



Estudio de metodologías para la modelación matemática y simulación de engranes rectos para validar su diseño

Study of methodologies for mathematical modeling and simulation of spur gears to validate their design

Estudo de metodologias de modelagem matemática e simulação de engrenagens de dentes retos para validar seu projeto.

Luis Santiago Choto Chariguaman ^I
lchoto@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-0655-2503>

Sócrates Miguel Aquino Arroba ^{II}
saquino@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-8931-3577>

Luis Patricio Tierra Pérez ^{III}
patricio.tierra@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-3366-7867>

Campo Elías Morillo Robles ^{IV}
campo.morillo.@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-9551-2599>

Correspondencia: lchoto@epoch.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 23 de mayo de 2022 * **Aceptado:** 12 de junio de 2022 * **Publicado:** 29 de julio de 2022

- I. Magíster en Manufactura y Diseño Asistidos por Computador, Ingeniero Automotriz, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Riobamba, Ecuador.
- II. Magíster en Diseño Producción y Automatización Industrial, Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Riobamba, Ecuador.
- III. Magíster en Eficiencia Energética, Ingeniero Mecánico, Formación de Formadores, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Riobamba, Ecuador.
- IV. Magíster en Matemática Básica, Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias Pecuarias, Macas, Ecuador.

Resumen

Los engranajes rectos son elementos muy versátiles y utilizados en diferentes sectores industriales. El presente proyecto planteó, el diseño y simulación en el software ANSYS de un par de engranes rectos de manera que se establezca una metodología adecuada para la simulación mediante software CAE, con un análisis que garantice una calidad de resultado y presente un mallado apto para la pieza de manera que los datos obtenidos al final sean corroborados por medio de SOLIDWORKS y cálculos. A partir de una carga aplicada en un diente, se evaluaron parámetros como la deformación total, el esfuerzo de Von-Mises, el factor de seguridad, la vida y el factor de seguridad a fatiga

Palabras Clave: Engranaje Recto; Simulación; Mallado; Esfuerzos, Fatiga.

Abstract

Spur gears are very versatile elements used in different industrial sectors. The present project proposed the design and simulation in the ANSYS software of a pair of spur gears in order to establish an adequate methodology for the simulation using CAE software, with an analysis that guarantees a quality of result and presents a mesh suitable for the piece so that the data obtained at the end are corroborated by means of SOLIDWORKS and calculations. From a load applied to a tooth, parameters such as total deformation, Von-Mises stress, safety factor, life and fatigue safety factor were evaluated.

Keywords: Spur Gear; Simulation; meshing; efforts, fatigue.

Resumo

Engrenagens de dentes retos são elementos muito versáteis utilizados em diferentes setores industriais. O presente projeto propôs o projeto e simulação no software ANSYS de um par de engrenagens de dentes retos a fim de estabelecer uma metodologia adequada para a simulação utilizando o software CAE, com uma análise que garanta a qualidade do resultado e apresente uma malha adequada para a peça. que os dados obtidos ao final sejam corroborados por meio do SOLIDWORKS e cálculos. A partir de uma carga aplicada a um dente, foram avaliados parâmetros como deformação total, tensão de Von-Mises, fator de segurança, vida útil e fator de segurança à fadiga.

Palavras-chave: Engrenagem de dentes retos; Simulação; malha; esforços, fadiga.

Introducción

El presente documento muestra el modelado y la simulación de un engranaje recto fabricado de acero AISI 1020 el cual será evaluado por medio de softwares computacionales de Elemento Finito. Para lograrlo es necesario conocer acerca del temario que interviene, de manera que se puede decir que un engranaje es un elemento mecánico dentado que se acopla a otro para transmitir energía, fuerza o movimiento de un eje a otro, así como para aumentar o disminuir el torque o velocidad y/o cambiar el sentido de giro. Existe una gran variedad de engranajes, dependiendo de la forma de los dientes y según la disposición de sus ejes de rotación. [1]

Los engranes rectos son muy versátiles debido a que poseen una muy buena capacidad de transmisión de potencia y un bajo mantenimiento por lo que se pueden encontrar aplicados en relojes, batidoras de mano, juguetes, máquinas herramientas e inclusive en motores de aviones. [2]

A fin de crear un modelo se debe tomar en cuenta cuatro características importantes: concepto, diseño, análisis, y validación. Por medio de softwares CAD se puede llevar a cabo el concepto y el diseño del prototipo deseado, mientras que con el método del elemento finito computacional se puede analizar el comportamiento que tendrá el modelo tomando en cuenta sus características mecánicas: esfuerzos, factor de seguridad, tiempo de vida de la pieza, entre otros. Finalmente, la validación puede ser llevada a cabo por medio de otros softwares o por cálculos, corroborando así que el diseño se encuentre planteado correctamente. [3]

Para el diseño y simulación de un engranaje recto es necesario establecer la metodología adecuada, definir el tipo de análisis que se va a llevar a cabo ya sea 2D y/o 3D, estableciendo la mejor opción de mallado para obtener resultados más realistas, de manera que al comparar con cálculos u otros softwares éstos sean ratificados.

