

ESTUDO NUMÉRICO DE DESGASTE EM ENGRENAGENS CÔNICAS DE DENTES RETOS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Felipe Alencar Barros (UFC) E-mail: felipealencarbarros@alu.ufc.br
Rômulo do Nascimento Rodrigues (UFC) E-mail: rrodrigues@ufc.com

Resumo: Engrenagens cônicas de dentes retos são componentes mecânicas que têm por finalidade principal transmitir movimento entre eixos ortogonais, sendo muito utilizadas em caminhões e tratores. Além dessas funcionalidades, é importante ressaltar que quando dimensionamos uma engrenagem cônica, devemos levar em consideração fatores de falha por flexão e desgaste. A falha por flexão ocorrerá quando a tensão no dente igualar ou exceder a resistência ao escoamento e a falha por desgaste ocorre quando a tensão superficial exceder a resistência de endurecimento superficial. Em função desses fatores, este trabalho tem por finalidade principal avaliar a perda de volume por desgaste em materiais com dureza diferentes e sujeitos à mesma aplicação de forças. A simulação será realizada por meio do software de engenharia Ansys, que é usado para desenvolvimento de produtos e otimização de projetos, como base em um modelo matemático chamado de elementos finitos, onde esse método discretiza um sistema em várias porções menores que podem ser manipuladas ao se modelar a malha e a qualidade dos resultados que se deseja obter na simulação.

Palavras-chave: Engrenagens cônicas, elementos finitos, ansys, desgaste.

NUMERICAL STUDY OF WEAR ON STRAIGHT TEETH BEVEL GEARS USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Abstract: Straight tooth bevel gears are mechanical components whose main purpose is to transmit movement between orthogonal axes, being widely used in trucks and tractors. In addition, it is important to emphasize that in the design of gears, failure factors due to bending and wear are taken into account. Flexural failure will occur when the stress in the tooth equals or exceeds the yield strength and wear failure occurs when the surface tension exceeds the surface hardness strength. Therefore, the main purpose of this work is to evaluate the loss of volume due to wear in materials with different hardness and subject to the same application of forces. The simulation will be carried out using the Ansys engineering software, which is used for product development and project optimization, based on a mathematical model called finite elements. This method discretizes a system into several smaller portions that can be manipulated when modeling the mesh and the quality of the results you want to obtain in the simulation.

Keywords: Bevel gears, finite elements, ansys, wear.

1. Introdução

Engrenagens cônicas desempenham um importante papel na indústria automobilística e em equipamentos mecânicos em siderúrgicas. São usualmente empregados quando a transmissão de movimento em um eixo deve ser transmitido a um outro eixo perpendicular a ele ou com um ângulo específico para uma máquina, quando deseja-se aumentar o torque do elemento acionador e/ou aumentar ou reduzir a velocidade de um motor.

Quanto à sua utilização, podem ser empregados em situações que exigem uma velocidade de linha primitiva de até 5 m/s, desprezando-se a vibração. Dependendo da sua aplicação, podem ser fabricadas com aço endurecido por completo, AISI 4140, nitralloy, ferro fundido e ferro dúctil.

Ferro fundido garante boas propriedades de desgaste, usinabilidade e facilidade na produção. Aços carbono são usados em função da alta resistência mecânica, podendo ser tratadas

termicamente para obter uma combinação de tenacidade e dureza dentária. Contudo, apesar da grande quantidade de aços que podem ser usados na fabricação das engrenagens, mais utilizados pela indústria são: SAE 4140, 8620, 4340, 8640.

Tabela 01 - Aços para engrenagens (AÇOS NOBRE, 2022)

SAE 4140	Aço para beneficiamento	Forjamento: temperatura mín. 925°C e máx. 1220°C.	Dureza HRC: 55/60
SAE 8620	Aço para cementação	Forjamento: temperatura mín. 900°C e Máx. 1240°C.	Dureza HRC: 55/62
SAE 4340	Aço para beneficiamento	Forjamento: temperatura mín. 900°C e máx. 1220°C.	Dureza HRC: 55/60
SAE 8640	Aço para beneficiamento	Forjamento: temperatura mín. 900°C e máx. 1220°C.	Dureza HRC: 53/60

Engrenagens cônicas possuem uma geometria singular em comparação às demais, sendo formado por elementos cônicos. De forma geral, para determinarmos o ângulo primitivo da coroa (Γ), basta encontrarmos o diâmetro primitivo do pinhão e da coroa. Aplicando a tangente no triângulo retângulo que as engrenagens formam, é possível encontrar o ângulo primitivo da coroa. A figura 01 ilustra a terminologia usada. O passo da engrenagem é medido na extremidade maior do dente. O passo circular e o passo diametral são calculados pela mesma metodologia. A folga é uniforme. Os ângulos primitivos podem ser calculados usando trigonometria pelo comprimento dos diâmetros primitivos do pinhão e da coroa. Os dentes podem ser fundidos, fresados ou gerados.

