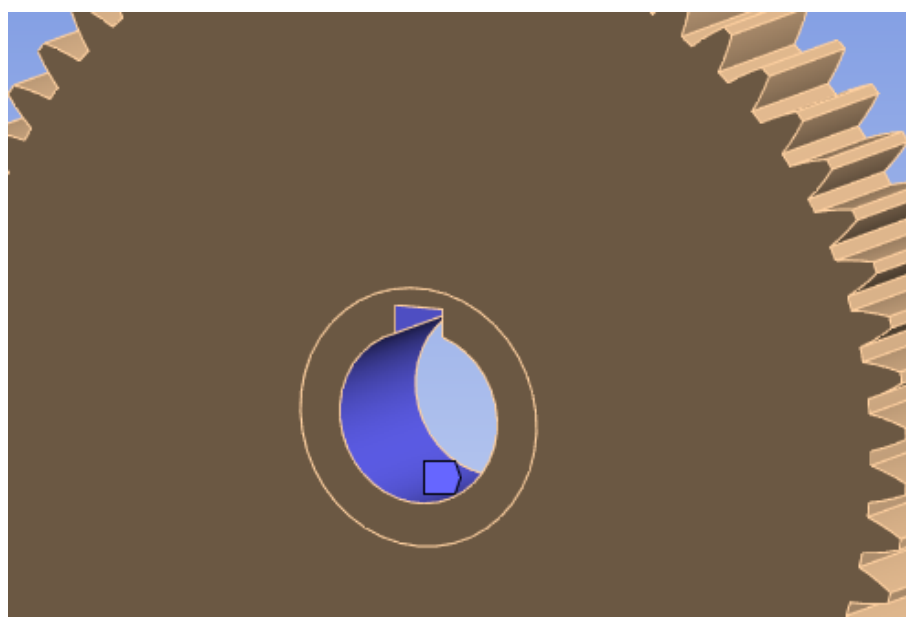
relações de fixação em um conjunto, garantindo que as peças mantenham posições específicas em relação umas às outras. Isso é particularmente útil quando se deseja restringir o movimento relativo entre componentes, além de não ser necessário fazer referência à geometria. O local escolhido como fixo pode ser visto em verde na Figura 17 e em azul na Figura 18.

Figura 17 – Áreas fixadas *solidworks*.



Fonte: Autor (2023).

Figura 18 – Áreas fixadas *ansys*.

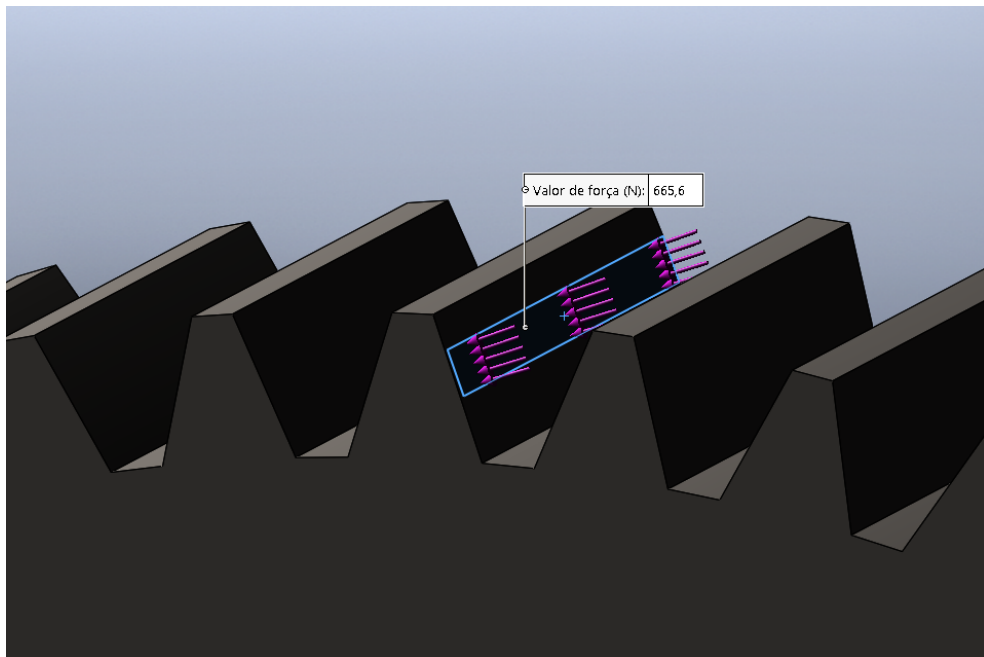


Fonte: Autor (2023).

