

ESTUDO COMPARATIVO DA ANÁLISE DE TENSÃO ENTRE ENGRENAGENS DE DENTES RETOS E ENGRENAGENS HELICOIDAIS

Hada Loanda Costa e Sousa (UniFacid Wyden) Email: hadaloanda@gmail.com

José da Guia Ferreira Morais (UniFacid Wyden) Email: josedaguiamorais@gmail.com

José Weliton Nogueira Junior (UniFacid Wyden) Email: jose.nogueira@professores.facid.edu.br

Resumo: O presente estudo tem como objetivo realizar uma comparação, por meio de simulação computacional através do Software Autodesk Inventor, com escopo voltado para a análise de tensão entre dois tipos diferentes de engrenagem (engrenagem de dentes retos e engrenagem helicoidal) ambas possuindo a mesma medida, mesma quantidade de dentes e com uma mesma aplicação tendo como principal finalidade comprovar, por meio do método de elementos finitos, qual das engrenagens possui uma melhor resistência a tensão. No projeto, o local de aplicação de ambas as engrenagens foi no diferencial de um caminhão de potência máxima 110 kW, tendo como força atuante de 20,9 kN (ou 20900,000N), tal força atuará apenas em 10 dentes em ambas as engrenagens. Após aplicada a força foi possível observar por meio de um relatório a forma como ela atua nos dentes de ambas as engrenagens, a deformação que pode ser causada devido a força utilizada, o esforço máximo em que ambas possam ser submetidas e as tensões dos planos.

Palavras-chave: Análise de tensão, método de elementos finitos, engrenagens.

COMPARATIVE STUDY OF STRESS ANALYSIS BETWEEN STRAIGHT TOOTH GEARS AND HELICAL GEARS

Abstract: The present study aims to carry out a comparison, through computer simulation through the Autodesk Inventor Software, with a scope focused on the analysis of tension between two different types of gear (straight teeth gear and helical gear) both having the same measurement, same number of teeth and with the same application, having as main objective to prove, through the finite element method, which of the gears has a better resistance to tension. In the project, the place of application of both gears was in the differential of a truck with a maximum power of 110 kW, with an acting force of 20.9 kN (or 20900,000N), such force will only act on 10 teeth in both gears. After applying the force, it was possible to observe through a report the way it acts on the teeth of both gears, the deformation that can be caused due to the force used, the maximum effort in which both can be subjected and the tensions of the planes.

Keywords: Tensions analysis, finite element method, gears.

1 INTRODUÇÃO

Conceitualmente é sabido que as engrenagens são dispositivos mecânicos compostos muito utilizados por diversas máquinas e equipamentos industriais, sendo tal ferramenta constituída por rodas dentadas, com vários modelos e opções disponíveis no mercado. Neste contexto, depreende-se que detém como principal propósito transmitir potência para uma determinada máquina através da ligação entre eixos, promovendo, assim, velocidade de rotação e torque a esse processo.

Neste contexto, consoando exposto por Franceschi e Antonello (2014), as engrenagens, muitas vezes, são usadas quando se deseja variar o número de rotações e/ou sentido da rotação

de um eixo para outro. A transmissão de movimento tem, normalmente, como finalidade aproveitar o máximo de potência gerada em trabalho mecânico útil.

Ainda de acordo com os autores supracitados, o movimento de rotação entre as engrenagens ocorre quando elas estão engrenadas, ou seja, em contato por meio de seus dentes, gerando atrito e assim permitindo que haja rotação. Transmitir movimento rotativo de um eixo para outro ocorre em quase todas as máquinas e dispositivos imagináveis para resolver problemas de transporte, propulsão, altura e movimento.