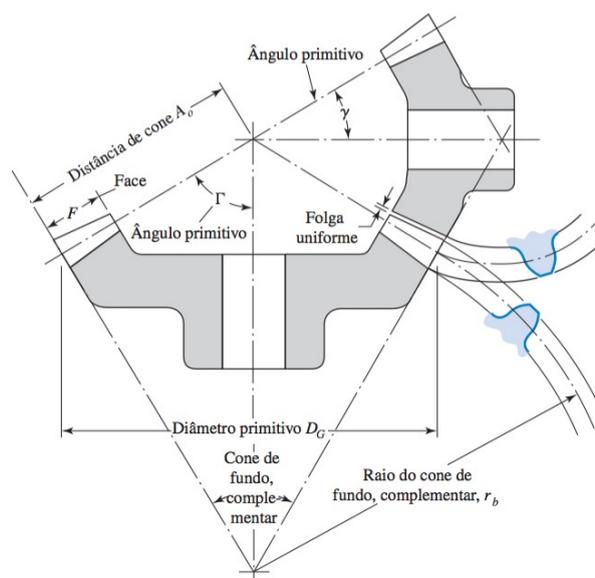


Figura 01 – Terminologia e design de engrenagens cônicas (SHIGLEY, 2016)

1.1 Desgaste

Raymond Bayer define o **desgaste** como dano progressivo a uma superfície causada por um

movimento relativo a outro objeto, não sendo limitado a perda de material, mas também à variação da geometria e de suas dimensões. Em vista a essa definição e com ênfase em evitar uma falha por **desgaste**, a associação dos fabricantes de engrenagens dos Estados Unidos (AGMA) definiu um conjunto de fatores, também chamado de fatores para equação AGMA, onde o fator de segurança e o volume perdido se relacionam entre si.

- Resistência de desgaste da engrenagem (Eq. 01):

$$S_{wc} = \left(\sigma_c \right)_{adm} = \frac{s_{ac} C_L C_H}{s_H K_T C_R} \quad (Eq. 01)$$

- Fator de segurança do desgaste (Eq. 02):

$$S_H = \left(\frac{(\sigma_c)_{adm}}{\sigma_c} \right) \quad (Eq. 02)$$

Conforme mencionado anteriormente, engrenagens possuem um movimento de rotação para transmissão de força. Essa transmissão ocorre por meio de um deslizamento dente-dente, onde o coeficiente de desgaste é reduzido por meio do uso de lubrificantes. Contudo, em um ambiente industrial, onde a poeira está presente ou quando as engrenagens são fabricadas com materiais provenientes de fontes não tão confiáveis, é comum a presença de partículas no deslizamento entre as face, gerando uma pressão sobre os materiais e os riscando. O efeito desse desgaste por abrasão pode ser visto na figura 02, situada acima da região do raio primitivo.



Figura 02 – Desgaste por abrasão (KAIO DUTRA, 2015)

1.2 Interferência

O desgaste também pode ser ocasionado por interferência, falta de lubrificação e ausência de manutenção preditiva. Para evitar problemas como este, o livro elementos de máquinas de Shigley traz um conjunto de parâmetros para um correto dimensionamento e, assim, evitar problemas relacionados à redução da vida útil do material. Cabe destacar que as equações sobre interferência estão diretamente relacionado com a simulação por elementos finitos, uma vez que o projeto está corretamente dimensionado de forma a minimizar a perda de volume por mal dimensionamento e deixar o desgaste por abrasão como principal fator à perda de vida das engrenagens.

Para uma razão de engrenagens $m_G = N_G/N_P$, o menor número de dentes do pinhão resulta:

$$N_P = \frac{2k \cos \psi}{(1+2m)\phi_t} \left[m + \sqrt{m^2 + (1 + 2m)\phi_t} \right] \quad (Eq. 03)$$

A maior coroa para um pinhão especificado é:

$$N_G = \frac{N_P^2 \phi_t - 4k^2 \psi}{4k \cos \psi - 2N_P \phi_t} \quad (Eq. 04)$$

O desgaste por interferência geralmente está associado a um engrenamento com contatos

inadequados, onde a transmissão de forças ocorre na porção superior ou inferior da região de loinha primitiva. Segundo a AGMA, para um engrenamento com módulo de 20° e ângulo de pressão de 20°, o número mínimo de dentes do pinhão deve ser de 16 dentes enquanto o da coroa um máximo de 101 dentes.