Outro fator importante para se obter bons resultados na simulação é determinar o tipo do carregamento e onde ele será aplicado na estrutura. Escolher o tipo de car-

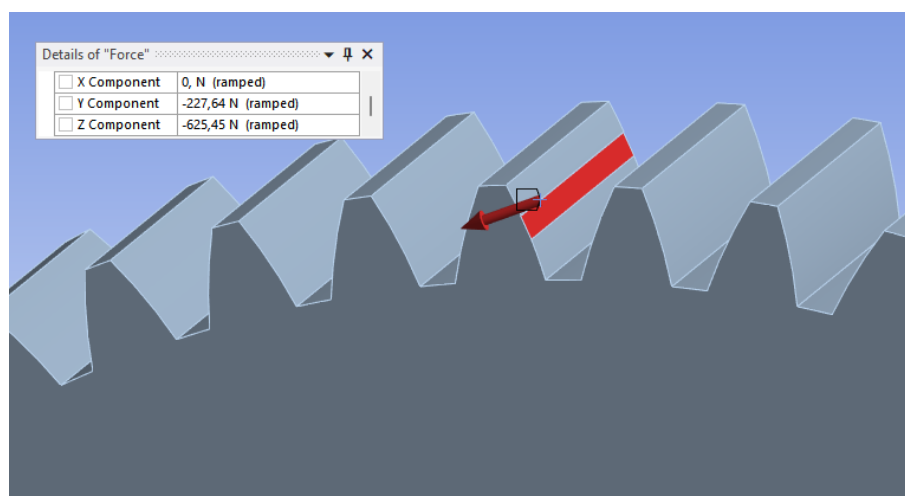
regamento correto em ambos os softwares é uma etapa crítica no processo de projeto e simulação, pois influencia a precisão, segurança, eficiência e conformidade do projeto com os padrões da norma ISO 53:1998 (GEARS, 2021). As áreas para aplicação das solicitações e os tipos de carregamentos são determinados por G. Neelesh K. J. (2017), nas Figuras 19 e 20 pode-se observar os tipos, valores e locais onde foram aplicados as forças.

Figura 19 – Valor e área de aplicação da força no *solidworks*.



Fonte: Autor (2023).

Figura 20 – Valor e área de aplicação da força no *ansys*.



Fonte: Autor (2023).

O próximo passo é a criação da malha utilizada na simulação, essa malha foi escolhida de acordo com o tipo de superfície da peça, e o refinamento da malha é crucial

para a futura otimização topológica (BENDSOE, 2004), o refinamento de malha é realizado para melhorar a precisão da simulação, reduzindo o tamanho dos elementos finitos onde necessário. Isso é feito usando a ferramenta "Refinamento de Malha" para selecionar regiões críticas do modelo, como áreas de alta tensão ou deslocamento, e aplicar critérios de refinamento específicos, como tamanho máximo do elemento ou taxa de crescimento.

O refinamento de malha aumenta a resolução local do modelo, permitindo análises mais precisas em áreas de interesse, embora possa aumentar o tempo de processamento. O equilíbrio entre precisão e eficiência deve ser considerado ao ajustar os parâmetros de refinamento da malha. Nas figuras 21 e 22 pode ser observado a malha obtida depois do refinamento aplicado.

Figura 21 – Controle e refinamento de malha no *solidworks*.

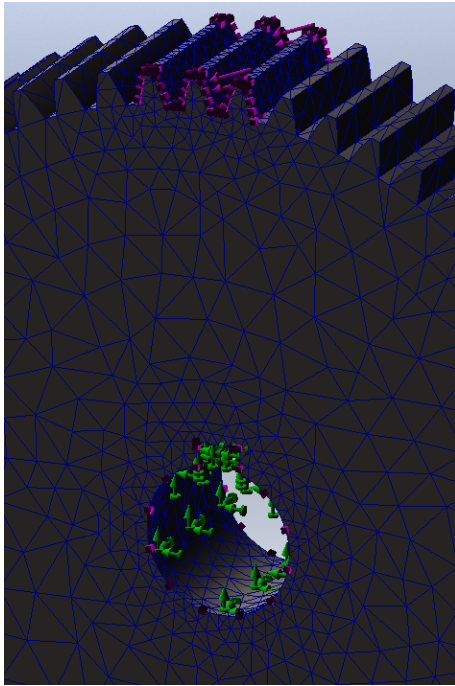
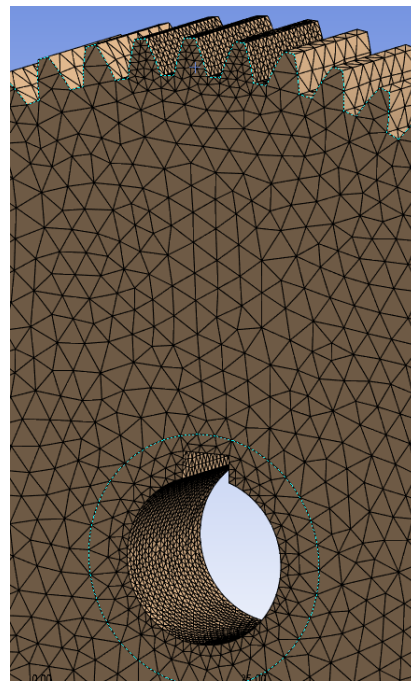
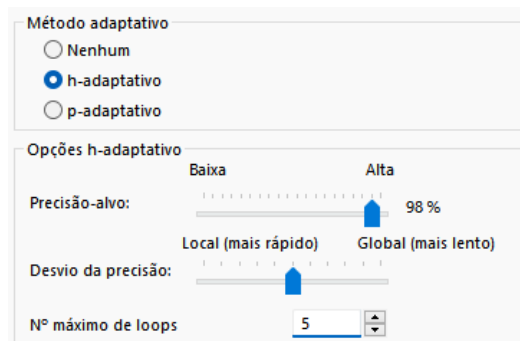