Marco Teórico

Los engranes rectos son elementos mecánicos dentados que tiene ejes paralelos y sus dientes son rectos. Constan principalmente de una rueda dentada empleada para transmitir el movimiento desde una parte de una máquina a otra. El engranaje motriz se denomina piñón y el conducido se denomina rueda. Con el propósito de llevar a cabo el diseño de este tipo de engranajes se debe tomar en cuenta las siguientes características: [4]

- Diente del engranaje: Los dientes son los que realizan el esfuerzo de empuje y transmiten la potencia desde el eje o ejes motrices hacia los conducidos.
- Circunferencia primitiva: Alrededor de esta circunferencia se realiza en engrane de los dientes para la transmisión. En base a dicha circunferencia se pueden determinar todas las características fundamentales de los elementos de los engranajes.
- Paso circular: Es el arco de la circunferencia primitiva entre diente y diente.
- Número de dientes: Se simboliza como “Z” y ayudará a calcular la relación de transmisión de potencia en función del número de dientes del piñón y de la rueda.
- Espesor de dientes: Es el grosor que posee el diente en el lugar donde se realizará el contacto.
- Diámetro exterior: Es el diámetro de la circunferencia considerando la distancia de cabeza de diente a cabeza de diente.
- Diámetro interior: Es el diámetro de la circunferencia considerando la distancia del pie de diente a pie de diente.
- Pie del diente: Es la zona que se comprende entre la circunferencia interior y la primitiva.
- Cabeza del diente: Es la zona que se comprende entre la circunferencia exterior y la primitiva.
- Ángulo de presión: Es el ángulo que se forma entre la línea de acción del engrane con la tangente a la circunferencia de paso. Por lo general este ángulo se encuentra normalizado
- Módulo: El módulo está definido como la relación entre el diámetro primitivo y el número de dientes, cabe recalcar que el valor del diámetro debe estar ingresado en milímetros.
- Distancia entre centros: Es la distancia existente entre el centro del engranaje conductor y el centro del engranaje conducido.

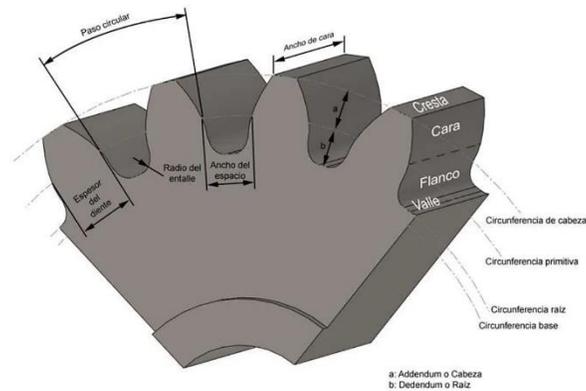


Fig. 1. Características de engranes rectos

Para la fabricación de engranajes existen una infinidad de métodos como, como fundición con moldes de arena, mediante proceso de metalurgia de polvos, con cortadoras formadoras, laminado en frío, etc. En la actualidad los procesos más usados son los de maquinada por fresado, cepillado o con fresa madre y después se afina detalles con esmerilados, bruñidos, cepillados o pulidos. [5]

A. Fresado

Para este método se necesita una fresa de forma que se adapte a la forma del diente del engranaje. Una desventaja es que para este método se necesita una fresa diferente para cada engranaje, ya que al poseer diferente número de dientes el paso circular no es el mismo.



Fig. 2. Fabricación de engranajes mediante fresadora

B. Cepillado

En este método los dientes pueden ser generados por un cortador tipo piñón o de cremallera. En este método el piñón cortador se traslada a lo largo de un eje vertical mientras va penetrando la materia prima del engranaje a una determinada profundidad para generar cada uno de los dientes.



Fig. 3. Fabricación de engranajes con piñón-cremallera

C. Generación con fresa madre

En este proceso la fresa madre es una herramienta de corte con una configuración parecida a la de un tornillo sinfín. La velocidad con la que gire la fresa madre debe ser adecuada para el tipo de engrane que se va a construir, el avance de la fresa madre es lento y a través de la cara de la materia prima hasta que se hayan formado todos los dientes del engranaje.

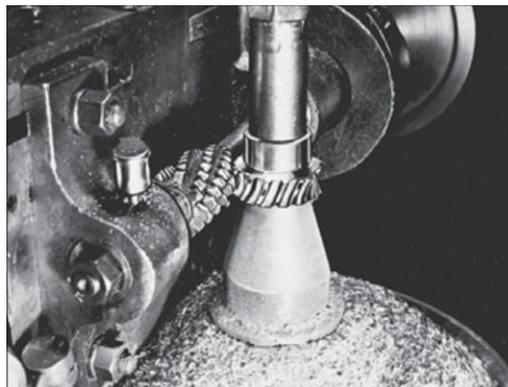


Fig. 4. Fabricación de engranajes con fresa madre

D. Acabados superficiales

Debido a las velocidades y las fuerzas que transmiten los engranajes, estarán sometidos a diferentes tipos de fuerzas dinámicas en caso de que existan errores de fabricación en los dientes. Es por eso por lo que después de cortar los dientes existen métodos para refinarlos y asegurar una calidad superficial óptima para que el engranaje no falle.

- El bruñido y el cepillado por lo general se utiliza en engranes que no han sido tratados térmicamente. En él bruñido, los engranajes endurecidos con dientes y con un pequeño sobre tamaño en acoplamiento con su otro engranaje generan superficies lisas.
- El rectificado y pulido es utilizado para engranes que tienen dientes endurecidos después de haber sido sometidos a tratamientos térmicos. En el rectificado mediante el principio de generación se pueden producir dientes muy exactos.