As engrenagens de dentes retos são um dos tipos mais comuns de engrenagens usadas em máquinas e equipamentos mecânicos. Segundo Budynas e Nisbett (2016), de todos os tipos, a engrenagem cilíndrica de dentes retos é a mais simples e, por essa razão, utilizada para desenvolver as relações cinemáticas primárias na forma de dente. Possuem dentes paralelos ao eixo de rotação e são utilizadas para transferir o torque e a potência entre eixos. Foram projetadas para transmitir um movimento de alta rotação com uma maior eficiência, entretanto, produzem um ruído significativo durante a operação. A força nos dentes das engrenagens retas é distribuída apenas em uma pequena área, o que pode levar a um desgaste prematuro dos dentes e, conseqüentemente, a falha da engrenagem. Além das inúmeras possibilidades de aplicação da engrenagem cilíndrica de dentes retos, outra vantagem apresentada pela mesma é que a pressão nos dentes dessa engrenagem se mantém constante, o que auxilia na durabilidade.

Conforme Budynas e Nisbett (2016), as engrenagens helicoidais possuem dentes inclinados em um ângulo em relação ao eixo de rotação. Isso permite que as engrenagens transmitam mais carga do que as engrenagens de dentes retos, com menor desgaste, menor nível de ruído e vibração. Além disso, a forma helicoidal dos dentes distribui a força de contato em uma área maior que nas engrenagens retas, ajudando a diminuir o desgaste e aumentando a vida útil da engrenagem. São especialmente adequadas para as aplicações de alta potência e velocidade, onde se faz necessária uma operação suave e silenciosa. Ainda em conformidade com Budynas e Nisbett (2016), elas podem ser usadas nas mesmas aplicações que as engrenagens de dentes retos e, quando assim utilizadas, não são tão barulhentas, devido ao engajamento mais gradual dos dentes durante o engrazamento.

As engrenagens de dentes retos e helicoidais, apesar de poder ter a mesma aplicação, são diferentes em vários aspectos: a engrenagem de dentes retos possui dentes retos, o que a torna mais adequada para altas velocidades de transmissão. Já a engrenagem helicoidal, possui dentes em forma de hélice ou espiral, o que a torna mais apta para aplicações que exigem alta carga e precisão. Outra diferença entre essas engrenagens é a respeito da eficiência. Segundo Chen e Tsay (2002), a eficiência das engrenagens helicoidais e de dentes retos vai depender das condições em que elas serão aplicadas. Os resultados de estudos mostram que as helicoidais tendem a ter uma eficiência entre 2% e 8% maior que as engrenagens de dentes retos. Sabe-se também que as engrenagens retas produzem um maior ruído devido a colisão que se dá quando os dentes das engrenagens se encontram, diferentemente da engrenagem helicoidal que é mais recomendada para ser usada em ambientes que priorizam o silêncio.

Aplicando os estudos embasados, esse artigo tem por finalidade discorrer através do método de elementos finitos, a realização comparativa da análise de tensão a respeito de qual engrenagem se comportará melhor com a força de 20,90kN aplicada na face de seus dentes. Por meio da simulação computacional os resultados obtidos passarão a ser analisados, comprovando, por fim, qual engrenagem se saiu melhor com a carga aplicada, de acordo com o local estudado em questão, qual seja, diferencial de um caminhão.