Figura 22 – Controle e refinamento de malha no *ansys*.



Fonte: Autor (2023).

É importante ressaltar que em ambos os *softwares* a quantidade de nós e elementos gerados na malha foi aproximadamente o mesmo, esse fator é relevante pois o tempo de simulação e o resultado do estudo de topologia dependem diretamente da quantidade de elementos discretizados. Como o processo de otimização depende diretamente da malha escolhida, será escolhido o maior refinamento possível e uma convergência para a malha do tipo h para o *solidworks*, o conceito do método h é utilizar os elementos menores em regiões com muitos erros. Após executar o estudo e estimar os erros, o software refina automaticamente a malha para melhorar os resultados até chegar em uma precisão definida como 98% em até 5 iterações, na figura 23 pode-se observar a malha e os valores para realização da convergência.

Figura 23 – Malha h-adaptativa *solidworks*.

Fonte: Autor(2023).

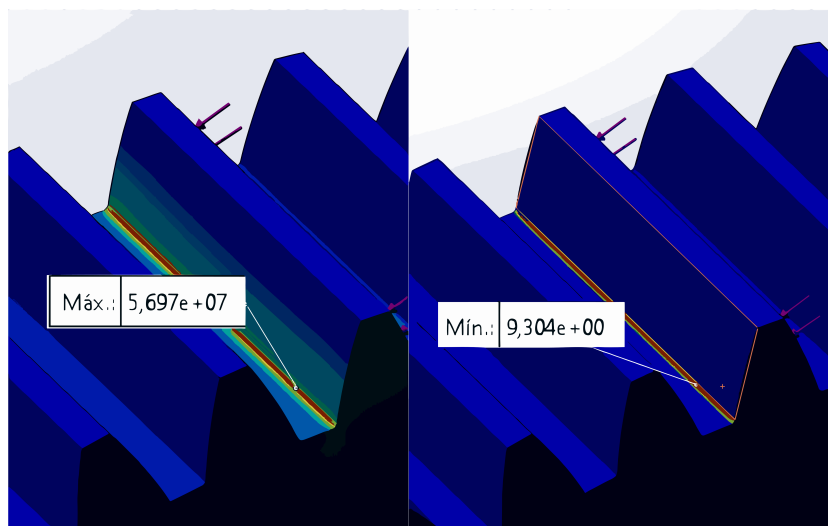
No *ansys* a malha adaptativa funciona de maneira diferente, nesse caso foi escolhida uma porcentagem de erro de 2% e não se pode escolher o método de malha adaptativa, na figura 24

Figura 24 – Malha adaptativa *ansys*.

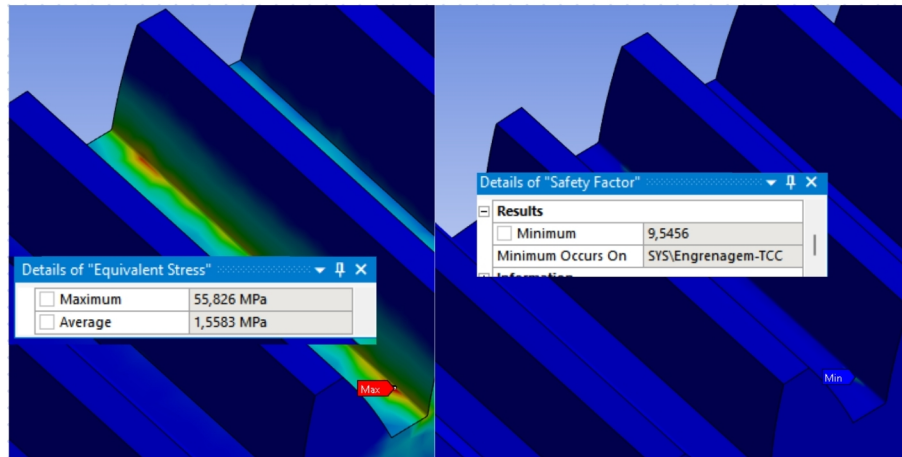
Definition	
Type	Maximum
Allowable Change	2, %

Fonte: Autor (2023).