Materiales y Métodos

Previo a la realización del modelado de un engrane recto se llevó a cabo los cálculos necesarios, para lo cual se ha tomado en cuenta una serie de requerimientos los cuales fueron obtenidos del ejemplo 14.2 de Sigley. [5]

- Material AISI 1020.
- Número de dientes 16.
- Ancho de cara 1 ½ in.
- Paso diametral 8 dientes/pulgada.
- Ángulo de Presión de 20°.

La metodología utilizada para el diseño del engrane recto es AGMA 2001-D04 ya que el procedimiento es muy detallado diseñando el engrane a fatiga por flexión y esfuerzo por contacto.

En el procedimiento para la fatiga por flexión es necesario calcular:

- El diámetro de paso y la velocidad

$$d_p = \frac{Np}{Pd} \quad [1]$$

$$V = \frac{\pi dn}{12} \quad [2]$$

- La carga de trabajo

$$W^t = \frac{33000H}{V} \quad [3]$$

- Los esfuerzos por flexión

$$\sigma = W^t K_o K_v K_s \frac{Pd K_m K_B}{F J} \quad [4]$$

En el procedimiento para desgaste superficial se vuelve a calcular el diámetro de paso, la velocidad y la carga de trabajo para posteriormente calcular el esfuerzo de contacto (σ_c).

$$\sigma_c = C_p \left(W^t K_o K_v K_s \frac{K_m C_f}{dF I} \right)^{1/2} \quad [5]$$

Las dimensiones obtenidas de los cálculos se emplearán para la creación del engranaje recto en el software SOLIDWORKS para su posterior análisis en el mismo y en ANSYS.

A. *Softwares Utilizados*

a. *ANSYS*

Para obtener los resultados del modelo propuesto se realizó el análisis estático de la pieza en ANSYS, tanto en 2D como en 3D, obteniendo la deformación, el esfuerzo de Von -Mises, el factor de seguridad y la fatiga.