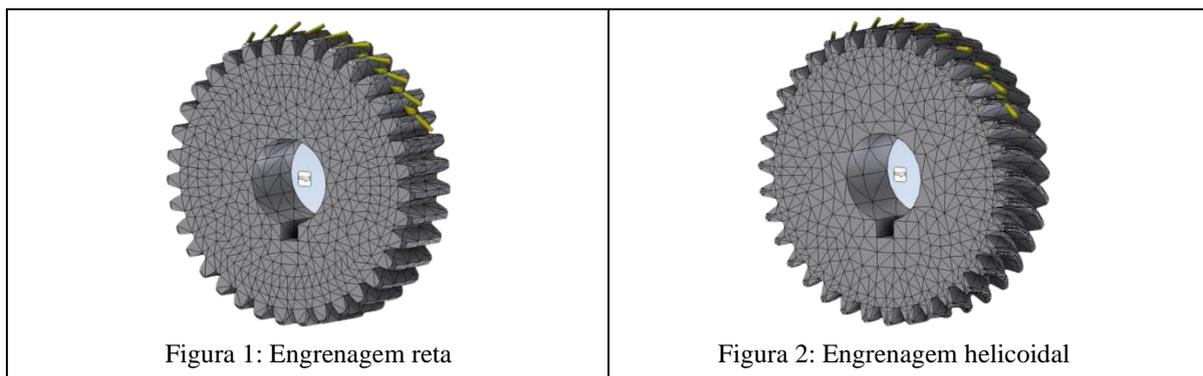
2 METODOLOGIA

O presente projeto tem como intenção a realização de um estudo que foi desenvolvido, inicialmente, por meio de pesquisas voltadas para a comparação entre engrenagens que foram submetidas a uma mesma aplicação e cargas iguais.

A realização do trabalho se deu através de modelagem computacional de ambas as engrenagens por meio do software *Autodesk Inventor*, tendo como intuito a realização de simulação que objetiva descobrir qual engrenagem suporta uma maior tensão. Após a pesquisa, utilizou-se do método de Elementos Finitos que possui como finalidade determinar as tensões máximas que foram sofridas por ambas as engrenagens na força que foi aplicada.

A análise de elementos finitos (*Finite Element Analysis - FEA*) é um método computadorizado que tem por intuito antever como um produto responderá a forças do mundo real, como vibração, tensão mecânica, fluxo de fluido entre outros efeitos físicos. O referido método demonstra se um produto vai quebrar, se desgastar ou funcionar da maneira como foi projetado. Embora seja chamada de análise, no processo de desenvolvimento do produto, é usada para prever o que vai acontecer quando o produto for usado (AUTODESK, 2023).

Para realizar o desenvolvimento desse método é necessário que sejam efetuadas as seguintes etapas: modelagem da peça, definir o material a ser aplicado, aplicação das restrições (apoios) e dos esforços, criação da malha, e por fim a análise numérica.



Em primeiro momento, realizou-se a modelação de ambas as engrenagens tendo como material utilizado SAE 1020 (Aço Carbono), foram definidos os apoios nas peças modeladas (apoio fixo que permite rotação) e os pontos de atuação de carga.

O cenário de atuação de ambas as engrenagens se deu no diferencial de um caminhão que possui peso bruto total de 6.300kg e é equipado com um motor diesel de potência máxima de 110 kW. Sabendo que a velocidade máxima é de 15,5 km/h na primeira marcha, a força atrativa utilizada será de 20,90 kN.

As engrenagens possuem as seguintes medidas:

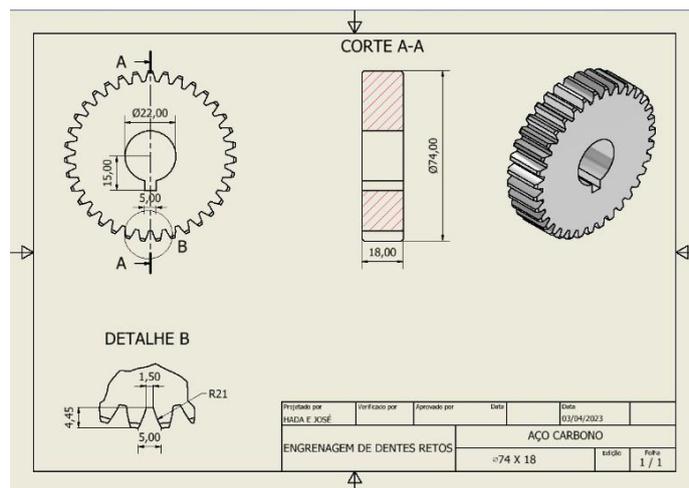


Figura 3: Vistas da Engrenagem de Dentes Retos

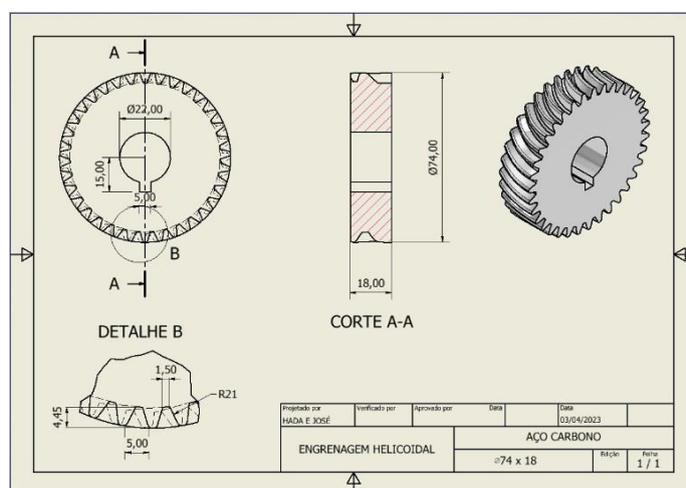


Figura 4: Vistas da Engrenagem Helicoidal

Desse modo, foi realizada a aplicação da força na face dos dentes das engrenagens, onde obtiveram-se resultados diferentes de tensão e deformação em ambas as peças modeladas e por meio do relatório é possível realizar uma comparação.

3 SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Esta etapa do projeto tem como escopo analisar, por meio de simulação computacional, a tensão suportada pelas engrenagens, a deformação que elas sofrem devido ao tensionamento e analisar, também, quais pontos mais serão afetados nas engrenagens.

A análise de tensão tem como finalidade determinar se a estrutura pode suportar com segurança as forças que incidem sobre elas. Com a realização de uma comparação de cenários é possível avaliar melhores estratégias com intuito alcançar um propósito específico.

A verificação foi realizada após a força de 20,90 kN ter sido aplicada em ambas as engrenagens. Após a execução, o software, por meio do método de elementos finitos, forneceu um relatório contendo imagens e algumas tabelas com dados numéricos a respeito das forças que cada uma das engrenagens teria sido sujeita, assim, por meio destas, foi possível efetuar a comparação de ambos os dados levando em consideração os limites pré-estabelecidos para

assim verificar o estado em que o material se encontra. Em outras palavras, é imprescindível que sejam identificados os valores de tensão e deformação que levarão o material a falha (rompimento ou escoamento, por exemplo).

A Tensão de Von Mises representa uma medida de tensão equivalente usada para avaliar a falha em materiais dúcteis. Ela é útil para determinar se o material está próximo ou além de seu limite de resistência, ou seja, caso o material venha a exceder seu limite de resistência isso indica que o mesmo irá falhar por escoamento.

Desta feita, realizando uma comparação entre os dados numéricos fornecidos nas figuras 5 e 6 após a análise de tensão foi possível concluir que as engrenagens de dentes retos e helicoidal obtiveram como Tensão de Von Mises aproximadamente 133,7 MPa e 197,4 MPa respectivamente.

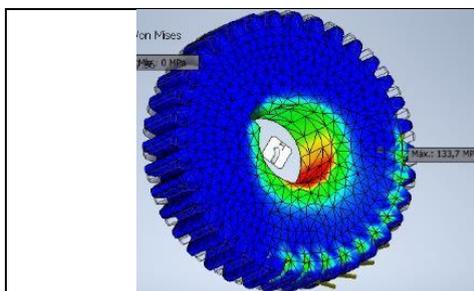


Figura 5: Tensão de Von Mises engrenagem de dentes retos, onde o valor mínimo foi 0,0155 MPa e o máximo 133,663 MPa