Logo após a criação da malha iniciou-se a análise estática e observou-se a plotagem de tensões e o fator de segurança, nas imagens 25 e 26 pôde-se observar que a tensão máxima não atinge a tensão de escoamento do material e que o fator de segurança obtido é de 7. Nesse sentido, a otimização topológica pode trazer uma redução da massa sem comprometer o funcionamento do sistema.

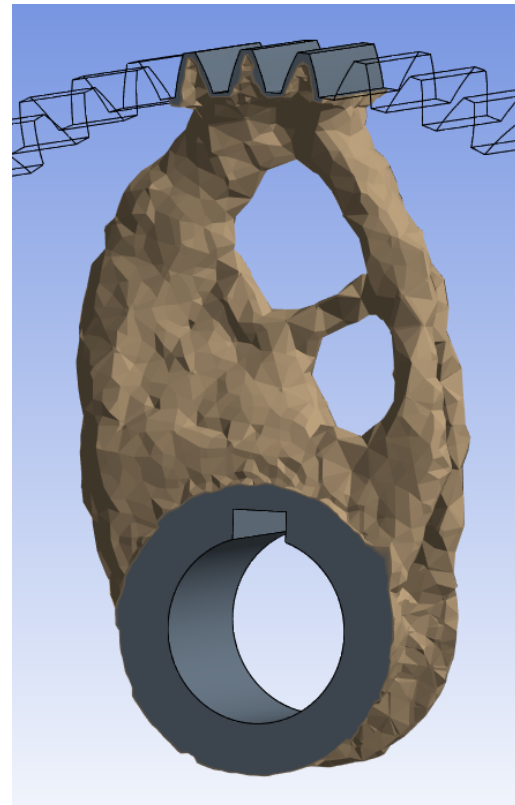
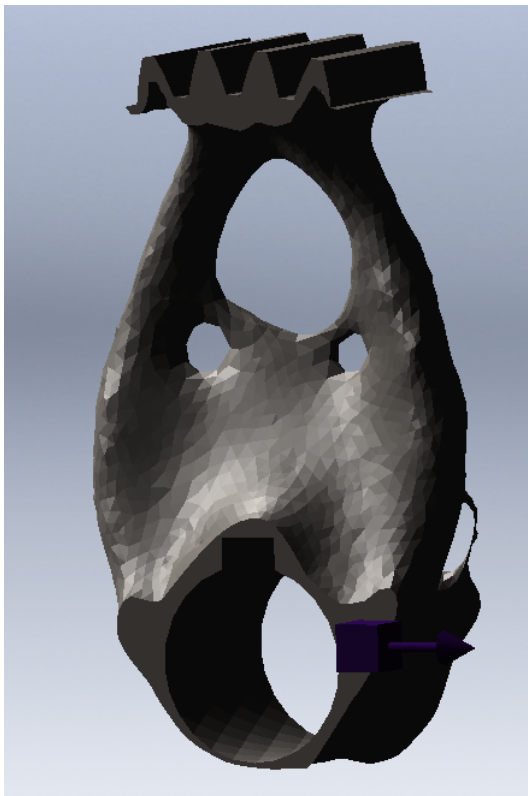
Figura 25 – Tensão máxima e fator de segurança no *solidworks*.

Fonte: Autor (2023).

Figura 26 – Tensão máxima e fator de segurança no *Ansys*.

Fonte: Autor (2023).

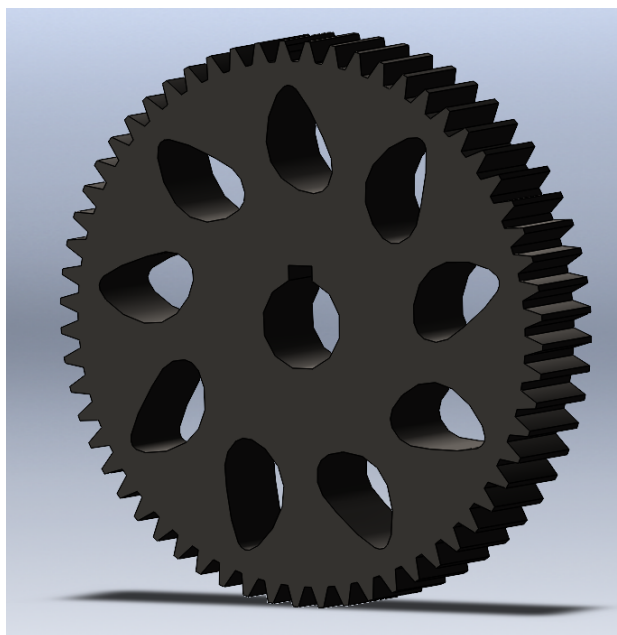
Para melhorar a distribuição de material da peça foi escolhido o parâmetro de minimização de massa, ou seja, obter a menor massa possível com a restrição do fator de segurança maior que 5, depois de definidos os planos de simetria necessários para a estrutura, foi realizado o processo de estudo de topologia, o resultado é mostrado nas figuras 27 e 28.

