

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA



**ANÁLISIS DE FALLA POR FATIGA PARA DETERMINAR LA VIDA
ÚTIL DEL EJE PRINCIPAL DE UN MOLINO DE MARTILLO
TRITURADOR**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

**AUTOR
LUIS ENRIQUE FERNANDEZ MONTENEGRO**

**ASESOR
ELMER ROLANDO POLO BRICEÑO**
<https://orcid.org/0000-0002-5831-8818>

Chiclayo, 2022

**ANÁLISIS DE FALLA POR FATIGA PARA
DETERMINAR LA VIDA ÚTIL DEL EJE PRINCIPAL DE
UN MOLINO DE MARTILLO TRITURADOR**

PRESENTADA POR:

LUIS ENRRIQUE FERNANDEZ MONTENEGRO

A la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
para optar el título de

INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO

APROBADA POR:

Alexander Querevalu Morante

PRESIDENTE

Alejandro Vera Lázaro

SECRETARIO

Elmer Rolando Polo Briceño

VOCAL

DEDICATORIA

A Dios por ser quien me ayudo en los momentos más difíciles y guío mi camino en todo momento, gracias por darme una familia hermosa y maravillosa.

A toda mi familia en especial a mis padres Oimer y Flor por haberme forjado a ser la persona que soy hoy en día, a mi tía Rosa, abuela Berlinda, abuelo Wenseslao y a mi Tío Nelson, que son las personas que hicieron este sueño posible, agradecerles por todos los consejos y por siempre estar pendientes de mí, apoyarme y siempre animarme a seguir.

A mis hermanos Diana, Julio y nicol por su apoyo y confianza en mí, mis sobrinas Tatiana y Valeria que siempre me ayudaron y apoyaron sobre todo por compartirme sus sueños y alegrías, gracias a todos por ser parte importante de mi familia.

ÍNDICE

RESUMEN	11
ABSTRACT	12
I INTRODUCCIÓN	13
1.1 REALIDAD O PROBLEMÁTICA	14
- Realidad Problema	14
- Pregunta de investigación	14
- Delimitación de la investigación	15
1.2 JUSTIFICACIÓN	15
- Social:	15
- Económica:	15
- Ambiental:	15
- Tecnología:	15
1.3 OBJETIVOS	16
- Objetivo general	16
- Objetivos específicos	16
1.4 METODOLOGÍA DE DISEÑO	17
1.5 MATRIZ DE CONSISTENCIA	18
II MARCO TEÓRICO	19
2.1 ANTECEDENTES	19
2.2 BASES TEÓRICAS	21
- La molienda en la industria	21
- Maíz amarillo duro (MAD).....	21
- Producción del Maíz amarillo duro nacional.....	21
- Semilla de maíz amarillo duro importado	22
- Tipos de industria.....	22
- Esquema del molino.....	25
- Tipo de molienda	26
- Análisis de fallos.....	26
- Clasificación de los fallos	26
- Fatiga	27
- Criterios para la falla por fatiga.....	28
- Reconocimiento superficial.....	28
- Concentración de esfuerzos.....	28
- Fatiga en ejes	29
- Diagrama de cuerpo libre (DCL).....	30
- Teoría de fallas.....	31
- Fuerza cortante y momentos flexionantes en vigas	31
- Esfuerzo	31
- Diagrama S-N	33

- Límite de resistencia a la fatiga.....	33
- F. modifican el límite de resistencia a la fatiga	34
➤ F. de superficie (Ka).....	35
➤ F. de tamaño (kb).....	36
➤ F. de carga (kc).....	36
➤ F. de temperatura (kd)	37
➤ F. de confiabilidad (ke).....	37
➤ F. de efectos varios (kf)	38
- Resistencia a la fatiga.....	38
- Criterios de falla por fatiga ante cargas variable	39
- Método de Goodman modificado.....	40
- Método de Gerber	40
- Sistema de transmisión de poleas con bandas	40
- Metodología del Diseño	41
- SolidWorks	42
- Análisis por elementos finitos (FEA).....	42
- MDSolids.....	42
- CES EduPack.....	43
- Carburización.....	43
III Características de funcionamiento	44
- Reconocimiento y descripción del molino de martillo triturador de la empresa MAIZAL DEL NORTE EL INGENIERO.....	44
3.1 Reconocimiento, evaluación y dimensionamiento del eje principal molino de martillo expuesto a falla por fatiga.....	47
- Reconocimiento	47
- Evaluación	49
- Dimensionamiento.....	50
- Diseño del eje Principal	50
- Medidas del eje principal.....	50
3.2 Diseño del eje principal y la capa carburizada con espesor (um) del molino de martillo mediante el software SolidWorks.....	52
- Capa carburizada.....	52
- Diseño del eje en 3D	53
- Diseño de la capa carburizada en 3D	53
- Muestra del eje principal con la capa carburizada	54
- Ensamblaje del eje principal con la capa carburizada.	54
3.3 Determinar las fallas por fatiga del eje principal mediante el método analítico y el software CAE (SolidWorks).....	55
3.3.1 Análisis de falla por fatiga (método analítico)	55
- Descripción del material del eje principal.....	55
- Cálculo del sistema de transmisión.....	56

-	Cálculo de las cargas están en el eje principal.	57
➤	Pesos presentes en el eje principal de la parte de trituración.	57
➤	Peso del ventilador.	57
➤	Torque resistivo de inercia en la masa rodante.	58
➤	Torque total.	58
➤	Carga de impacto presente en la parte de trituración.	59
➤	Carga de la polea.	60
-	Diagrama de cuerpo libre del eje principal del molino.	61
-	En el plano YZ.	62
-	Diagrama del esfuerzo cortante en el plano YZ.	63
-	Diagrama del momento flector en el plano YZ.	63
-	En el plano XZ.	64
-	Diagrama del esfuerzo cortante en el plano XZ.	64
-	Diagrama del momento flector en el plano XZ.	65
➤	Secciones de tensiones máximas.	65
-	Análisis de fatiga del eje principal	66
3.3.2	Análisis de falla por fatiga mediante el software SolidWorks	73
-	Descripción del eje principal.	73
-	Descripción del material del eje principal.	73
-	Cargas aplicadas al eje principal.	74
-	Sujeciones	74
-	Información de malla.	75
-	Distribución de tensiones.	77
-	Desplazamiento.	77
-	Factor de seguridad	78
-	Análisis de fatiga.	78
-	Daño acumulado.	79
-	Vida total.	80
-	Factor de carga.	80
-	Indicador de Biaxialidad.	81
-	Curva S-N.	81
IV	ANÁLISIS DE RESULTADOS.	83
V	CONCLUSIONES	85
VI	RECOMENDACIONES.	86
VII	BIBLIOGRAFÍA	87
VIII	ANEXOS	89
-	Imágenes del desmontaje y pesaje del molino triturador de martillos.	89
-	SolidWorks Simulation	93
-	Plano del eje	97

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Datos técnicos - Molino de martillos [6].....	23
Tabla 2: Datos técnicos - Molino de rodillos [6].....	24
Tabla 3: Datos técnicos - Molino de bolas [6].....	25
Tabla 4: Dimensionamiento de molienda (Tamaño) [8]	26
Tabla 5: Factores de acabado de superficie	36
Tabla 6: Valores para el factor de confiabilidad [2].....	38
Tabla 7: Características del molino de martillo triturador [19].....	46
Tabla 8: Características del motor del molino [19]	47
Tabla 9: Cálculo de pesos de las piezas del rotor.	57
Tabla 10: Cálculo de peso del ventilador.	57
Tabla 11: Propiedades del Acero 1020 con tratamiento de cementación.	73
Tabla 12: Descripción de Mallado del eje principal.	76
Tabla 13: Resultados de la tensión máxima mediante el método analítico y SolidWorks Simulation.....	83
Tabla 14: Resultados de la vida total mediante el método analítico y SolidWorks Simulation.....	84
Tabla 15: Resultados del factor de seguridad mediante el método analítico y SolidWorks Simulation.....	84

LISTADO DE GRÁFICAS

Grafica 1: Diagrama S-N [14]	33
Grafica 2: Gráfica límite de resistencia a la fatiga Vs. Resistencia a la tensión [2].....	33
Grafica 3:Factores de modificación de superficie para el material del acero [2]	35
Grafica 4:Dispersión de los datos experimentales del límite a la fatiga de un material [2]	37
Grafica 5:Fracción de resistencia a la fatiga f. [2].....	39
Grafica 6:Diagrama con criterios de falla [2]	39

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: maíz Amarillo Duro (MAD) [8].....	21
Figura 2: Producción, superficie y rendimiento nacional de semilla de maíz amarillo duro, entre los años 2007-20017 [7]	22
Figura 3:Importación de semillas de maíz amarillo duro, 2007-2017 [7].....	22
Figura 4:Molino de martillo [6].....	23
Figura 5:Molino de rodillos [6]	24
Figura 6:Molino de bolas [6]	24
Figura 7: Esquema de un molino de martillos [8]	25
Figura 8:Superficie de rotura por fatiga [2].....	28
Figura 9: Superficie de falla en la que se pueden distinguir el origen de la grieta, la zona de fatiga y la zona de fracturada instantánea. [11]	28
Figura 10: Gráficas de f. de concentración de esfuerzos para carga axial y de flexión [12]	29
Figura 11:Variación de esfuerzos de un punto en el tiempo [5].....	30
Figura 12:A) Diagrama de cuerpo libre de una viga. B) Resultante de fuerza cortante y momento flexionante. [2]	31
Figura 13:A) Esfuerzo tridimensional. B) Esfuerzo bidimensional [2].....	32
Figura 14: S. reductor de velocidad [8]	41
Figura 15: S. multiplicador de velocidad [8].....	41
Figura 16: Filosofía de modelamiento de piezas en SolidWorks [15]	42
Figura 17: Programa MDSolids 4.1.0 [17].....	43
Figura 18: CES 2018 EduPack [18]	43
Figura 19: Partes del molino de martillos [8].....	45
Figura 20: Molino triturador de la empresa actual TN-8.....	45
Figura 21: Sistema interno del molino TN-8.....	46
Figura 22: Eje principal del molino con los rodajes en su posición original.....	47
Figura 23: Medición del cambio de sección del lado izquierdo eje principal del molino	48
Figura 24: Medición de la parte de trituración del eje principal del molino	48
Figura 25:Verificación del esfuerzo cortante ocasionado por el martillo y disco sobre el eje principal, donde se puede observar inicio y propagación de grieta a y b. En c se puede apreciar la corrosión en la superficie del eje que luego producirá una corrosión bajo tensión.....	49
Figura 26:Apreciación del corte transversal del eje y medición del espesor de la capa carburizada o cementada.	49
Figura 27: Diseño del eje principal.....	50
Figura 28: Medida longitudinales del eje principal de 644mm en AutoCAD.....	50
Figura 29: Dimensionamiento de las chavetas del eje principal en 2D.	51
Figura 30: Dimensionamiento de diámetros del eje principal.....	51
Figura 31: (a) Microestructura del eje mediante un corte transversal, donde se puede apreciar una estructura perlítica en el núcleo. (b) Apreciación de la franja carburizada a 50µm con un espesor promedio 143.44 microns - 0.14344mm.	52

Figura 32: Se muestra el diseño del eje principal en 3D.	53
Figura 33: Capa carburizada con un espesor de 143.44µm o 0.14344 mm.....	53
Figura 34: Muestra de la capa carburizada y el eje principal en 3D.	54
Figura 35: Ensamblaje de la capa carburizada y el eje principal en 3D.....	54
Figura 36: Composición química del SAE 1020. [20]	55
Figura 37: Propiedades mecánicas del Aceros 1020. [20].....	55
Figura 38: Sistema de transmisión. [21].....	56
Figura 39: Torque inercial con las fuerzas de impacto.....	58
Figura 40: Distancia del centro hasta la resultante del impacto.	59
Figura 41: Cargas en la polea usando AutoCAD.	60
Figura 42: Dimensionamiento del eje principal.	61
Figura 43: DCL tridimensional del eje principal.....	61
Figura 44: DCL tridimensional del eje principal con las cargas establecidas.	62
Figura 45: DCL en el plano YZ. (MDSolids).....	62
Figura 46: Esfuerzos cortantes. (MDSolids)	63
Figura 47: Momentos flectores. (MDSolids).....	63
Figura 48: DCL en el plano XZ. (MDSolids).....	64
Figura 49: Esfuerzos cortantes. (MDSolids)	64
Figura 50: Momentos flectores. (MDSolids).....	65
Figura 51: Secciones críticas en el eje principal.....	65
Figura 52: Eje principal del molino triturador de maíz.	73
Figura 53: Cargas y torsión aplicada en el eje principal con SolidWorks.....	74
Figura 54: Ventana de SolidWorks donde se define la sujeción tipo rodamiento.....	75
Figura 55: Muestra de sujeción de rodamientos tipo muelle del eje principal.	75
Figura 56: Mallado del eje principal.....	76
Figura 57: Distribución de la tensión de Von Misses.....	77
Figura 58: Distribución de desplazamiento.	77
Figura 59: Factor de seguridad del eje principal.	78
Figura 60: Parámetros para el análisis de fatiga.....	78
Figura 61: Ventana definición de propiedades de fatiga.	79
Figura 62: Daño acumulado en el eje principal.....	79
Figura 63: Vida total del eje principal.	80
Figura 64: Factor de carga del eje principal.	80
Figura 65: Indicador de biaxialidad para el eje principal del molino de maíz.	81
Figura 66: Curva S-N.	82
Figura 67: Propiedades de la curva SN de fatiga.....	82
Figura 68: Desmontado del eje principal.....	89
Figura 69: Reconocimiento del eje principal.....	89
Figura 70: Pesaje del eje principal.....	90
Figura 71: Medidas del eje principal.	90
Figura 72: Reconocimiento de la zona de trituración del molino de martillo.	91
Figura 73: Pesaje de la zona de trituración.....	91
Figura 74: Obteniendo el peso de la polea.	92
Figura 75: Medición del diámetro de la polea.....	92

RESUMEN

El propósito de esta tesis tiene como objeto, estimar la vida útil del eje principal mediante el análisis de falla por fatiga ante la presencia de una fisura en el eje principal del molino triturador de maíz de la empresa MAIZAL DEL NORTE EL INGENIERO -CHICLAYO para determinar su vida útil, será basada en la combinación de un estudio analítico utilizando el método de Gerber y un estudio de falla de fatiga con SolidWorks en el cual se hará una comparación de resultados para comprobar la fiabilidad de estos. Sabiendo que un molino de martillos es una máquina que se utiliza para procesos de molienda y trituración, en el cual uno de sus componentes principales son los ejes, para lo cual esta tesis se presentará como una solución para mejorar o aumentar la vida útil del eje: Los ejes son componentes que soporta los elementos y guían el movimiento de una pieza, por eso son considerados como los elementos más importantes en las máquinas, una falla en los ejes por fisura o fatiga generaría una parada innecesaria de horas o días que involucraría un elevado costo para la empresa. Esta tesis constará de tres fases: En la primera fase se hará el diagnóstico del trabajo actual del molino de martillo triturador de maíz para poder evaluar, reconocer y dimensionar el eje principal del molino. En la segunda fase se estudiará las propiedades de funcionamiento del eje para sostener una determina carga, en el cual se realizó la comparación entre el método de Goodman modificado y el método de Gerber, se determinó utilizar el método analítico de Gerber por ser un método más conservador, en su tercera fase se realiza el estudio de falla por fatiga mediante el método analítico usando el programa SolidWorks Simulation con lo que finalmente se determinó la vida útil del eje principal de 63×10^6 ciclos. Los resultados obtenidos serán puestos a disposición de la empresa MAIZAL DEL NORTE EL INGENIERO para que le den el uso necesario.