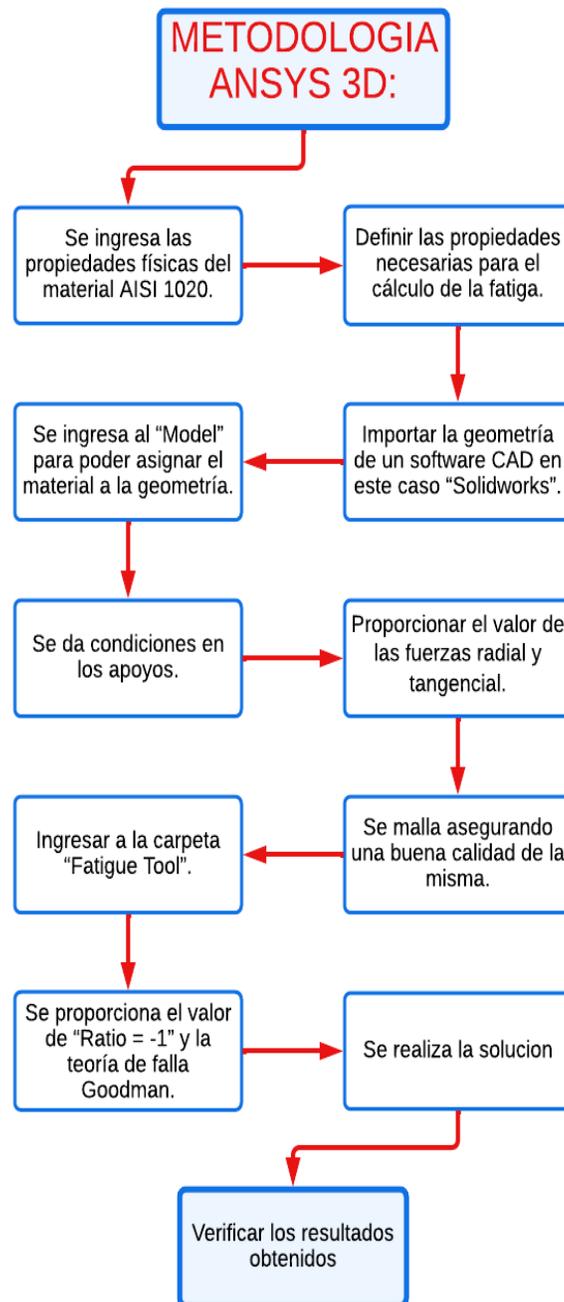


Fig. 5. Algoritmo para Simulación 3D en ANSYS

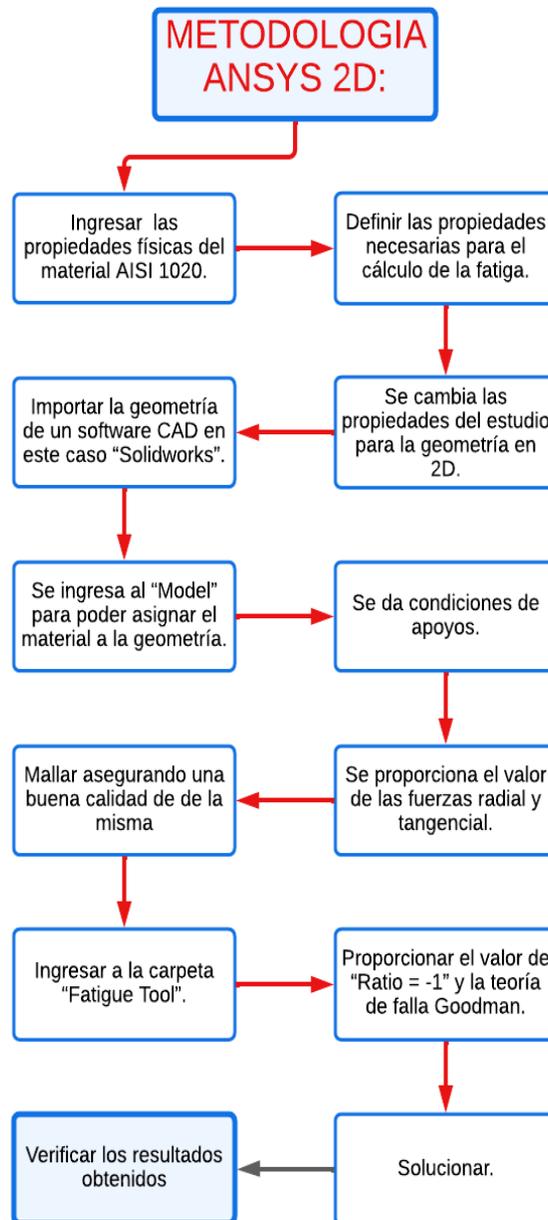


Fig. 6. Algoritmo para Simulación 2D en ANSYS

b. *SOLIDWORKS*

El software *SOLIDWORKS* permite modelar el engranaje con las medidas encontradas por medio de cálculos. Además, es apto para realizar simulaciones de análisis estructural para determinar así la deformación, el esfuerzo de Von -Mises, el factor de seguridad y la fatiga.

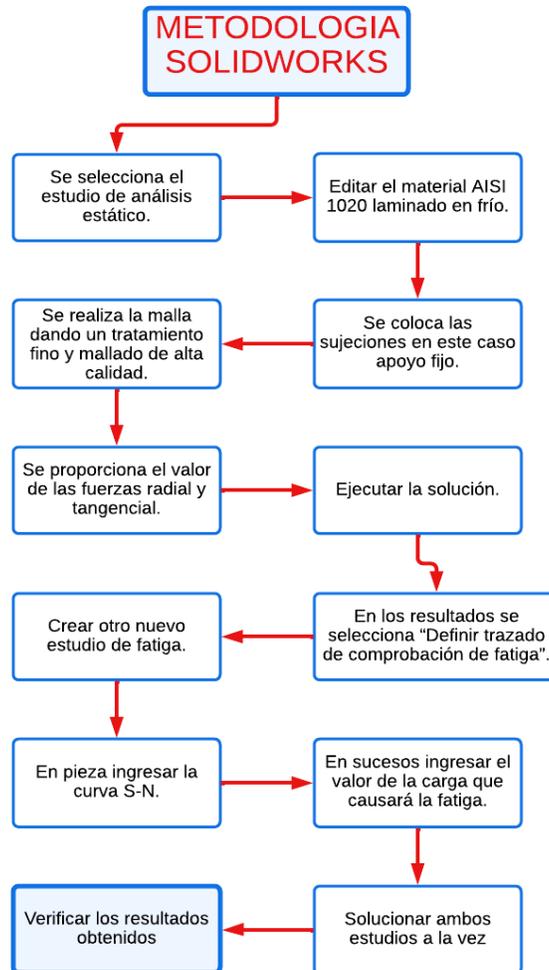


Fig. 7. Algoritmo para Simulación en *SOLIDWORKS*

Resultado y Discusión

A. *Modelado en SOLIDWORKS*

a. *Croquizado*

A partir de las dimensiones obtenidas en los cálculos se procedió a crear el engrane recto que posee un eje de 0.25 in y una cresta de 0.06in.

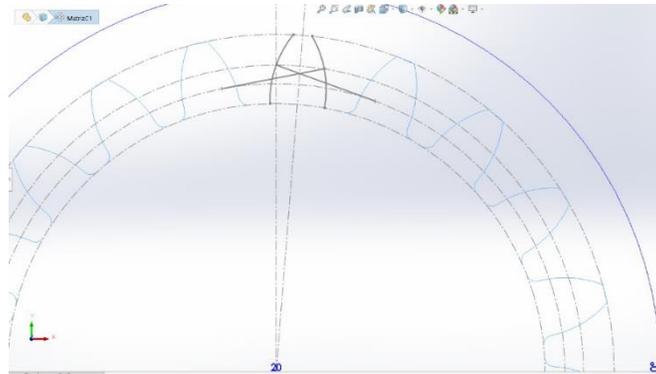


Fig. 8. Croquis de Engranaje

b. Modelo Final

Una vez se tuvo realizado el croquis se prosiguió a extruirlo para poner tener completo al engrane, y además se le añadió el material AISI1020 de la librería.



Fig. 9. Modelado final del engranaje

B. Análisis en 2D en ANSYS

a. Mallado

Al momento de realizar el mallado se obtuvo una buena calidad partiendo de la malla colocada por defecto ya que el promedio que arrojó fue de 0.939 con una desviación estándar de 0.0491.