Figura 03 – Desgaste por interferência (KAIO DUTRA, 2015)

Tabela 02 – Símbolos usados nas equações de classificação de engrenagens cônicas

Símbolo AGMA	Símbolo ISO	Descrição	Unidades
S_{wc}	σ_{HP}	Valor permissível da tensão de contato	N/mm^2
σ_c		Tensão de contato	N/mm^2
s_{ac}	$\sigma_{H\ lim}$	Valor da tensão de contato admissível	N/mm^2
C_L	Z_{NT}	Fator de ciclagem de tensão para a resistência à cavitação	
C_H	Z_W	Fator de razão de dureza para a resistência à cavitação	
s_H	s_H	Fator de segurança de contato	
K_T	K_0	Fator de temperatura	
C_R	Z_Z	Fator de confiabilidade para cavitação	
ψ	β_m	Ângulo de espiral médio na superfície primitiva	
ϕ_t	α_{wt}	Ângulo de pressão transversal no ponto primitivo	
N_P	z_1	Número de dentes do pinhão	
N_G	z_2	Número de dentes da coroa	
m	m	Módulo da engrenagem	

1.3 Método dos elementos finitos

A busca por soluções no campo matemático para discretizar problemas numéricos data do século XVIII, embora o desenvolvimento tecnológico na época fosse um grande empecilho para dar continuidade a essa ideia. O MEF começou a ser utilizado em larga escala em meados do século XX, quando pesquisadores responsáveis por dirigir uma pesquisa na Boeing propuseram a criação de um modelo matemático que conseguisse fazer uma análise estrutural de estruturas em uma aeronave. O desenvolvimento tecnológico na época foi suficiente, não só para realizar análises estruturais, mas para ampliar o campo de estudo à análises dinâmicas, vibracionais, térmicas e entrar no campo do estudo de fluidos.

Atualmente, o método dos elementos finitos (MEF) pode ser encontrado em vários softwares de engenharia como Solidworks, Inventor e Ansys. A opção pelo estudo de desgaste no Ansys deve-se a um ambiente de trabalho mais simples, completo e com uma ampla gama de ferramentas. O Ansys, ao contrário dos demais softwares, permite realizar um estudo para parametrizar a superfície, otimizar um produto e várias outras gamas de funcionalidades.

2. Metodologia

A análise estática para simulação de desgaste por elementos finitos será desenvolvida em 7 etapas, como pode ser visualizado na imagem abaixo:

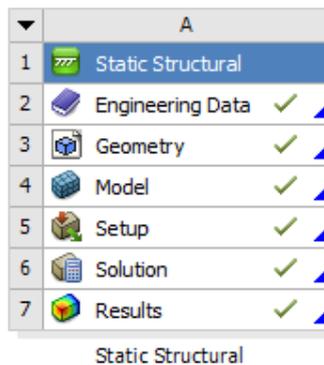


Figura 05 – Parâmetros para análise estrutural

2.1 Engineering Data

Engineering data é uma seção do Ansys que contém um conjunto de nomes e aplicações típicas de materiais para engenharia mais comuns. O workspace permite editar a dureza, coeficiente de transferência de calor, densidade, coeficiente de poisson e muitos outros parâmetros. A possibilidade de editar os dados de engenharia permite ao usuário realizar uma simulação o mais próximo possível de sua situação. Cabe mencionar, que existem diversos tipos de aço com propriedades e aplicações diferentes e não seria produtivo realizar uma análise com dados que não se assemelham ao da situação real. Para realizar a simulação com o aço AISI 1020, alterei a densidade, coeficiente de expansão térmica e o módulo de Young. Os dados de projeto para cada material que será usado na simulação podem ser encontrados na tabela abaixo.

Tabela 03 – Propriedades dos materiais usados na simulação

Materiais	Densidade (Kg/m³)	Dureza a vickers	Limite de resistência à tensão (Mpa)	Módulo de elasticidade (Mpa)	Módulo de poisson
Aço AISI 1020, laminado à frio	7870	126	420	186	0,29
Ferro fundido ASTM classe 30	7150	220	214	90-130	0,28
Nítrallooy 135M	4757	294	931	-	-

Com base nas escolhas dos materiais, basta ir em engineering data, properties e substituir as propriedades dos materiais que serão usados na simulação.