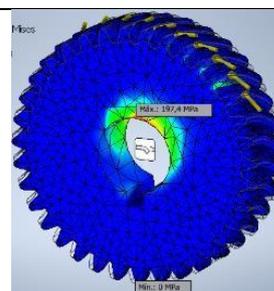


Figura 6: Tensão de Von Mises engrenagem helicoidal, onde o valor mínimo foi 0,0158 MPa e o máximo 197,382 MPa

A Primeira Tensão Principal é bastante importante pois ela fornece valores a respeito da tensão máxima, ou seja, tensão máxima de tração que o material está suportando em um determinado ponto. Caso a Primeira Tensão Principal venha a ultrapassar o limite de resistência do material, o mesmo estará sujeito a vir a falhar nesse ponto em questão. É bastante importante verificar se essa tensão irá ou não exceder o limite de resistência do material, de modo, a garantir a segurança e integridade estrutural.

Conforme as figuras 7 e 8, obteve-se para a Primeira Tensão Principal na engrenagem de dentes retos valor máximo de aproximadamente 161,986 MPa, já para a engrenagem helicoidal o valor é de aproximadamente 193,61 MPa.

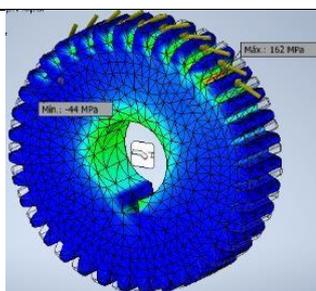


Figura 7: Primeira Tensão Principal engrenagem de dentes retos, onde o valor mínimo foi -44,0268 MPa e o máximo 161,986 MPa

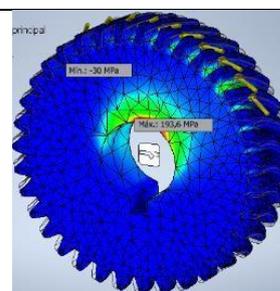


Figura 8: Primeira Tensão Principal engrenagem helicoidal, onde o valor mínimo foi -29,9637 MPa e o máximo 193,61 MPa

Comparando os dados das figuras 9 e 10, o deslocamento total no plano cartesiano, por sua vez, foi maior na engrenagem helicoidal, ela teve como valor máximo de 0,0239 mm, enquanto a engrenagem de dentes retos possuiu um valor de deslocamento máximo de 0,0198 mm, tal fato se deu por conta da quantidade e espessura dos dentes na engrenagem helicoidal, levando em consideração que ambas as engrenagens possuem o mesmo diâmetro e a mesma quantidade de dentes.

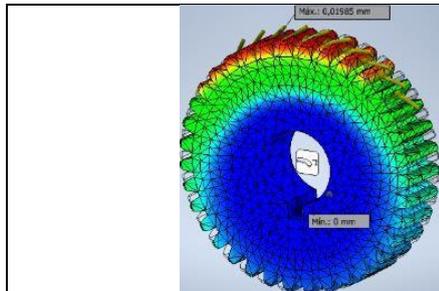


Figura 9: Deslocamento na engrenagem de dentes retos, onde o valor mínimo foi 0 mm e o máximo 0,0198 mm

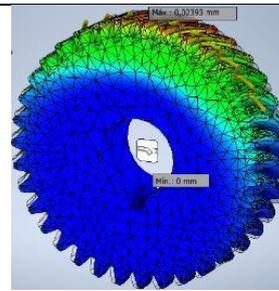


Figura 10: Deslocamento na engrenagem helicoidal, onde o valor mínimo 0 mm foi e o máximo 0,0239 mm

A Tensão XX ou Tensão Normal em X como também é chamada, devido atuar no sentido do eixo X, é de grande importância em análises estruturais e mecânicas, permitindo analisar como determinado material ou estrutura irão se comportar com aplicação de cargas. Caso a Tensão XX possua valor positivo, isso indicara uma força de tração atuando ao longo do eixo X, por outro lado, se esse valor for negativo, uma força de compressão agirá ao longo do eixo.