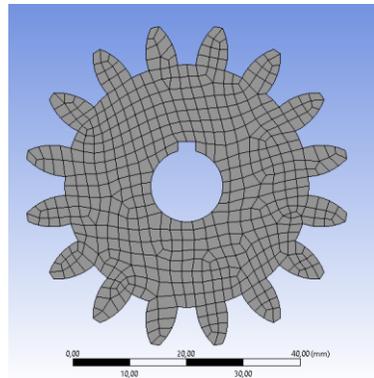


Fig. 10. Mallado en ANSYS (2D)

b. Deformación total

El engranaje presentó una deformación notoria en la parte superior en la cual se aplicaban las cargas, de manera que el diente tendía a deformarse un máximo de 0.0041 mm.

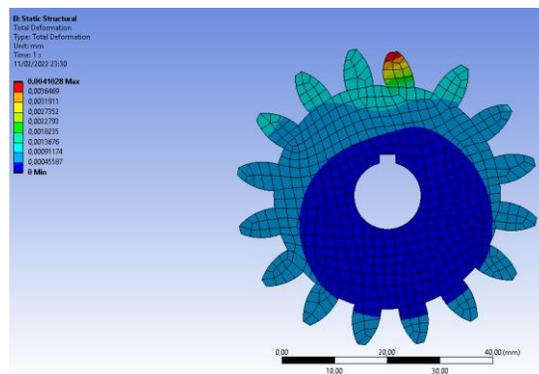


Fig. 11. Deformación total en ANSYS (2D)

c. Esfuerzo Equivalente (Von - Mises)

El esfuerzo equivalente máximo que presentó el modelo se dio en puntos de la cresta y el valle donde alcanzo valores de 64.78 MPa.

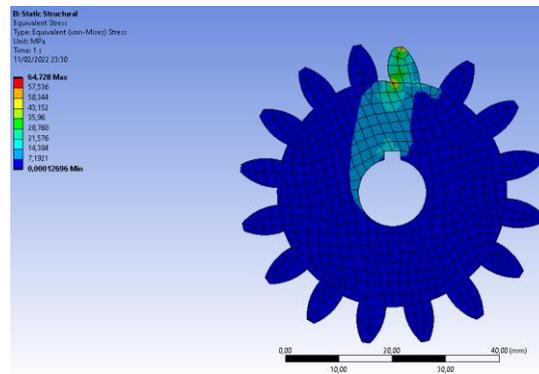


Fig. 12. Esfuerzo Equivalente en ANSYS (2D)

d. Factor de Seguridad

El factor de seguridad que posee la pieza simulada es de 5.87. Este valor se centra en las partes críticas donde sufre más esfuerzo ya que el resto posee un factor de 15.

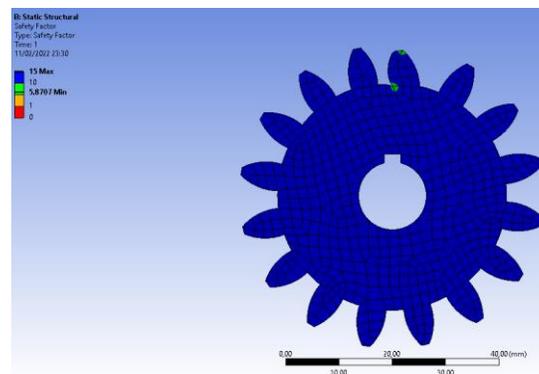


Fig. 13. Factor de Seguridad en ANSYS (2D)

e. Fatiga

- Vida

El resultado del análisis de fatiga mostró que el engranaje posee vida infinita.

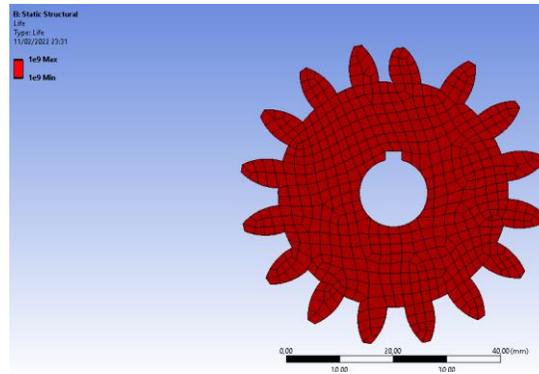


Fig. 14. Vida a Fatiga en ANSYS (2D)

- Factor de seguridad

En fatiga el factor de seguridad que posee el engrane se ve reducido a 3.39, siendo este el menor por lo tanto es el que se debe considerar.

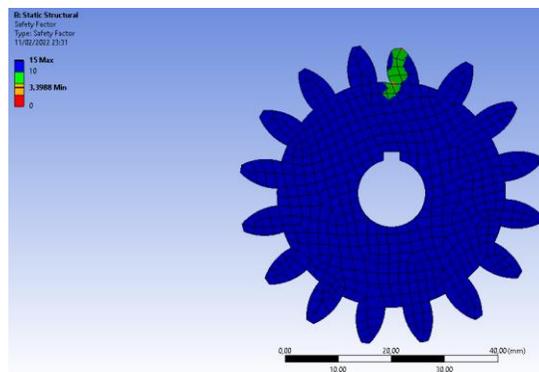


Fig. 15. Vida a Fatiga en ANSYS (2D)

C. Análisis en 3D en ANSYS

a. Mallado

Al momento de realizar el mallado se obtuvo una calidad óptima de la malla colocada arrojando un promedio de 0.919 con una desviación estándar de 0.0807. La cual, comparando con el mallado en 2D, produjo una menor calidad y una desviación mayor.