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	Aço AISI 1020, Laminado a frio			Gene	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
4	Ferro fundido ASTM Classe 30			Gene	
5	Nitalloy 135M			Gene	
*	Click here to add a new material				

Figura 04 – Área de trabalho dos dados de engenharia

2.2 Geometry

Após a definição das propriedades do aço, é necessário definir a geometria da peça da simulação. O Software permite 2 possibilidades: importar a geometria de um software de desenho (Solidworks, inventor) ou desenhar a peça no workspace do workbench. Como o solidworks apresenta mais facilidade de desenhar engrenagens, o utilizei e o importei para o Ansys. A simulação é constituída de 3 peças: 2 pinhões de 20 dentes e 1 coroa de 40 dentes. Os dados das engrenagens podem ser visualizados na tabela abaixo:

Tabela 04 – Geometria dos pinhões e da coroa

Peça	Pinhão	Coroa
Número de dentes	20	40
Ângulo de pressão	20°	20°
Passo diametral	10	10
Largura de face	0,5	0,5
Diâmetro eixo	3/4	3/4
Chaveta	Quadrada (1)	Retangular (1)

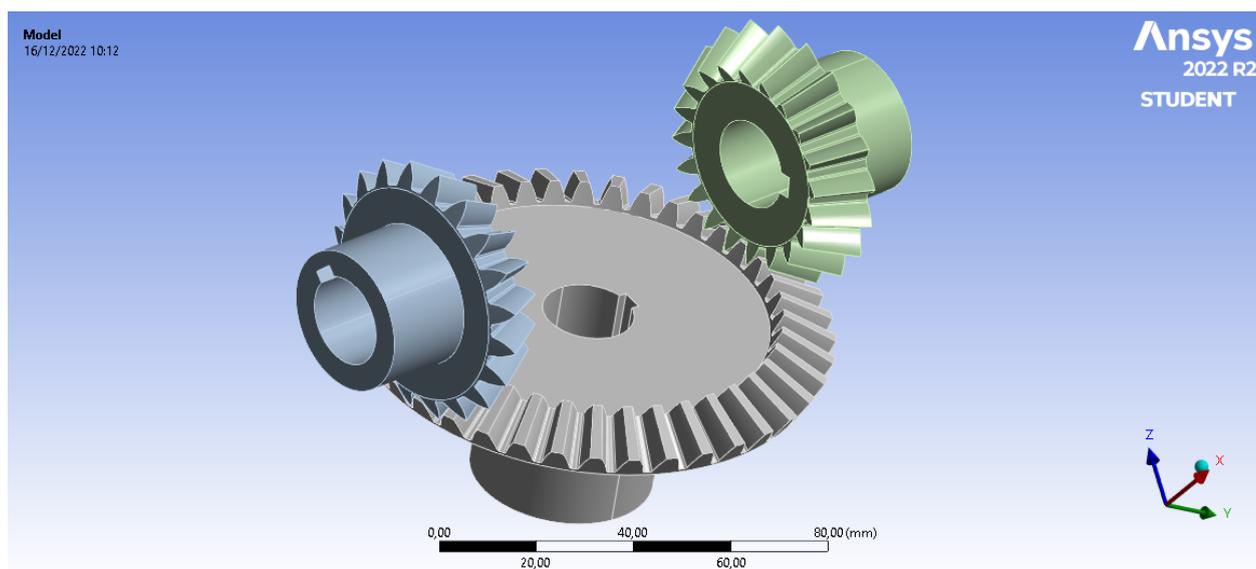


Figura 05 – Vista isométrica das engrenagens cônicas de dentes retos importadas do solidworks

2.3 Model:

Model ou modelo, é uma subsecção do Ansys que contém os conexões, malha, estrutura estática e soluções.

2.3.1 Conexões

2.3.1.1 Contatos do tipo friccional:

Toda estrutura que não é completamente lisa possui alguma resistência ao deslocamento. Nesse sentido, as fabricantes recomendam a utilização de lubrificantes para amortecer o contato e, portanto, reduzir o coeficiente de atrito.

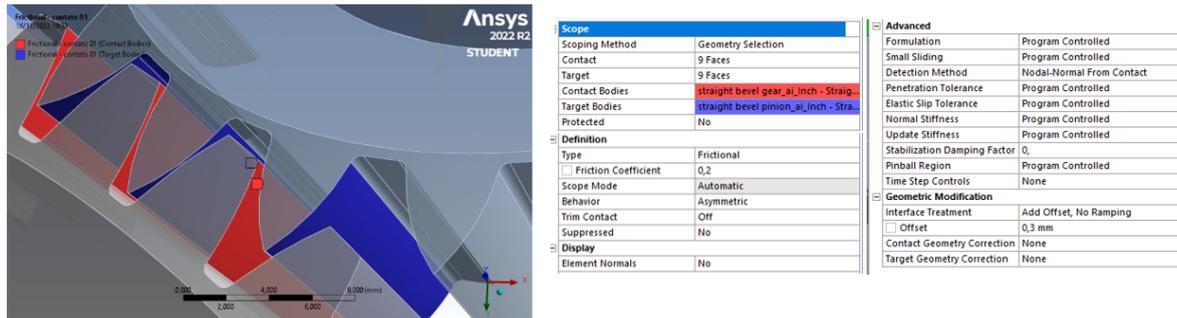


Figura 6 – Contatos e alvos e configurações dos contatos

Os contatos são do tipo frictional, com coeficiente de atrito de 0,2, já lubrificadas, com comportamento assimétrico, ou seja, as superfícies de contato não são permitidos penetrarem nas superfícies de destino. Método de detecção nodal-normal from contact, onde o local de detecção de contato está em um ponto onde a normal de contato é perpendicular à superfície de destino.