Palabras claves: Ejes, Vida útil, Fisura, Estudio analíticos, método de Goodman modificado, método de Gerber.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to analyze the fatigue failure of the main shaft of the corn grinding mill of the company MAIZAL DEL NORTE EL INGENIERO -CHICLAYO to determine its useful life, it will be based on the combination of an analytical study using the method of Gerber and a fatigue failure with SolidWorks in which a comparison of results will be made to check the reliability of their study.

Knowing that a hammer mill is a machine that is used for grinding and grinding processes, in which one of its main components are the shafts, for which this thesis will be presented as a solution to improve or increase the useful life of the shaft. : The axes are components that support the elements and guide the movement of a piece, that is why they are considered as the most important elements in the machines, a failure in the axes due to cracking or fatigue would generate an unnecessary stoppage of hours or days that would involve a high cost for the company.

This thesis will consist of three phases: In the first phase, the diagnosis of the current work of the corn crusher hammer mill will be made in order to evaluate, recognize and size the main axis of the mill. In the second phase, the operating properties of the shaft will be studied to sustain a certain load, in which the comparison between the modified Goodman method and the Gerber method was made, it was determined to use the Gerber analytical method as it is a more conservative, in its third phase the fatigue failure study is carried out by means of the analytical method using the SolidWorks Simulation program with which the useful life of the main axis of 63×10^6 cycles was finally determined. The results obtained will be made available to the company MAIZAL DEL NORTE EL INGENIERO so that they can use it as necessary.

Keywords: Axes, Useful life, Crack, Analytical study, modified Goodman method, Gerber method.

I INTRODUCCIÓN

En el año 2002 la Sociedad Americana de Materiales publicó un manual sobre el análisis de falla donde explica que, si un componente ya ha fallado, no opera a las mismas condiciones a las que fue diseñado. Los ejes y ejes de transmisión son elementos metálicos que soportan vibraciones, exposición a entornos hostiles y movimiento relativo, también cargas de compresión, flexión, torsión, tracción y combinación de estas. [1]

En la actualidad las máquinas rotativas han dado inicio al desarrollo de la mayoría de industria entre ellas la industria textil, la industria alimenticia, etc. Pero se conoce que estas máquinas van a sufrir fallas por el tiempo de desgaste, condición de operación, etc. Los molinos también sufren fallas donde una de sus etapas más importantes es la trituración y la molienda.[2]

La trituradora experimentará fallas mecánicas durante su vida útil, las cuales son vistas en: el desequilibrio de elementos giratorios, acoplamientos desalineados, ejes desgastados. Estos problemas generalmente son causados por cambio de dirección e intensidad en las fuerzas, las cuales son ocasionadas por el movimiento de rotación de la máquina lo cual puede generar la falla por fatiga.[2]

Los ejes son considerados un miembro rotatorio, en el cual se encuentran elementos transmisores de potencia como engranes, poleas, levas, etc. La carga sobre el eje puede ser por flexión, torsión, axial, combinadas, etc. [3]

El análisis de falla nos ayuda a diagnosticar la condición del estado mecánico de un componente de la máquina entre ellos están los ejes, engranajes, rodamientos, etc. Con el objetivo de detectar oportunamente las posibles fallas que pueden tener y las causas que lo provocan. Cuando en la máquina existen fricciones entre su pieza y la materia que se utiliza se sufre desgaste en sus ámbitos de contacto. Esto significa que va a aumentar los esfuerzos, tensiones y hasta producirle pérdida de energía. [4]

1.1 REALIDAD O PROBLEMÁTICA

- Realidad Problema

Entre los años 2009 a 2018 la producción nacional de semilla de maíz amarillo duro ha aumentado su tasa promedio anual de 1% (es baja). Por otro parte, la tasa anual de crecimiento promedio de las importaciones de semilla de maíz amarillo entre el 2007 al 2018 fue de más de 9%.

Las máquinas de molino de martillo tienen los procesos de molienda y trituración, en el cual se emplea un grupo de ejes que llevan martillos que son utilizados para desintegrar, pulverizar y moler varios tipos de materiales.

Las partes más importantes de una máquina de molino de martillo es el sistema de trituración la cual está formada por ejes secundarios, eje principal y discos porta martillos, entre otros.

Donde el eje es uno de los elementos más importantes, el cual se puede clasificar en ejes giratorios o ejes estacionarios. Los cuales son utilizados como turbinas, trituradoras, motores. Siendo los ejes giratorios los que están sometidos a cargas de tracción, torsión, flexión, etc. Que son cargas variables generando mayores esfuerzos, lo cual lo puede llevar a la falla por fatiga, fractura o desgaste.

Según los estudios realizados, al menos 8 de cada 10 fallas en piezas mecánicas que trabajan en cargas variables que van generando mayores esfuerzos están vinculadas a los fenómenos de fatiga.

La fatiga es un proceso que realiza un cambio o degeneración de un material sometido a esfuerzos variables o deformaciones, por el cual hace mucho tiempo atrás se han desarrollado muchos tipos de técnicas de ensayo de estudio a la fatiga. Donde el estudio de la fatiga es muy importante para observar o estudiar los fallos de los componentes en el campo de la ingeniería.

- Pregunta de investigación

¿Es posible determinar la vida útil de un eje principal de un molino de martillo triturador mediante de método analítico y por SolidWorks?

- Delimitación de la investigación

La investigación se centrará en tres partes, la cual lo primero es realizar un estudio a las características del eje al soportar las cargas establecidas. En la segunda se realizará un estudio analítico utilizando el método de Gerber y en la tercera parte se hará un estudio de falla de fatiga con SolidWorks para al final realizar una comparación de resultados para comprobar la fiabilidad de estos.

1.2 JUSTIFICACIÓN

- Social:

En este estudio se busca que el eje tenga más uso prolongado de vida eso repercutirá en una máxima producción de alimentos balanceados para aves.

- Económica:

Este estudio del análisis de falla por fatiga en el eje principal planea mediante un estudio determinar las fallas que afectan de forma significativa la vida útil del eje. Teniendo en cuenta que al fallar ocasiona paradas innecesarias para la empresa, lo cual generaría pérdida de dinero no solo por el costo de la pieza, sino también porque involucra parar la producción. Esto contribuirá en la disminución de costos en la empresa MAIZAL DEL NORTE EL INGENIERO ocasionada por fatiga. Una vez obtenida la información brindará la información al molino para la solución correspondiente.

- Ambiental:

Al conocer la falla del molino, se puede dar las soluciones correspondientes. Una de ellas es que se puede mejorar la vida útil del eje hasta su reutilización. También al tener el molino trabajando de manera correcta, no ocasiona ruidos extraños que podrían causar molestias auditivas y afectar a la salud de las personas.

- Tecnología:

Este estudio del eje principal del molino tiene como intención impulsar y dar base a futuras investigaciones relacionadas al análisis de este tipo de eje, ya que en este se está tomando en cuenta la capa cementada en el eje para datos más exactos.

1.3 OBJETIVOS

- **Objetivo general**

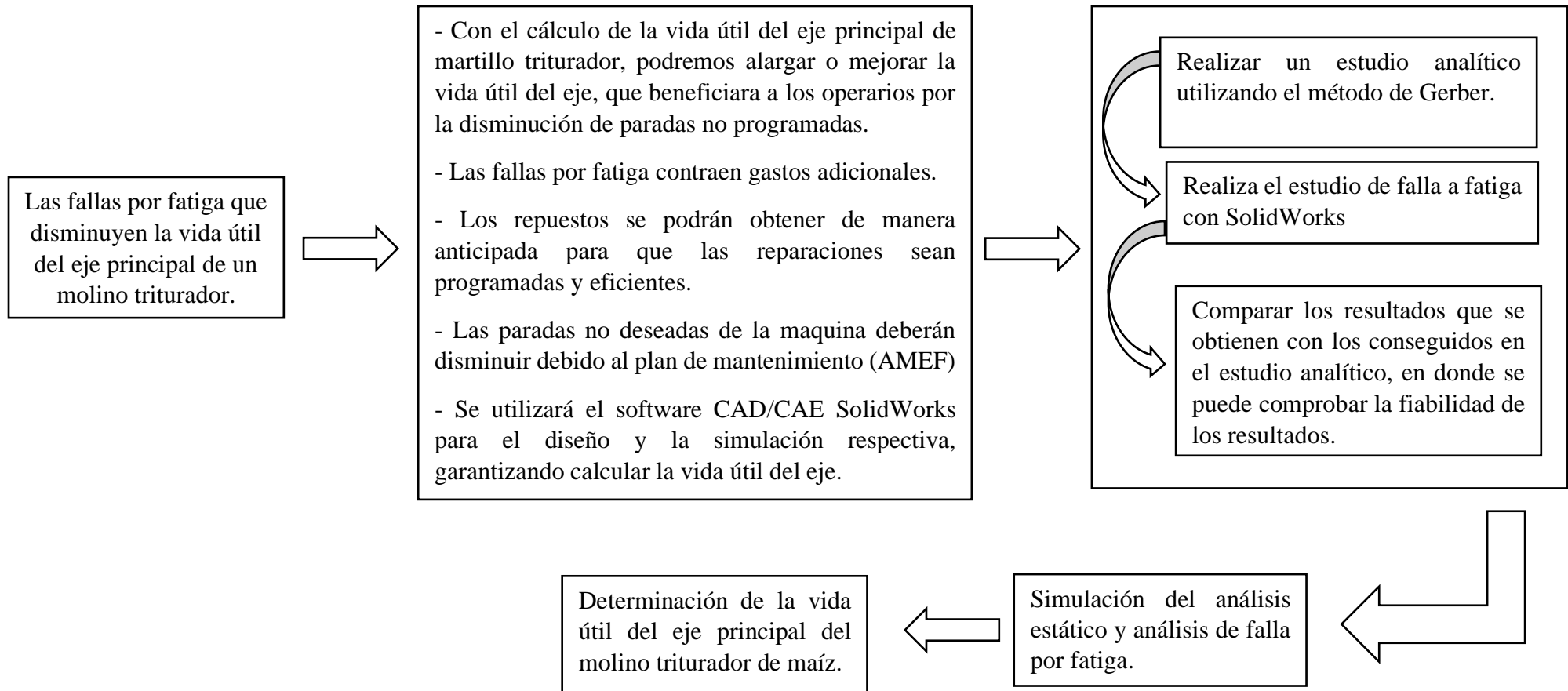
Realizar el análisis de falla por fatiga para determinar la vida útil del eje principal de un molino de martillo triturador.

- **Objetivos específicos**

1. Diagnosticar el trabajo del eje principal del molino de martillo expuesto a falla por fatiga.
2. Diseñar el eje principal y la capa carburizada con espesor (um) del molino de martillo mediante el software CAE (SolidWorks).
3. Determinar las fallas por fatiga del eje principal mediante el método analítico y el software CAE (SolidWorks).
4. Determinar la vida útil del eje principal del molino de martillo triturador de maíz mediante el método analítico y el software CAE (SolidWorks).

1.4 METODOLOGÍA DE DISEÑO

Tema: ANÁLISIS DE FALLA POR FATIGA PARA DETERMINAR LA VIDA ÚTIL DEL EJE PRINCIPAL DE UN MOLINO DE MARTILLO TRITURADOR



1.5 MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
¿Es posible determinar la vida útil de un eje principal de un molino de martillo triturador mediante de método analítico y por SolidWorks?	GENERAL	GENERAL	<p>VARIABLE INDEPENDIENTE Análisis de falla por fatiga del eje principal de un molino de martillo triturador</p> <p>Indicadores:</p> <p>Esfuerzos Desplazamiento Factor de seguridad Torque</p> <p>VARIABLE DEPENDIENTE Comparación del estudio analítico y el estudio de falla de fatiga con SolidWorks, para conocer la vida útil.</p> <p>Indicadores:</p> <p>Procesamiento de datos</p>	<p>DISEÑO DE INVESTIGACIÓN Tipo aplicada correlacional con utilización del software CAD/CAE SolidWorks.</p> <p>TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS En este proyecto de investigación se usará la observación a través de archivos audiovisuales.</p> <p>POBLACIÓN Y MUESTRA La unidad de estudio del eje de un triturador de martillo.</p> <p>La población será las maquinas triturador de martillos existentes.</p>
	Realizar un análisis de falla por fatiga del eje principal de un molino de martillo triturador de maíz para determinar la vida útil en el molino MAIZAL DEL NORTE EL INGENIERO	Si realizo el análisis de falla por fatiga del eje del molino de martillo triturador, entonces se podrá determinar la vida útil y ver soluciones para su mejoramiento.		
	ESPECÍFICOS	ESPECÍFICOS		
	1.-Reconocimiento, evaluación y dimensionamiento del eje principal molino de martillo expuesto a falla por fatiga.	1.- Si se identifica el trabajo que realiza y los materiales que utiliza en su proceso, se podrá realizar un análisis más preciso.		
	2.- Diseñar el eje principal y la capa carburizada con espesor (um) del molino de martillo mediante el software CAE.	2.- Si se realiza el estudio mediante el uso del método analítico y SolidWorks Simulation, se podrá determinar las causas por la que la maquina puede fallar.		
3.- Evaluar las variables obtenidas a través del método analítico y análisis CAE del eje principal.	3.- Si se realiza el estudio de falla por fatiga en el eje, se podrá determinar la vida útil del molino triturador de martillo			
4.- Determina la vida útil del eje principal del molino de martillo triturador de maíz.	4.- Si se realiza el estudio de falla por fatiga en el eje, se podrá determina la vida útil del molino triturador de martillo			

II MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

El trabajo se centró en el análisis de un eje de un tren, el cual explica que se pueden producir diferentes fallas bajo las cargas de servicio durante su vida útil, los cuales pueden provocar fallas catastróficas. El objetivo fue analizar la conducta del eje ferroviario ante la presencia de fatiga, visualizar la influencia de la geometría ante la presencia de fisuras en el programa Pro Engineer. Donde se realizó diferentes comparaciones con los resultados mediante el método analítico y obtenidos con el programa ANSYS. Al final se pudo observar que el incremento del tamaño afectó negativamente a la vida útil del eje, donde se visualizó que aumenta la tensión máxima en el borde de la fisura. [5]

En este trabajo se analizó la falla de un eje de molino pulverizador de carbón tipo bola y pista. Donde se visualiza que el eje de acero EN 25, fallo por fatiga. Donde el origen fue en el área del chavetero, la fatiga comenzó desde el borde superior. Se concluye que el eje tenía un mal tratamiento térmico por las microestructuras frágiles lo cual generó la falla. [6]

Se diseñó e implementó un molino de martillos para la producción de harina, con el cual se buscó disminuir los tiempos y costos de producción, buscando que el diseño del molino que está aplicado con las normas internacionales, se tenga un molino competitivo. Para el diseño determinaron las dimensiones, parámetros de cada parte del molino, material (acero inoxidable A304) y se simuló en el programa CATIA.[7]

El estudio centrado en la falla del eje de un agitador de mezcla agua-cal, el eje de acero SAE 1045 presentó falla por fatiga. Se tiene como referencia que se maquinó un cuñero que se había desgastado para darle más tiempo de vida al eje. Al realizar los análisis: microestructural, de diseño y de esfuerzos con el método de elementos finitos. Con el cual se determinó que el eje estaba trabajando con esfuerzos muy cercanos al límite de fatiga, por culpa de los cuñeros al no encontrarse en su posición correcta, el cual generó un desbalance en el eje causando vibraciones. [1]