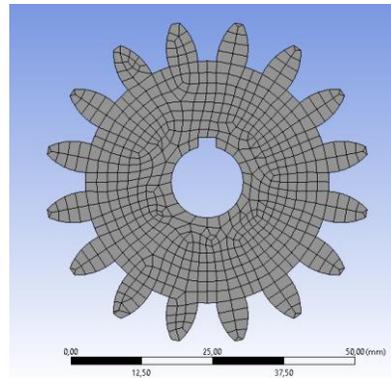


Fig. 16. Mallado en ANSYS (3D)

b. Deformación total

El engranaje presentó una deformación máxima de 0.0044mm en la parte superior del diente donde se aplicaban las cargas.

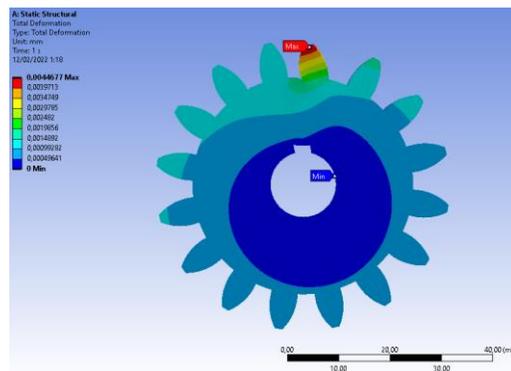


Fig. 17. Deformación total en ANSYS (3D)

c. Esfuerzo Equivalente (Von - Mises)

El esfuerzo equivalente máximo que presentó el modelo es de 62.327 MPa. Siendo este un valor menor al obtenido en el análisis 2D.

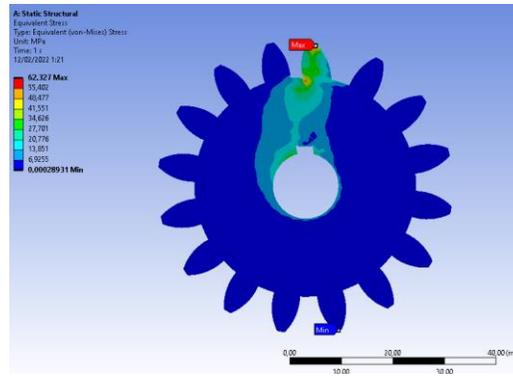


Fig. 18. Esfuerzo Equivalente en ANSYS (3D)

d. Factor de Seguridad

El factor de seguridad que al analizar el modelo 3D es de 6.09 en los puntos críticos, este valor es mayor que el 5.87 planteado en la otra simulación.

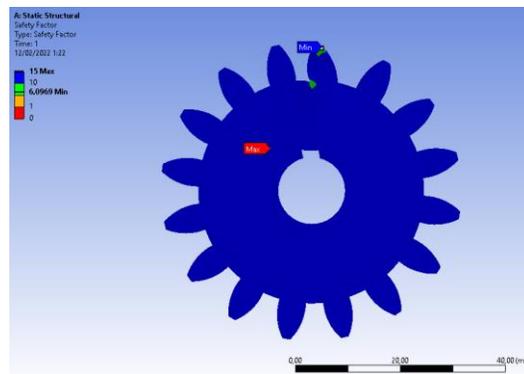


Fig. 19. Factor de Seguridad en ANSYS (3D)

e. Fatiga

- Vida

El resultado del análisis de fatiga mostró que el engranaje posee vida infinita al igual que en 2D.

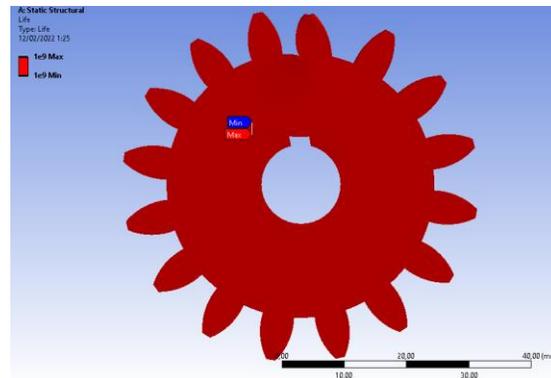


Fig. 20. Vida a Fatiga en ANSYS (3D)

- Factor de seguridad

En fatiga el factor de seguridad que posee el engrane en comparación al otro simulado se ve aumentado a 3.52.

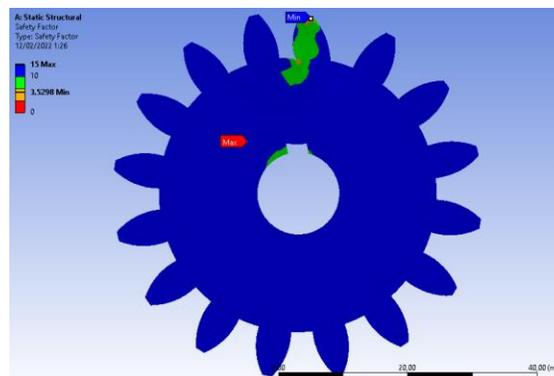


Fig. 21. Vida a Fatiga en ANSYS (3D)

D. Análisis 3D en SOLIDWORKS

a. Mallado

Este software permitió llevar a cabo un mallado más fino (malla 2) por lo cual el valor de los resultados aumentó, para conseguir unos datos similares a los obtenidos en ANSYS, la calidad tuvo que ser reducida hasta un mallado de 3.765mm (malla 1), mientras que con un valor de 1mm se obtuvo una mejor disposición.