2.3.1.2 Juntas de revolução

Os pinhões irão rotacionar em torno do próprio eixo em função do torque aplicado sobre a coroa. Foram criadas duas juntas de revolução para os pinhões com conexões do tipo Body-Ground e uma junta de revolução para a coroa do tipo Body-Ground.

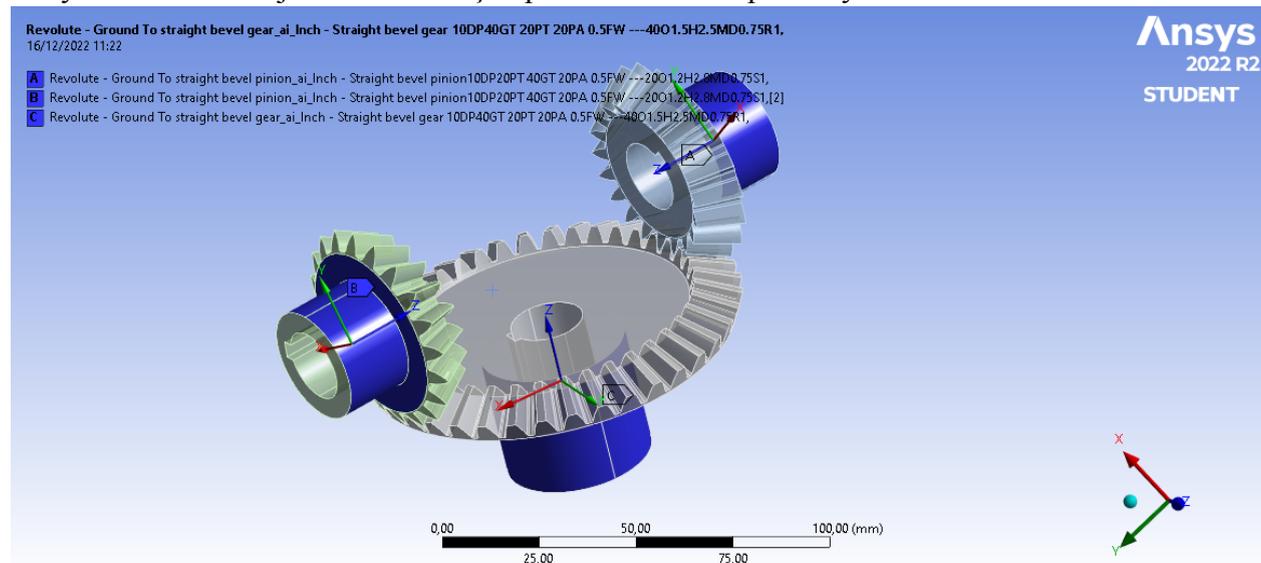


Figura 08 – Eixos de rotação

2.3.2 Informações de contato:

Contatos do tipo closed indicam que a transmissão de forças do dente para a coroa estão ocorrendo naturalmente. O status dos contatos que não serão usados permanecem como inativos, em virtude do comportamento assimétrico usado nos contatos.