Se realizó el estudio de falla por fatiga ante la presencia de una fisura en el eje de accionamiento de una trituradora de impacto donde se podrá determinar la vida útil de dicho eje. El estudio es ayudado con el método de los elementos finitos (MEF) y corroborado con el software SolidWorks. En conclusión, se compararon los resultados

obtenidos por los dos métodos y se determinó que la vida útil del eje es de 64.36×10^8 ciclos. [2]

En este trabajo se estudió la unión de un eje con ajuste a presión, se determinó los tamaños de eje y agujero que se usarán en el análisis. El contenido se dividió en dos partes: En la primera parte se realizó un estudio analítico y un análisis de elementos finitos con el programa ANSYS 2D para obtener las tensiones producidas y determinar la vida a fatiga. En la segunda parte se realizó el estudio solo con el ajuste, luego con una fuerza que produce flexión en el eje y el análisis del eje a flexión original, todos los estudios se dieron en el programa ANSYS 3D. Una vez obtenidas las tensiones en el caso de flexión, se utilizó el criterio de fatiga multiaxial para obtener el número de ciclos hasta el fallo de la pieza. El parámetro de Smith-Watson-Topper es 0.0095, lo que hará que la vida a fatiga tenga un número de ciclo es mayor que en el caso del ajuste a presión. [3]

El trabajo se centró en la explicación de los métodos más usados sobre el análisis de fatiga de elementos mecánicos, donde nos brinda información sobre conceptos y métodos analíticos de fatiga con vistas al diseño de eje, porque el eje es uno de los elementos más utilizados. Todos los métodos están acompañados del software COSMOS de SolidWorks. [4]

Se demostró las causas más comunes de fallas en ejes de equipos industriales, mediante el estudio de dos análisis de fallas y los datos del laboratorio en una caja de cambios de un molino de bolas. El trabajo mostró la metodología que se debe seguir al realizar un análisis de falla. Finalmente, se analizaron los resultados y se encontró que los problemas más frecuentes estaban relacionados con defectos en los materiales utilizados para fabricar los componentes. [5]

El trabajo busca calcular y definir cada uno de los componentes de un molino de martillos para grano, basándose en la historia y evolución del molino para dimensionar dos ejes con respecto a la potencia, en su estudio se analiza dos ejes diferentes (AISI 1045 Y AISI 4140 H), donde el AISI 1045 presentó características mecánicas muy menores a la del acero AISI 4140H. Todo el estudio ayudó a poder diseñar de manera confiable necesaria para poder diseñar de manera confiable. [6]

2.2 BASES TEÓRICAS

- La molienda en la industria

La molienda en la industria se refiere a toda actividad que pulveriza o desintegra un material, reduciendo el volumen de un material por medio de máquinas mecánicas, el cual busca adquirir como resultado una partícula con tamaño necesitado. [6]

- Maíz amarillo duro (MAD)

El maíz duro amarillo es una de las actividades socioeconómicas de gran importancia por su consumo alto consumo en el país. Su consumo es como materia prima y se presenta en dos tipos de actividades: extractiva (crianza de animales), transformación (alimentos preparados para animales). [7]



Figura 1: maíz Amarillo Duro (MAD) [8]

- Producción del Maíz amarillo duro nacional

En el año 2009, la producción de semilla de maíz amarillo duro en el Perú se observó una productividad de 780 toneladas, en el año 2014 se observó una producción de 390 toneladas, mientras que en el año 2017 una producción de 690 toneladas. El crecimiento promedio fue de 1,1 por año. [7]

Años	Producción (Miles de t)	Superficie cosechada (Miles de ha)	Rendimiento (t/ha)	Variación porcentual anual		
				Producción	Superficie cosechada	Rendimiento
2007	1.123	282,8	4,0			
2008	1.232	297,6	4,1	9,7	5,3	4,2
2009	1.274	301,2	4,2	3,4	1,2	2,2
2010	1.284	295,8	4,3	0,8	-1,8	2,6
2011	1.260	277,4	4,5	-1,8	-6,2	4,7
2012	1.393	294,8	4,7	10,5	6,3	4,0
2013	1.365	293,3	4,7	-2,0	-0,5	-1,5
2014	1.228	271,1	4,5	-10,0	-7,6	-2,7
2015	1.439	297,6	4,8	17,2	9,8	6,8
2016	1.232	267,6	4,6	-14,3	-10,1	-4,7
2017p/	1.250	265,1	4,7	1,4	-0,9	2,3
Var% acumulada	11,3	-6,2	18,7			
Tasa de crecimiento promedio anual	1,1	-0,6	1,7			

Figura 2: Producción, superficie y rendimiento nacional de semilla de maíz amarillo duro, entre los años 2007-20017 [7]

- Semilla de maíz amarillo duro importado

La semilla de maíz amarillo duro importado presento una tasa promedio anual de más de 9% entre los años 2007 – 2017. En el cual, en el 2007 se importaron 1200 toneladas y en el año 2017 aumento a casi 3000 toneladas, con el cual se registró un crecimiento entre esos 10 años de hasta un 139%. [7]

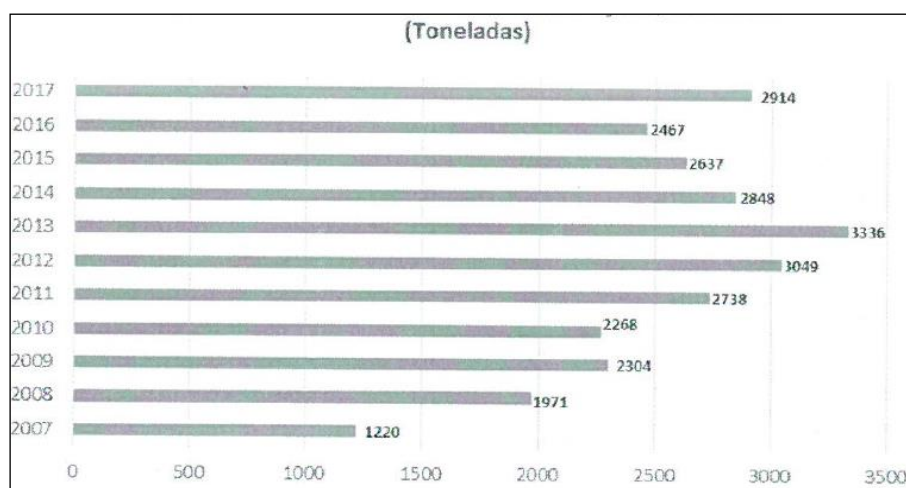


Figura 3: Importación de semillas de maíz amarillo duro, 2007-2017 [7]

- Tipos de industria

La industria alimentaria representa el sector secundario de la actividad económica del país. A continuación, se explicará los tipos de máquinas que se pueden usar en la industria alimentaria entre las maquinas analizadas se encuentran el molino de martillos, de rodillas y de bolas; en el cual de cada uno se mostrara sus datos técnicos. [6]

Industria alimentaria

En la industria alimentaria se producen productos que son para el consumo animal y humano, son alimentos comestibles que pueden ser de origen animal, mineral y vegetal.

El proceso en el que trabaja la industria es transportar, procesar y almacenar la materia prima, el cual debe cumplir con normas y leyes alimenticias. [6]



Figura 4: Molino de martillo [6]

Tabla 1: Datos técnicos - Molino de martillos [6]

Molino de martillos	
Aplicación	Molienda preliminar y fina
Campos de aplicación	Geología/metalurgia/materiales de construcción/química/plástico/vidrio/cerámica/agroindustria
Tipo de material a moler	Duro, semiduro y frágil (hasta 8 Mohs)
Principio de molienda	Impacto
Dimensión de cámara de molienda (mm)	Largo/ancho/altura de 2310/1665/1610 a 3720/2650/2540 (minería) Ancho/diámetro De 150/250 a 120/150 (agroindustria)
Granulometría inicial (mm)	< 100 (minería) < 40 (agroindustria)
Granulometría final	De 0 a 3 mm (minería) < 100 µm (agroindustria)
% de humedad del material a moler	Hasta el 20% (en molienda húmeda)
Rpm (referencial)	500 rpm a 1000 rpm (minería) Hasta 2000 rpm (agroindustria)
Producción toneladas/hora	De 35 a 100 (minería) De 0.05 a 3 (agroindustria)
Potencia (kW)	De 75 a 132 (minería) De 3 a 38 (agroindustria)
Material de los martillos	Acero al manganeso (minería) Acero al carbono (agroindustria)



Figura 5: Molino de rodillos [6]

A continuación, se muestran datos técnicos referenciales de este tipo de molino de rodillos:

Tabla 2: Datos técnicos - Molino de rodillos [6]

Molino de rodillos	
Aplicación	Molienda preliminar y fina
Campos de aplicación	Geología/metalurgia/materiales de construcción/química/vidrio/cerámica/agroindustria
Tipo de material a moler	Duro, semiduro y frágil
Principio de molienda	Compresión, fricción
Granulometría inicial	< 30 mm (en el caso de mineral)
Granulometría final	< 50 μm (en el caso de harinas)
Rpm (referencial)	40 rpm (en el caso de la caña de azúcar)
Material de rodillos	Oxido de circonio, acero templado, carburo de tungsteno, acero al manganeso, piedra.

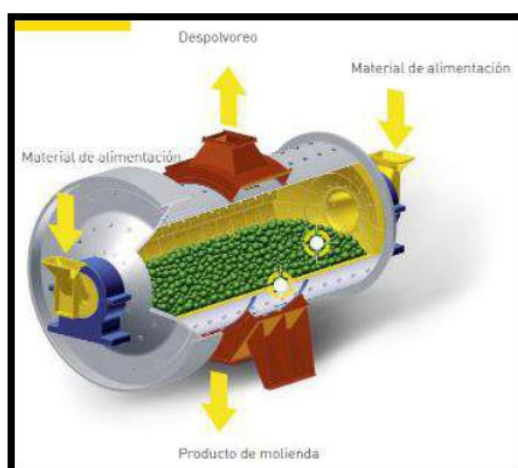


Figura 6: Molino de bolas [6]

A continuación, se muestran datos técnicos referenciales de este tipo de molino de bolas:

Tabla 3: Datos técnicos - Molino de bolas [6]

Molino de bolas	
Aplicación	Molienda preliminar y fina
Campos de aplicación	Minería/metalurgia/siderurgia/cemento
Tipo de material a moler	Duros y semiduros (hasta 8 Mohs)
Principio de molienda	Impacto y fricción
Granulometría inicial	< 30 mm
Granulometría final	< 0.5 mm
Rpm (referencial)	de 14 rpm a 38 rpm
% de velocidad crítica	65% a 75%
Material de bolas	Aleaciones de hierro-carbono al manganeso o al cromo
Diámetro de bolas	De 25 mm a 125 mm
Peso de bola (kg)	De 1.5 a 33
Dureza de bolas (HRC)	DE 50 a 65
Consumo de elementos de molienda	De 43 a 120 toneladas/mes (depende dureza de material)
Revestimiento interno del casco	Acero al manganeso, Ni-hard, cromo-molibdeno. (depende del mineral que se muele)
% de mineral en peso	De 65% a 80%
% de volumen de bolas en la cámara	De 40% a 50%
% de agua en peso	50% a 60% (molienda húmeda)
Producción (t/h)	De 0.17 a 250
Diámetro de molino	De 900 mm a 4500 mm
Longitud de molino	De 900 mm a 6100 mm
Potencia (kW)	De 18.5 a 2300

- Esquema del molino

El molino “NEHEMIAS EL INGENIERO” cuenta con una serie de máquinas y equipos que buscan la transformación del maíz (reducción) dependiendo al pedido del cliente. [8]

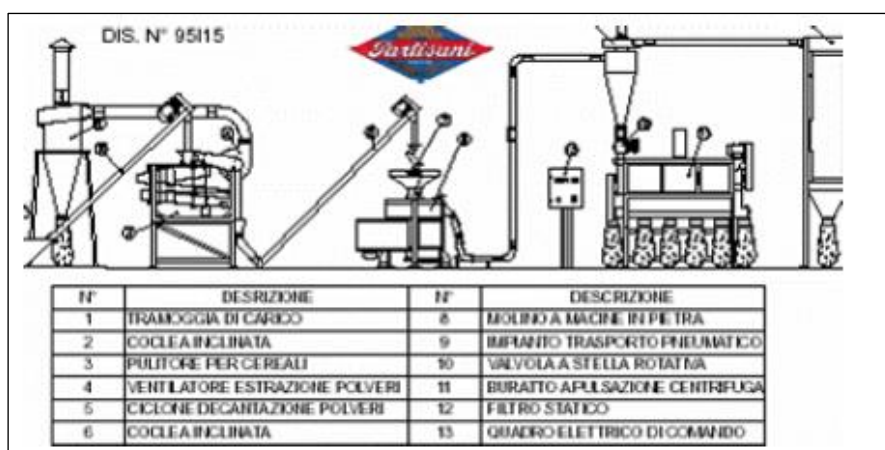


Figura 7: Esquema de un molino de martillos [8]

- Tipo de molienda

Las maquinas más utilizadas para la aplicación de reducción de materiales son: cortado, compresión, impacto, etc. Los tamaños que puede dar esta máquina se mostraran en la siguiente tabla: [8]

Tabla 4: Dimensionamiento de molienda (Tamaño) [8]

Tipo de proceso	Tamaño de salida
Molienda gruesa	1 – 5 (mm)
Molienda media	200 – 500 (μm)
Molienda fina	50 – 100 (μm)

- Análisis de fallos

Es muy importante poder conocer y comprender realmente la posibilidad que presenta cada material para llegar a determinadas aplicaciones, es por eso que se utilizara el análisis de falla, aunque es muy complejo porque en muchos casos las fallas son difíciles encontrar, ya que el entorno en el que ocurre la falla no tiene nada que ver con el componente fallado o incluso con el mecanismo de falla. [9]

- Clasificación de los fallos

El rango de clasificación de fallas es muy amplio. Se introducen los factores relacionados con los diferentes tipos de tensiones mecánicas que se producen durante el uso y los tipos de fracturas observadas en los componentes. [10]

a) Según la sollicitación

Según la sollicitud las fallas se pueden clasificar con respecto con la forma en que se aplica la carga y los tipos de esfuerzos que pueden causar la falla. La carga puede ser estática o variable, que serán explicadas a continuación: [10]

- Cargas estáticas: Donde los componentes están bajo cargas de compresión, torsión, tracción, cizalladura, etc.
- Cargas variables: Las fracturas que se presentan por cargas cíclicas (medirá por ciclos) y dinámico.

b) Según el tipo de fractura

Según el tipo de fractura, se pueden mostrar en 3 magnitudes diferentes: [10]

- Nivel atómico
 - Donde la conducta del material (los fenómenos de deformación) se analizará por medio de la teoría de dislocación.
- Nivel microscópico
 - Las fracturas se presentan en dos tipos: Transcristalinas (depende del aspecto morfológico o mecanismo de fractura) e intercristalinas (Con anticipación a la fractura se realiza la descohesión entre granos mediante sus bordes).
- Nivel macroscópico
 - Se clasifican en 3 tipos: Dúctil por carga estática (La fractura se da por deslizamiento y genera deformación plástica), Frágil por carga estática (Se presenta por el crecimiento de grietas y no presenta deformación plástica) y fatiga.

- Fatiga

La fatiga se representa por fallas gradualmente en una pieza bajo cargas que pueden ser fluctuantes, repentinas y cíclicas. La fatiga es un fenómeno que se muestra cuando una estructura puede fallar con un esfuerzo requerido es menor al exigido y causa falla bajo las condiciones estáticas. [11]

Las fallas por fatiga se clasifican en dos tipos: Simples: Se comienza desde la grieta es una sola, luego se propagarse y finaliza con la falla. Compuestas: cuando tiene mas de una grieta, luego se propaga hasta encontrarse las grietas y finaliza con la falla total.