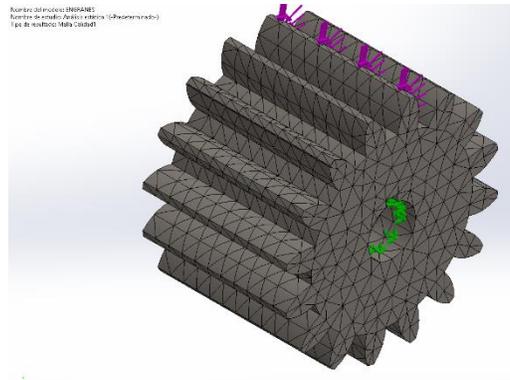


Fig. 22. Mallado de baja calidad en SOLIDWORKS (3D)

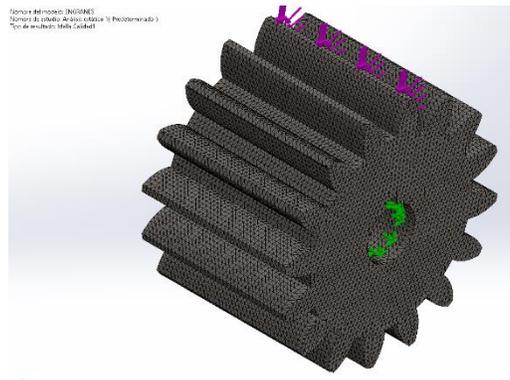


Fig. 23. Mallado de alta calidad en SOLIDWORKS (3D)

b. Deformación total

El engranaje presentó una deformación total de 0.0064 mm en la parte superior del diente donde se aplicaban las cargas en la malla 1 mientras que con la malla 2 este valor se vio incrementado a 0.0067 mm.

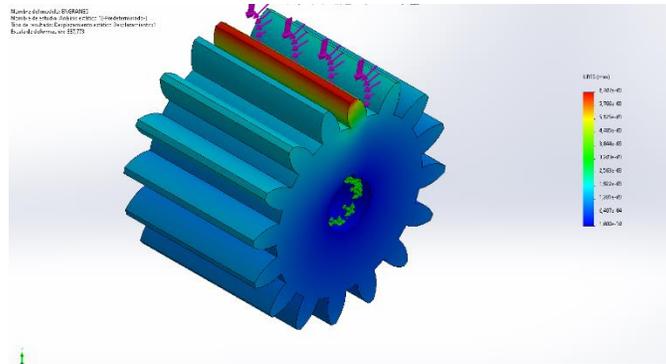


Fig. 24. Deformación en mallado de baja calidad

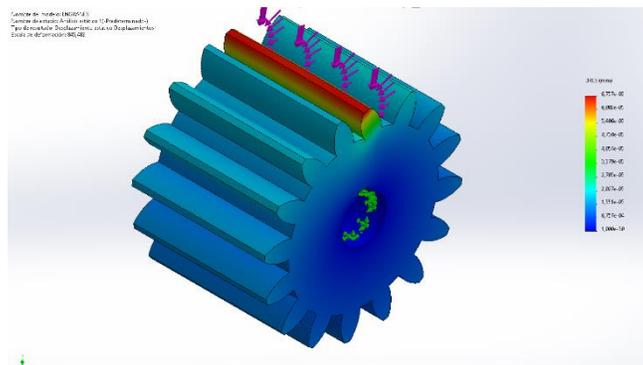


Fig. 25. Deformación en mallado de alta calidad

c. *Esfuerzo Equivalente (Von - Mises)*

El esfuerzo equivalente máximo que presentó el modelo que se logró con la malla 1 es de 64.72 MPa, mientras que con la otra se obtuvo 103.7MPa. De donde se puede apreciar que el resultado 1 es semejante al planteamiento realizado en 2D de ANSYS.

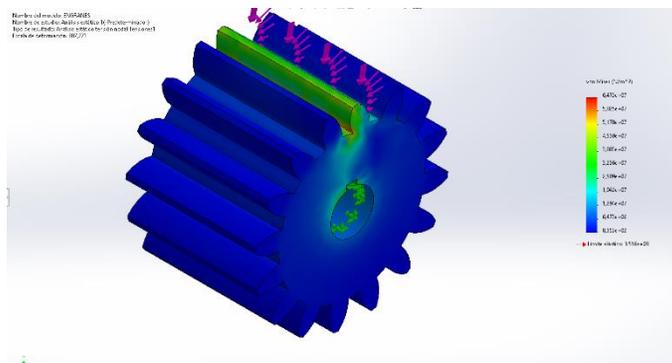


Fig. 26. Esfuerzo Equivalente en mallado de baja calidad

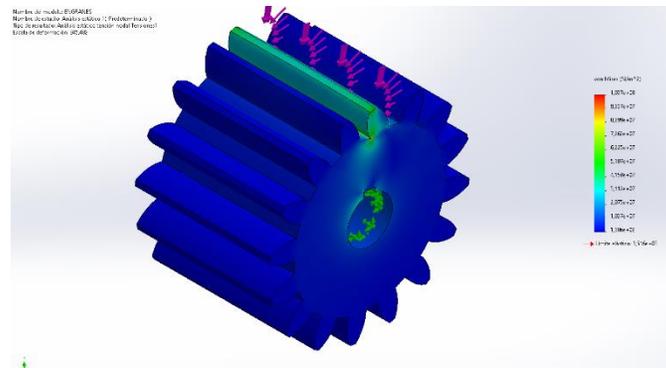


Fig. 27. Esfuerzo Equivalente en maldado de alta calidad

d. Factor de Seguridad

El factor de seguridad mínimo al analizar el modelo de 1 es de 5.4, mientras que con la malla 2 se tiene 3.4, mostrando así que la calidad de malla si influye en los resultados.