Figura 27 – Otimização topológica no *solidworks*.

Fonte: Autor (2023).

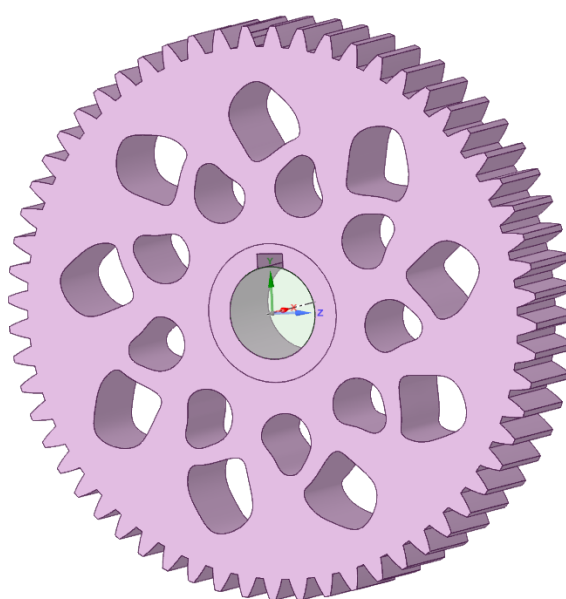
Para obter o modelo final da peça é necessário exportar o modelo otimizado e a partir dele definir um modelo funcional de engrenagem, esse modelo foi criado no próprio *software* em que a otimização foi feita aplicando um processo de simetria circular, esse padrão circular foi feito criando um esboço em cima da peça otimizada e replicando até obter uma simetria, como pode ser visto nas figuras 29 e 30.

Figura 29 – Peça gerada a partir da otimização do *solidworks*.



Fonte: Autor (2023).

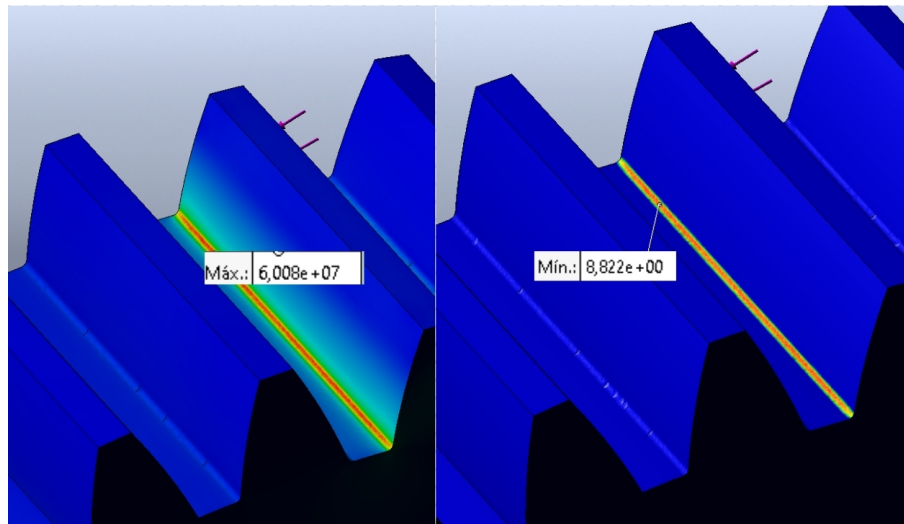
Figura 30 – Peça gerada a partir da otimização do *ansys*.



Fonte: Autor (2023).

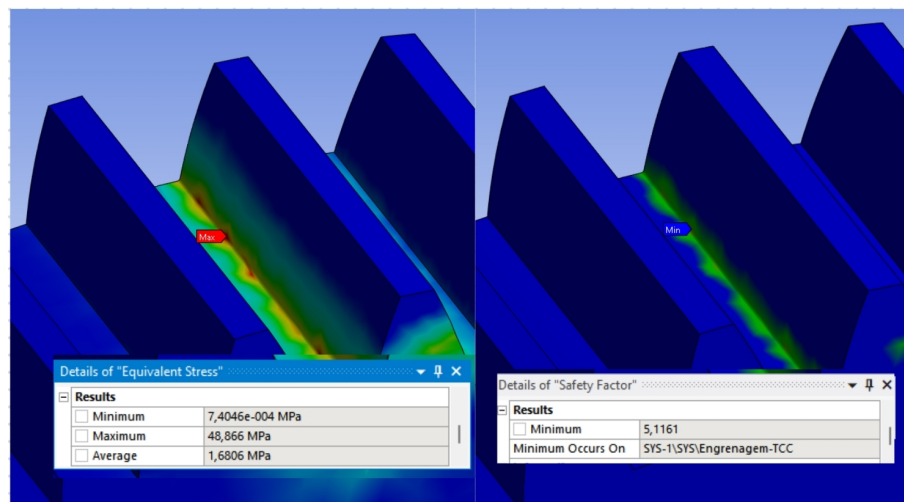
Em posse do modelo otimizado é importante realizar a validação da nova geometria, para isso foi realizada uma nova simulação estática com os mesmos valores aplicados à estrutura anterior, essa validação foi realizada observando se as tensões máximas e o fator de segurança estão dentro do limite desejado, os resultados da validação podem ser observados nas figuras 31 e 32.