A continuación, se presentará las tres fases en la que se presenta la falla por fatiga: [2]

- Iniciación: Es donde comienza la falla se puede presentar como una o mas grietas en la pieza, se presenta mayormente en alguna concentración de tensión, pero pueden presentarse en cualquier punto de la pieza.
- Propagación: Se forman las grietas por presencia de cargas, las cuales las grietas son de difícil detección por ser finas.
- Rotura: En consecuencia, de la propagación, como la grieta sigue aumentando, la pieza continua con su deterioro hasta generarse una rotura por fatiga.



Figura 8: Superficie de rotura por fatiga [2]

- Criterios para la falla por fatiga

Es el acto simultáneo del esfuerzo de tensión, deformación plástica y el esfuerzo cíclico, ya sea que uno de estos tres factores no se encuentre o sea eliminado, la fatiga tiende a desaparecer. Donde; Esfuerzo de tensión: Es obviamente la causa de la formación de grietas, pero debe recordarse que, aunque el esfuerzo de compresión no causará fatiga, la carga de compresión sí lo hará y el esfuerzo cíclico: se determina de forma fácil e inmediatamente. [11]

- Reconocimiento superficial

Al visualizar una pieza que ha sufrido una fractura por fatiga, se pueden ver dos zonas, conocidas como zona de fatiga (zona de propagación de la grieta) y la zona de ruptura (donde ocurre la falla). [11]

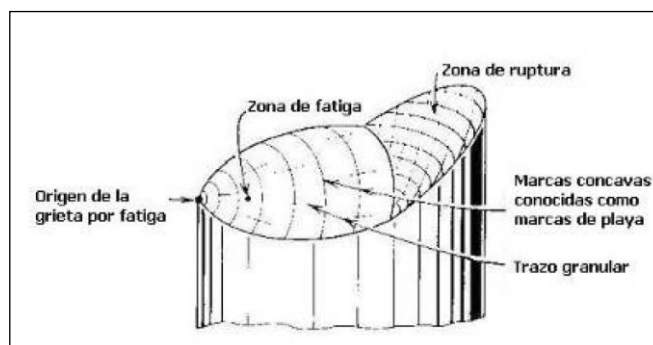


Figura 9: Superficie de falla en la que se pueden distinguir el origen de la grieta, la zona de fatiga y la zona de fracturada instantánea. [11]

- Concentración de esfuerzos

Esta concentración es causante de la pluralidad de fallas por fatiga que se pueden encontrar en la praxis. Se puede encontrar como dos tipos: [12]

- ✓ Cargas estáticas: Son encontrados en materiales maleables, el esfuerzo máximo normalmente aumenta la fluidez en ese punto, siendo la carga se trasmite a otros fragmentos de la pieza. [12]
- ✓ Cargas repetidas: La fluencia se limita a un área más pequeña y no puede hacer demasiada distribución de la tensión, el ciclo agota de forma rápida conduciendo a la fisura por la rápida deformación en frío. [12]

La concentración de esfuerzos mediante el régimen elástico o conocido como “Kt” que es empleado para determinar el esfuerzo, como se puede visualizar en la formula la cual provoca la disminución en el esfuerzo real aplicado. [12]

$$\sigma_n = \frac{\sigma_n}{K_t} \quad \text{Ecuación 1}$$

Los valores de Kt están relacionados a la forma de la pieza, pueden variar dependiendo de los agujeros, filetes, entallas, etc. Es obtenida mediante tablas (ver Ilustración 12), el cual el valor máximo que puede asumir Kt es 3.

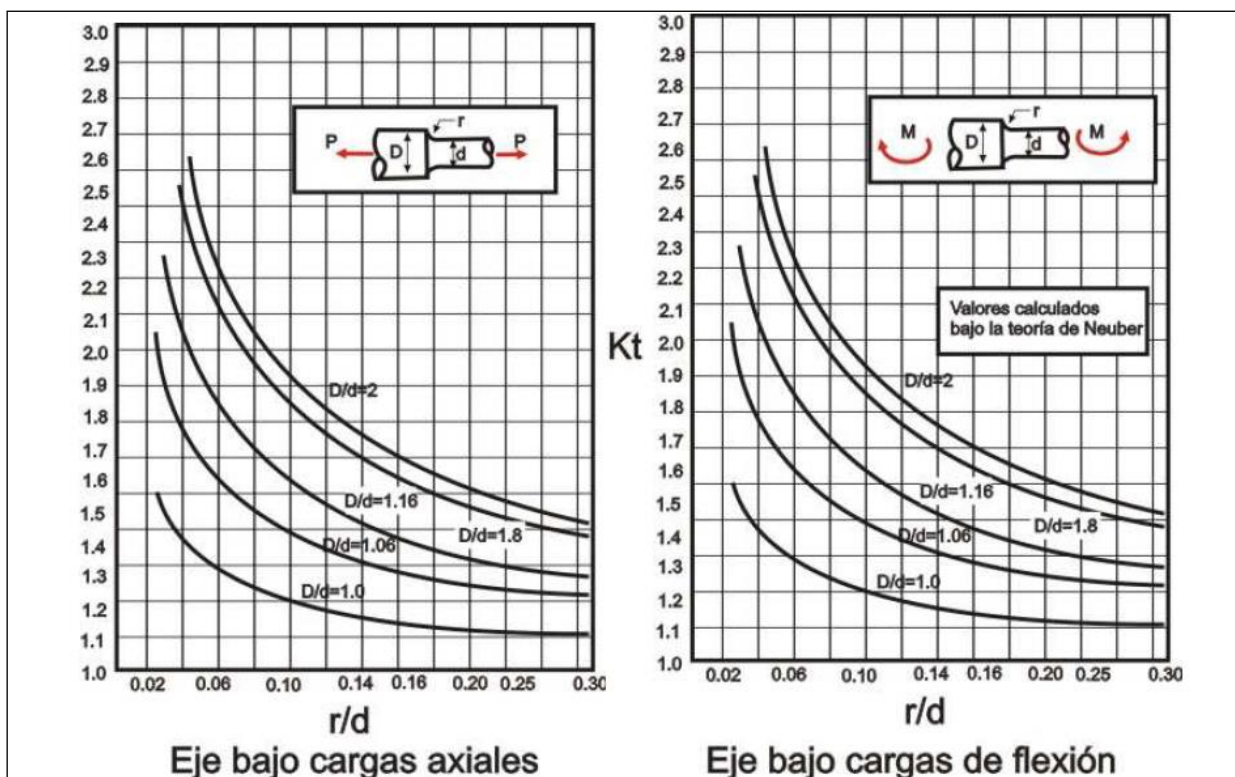


Figura 10: Gráficas de f. de concentración de esfuerzos para carga axial y de flexión [12]

- Fatiga en ejes

Los ejes son elementos mecánicos que giran sobre su propio eje, al igual que los ejes de transmisión transmiten una gran potencia durante un largo período de trabajo. [5]

En la ilustración 11, se puede observar como el punto A considerado infinitesimal que está en la parte superior del eje que soporta la carga de flexión cambia de compresión en "t1" a tracción en "t2". De esta forma, se demuestra que las mismas propiedades de trabajo en las que se encuentra sometida el eje cumplen con los requisitos para que cause una falla por fatiga. Por lo tanto, la tensión a la que está sometida el eje debe ser lo suficientemente alta como para hacer que el eje comience a agrietarse y, finalmente, el eje fallará debido a la fatiga. [5]

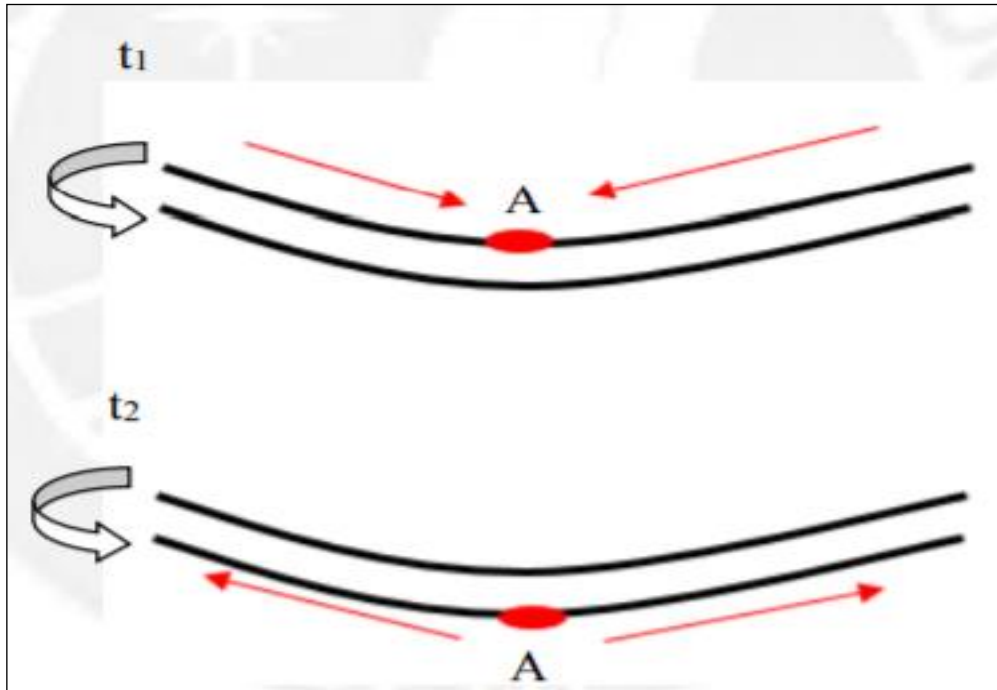


Figura 11: Variación de esfuerzos de un punto en el tiempo [5]

➤ Fundamentales factores que ocasionan fallas en los ejes

Los principales o más comunes fallas en ejes de potencia son los siguientes: [5]

- ✓ De diseño
- ✓ De material
- ✓ De fabricación
- Diagrama de cuerpo libre (DCL)

El diagrama de cuerpo libre o conocido con las abreviaturas DCL, ayuda a simplificar el análisis de estructuras o máquinas muy complejas separando cada elemento por partes y así poder analizarlo y estudiarlo de manera más sencilla. Una vez analizado cada parte de esa manera, se unifica todo para que se obtenga la información del comportamiento de todo el sistema. [13]

- Teoría de fallas

Los componentes de las maquinas pueden dejan de funcionar, estas son algunas razones: Fractura, corrosión, agrietamiento y hasta fatiga, etc.

Existen una diversidad de ensayos mecánicos que con cierta precisión nos ayudan a determinar la falla de un elemento desde su origen. Hay que tener presente que las pruebas realizadas no dejan de ser hipótesis. Las pruebas se realizan con respecto al material, si es frágil o dúctil. Entre las pruebas o ensayos que se utilizan encontramos: [2]

- En los materiales frágiles se suelen utilizar: Mohr coulomb frágil, esfuerzos normal máximos y Mohr modificado.
- En los materiales dúctiles se utilizan: También se usa Mohr coulomb, pero dúctil, energía de distorsión y esfuerzos cortantes máximos.

- Fuerza cortante y momentos flexionantes en vigas

Las fuerzas cortantes son representadas en el cuerpo libre como una sumatoria de fuerzas que se aplican en dirección vertical a la viga y que buscar garantizar que la viga a analizar este en equilibrio como se muestra en la parte a de la ilustración 10. [2]

Por otra parte, el momento flexionante se encuentra por la suma de los momentos ocasionados por las fuerzas sobre un determinado punto en la viga, es representada en el cuerpo libre, así como se ve en la parte b de la ilustración 10. [2]

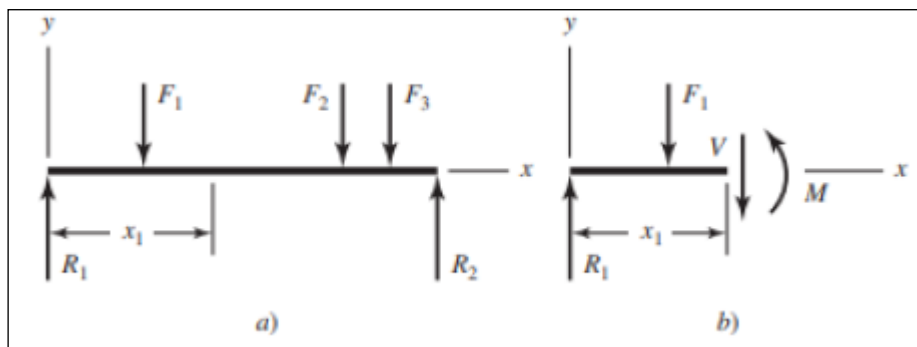


Figura 12:A) Diagrama de cuerpo libre de una viga. B) Resultante de fuerza cortante y momento flexionante. [2]

- Esfuerzo

Es la acción donde se emplea una fuerza de forma distribuida sobre todo el área de una superficie. Los esfuerzos pueden ser expresados en dos tipos:

- Esfuerzo normal: Conocida también esfuerzo axial y es cuando la fuerza es representada con dirección normal a la superficie.
- Esfuerzo cortante tangencial: Es representada cuando la dirección de la fuerza tiene dirección tangencial. [2]

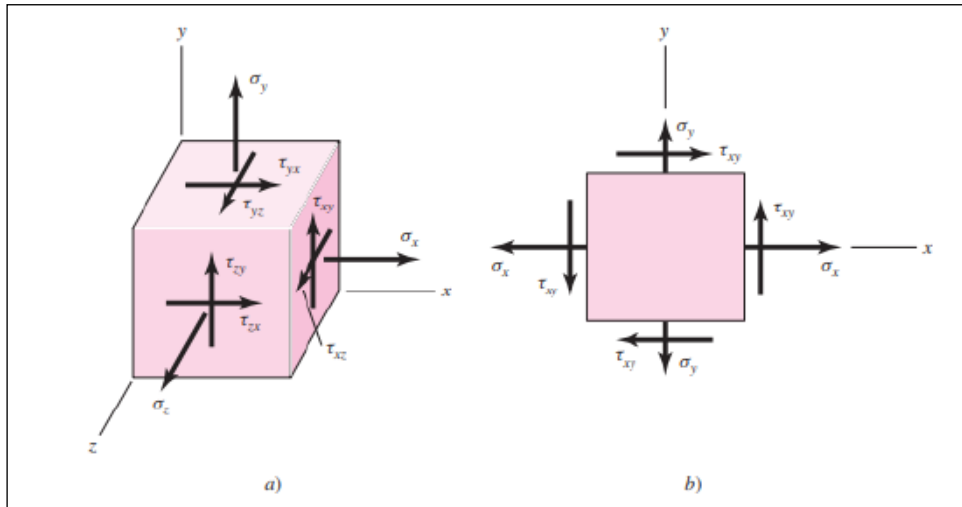


Figura 13:A) Esfuerzo tridimensional. B) Esfuerzo bidimensional [2]

Las fórmulas matemáticas que representan los esfuerzos son explicadas a continuación:
[2]

$$\sigma = \frac{F_N}{A} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\tau = \frac{F_T}{A} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

- F_N es la fuerza normal
- A es el área de la superficie analizada.
- σ es el esfuerzo normal.
- F_T es la fuerza tangencial.
- T es el esfuerzo cortante.