Analisando as figuras 11 e 12, a engrenagem de dentes retos teve como valor máximo 73,4488 MPa, enquanto a engrenagem helicoidal possuiu um valor de 85,1217 MPa, ou seja, valores esses que representam as forças de tração atuantes no eixo X em ambas as engrenagens. Já como valores mínimos obteve-se -73,436 MPa para a engrenagem de dentes retos e -117,612 MPa para a engrenagem helicoidal, valores esses que representam a força de compressão que atua no eixo X.

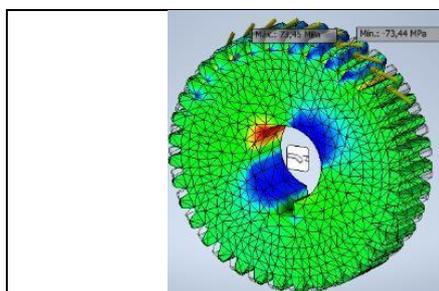


Figura 11: Tensão XX na engrenagem de dentes retos, onde o valor mínimo foi -73,436 MPa e o máximo 73,4488 MPa

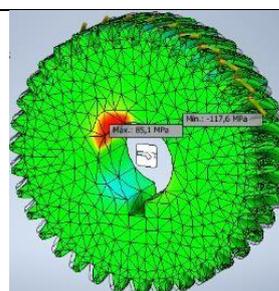


Figura 12: Tensão XX na engrenagem helicoidal, onde o valor mínimo foi -117,612 MPa e o máximo 85,1217 MPa

A Tensão XY, por sua vez, refere-se a força de cisalhamento atuante no plano, sendo ela perpendicular aos eixos X e Y. É de suma importância conhecer e analisar essa tensão, para se observar o comportamento mecânico dos materiais. Conforme as figuras 13 e 14 a Tensão XY, possuiu como valor máximo na engrenagem de dentes retos 57,5078 MPa e na engrenagem helicoidal 64,8969 MPa.

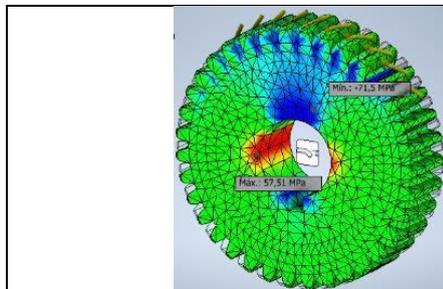


Figura 13: Tensão XY na engrenagem de dentes retos, onde o valor mínimo foi -71,5046 MPa e o máximo 57,5078 MPa

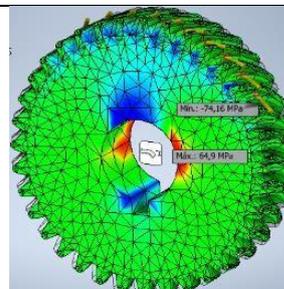


Figura 14: Tensão XY na engrenagem helicoidal, onde o valor mínimo foi -74,1646 MPa e o máximo 64,8969 MPa

Por fim, o Deslocamento X, refere-se ao movimento ou deslocamento que é provocado no objeto devido a aplicação de uma carga ocorrendo ao longo do eixo X, esse deslocamento pode ocorrer tanto para a esquerda como para a direita do eixo. Comparando as figuras 15 e 16, a engrenagem de dentes retos teve como valor máximo 0,0198 mm, enquanto o da engrenagem helicoidal foi de 0,0178 mm.