Figura 31 – Tensões e FOS na peça otimizada no *solidworks*.



Fonte: Autor (2023).

Figura 32 – Tensões e FOS na peça otimizada no *ansys*.



Fonte: Autor (2023).

Após ser aprovado no processo de validação observou-se que a massa da estrutura foi reduzida em 30% e a resistência da peça diminuiu em 25% no *ansys* e no *solidworks* a massa foi reduzida em 23,5% e a resistência foi reduzida em 5%, o fator de segurança foi levemente reduzido nos dois *softwares*. Vê-se também que agora a nova geometria é orgânica e complexa para os métodos de fabricação mais comuns. Nessa lógica, a manufatura

aditiva é uma ótima opção para construção da peça, uma vez que é indicada para esses tipos de geometria.

O caminho a ser tomado para otimizar um peça deve sempre levar em consideração onde ela será aplicada, priorizando a aplicação da peça, por exemplo, o modelo de engrenagem utilizado tem uma carência muito grande de simetria, então essa característica deve ser priorizada no processo, assim como os locais onde vão ser feitas as retiradas de massa e os locais que não devem ser modificados, tudo isso depende da aplicação e da localização da peça.

É fundamental destacar que a geometria obtida nesse processo pode variar de acordo com a aplicação desejada ou até o design requerido, outros processos de fabricação podem ser aplicados deixando as superfícies mais poligonais com o objetivo de utilizar alguns processos e um maquinário mais econômico, a otimização topológica mostra de onde a massa de uma peça pode ser retirada, o design final é uma opção do projetista.

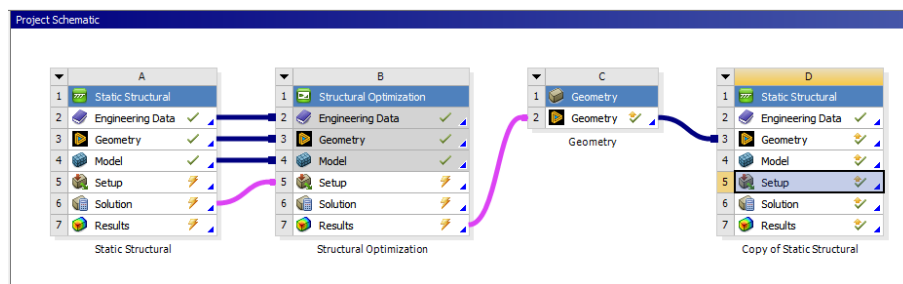
É importante, também, saber quais peças podem ou devem ser otimizadas em um sistema de grande porte, visto que a análise de fadiga e vibração também precisa ser realizada depois da obtenção da geometria final, isso pode ser aplicado em um projeto futuro buscando o desenvolvimento de um design generativo com o auxílio da otimização topológica.

4.1 Análise comparativa

4.1.1 Flexibilidade na entrada

A flexibilidade de entrada é fundamental em um software de simulação, pois permite ajustar os parâmetros e variáveis de entrada de acordo com as necessidades específicas. Isso possibilita simular uma ampla variedade de cenários e condições, adaptando-se às mudanças ao longo do tempo. Além disso, a flexibilidade de entrada permite a personalização, experimentação, validação e verificação do modelo de simulação, garantindo resultados mais precisos e confiáveis. Em resumo, a flexibilidade de entrada é essencial para um software de simulação, pois amplia sua aplicabilidade e torna-o uma ferramenta poderosa para análise e tomada de decisões.

Nesse sentido, o *ansys* apresenta um controle muito maior nos parâmetros de entrada, além de apresentar um aba, que pode ser vista na figura 33 em que é possível controlar e relacionar as etapas que serão realizadas, além disso, a diversidade de métodos de controle de malha é um destaque muito importante para a otimização de topologia. Isso não significa que o *solidworks* não apresente uma grande variedade de métodos de entrada e controle de malha, mesmo em menor quantidade e com um controle de processo ruim, este fica atrás nesse quesito.

Figura 33 – Tela do esquema de projeto do *ansys*.

Fonte: Autor (2023).

4.1.2 Facilidade de aprendizagem

A facilidade de aprendizagem e uso de um software de simulação é de extrema importância, pois permite que os usuários possam rapidamente compreender e operar a ferramenta de forma eficiente. Isso possibilita que eles se concentrem no objetivo principal da simulação, seja ele aprender conceitos complexos, realizar testes ou tomar decisões estratégicas. Além disso, a facilidade de aprendizagem e uso também contribui para reduzir erros e aumentar a produtividade dos usuários, tornando a experiência mais acessível e agradável.