Otra fórmula que se puede utilizar en el esfuerzo normal, es relacionarlo con la ley de Hooke. [2]

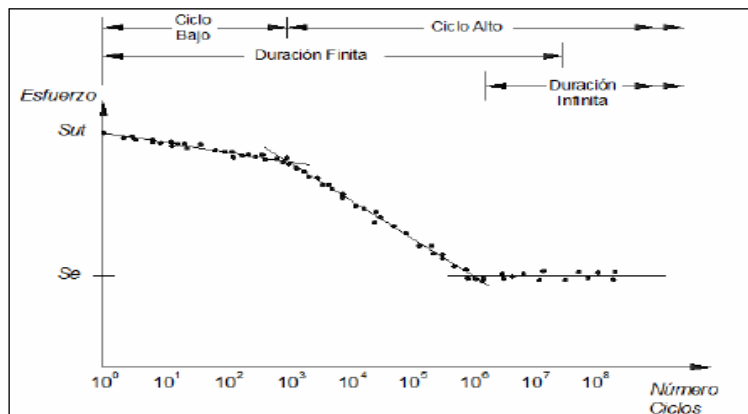
$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

- ϵ es la deformación unitaria.
- E es el módulo de Young (modulo elástico)

- Diagrama S-N

El diagrama S-N o llamada curva de fatiga, representa la resistencia a la fatiga de un material. La curva fue diseñada por Wöhler mediante un conjunto de datos experimentales, él nos indica que según el número de ciclos se puede ver los fallos con los diferentes niveles de esfuerzos cíclicos. [14]

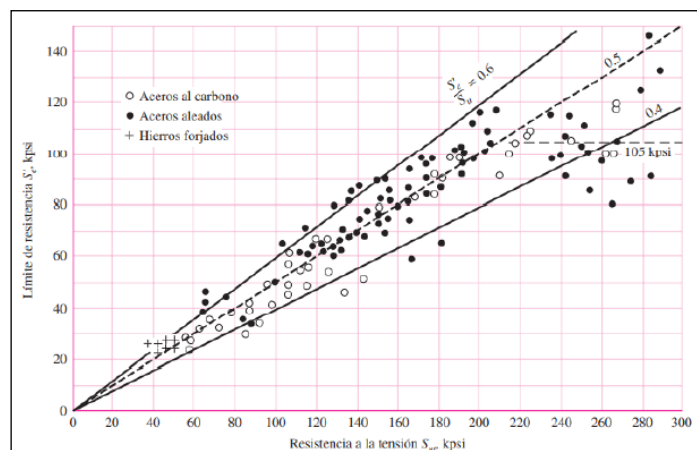


Grafica 1: Diagrama S-N [14]

- Límite de resistencia a la fatiga

El límite de resistencia está representado por el valor máximo del esfuerzo fluctuante o alternante, que puede resistir sin fallar una pieza N ciclos.

El método para encontrar la resistencia a la fatiga es realizar un ensayo en varias probetas con similares propiedades, los cuales están sometidos a cargas particulares diferentes cada una hasta la ruptura. [14]



Grafica 2: Gráfica límite de resistencia a la fatiga Vs. Resistencia a la tensión [2]

Se introducirá un procedimiento para determinar el límite de resistencia a la fatiga. Las consideraciones derivadas de una gran cantidad de datos obtenidos de varias fuentes bibliográficas que están destinadas a ser muy dispersas y pueden ser muy diferentes de los resultados de pruebas realizados en laboratorios, que están relacionados con las propiedades mecánicas de las muestras obtenidas. tener especificaciones estrictas. [2]

Con respecto al caso de los aceros, al reducir las observaciones en la ilustración 13, se estima el límite de resistencia como: [2]

Para $S_{ut} \leq 200$ kpsi:

$$S_e' = 0.5 \cdot S_{ut} \quad \text{Ecuación 5}$$

Para $S_{ut} > 200$ kpsi:

$$S_e' = 100 \text{ kpsi} \quad \text{Ecuación 6}$$

- F. modifican el límite de resistencia a la fatiga

Las pruebas realizadas para determinar el límite de fatiga son muy cautelosas y se prueban en condiciones controladas con precisión. Se puede esperar que los elementos mecánicos o estructurales reales no tengan el mismo valor. Esto se debe a varias razones, que incluyen: los aspectos geométricos de la pieza, el método y método de fabricación de la pieza y las condiciones térmicas de trabajo. Estas razones conducen a la modificación del valor de resistencia a la fatiga obtenido en condiciones de laboratorio, que suele ser mediante El valor de voltaje promedio es cero. Es así como algunos de los factores propuestos por Marín modifican la expresión del límite de fatiga. [14]

A continuación, se explicará la ecuación de Marín:

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S_e' \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

- Factor será representado por la letra F.
- Límite será representado por la letra L.

K_a = F. de modificación de la condición superficial.

K_b = F. de modificación de tamaño.

K_c = F. de modificación de carga.

K_d = F. de modificación de temperatura.

K_e = F. de confiabilidad.

K_f = F. de modificación de efectos varios.

S'_e = L. de resistencia a la fatiga en viga rotatoria

S_e = L. de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de maquina.

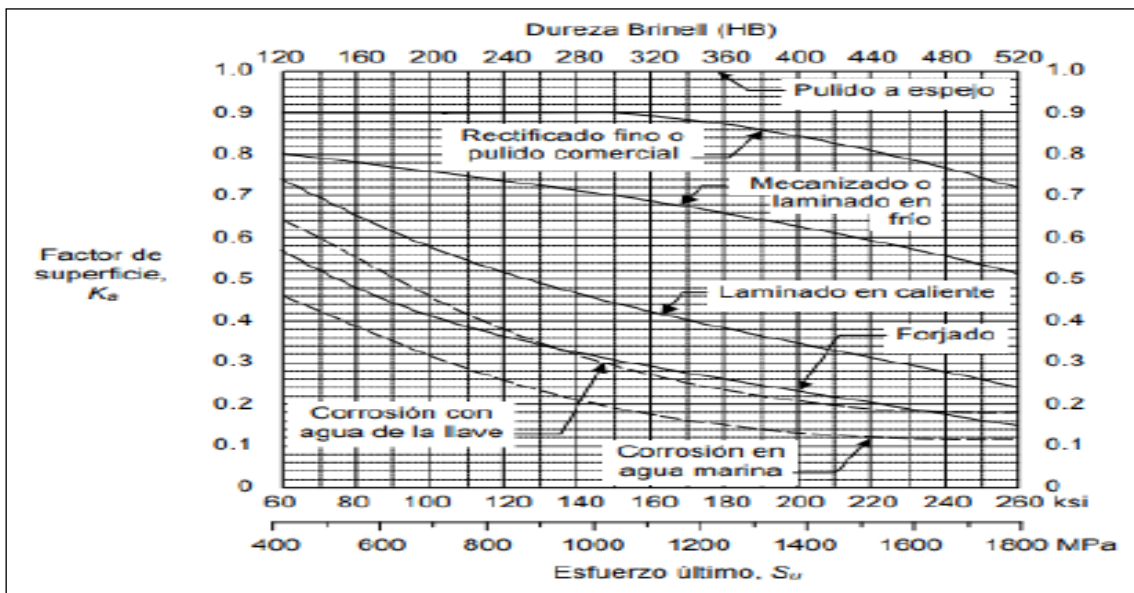
Dichos factores serán dados a conocer ampliamente a continuación.

➤ F. de superficie (K_a)

El K_a está directamente relacionado a la calidad de acabado, la resistencia de la pieza es menor mientras que la rugosidad de la superficie es mayor. Ya que por esos desniveles se inician las grietas.

En la gráfica 3, se mostrarán los rangos que va desde 0 a 1, donde 1 es la mejor superficie.

[2]



Grafica 3: Factores de modificación de superficie para el material del acero [2]

El F. de superficie o K_a se puede encontrar también por medio de la siguiente ecuación:

[2]

$$k_a = a \cdot S_{ut}^b \quad \text{Ecuación 8}$$

A través de la tabla 5, se puede obtener el valor de a y b, respecto a algunos acabados.

Tabla 5: Factores de acabado de superficie

Acabado Superficial	Factor a		Exponente B
	Sut kpsi	Sut Mpa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o lamina en frio	2.7	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	227	-0.995

➤ F. de tamaño (k_b)

En k_b se conceptúa que a mayor tamaño de la pieza su resistencia es más baja, pero para carga axial no hay consecuencia de tamaño. La relación entre la disminución de resistencia con respecto al incremento del tamaño se da por la posibilidad de que mientras más grande el volumen más la probabilidad de que se encuentre un grano defectuoso.

A continuación, se presentará algunos datos para calcular el k_b . [2]

Cuando sea ≤ 8 mm:

$$k_b = 1 \quad \text{Ecuación 9}$$

Entre 8 - 51 mm:

$$k_b = 1.24 \cdot d_e^{-0.107} \quad \text{Ecuación 10}$$

Para 51 - 254 mm:

$$k_b = 1.51 \cdot d_e^{-0.157} \quad \text{Ecuación 11}$$

Cuando sea > 254 mm:

$$k_b = 0.6 \quad \text{Ecuación 12}$$

➤ F. de carga (k_c)

En los k_c se realizan ensayos de fatiga con cargas torsionales, axiales y flexionantes, en donde los límites de fatiga retardan. [14]

Según el modelo de carga aplicada interviene en su resistencia final. Hay datos que se puede asumir: Carga flexión es 1, carga axial es 0.7 y carga por torsión está dada por el valor de 0.577. [2]

➤ F. de temperatura (k_d)

Se conoce que la temperatura está en relación con las propiedades físicas de los materiales, debido a la presencia de cambio que los granos que lo conforman sufren. A continuación, se brindará algunas fórmulas, que nos ayudan a estimar el factor: [2]

Cuando la $T^\circ \leq 450^\circ\text{C}$

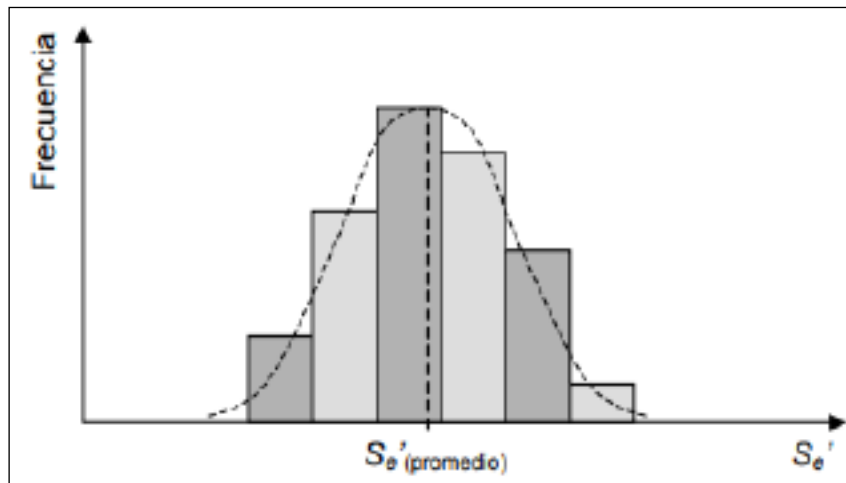
$$k_d = 1 \quad \text{Ecuación 13}$$

Y para $450^\circ\text{C} < T^\circ \leq 550^\circ\text{C}$, se aplica la siguiente formula.

$$k_d = 1 - 0.0058(T - 450) \quad \text{Ecuación 14}$$

➤ F. de confiabilidad (k_e)

Se sabe que para el análisis de falla pro-fatiga se necesita encontrar diversos cálculos estadísticos, por el gran número de datos que se van a necesitar es importante este factor, ya que nos ayuda a indicar la categoría de confianza de los datos obtenidos para comprobar su fiabilidad, los cuales son representados en la siguiente tendencia: [2]



Grafica 4: Dispersión de los datos experimentales del límite a la fatiga de un material [2]

Es por eso por lo que el k_e se define de la siguiente manera: [2]

Tabla 6: Valores para el factor de confiabilidad [2]

Confiabilidad (%)	Ke
50	1
90	0.897
99	0.814
99.9	0.753
99.99	0.702
99.999	0.659

➤ F. de efectos varios (kf)

No solo la F. de superficie, la F. de tamaño y F. de temperatura pueden afectar el rendimiento de un material, existen más condiciones de operación que afectan al material sometido a fatiga.

El kf depende de si el material se encuentra sometido a diferentes condiciones, según su proceso de manufactura (fundido, laminado, etc.), según los esfuerzos residuales, según el ambiente corrosivo y recubrimiento (niquelado, carburización, electro chapado, entre otros.). [2]

- Resistencia a la fatiga

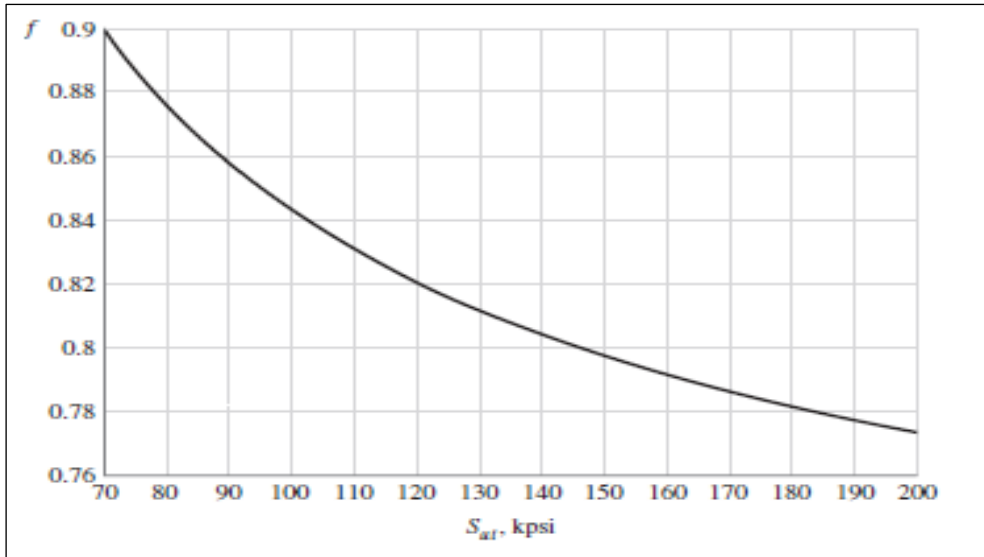
La zona de fatiga de ciclos bajos va desde $N = 1$ ciclos hasta casi 10^3 ciclos. Donde la resistencia a la tracción S_{ut} es un poco mayor a la resistencia a la fatiga S_f . En esta área el predominio de fatiga va desde 10^3 ciclos de acero llegando hasta su vida útil máxima de fatiga. [2]

$$a = \frac{(fxS_{ut})^2}{S_e} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$b = -\frac{1}{3} \log \left(\frac{fxS_{ut}}{S_e} \right) \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde el número de ciclos de falla es expresado como:

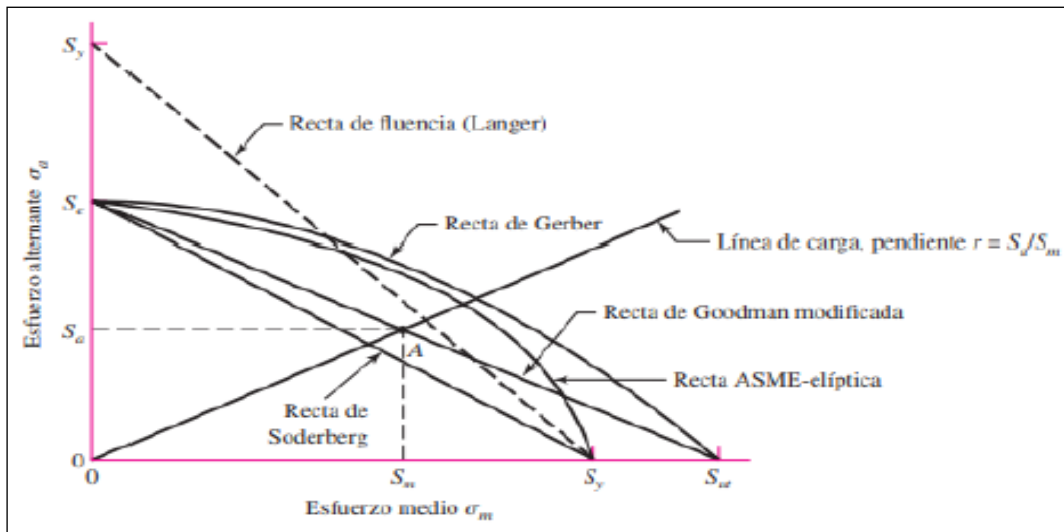
$$N = \left(\frac{\sigma}{a} \right)^{1/b} \quad \text{Ecuación 17}$$



Gráfica 5: Fracción de resistencia a la fatiga f . [2]

- Criterios de falla por fatiga ante cargas variable

En la ilustración 16 nos muestra los distintos criterios de falla que existen, de los cuales tenemos la de Goodman modificado, Langer, Gerber, Asme – elíptica y de Soderberg. Donde la M de Soderberg es la única M que proporciona protección contra fluencia, pero tiene una desviación baja. El estándar de Goodman es determinista, fácil de dibujar, incapaz de cuantificar su desviación y no es conservador. [2]



Gráfica 6: Diagrama con criterios de falla [2]

- Método de Goodman modificado

El método Goodman aplica un criterio donde su alteración de la resistencia de CA con la fuerza promedio se especifican mediante una línea que transita por los puntos $(0, S_f)$ y $(S_{ut}, 0)$.