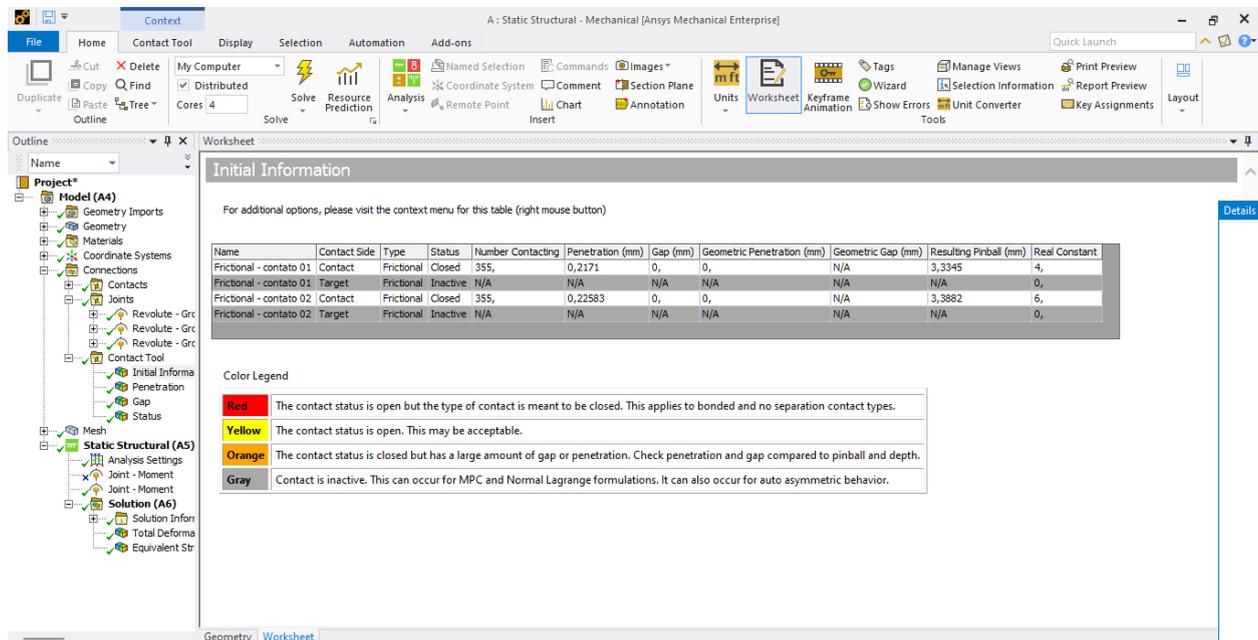


Figura 09 – Status dos contatos

2.3.3 Malha

A versão do Ansys student permite modelar um sistema com até 200 mil nós. Em função das restrições, utilizei o comando face sizing para criar uma malha de 3 mm para as 3 engrenagens e utilizei o comando face sizing para criar uma malha de 1 mm nas regiões de contato, que é onde a cavitação ocorre.

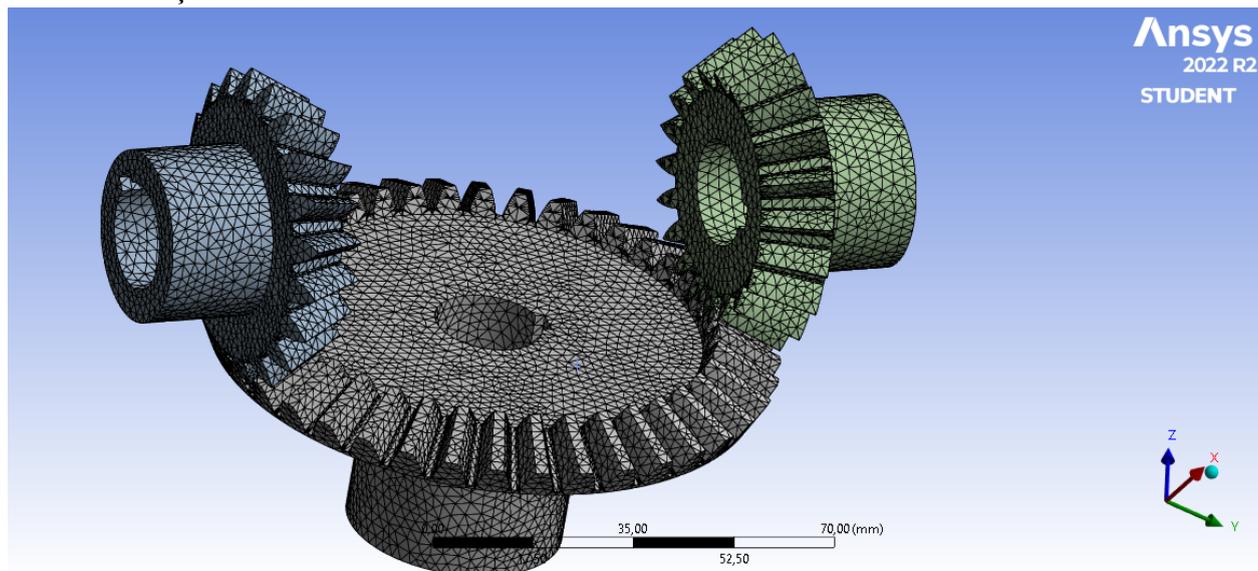


Figura 10 – Malha gerada na superfície das engrenagens

2.3.4 Static Structural

A simulação estática tem por função calcular o efeito nas engrenagens quando são submetidas a um carregamento estático na estrutura. Nesse sentido, a tensão e deformação de uma estrutura podem ser estudadas sob uma variedade de condições de cargas, ajudando a determinar os locais onde há maior fragilidade e resistência ainda na fase de projetos. Por essa razão, será aplicado à coroa um carregamento estático de 5 N·m sob a coroa e o efeito de contato, bem como desgaste será obtido nos resultados.