Nessa lógica, foi observado que o *solidworks* apresenta uma interface muito mais simples e intuitiva, além de integrar no mesmo software todas as ferramentas desde a modelagem até a otimização topológica, isso facilita a transição de um local para o outro aumentando a produtividade, ou seja, o tempo de *software* dedicado a simulação é muito maior que no *ansys*.

4.1.3 Velocidade de execução

A velocidade de execução em um software de simulação desempenha um papel crucial na obtenção de resultados. Quanto mais rápida for a execução, mais eficiente e produtivo se torna o processo de simulação. Isso permite que os usuários realizem experimentos mais rapidamente, analisem os resultados em tempo hábil e tomem decisões informadas com base em cenários simulados. Além disso, a velocidade de execução também é essencial para simulações em tempo real, como em jogos ou treinamentos virtuais, onde a resposta imediata é fundamental para uma experiência imersiva e eficaz.

Em vista disso o *ansys* terminou o processo completo de simulação estática e estudo de topologia em 23 minutos, enquanto o *solidworks* levou 40 minutos para o término de todo esse processo. Então quando se trata de velocidade de processamento o *ansys* leva a melhor.

4.1.4 Geração de gráficos

A geração de gráficos em um software de simulação desempenha um papel fundamental ao fornecer uma representação visual dos dados e resultados obtidos. Esses gráficos permitem uma análise mais fácil e rápida das informações, facilitando a identificação de tendências, padrões e *insights* importantes. Além disso, os gráficos facilitam a comunicação dos resultados da simulação, tornando-os mais compreensíveis e acessíveis para diferentes públicos. Eles ajudam os usuários a visualizar e interpretar os dados de forma mais eficaz, auxiliando na tomada de decisões informadas e na compreensão de complexidades em um contexto visualmente atraente.

Nesse quesito, os dois *softwares* apresentam todos os gráficos possíveis, desde convergência da simulação realizada até os gráficos de solicitações e da malha, os gráficos apresentados são atualizados em tempo real, o que permite visualizar se a simulação está caminhando para uma convergência ou não.

4.1.5 Qualidade da documentação

A qualidade da documentação de um software de simulação é de vital importância, pois ela desempenha um papel fundamental na compreensão e utilização eficiente do software. Uma documentação bem elaborada e completa permite aos usuários entenderem o propósito do software, sua funcionalidade e como utilizá-lo corretamente. Além disso, a documentação de qualidade também ajuda na manutenção e atualização do software, pois fornece informações detalhadas sobre sua arquitetura, algoritmos e interfaces. Em resumo, a qualidade da documentação garante que os usuários possam utilizar o software de simulação de forma adequada, reduzindo erros e maximizando os benefícios obtidos com sua utilização.

A qualidade de ambos os sistemas é impecável, com comandos para ajudar a buscar como utilizar os comandos e detalhamentos de todos os algoritmos aplicados aos métodos de elementos finitos, além dos tipos de algoritmos usados na otimização topológica e no controle de malha.

5 Conclusão

A otimização estrutural é uma ferramenta fundamental para a Engenharia mecânica, permitindo criar componentes e sistemas mais leves, resistentes e econômicos, além de reduzir custos e tempo de produção. O processo de otimização pode ser alcançado por meio de diversas técnicas, como a Engenharia assistida por computador, simulação por método de elementos finitos e a otimização topológica. Na tabela 3 pode-se observar a comparação entre os dois *softwares* analisados nessa pesquisa, a partir desta tabela pode-se concluir que para a execução da simulação e da otimização de topologia o *ansys* tem um melhor desempenho permitindo uma maior controle de processo durante toda a análise estática e estudo de topologia, entretante o *solidworks* por apresentar uma maior facilidade de uso e uma interface mais amigável e intuitiva, é mais indicado para realizar o processo de modelagem e ajustes finais, na pós simulação.

Tabela 3 – Tabela comparativa.

Parâmetros	Classificação	
	<i>ansys</i>	<i>solidworks</i>
Flexibilidade de entrada	Alta	Mediana
Facilidade de aprendizagem e uso	Baixa	Alta
Velocidade de execução	Alta	Baixa
Geração de gráficos	Alta qualidade	Alta qualidade
Qualidade da documentação	Alta qualidade	Alta qualidade

Fonte: Autor(2023).

O estudo de caso apresentado nesta pesquisa, que envolve a otimização de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos para transmissão de potência, atingiu os resultados desejados diminuindo em até 30% a massa da peça final e conseqüentemente a quantidade de matéria prima necessária para a sua produção, este estudo de caso ilustra a aplicação prática dessas técnicas e destaca a importância da modelagem computacional para validar o processo de otimização e determinar o processo de fabricação mais adequado. No contexto de um mercado cada vez mais competitivo, a otimização estrutural é uma ferramenta essencial para garantir a eficiência e segurança dos sistemas mecânicos, ao mesmo tempo em que se busca reduzir custos e impactos ambientais.