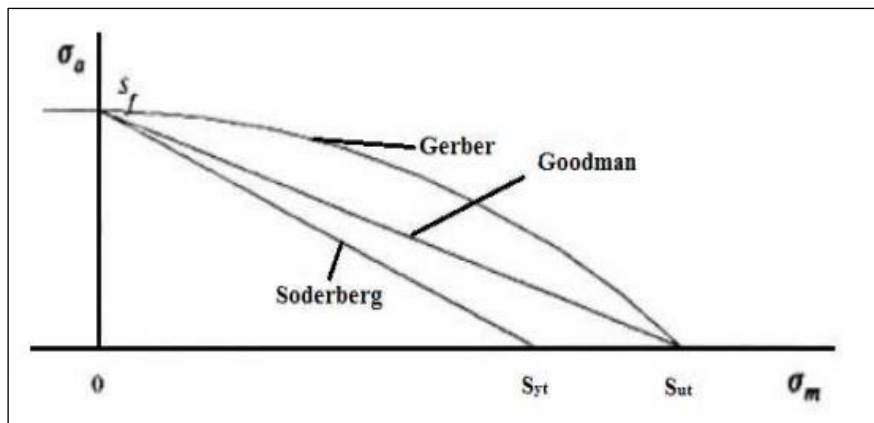
Eso quiere decir que el valor S_f está en relación con el N ciclos para fallos, y para la carga estática, el valor de la resistencia promedio o voltaje promedio de falla es S_{ut} . [9]

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{ut}} = 1 \quad \text{Ecuación 18}$$

- Método de Gerber

Esta teoría no es lineal, y supone que la variación de σ_a con σ_m se representa mediante una parábola cuyo vértice es el punto $(0, S_f)$, su eje es el de ordenadas y pasa por el punto $(S_{ut}, 0)$. Así, la rotura a N ciclos se produce cuando:

$$\frac{S_a}{S_e} + \left(\frac{S_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1 \quad \text{Ecuación 19}$$



Grafica 7: Diagrama de fatiga con criterios de Goodman, Soderberg y Gerber [10]

- Sistema de transmisión de poleas con bandas

Son dos elementos circulares de diferentes diámetros que se encuentran a cierta distancia, mediante una banda giran al mismo tiempo. Las bandas son de cuero flexible muy resistentes.

Según el tamaño de las poleas se pueden encontrar de dos tipos:

- a) Sistema de reductor de velocidad: Es cuando la polea motriz es de menor tamaño que el de la polea conducida, eso conlleva a que la velocidad de la polea conducida sea menor.

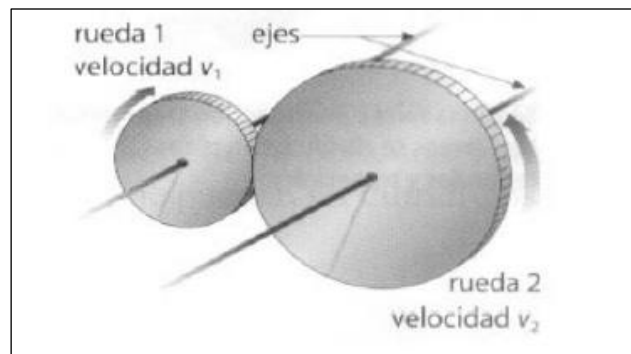


Figura 14: S. reductor de velocidad [8]

- b) Sistema multiplicador de velocidad: Es cuando la polea motriz es de mayor tamaño que el de la polea conducida, eso conlleva a que la velocidad de la polea conducida sea mayor.

Donde la fórmula para hallar las velocidades tangenciales es:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{d}{D}$$

Ecuación 18

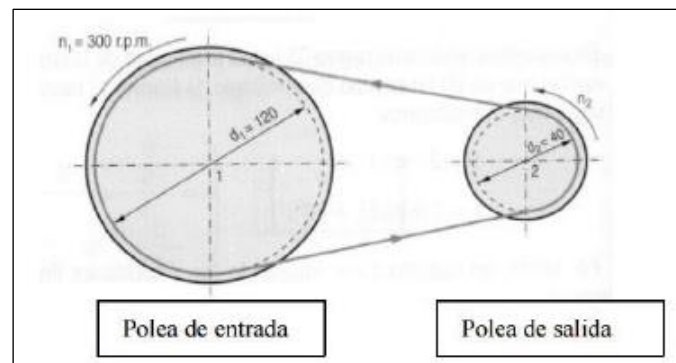


Figura 15: S. multiplicador de velocidad [8]

- Metodología del Diseño

El propósito del método de diseño es proporcionar un modelo que ayude a elaborar un plan general para establecer las operaciones que se necesitan para poder obtener respuestas exactas a las necesidades con el objetivo de responder directamente a las necesidades específicas del problema para obtener una solución. [14]

- SolidWorks

La primera versión de SolidWorks fue dada en el año 1995 con el objetivo de que la tecnología CAD pueda ser para todos, donde se vio que SolidWorks es un software asistido por computadora para el modelamiento en 2D y 3D.

Las soluciones que da el programa SolidWorks tienen todas las apariencias del proceso de desarrollo de productos a través de flujos de trabajo perfectamente integrados, que van desde las etapas de diseño, las de verificación, el diseño sostenible y la gestión de datos. Gracias al programa los ingenieros y diseñadores pueden englobar fácilmente varias disciplinas, lo que permite poder ahorrar tiempo con respecto a diseño y aumentar el proceso. [15]

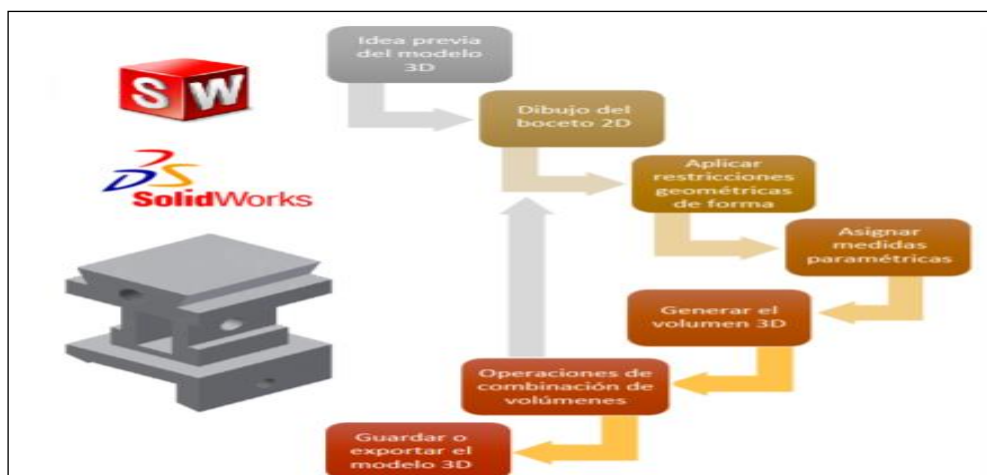


Figura 16: Filosofía de modelamiento de piezas en SolidWorks [15]

- Análisis por elementos finitos (FEA)

Este método busca elegir un elemento y seccionar en partes finitas. Cada una de estas puntuaciones tiene atributos físicos y están relacionados entre sí, a estos puntos característicos se denominan "nodos". Por el estudio de los nodos, cada elemento se puede combinar con sus vecinos, de modo que se puede visualizar el comportamiento de cada parte. [16]

- MDSolids

MDSolids es un software diseñado para ayudar a estudiar la mecánica de los sólidos deformables, donde se relacionan las fuerzas internas, las deformaciones del sólido, las fuerzas externas y los momentos que actúan sobre los objetos. Recordar que, para el diseño de una máquina o estructura, el diseñador primero debe evaluar la carga que actúa sobre el objeto. Estas cargas externas se transmiten en el cuerpo como cargas internas, la

resistencia de estas cargas internas se denomina tensión y debe compararse con la resistencia del material utilizado. [17]



Figura 17: Programa MDSolids 4.1.0 [17]

- CES EduPack

CES EduPack es un programa líder sobre materiales usados en ingeniería, fabricación, diseño y ciencia mediante un software visual y muy interactivo. Muestra un repertorio de 3900 materiales y procesos, mostrando información de las propiedades técnicas, medioambientales y económicas. [18]

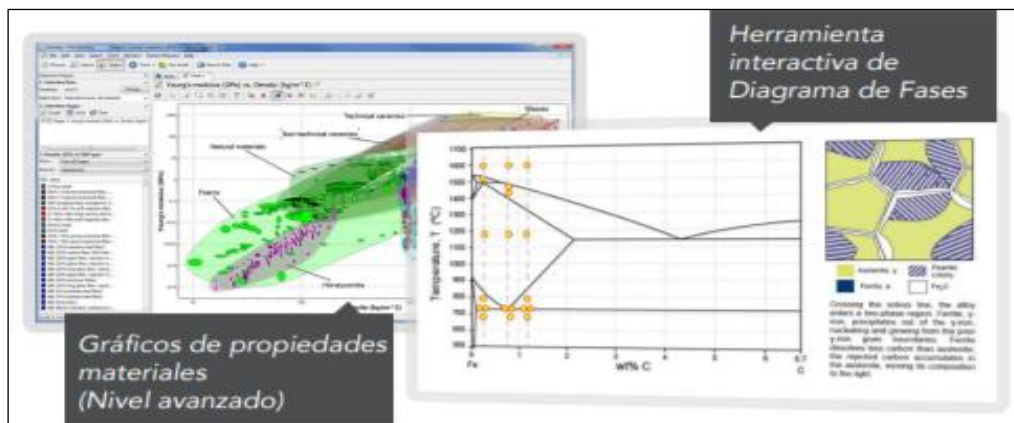


Figura 18: CES 2018 EduPack [18]

- Carburización

La carburación o también conocido como cementación, es un tratamiento termoquímico, el cual lo que hace que la superficie sea más dura, más resistente al desgaste, busca mejorar el núcleo haciéndolo más tenaz, para que pueda soportar los esfuerzos a los que estará sometido. La carburización o cementación es el proceso de elevar el contenido en carbono de los materiales, el cual consiste en rodear al material con el medio carburante y juntarlo a una elevada temperatura. Finalmente se templan las piezas y se obtiene una pieza con una elevada dureza superficial. [16]

III Características de funcionamiento

- Reconocimiento y descripción del molino de martillo triturador de la empresa MAIZAL DEL NORTE EL INGENIERO.

La máquina que se analizara es un Molino de martillo triturador TN-8 Grano Seco de la marca Nogueira, que tiene como misión pulverizar, aplastar y moler el maíz. Es un molino que aplica golpes con martillos para moler el material. Es una máquina que no puede ser remplazado en el molino “MAIZAL DEL NORTE EL INGENIERO”, por el cual si deja de funcionar puede detener toda la producción.

El molino de martillos tiene un diseño simple, lo cual ayuda a su fácil manejo y mantenimiento, estos molinos están diseñados para una gran trabajar con gran cantidad de molienda y son aplicados en las operaciones pre - molienda en el molino.

Su principio de funcionamiento del molino de martillos no es muy complicado, inicia con la entrada del maíz por la boca que se encuentra en la parte superior de la maquina donde cae hacia la máquina para ser triturado, en el interior el molino cuenta con un eje principal que mediante poleas con correas lo hacen girar, los discos cuentan con ejes secundarios en los cuales se encuentran los martillos que giran y mediante la presencia de fuerza centrífuga golpean al maíz a las cribas para ser desintegrados hasta el tamaño de la criba para que pase por la rejilla y salga del molino.

El molino TN-8 cuenta con:

1. Eje principal
2. Ejes secundarios: 3.
3. Discos: 4.
4. Martillos: 36, 12 en cada eje.
5. Criba
6. Motor: Siemens de 30 hp.

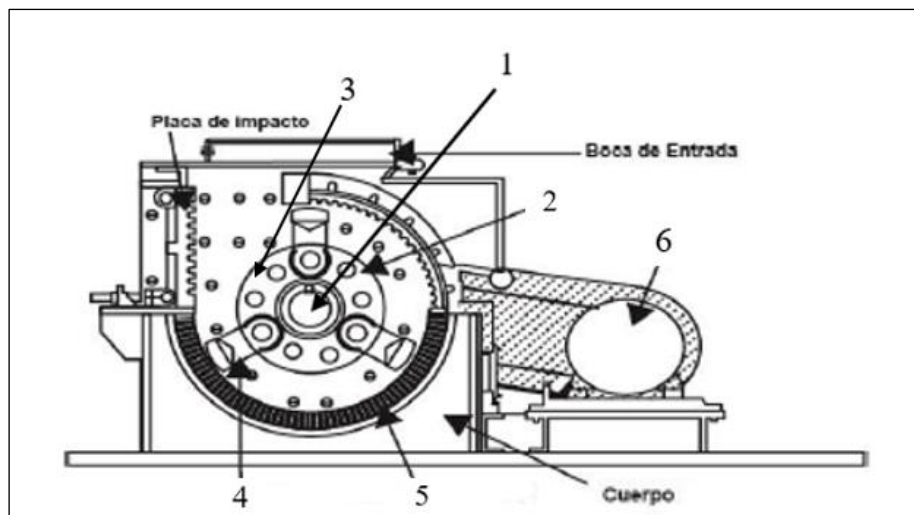


Figura 19: Partes del molino de martillos [8]



Figura 20: Molino triturador de la empresa actual TN-8.

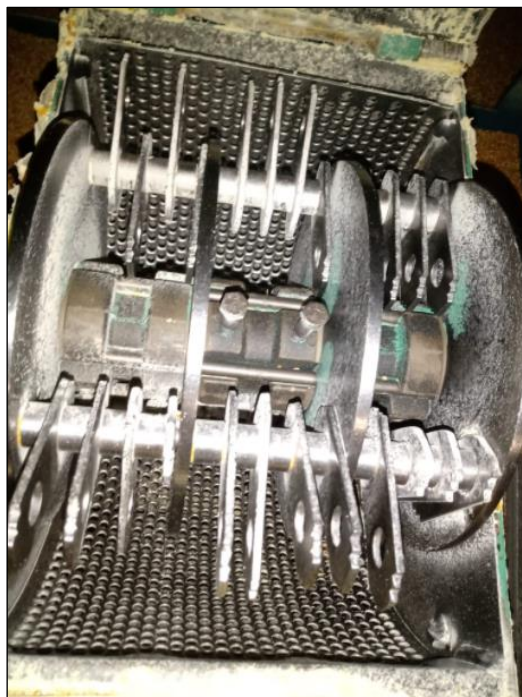


Figura 21: Sistema interno del molino TN-8.