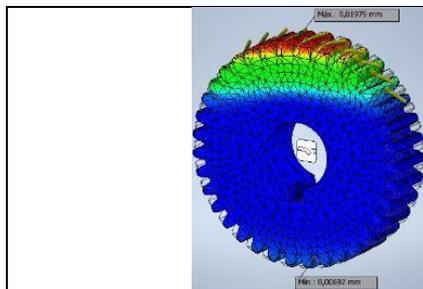


Figura 15: Deslocamento X na engrenagem de dentes retos, onde o valor mínimo foi 0,0069 mm e o máximo 0,0198 mm

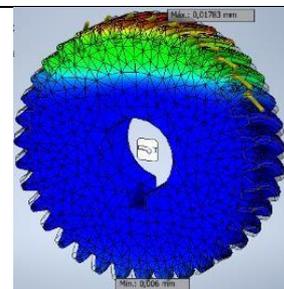


Figura 16: Deslocamento X na engrenagem helicoidal, onde o valor mínimo foi 0,0059 mm e o máximo 0,0178 mm

Observando as tabelas é possível chegar à conclusão de que apesar das engrenagens serem feitas do mesmo material, possuírem a mesma dimensão, mesma quantidade de dentes e serem submetidas a uma mesma força, os resultados de ambas serão diferentes por elas possuírem um formato diferente.

Tabela 1. Resumo de resultados na engrenagem de dentes retos

Nome	Mínima	Máxima
Tensão de Von Mises	0,0155 MPa	133,663 MPa
Primeira Tensão Principal	-44,0268 MPa	161,986 MPa
Deslocamento	0 mm	0,0198 mm

Tensão XX	-73,436 MPa	73,4488 MPa
Tensão XY	-71,5046 MPa	57,5078 MPa
Deslocamento X	0,0069 mm	0,0198 mm

Tabela 2. Resumo de resultados na engrenagem helicoidal

Nome	Mínima	Máxima
Tensão de Von Mises	0,0158 MPa	197,382 MPa
Primeira Tensão Principal	-29,9637 MPa	193,61 MPa
Deslocamento	0 mm	0,0239 mm
Tensão XX	-117,612 MPa	85,1217 MPa
Tensão XY	-74,1646 MPa	64,8969 MPa
Deslocamento X	0,0059 mm	0,0178 mm

4 CONCLUSÃO

Face o exposto, com a simulação foi possível observar que o material SAE 1020 utilizado para a fabricação da engrenagem de dentes retos e helicoidal não atingiu o seu limite de escoamento, 300MPa, tendo em vista que as tensões máximas atuantes ficaram na faixa de 133,7 MPa e 197,4 MPa, respectivamente.

Dessa forma, pode-se afirmar que o objetivo principal do estudo foi atingido. Com a modelagem das duas engrenagens e a simulação realizada através do software *Autodesk Inventor* obteve-se resultados significativos que procederam de maneira esperada. Tendo em vista que de acordo com o estudo embasado foi possível comprovar que a engrenagem helicoidal possui ligeiras vantagens a respeito da engrenagem de dentes retos.

Portanto, conclui-se que após a realização da análise de tensão e com o auxílio do método de elementos finitos foi possível comprovar, por meio dos dados obtidos, que a engrenagem helicoidal é mais benéfica para o uso no diferencial do caminhão pois ela suporta maiores tensões.

REFERÊNCIAS

A VOZ DA INDÚSTRIA. *Engrenagem de dentes helicoidais x engrenagens de dentes retos: veja as diferenças.* 2018. Disponível em: <<https://avozdaindustria.com.br/gestao/engrenagem-de-dentes-helicoidais-x-engrenagem-de-dentes-retos-veja-diferencas>>. Acesso em: 11 mai. 2023.

AUTODESK. *Análise de Elementos Finitos.* 2023. Disponível em: <<https://www.autodesk.com.br/solutions/finite-element-analysis>>. Acesso em: 12 mai. 2023.

BEER, F.P. e JOHNSTON, JR., E.R. *Resistência dos Materiais.* 3.ed. Makron Books, 1995.