Referências

- AHMAD, A.; BICI, M.; CAMPANA, F. Guidelines for topology optimization as concept design tool and their application for the mechanical design of the inner frame to support an ancient bronze statue. **Applied Sciences**, 06 2021.
- BANKS, J. Selecting simulation software. **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, 1991.
- BATISTA; DIAS; LEBRUN; FLOUR, L.; INGLEBERT. Contact fatigue of automotive gears: evolution and effects of residual stresses introduced by surface treatments. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 23, n. 3, p. 217–228, 2000. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1460-2695.2000.00268.x>>.
- BENDSOE, O. S. M. **Topology Optimization**. [S.l.]: Springer, 2004. v. 2^a edição.
- BENDSØE, M. P. Optimal shape design as a material distribution problem. **Structural Optimization**, v. 1, 1989.
- CASTRO, E. S. F. D. OtimizaÇÃo topolÓgica de engrenagem cilÍndrica de dentes retos. **UTFPR**, 2023.
- COUTINHO, K. D. Método de otimização topológica em estruturas tridimensionais. **UFRN**, 2006.
- DHATT GILBERT TOUZOT, E. L. G. **Finite Element Method**. [S.l.]: WILEY-Iste, 2012. volume 1.
- ESCHENAUER, O. Topology optimization of continuum structures. applied mechanic review. **APPLIED MECHANICS REVIEWS**, ASME, v. 54, 2001.
- FILHO, A. A. **Elementos finitos, a base da tecnologia CAE**. [S.l.]: Saraiva, 2009. volume 1.
- G. NEELESH K. J., R. L. K. **Advanced Gear Manufacturing and Finishing**. [S.l.]: Matthew Deans, 2017. volume 1.
- GARDAN, A. S. N. Topological optimization of internal patterns and support in additive manufacturing. **Journal of manufacturing systems**, ELSEVIER, v. 37, 2015.
- GEARS, I. . Cylindrical gears for general and heavy engineering — standard basic rack tooth profile. **International Organization for Standardization**, ISO, v. 2, 2021.
- KU, P. M. Gear failure modes—importance of lubrication and mechanics. **A S L E Transactions**, Taylor Francis, v. 19, n. 3, p. 239–249, 1976. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/05698197608982799>>.
- LABANOWSKI, A. Análise comparativa de métodos de otimização topológica em elasticidade 2d e 3d. 2004.

LEE, A. W. L.; CHUNG, S. Y.; LOW, J. S. C.; LU, W. F. Beyond light weighting, adapting topology optimisation to support ecodesign. **Procedia CIRP**, v. 116, p. 366–371, 2023. ISSN 2212-8271. 30th CIRP Life Cycle Engineering Conference. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827123000392>>.

LISLE, T. J.; SHAW, B. A.; FRAZER, R. C. External spur gear root bending stress: A comparison of iso 6336:2006, agma 2101-d04, ansys finite element analysis and strain gauge techniques. **Mechanism and Machine Theory**, v. 111, p. 1–9, 2017. ISSN 0094-114X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X16303159>>.

LU, T.; GUPTA, A.; JAYAL, A.; BADURDEEN, F.; FENG, S.; JR, O.; JAWAHIR, I. A framework of product and process metrics for sustainable manufacturing. In: _____. [S.l.: s.n.], 2011. v. 7, p. 333–338. ISBN 978-3-642-20182-0.

MUNJIZA EARL E. KNIGHT, E. R. A. A. **Computational Mechanics of Discontinua**. [S.l.]: Wiley, 2012.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas**. [S.l.]: bookman, 2011. v. 4^a edição.

OLIVIO, A. **Engrenagens cilíndricas de dentes retos e engrenagens cilíndricas helicoidais**. [S.l.]: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2019.

SALDANHA, L. **Otimização Topológica e a Manufatura Aditiva**. 2021. Disponível em: <<https://www.manufaturadigital.com/otimizacao-topologica-e-a-manufatura-aditiva/>>.

SILVA, T. M. E. C. N. Otimização aplicada ao projeto de sistemas mecânicos. **XI Seminário de Elementos Finitos e Encontro de Usuários do Software ANSYS**, 2001.

VIEGAS, F. S. Otimização topológica aplicada ao projeto de estruturas tradicionais e estruturas com gradação funcional sujeitas a restrição de tensão. 2006.

WONG, K. V.; HERNANDEZ, A. A review of additive manufacturing. **International Scholarly Research Network**, 2012.

WU OLE SIGMUND, J. P. G. J. Topology optimization of multi-scale structures: a review. **Struct Multidisc Optim**, SciELO Brasil, v. 63, 2021.