A continuación, se mostrará una tabla donde estará las características principales del molino donde se enfatiza las dimensiones del molino y su capacidad.

Tabla 7: Características del molino de martillo triturador [19]

Marca	NOGUEIRA
Modelo	TN-8 Grano Seco
Potencia del motor	30 CV
Accionamiento	Tractor/motor eléctrico
Rotación del rotor	3320 a 3670 rpm
Numero de martillos en el rotor	36
Peso	255 kg
Ancho	860 mm
Altura	753 mm

El motor del molino triturador tiene las siguientes características:

Tabla 8: Características del motor del molino [19]

Marca	SIEMENS
Potencia del motor	30 HP / 22.4 KW
Modelo	1LA4 183-4YA80
Hz	60
Rpm	1755
Voltaje	220 $\Delta\Delta$ - 380 YY - 440 Δ V
Factor de seguridad	1.05
cos ϕ	0.83

3.1 Reconocimiento, evaluación y dimensionamiento del eje principal molino de martillo expuesto a falla por fatiga.

- Reconocimiento



Figura 22: Eje principal del molino con los rodajes en su posición original.



Figura 23: Medición del cambio de sección del lado izquierdo eje principal del molino



Figura 24: Medición de la parte de trituración del eje principal del molino

- **Evaluación**

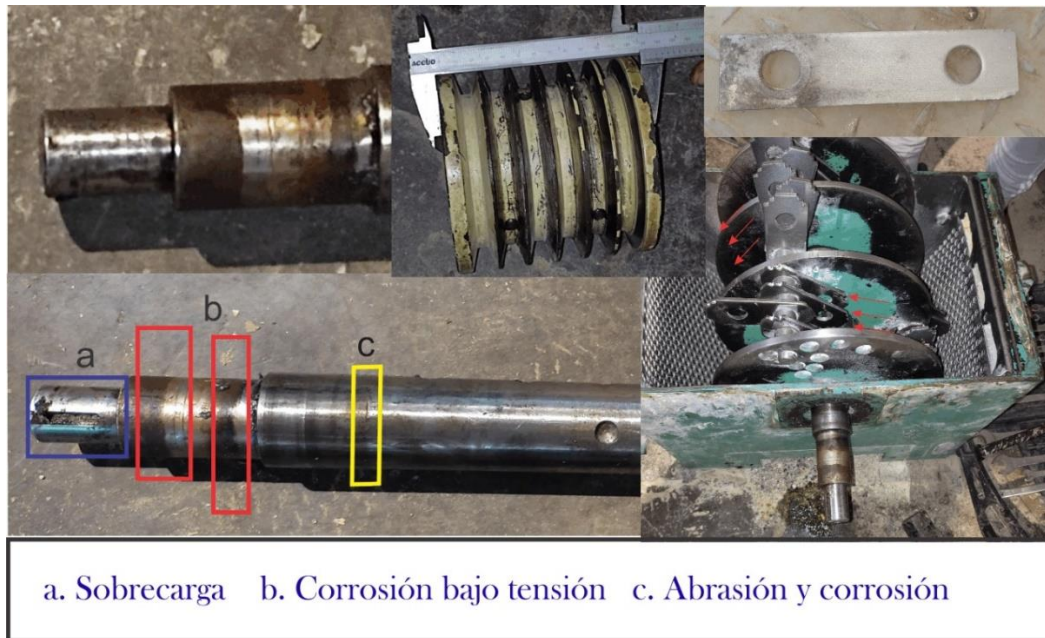


Figura 25: Verificación del esfuerzo cortante ocasionado por el martillo y disco sobre el eje principal, donde se puede observar inicio y propagación de grieta a y b. En c se puede apreciar la corrosión en la superficie del eje que luego producirá una corrosión bajo tensión.



Figura 26: Apreciación del corte transversal del eje y medición del espesor de la capa carburizada o cementada.

- Dimensionamiento

El dimensionamiento se hará mediante en mm en el programa AutoCAD.

- Diseño del eje Principal

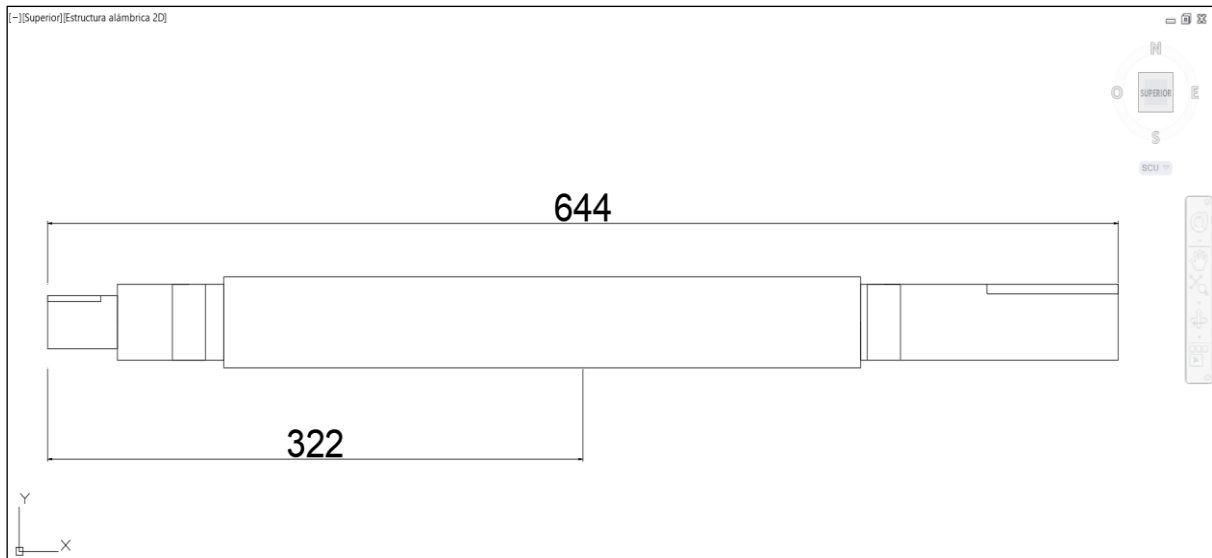


Figura 27: Diseño del eje principal.

- Medidas del eje principal

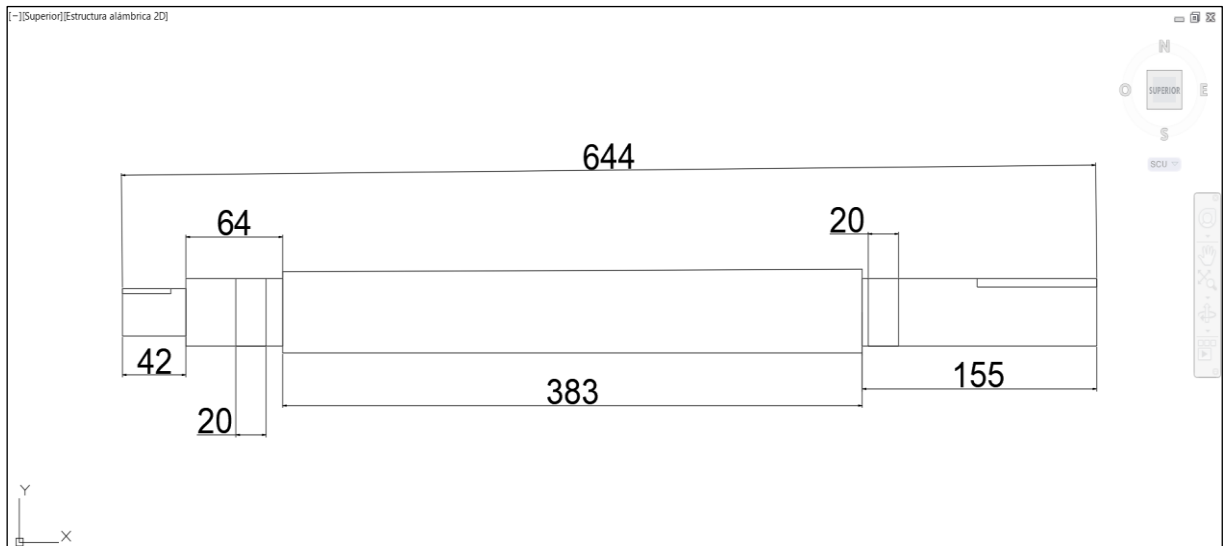


Figura 28: Medida longitudinales del eje principal de 644mm en AutoCAD.

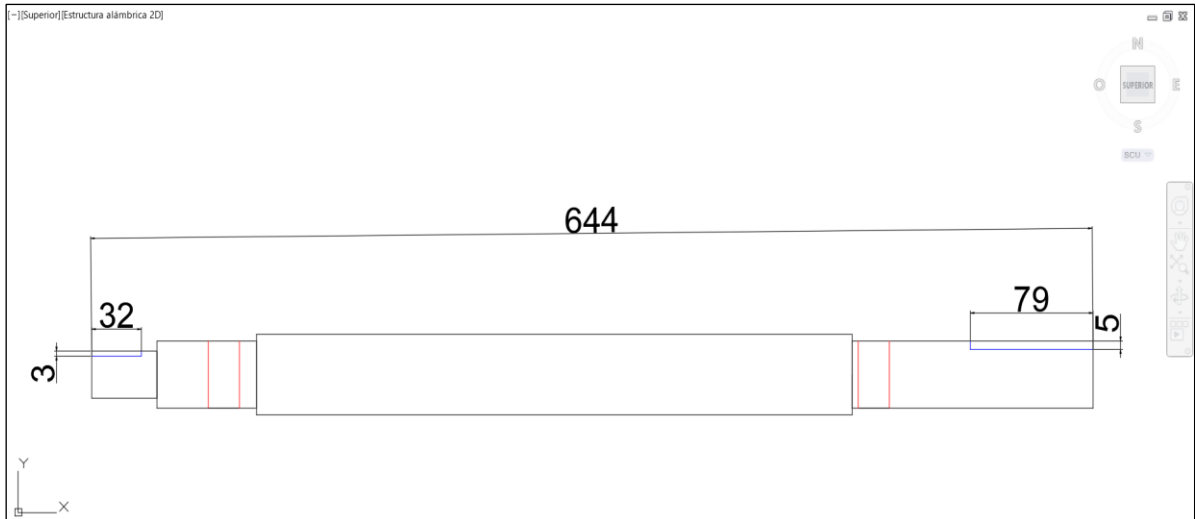


Figura 29: Dimensionamiento de las chavetas del eje principal en 2D.

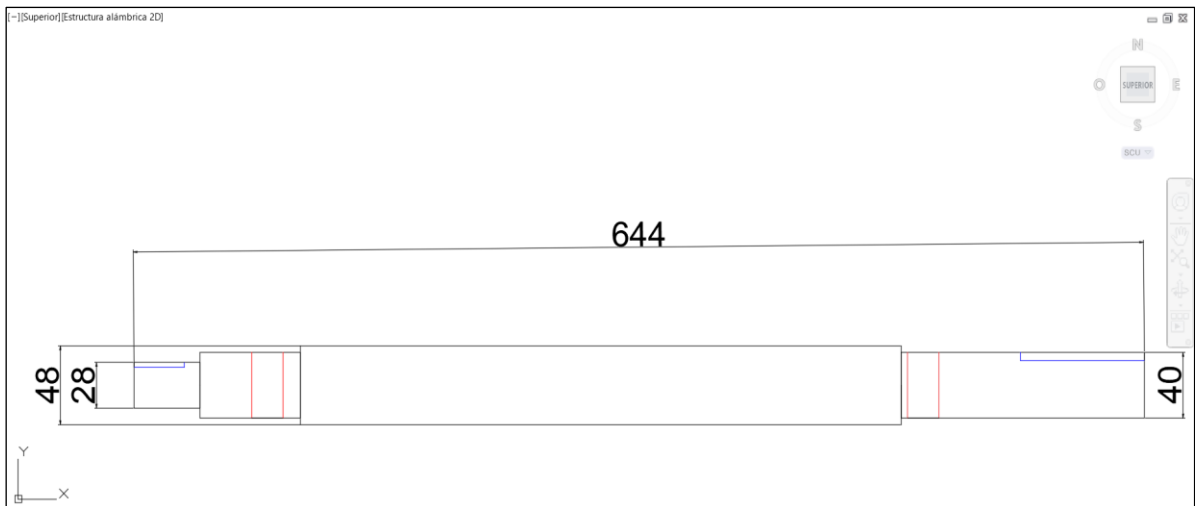


Figura 30: Dimensionamiento de diámetros del eje principal.

3.2 Diseño del eje principal y la capa carburizada con espesor (um) del molino de martillo mediante el software SolidWorks.

- Capa carburizada

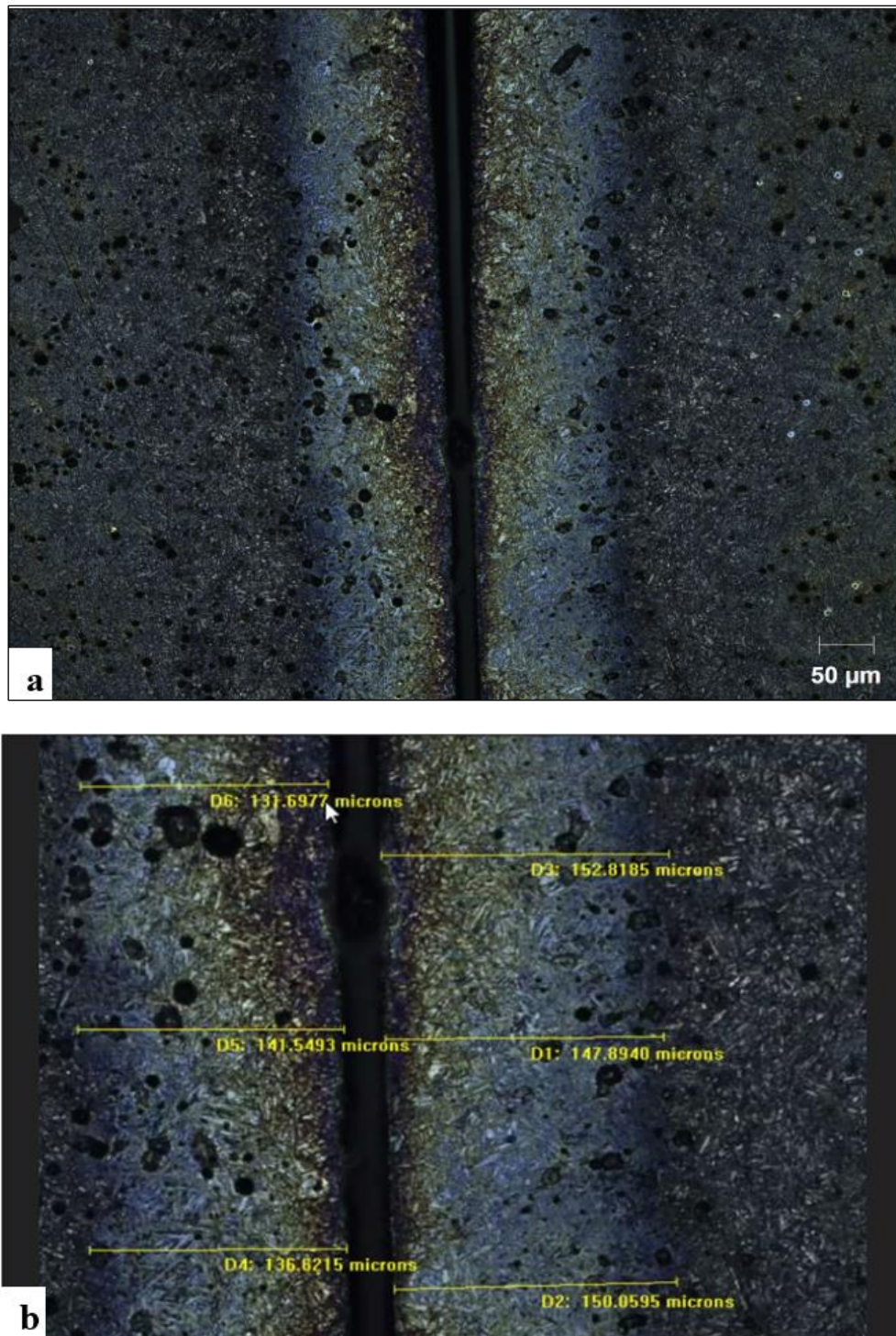


Figura 31: (a) Microestructura del eje mediante un corte transversal, donde se puede apreciar una estructura perlítica en el núcleo. (b) Apreciación de la franja carburizada a 50μm con un espesor promedio 143.44 microns - 0.14344mm.