3. Resultados

Após a definição das cargas que serão aplicadas à coroa e à engrenagem, é possível estimar o volume perdido por desgaste na simulação. Para isso é necessário ir na seção solutions no model e calcular para os contatos 1 e 2 o volume perdido durante o contato.

Desgaste em engrenagens cônicas fabricadas com aço AISI 1020 laminado à frio:

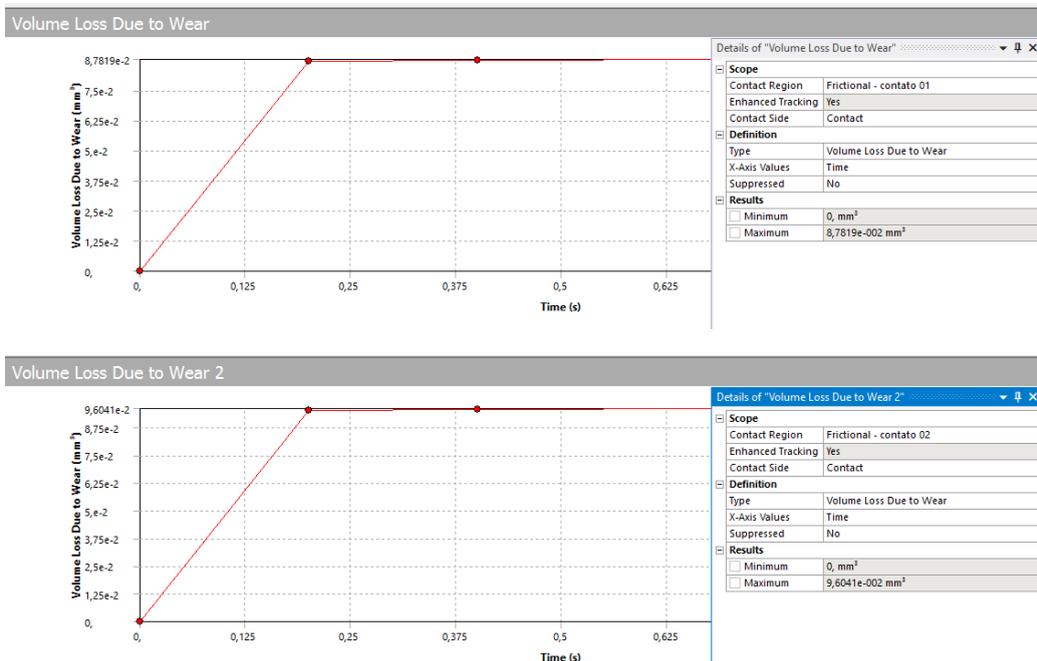
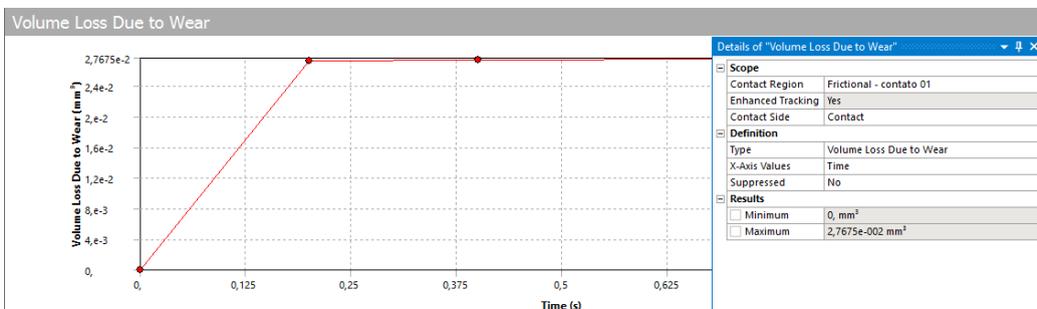


Figura 11 – Simulação de desgaste em engrenagens de aço

Desgaste em engrenagens cônicas fabricadas com ferro fundido ASTM classe 30.