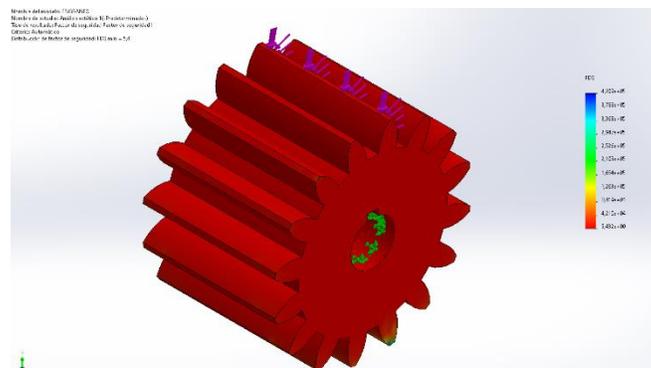


Fig. 28. Factor de Seguridad en maldado de baja calidad

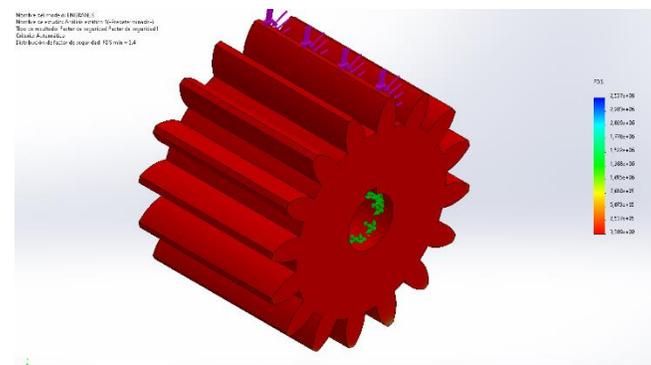


Fig. 29. Factor de Seguridad en maldado de alta calidad

e. *Fatiga*

- Vida

El resultado del análisis de fatiga mostró que el engranaje posee vida infinita al igual que en 2D.

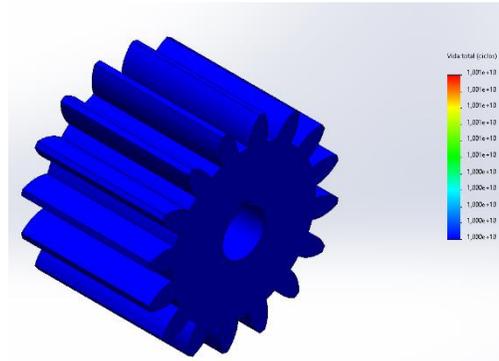


Fig. 30. Vida a Fatiga en ANSYS (3D)

- Factor de seguridad

El factor de seguridad a fatiga no fue posible calcular debido a las limitaciones del software.

E. *Comparación de Mallas*

Las mallas fueron realizadas tanto en SOLIDWORKS como en ANSYS, en 2D y 3D de lo cual se obtuvo los siguientes resultados.

Tabla 1. Comparativa entre mallados

Mallado	Deformación	Esfuerzo	Factor Seguridad	Vida Fatiga
2D ANSYS	0.0041 mm	64.78 MPa	5.87	∞
3D ANSYS	0.0047 mm	62.27 MPa	6.09	∞
3D SolidWorks	0.0064 mm	64,72 MPa	5.4	∞

Al fijarse en la tabla se puede apreciar como existe una variación según el paquete computacional de elemento finito que se utilice, ya que en este caso debido al limitante de la licencia no se pudo aplicar un mallado más extenso en ANSYS. Pero se puede apreciar que los valores tienden a ser

cercanos entre ellos, siendo la mejor respuesta la generada por SolidWorks ya que el factor de seguridad es el menor de todos, y posee una mayor deformación, lo cual podría suponer un escenario más crítico al que se puede enfrentar el engranaje.

Cabe destacar que el estudio 2D de ANSYS es una buena opción para aprovechar la cantidad de nodos permitidos, ya que se simplifica la malla.

Referencias

1. M. Sáenz Niño. "Diseño de reductores de engranajes". UNIVERSIDAD DE VALLADOLID (accedido el 11 de febrero de 2022). <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/16736/TFG-I-383.pdf;jsessionid=F2875EF7A3B0FC0B4350CD4AB96D19F7?sequence=1>
2. M. Torres Búa. "4.3.- Engranajes". Xunta de Galicia. https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947673/contido/43_engranajes.html (accedido el 11 de febrero de 2022).
3. Ingeniería Avanzada Ecuador. Evolución de la Tecnología de Simulación (01): Serie Avances Simulación por Elementos Finitos. (6 de junio de 2020). Accedido el 11 de febrero de 2022. [Video en línea]. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=k3LVsliQ4J0>
4. L. Vera. "Engranajes de dientes rectos". SlideShare. <https://es.slideshare.net/luisvera95/engranajes-de-dientes-rectos-62166336>
5. (accedido el 11 de febrero de 2022).
6. R. Budynas y J. K. Nisbett, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, 9a ed. Mexico: McGraw-Hill Educación, 2012.