BUDYNAS, R.G. & NISBETT, J.K. *Elementos de máquinas de shigley.* 10. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

CHEN, Y & TSAY, C. *Stress analysis of a helical gear set with localized bearing contact.* 2002

ENSUS. *Elementos Finitos - O que é? Quando utilizar? Quais são os benefícios?* Disponível em: <<https://ensus.com.br/elementos-finitos-quais-os-beneficios/#:~:text=A%20an%C3%A1lise%20de%20elementos%20finitos%20%C3%A9%20um%20m%C3%A>

9todo%20para%20resolver, fen% C3%B4meno%20que%20est% C3%A1%20se%20estudando>. Acesso em: 12abr. 2023.

FRANCESCHI, A. & ANTONELLO, M.G. *Elementos de máquinas*. Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria: Rede e-Tec Brasil, 2014.

FRESADORA HIPOYDE. *Engrenagem cilíndrica com dentes retos*. Disponível em: <<https://www.fresadorahipoyde.com.br/engrenagem-cilindrica-dentes-retos>>. Acesso em 12 mai. 2023

GERE, J.M. *Mecânica dos Materiais*. São Paulo: Pioneira Thomson Learning Ltda, 2001.

HIBBELER, R.C. *Resistência dos Materiais*. 3.º Ed. Editora Livros Técnicos e Científicos, 2000.

JLES. *O que é Análise de Elementos Finitos?* 2021. Disponível em: <<https://www.jles.com.br/2021/11/12/analise-de-elementos-finitos/#:~:text=Pode%2Dse%20destacar%20por%20exemplo,est% C3%A1tica%20n% C3%A3o%20linear>>. Acesso em: 09 abr. 2023

MECÂNICA INDUSTRIAL. *Engrenagens helicoidais x retas*. Disponível em: <<https://www.mecanicaindustrial.com.br/engrenagens-helicoidais-x-retas/#:~:text=Efici% C3%Aancia%3A%20uma%20engrenagem%20reta%20% C3%A9,engrenagens%20helicoidais%20do%20mesmo%20tamanho.&text=A%20efici% C3%Aancia%20da%20engrenagem%20helicoidal,engrenagem%20e%20geram%20mais%20calor>>. Acesso em: 11 mai. 2023.

MULTENGENAGENS. *Engrenagem Helicoidal*. Disponível em: <<https://www.multengrenagens.com.br/informacao/engrenagem-helicoidal/#:~:text=A%20engrenagem%20helicoidal%20tem%20esse,a%20engrenagem%20durante%20a%20opera% C3%A7% C3%A3o.>>. Acesso em 12 mai. 2023

PAZ, R.G.; RIBAS, G.W. & WILHELM, B.R. *Estudo de caso da tensão atuante em engrenagem com massa reduzida pelo método de elementos finitos*. 2017.

POLIUNIOR. *Tipos de Engrenagens*. Disponível em: <<https://polijunior.com.br/blog/tipos-de-engrenagens/>>. Acesso em 19 mai. 2023

RABELO, J.V. & CAVALER, L.C.C. *Otimização do projeto de polias fabricadas em ferro fundido cinzento GG-15 utilizadas no setor de ordenhadeiras*. 2018.

REDUTORES, IBR. *Conheça um pouco mais sobre as engrenagens*. Disponível em: <<https://www.redutoresibr.com.br/noticia/conheca-um-pouco-mais-sobre-as-engrenagens>>. Acesso em: 08 abr. 2023.

SALES, R. *Engrenagem: Quais são seus tipos e aplicações?* 2019. Disponível em: <<https://blog.acoplastbrasil.com.br/engrenagem/>>. Acesso em: 03 abr. 2023.

SALES, R. *Elementos de transmissão mecânica: entenda a importância desses ativos para sua indústria*. Disponível em: <<https://blog.acoplastbrasil.com.br/elementos-de-transmissao-mecanica/>>. Acesso em: 16 jun. 2023.

VIBRAMOL, *Engrenagens helicoidais x Engrenagens retas*. Disponível em: <<https://www.vibramol.com.br/blog/engrenagens-helicoidais-x-engrenagens-retas/>>. Acesso em 12 mai. 2023