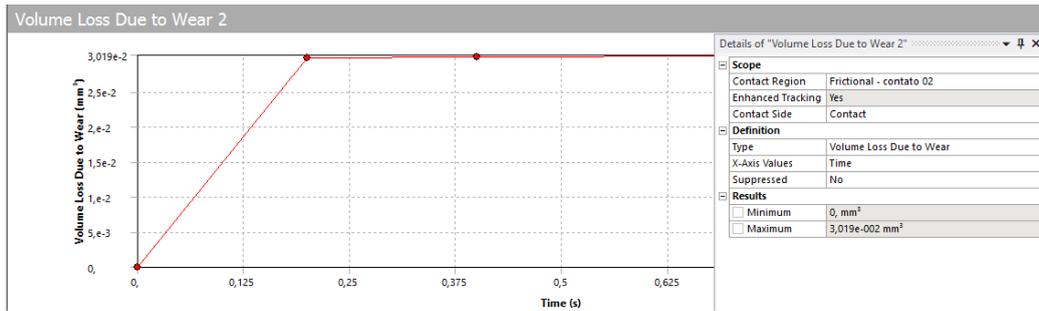


Figura 12 – Simulação de desgaste em engrenagens de ferro fundido

3.1 Desgaste em engrenagens cônicas fabricadas com Nitralloy 135M:

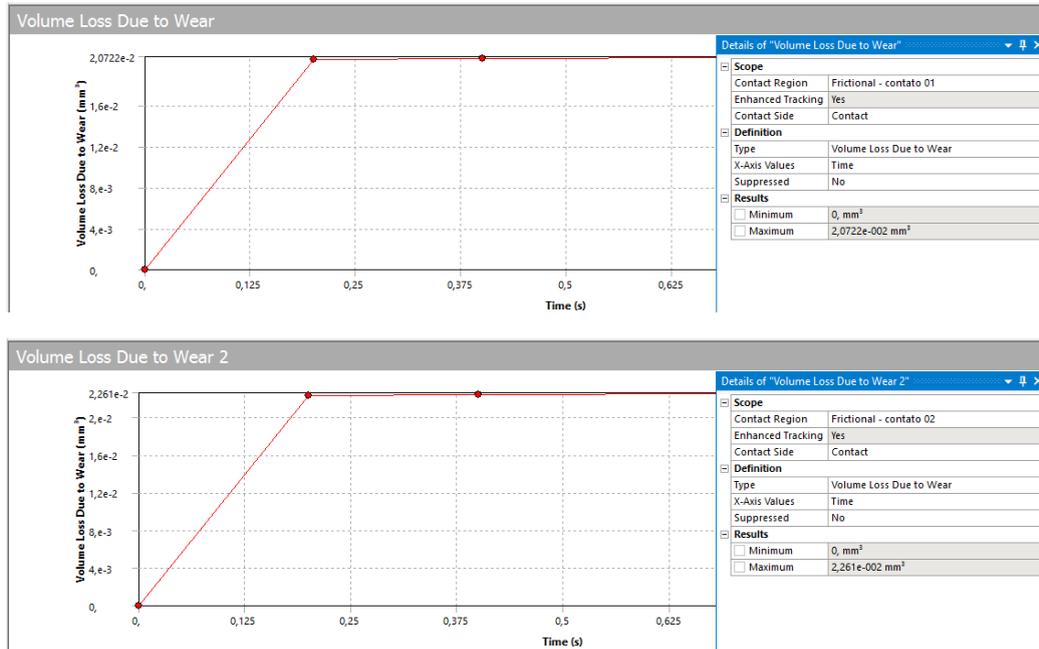


Figura 13 – Simulação de desgaste em engrenagens fabricadas com Nitralloy

4. Conclusão

A simulação de desgaste realizada no Ansys demonstra quantitativamente que existe uma forte correlação entre desgaste e dureza dos materiais quando submetido em um carregamento estático. Quando comparamos os materiais de maior e menor dureza, ou seja, Aço AISI 1020 e Nitralloy 135M, o volume perdido do material mais duro equivale a apenas 23,6% do volume perdido do de menor dureza. Em posse dessas informações, quando consideramos que a tensão superficial excede a resistência de endurecimento superficial devemos projetar uma engrenagem cônica para o desgaste com material que apresente resistência superficial mais elevada. Além desse aspecto, é importante mencionar que a simulação por elementos finitos constituiu uma fonte confiável e eficiente para simulação de estruturas estáticas, dinâmicas, entre outros.

5. Referências

BUDYNAS, Richard G. **Elementos de máquinas de Shigley**: capítulo 15 engrenagens cônicas e sem fim. 10. ed. Porto Alegre: Mc Grall Hill Educational, 2016. 1096 p. Unidades no sistema SI.

MATWEB. **AISI 1020 Steel, cold rolled.** Disponível em: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=10b74ebc27344380ab16b1b69f1cffbb>. Acesso em: 19 dez. 2022.

KETTERMANN, Viviane. **Desgaste e os seus mecanismos.** 2017. Disponível em: <https://engenheirodemateriais.com.br/tag/mecanismos-de-desgaste>. Acesso em: 19 dez. 2022.

MATWEB. **ASTM class 30 Standard gray iron test bars, as cast.** Disponível em: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=e488d734da43419aaf5266d02b6030d1&ckck=1>. Acesso em: 19 dez. 2022.

AIRCRAFTMATERIALS. **NITRALLOY 135™Modified VAC-ARC.** 2013. Disponível em: <https://www.aircraftmaterials.com/data/alstst/nitriding135.html>. Acesso em: 19 dez. 2022.