- Diseño del eje en 3D

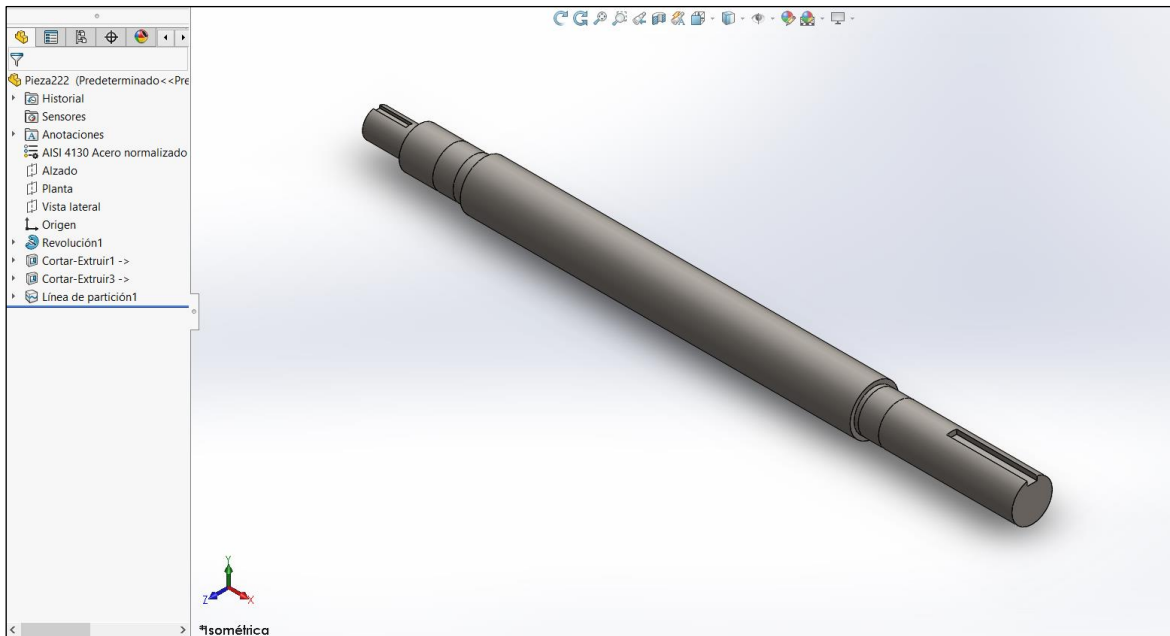


Figura 32: Se muestra el diseño del eje principal en 3D.

- Diseño de la capa carburizada en 3D

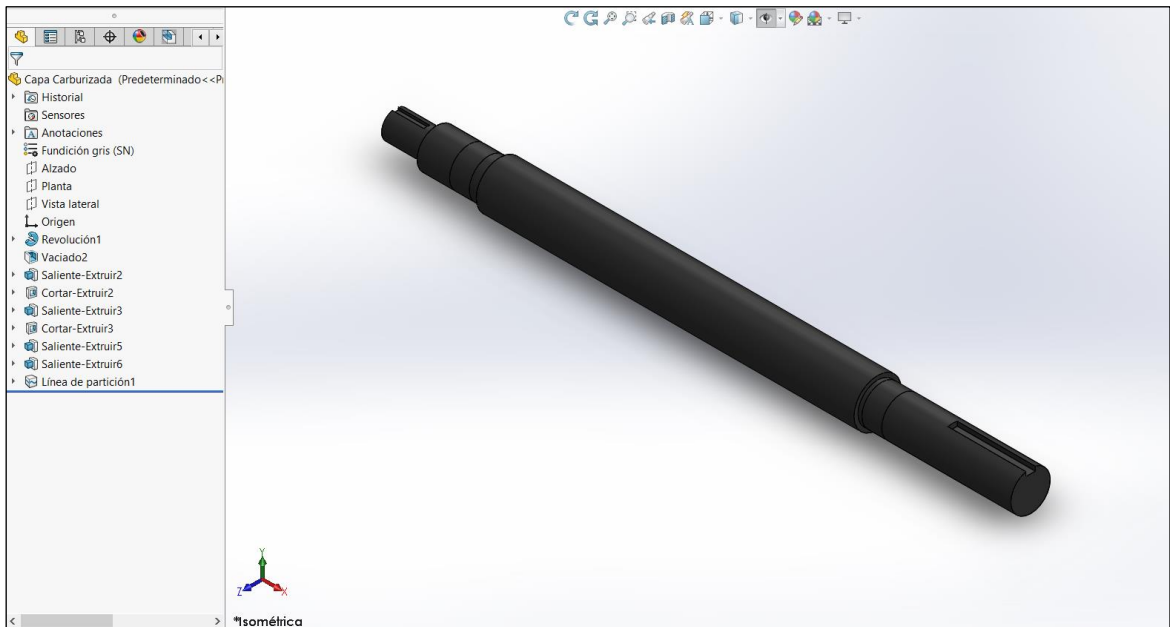


Figura 33: Capa carburizada con un espesor de $143.44\mu\text{m}$ o 0.14344 mm

- Muestra del eje principal con la capa carburizada

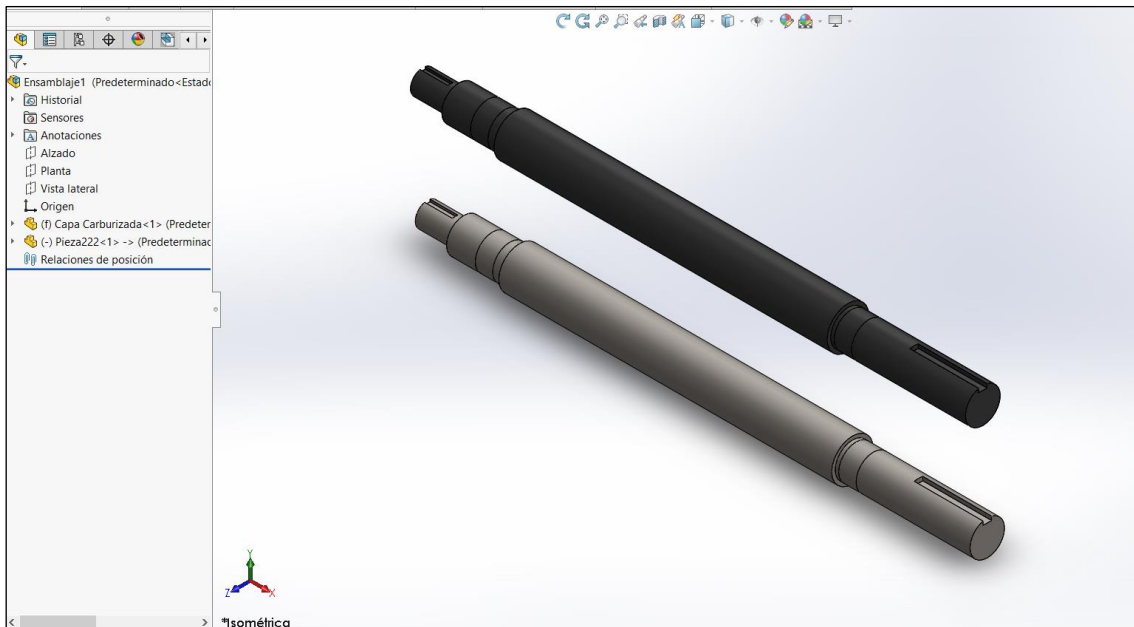


Figura 34: Muestra de la capa carburizada y el eje principal en 3D.

- Ensamblaje del eje principal con la capa carburizada.

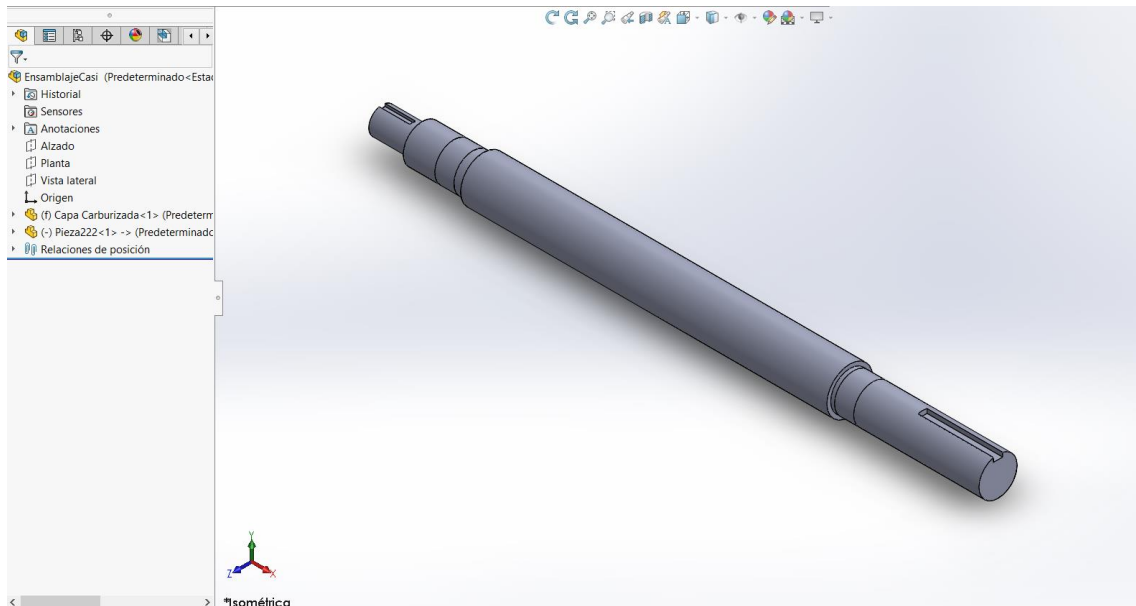


Figura 35: Ensamblaje de la capa carburizada y el eje principal en 3D.

3.3 Determinar las fallas por fatiga del eje principal mediante el método analítico y el software CAE (SolidWorks).

3.3.1 Análisis de falla por fatiga (método analítico)

- Descripción del material del eje principal.

El eje principal del molino triturador de maíz está fabricado de acero AISI SAE 1020 con tratamiento de cementado.

El cual cuenta con una composición química:

COMPOSICION QUÍMICA	C %	Mn %	P máx. %	S máx. %	Si máx. %
Análisis típico en %	0.18	0.3	0.04	0.05	0.15
	0.23	0.6			0.3

Figura 36: Composición química del SAE 1020. [20]

Y con unas propiedades mecánicas:

PROPIEDADES MECÁNICAS					
Estado de suministro	Resistencia a la tracción MPa	Limite elástico MPa	Alargamiento %	Reducción de área %	Dureza Brinell aprox.
Laminado en caliente	441	196	25	45	140 / 180
Normalizado	490 - 588	343	30	55	150
Recocido	441 - 539	294	35	60	130 / 150
Calibrado	539 - 686	441	10	35	180 / 220
Cementado, templado y rev.	686 - 833	441	15	45	-----

Figura 37: Propiedades mecánicas del Aceros 1020. [20]

- **Cálculo del sistema de transmisión.**

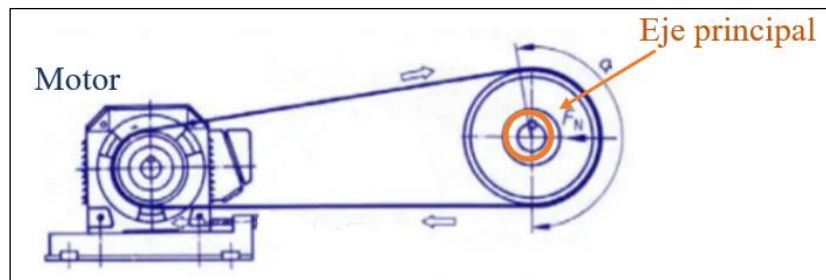


Figura 38: Sistema de transmisión. [21]

Se cuenta con un motor de 30 HP (22.37 KW) con una velocidad de 1750 Rpm. El diámetro de la polea del motor es 115mm y el diámetro de la polea del eje es 135mm.

Con la siguiente ecuación se encontrará la velocidad angular del motor.

Donde:

$$\omega_{motor} = \frac{2\pi N}{60} = \frac{2 * \pi * 1750}{60}$$

$$\omega_{motor} = 183.26 \text{ rad/s}$$

Ahora hallaremos la velocidad angular que llega al molino.

$$\frac{\omega_{motor}}{\omega_{eje}} = \frac{D_{polea \text{ del motor}}}{D_{polea \text{ del eje}}}$$

$$\frac{183.26}{\omega_{eje}} = \frac{115}{135}$$

$$\omega_{eje} = 215.13 \text{ rad / s}$$

Donde el torque en el eje es:

$$T_{eje} = \frac{Potencia_{motor}}{\omega_{eje}}$$

$$T_{eje} = \frac{22370}{215.13} = 103.98 \text{ N.m}$$

- **Cálculo de las cargas están en el eje principal.**

➤ Pesos presentes en el eje principal de la parte de trituración.

Se considera a todas las piezas mecánicas como si fuera una sola carga, para poder realizar el análisis de fuerzas del eje principal. Se obtuvieron las masas mediante el pesaje de las piezas del molino actual de la empresa NEHEMÍAS EL INGENIERO. Con esto podemos obtener el peso total que actúa en el eje principal. La gravedad por considerar será de 9.81 m/s². La fórmula para obtener el peso será:

$$\text{Peso} = \text{masa} * \text{gravedad}.$$

Tabla 9: Cálculo de pesos de las piezas del rotor.

PIEZAS DEL ROTOR	Cantidad	Masa unitaria (kg)	Masa total (kg)	Peso (N)
CAPA DEL EJE PRINCIPAL	1	3.324	3.324	--
DISCO	4	4.180	16.72	
EJE SECUNDARIO	3	0.297	0.891	
SEPARADOR DE MARTILLOS	45	0.0195	0.8775	
MARTILLO	36	0.218	8.928	
Masa Total			30.741	301.569
Peso de las piezas en la parte de trituración (w)				301.569

➤ Peso del ventilador.

Tabla 10: Cálculo de peso del ventilador.

PESO DEL VENTILADOR	Cantidad	Masa (kg)	Peso (N)
VENTILADOR	1	5	49.05
Peso del ventilador del lado izquierdo (w)			49.05

➤ Torque resistivo de inercia en la masa rodante.

Conociendo que el eje secundario del molino gira a una velocidad angular constantes, entonces se realizara un análisis estático de las fuerzas para poder encontrar el torque inercial.

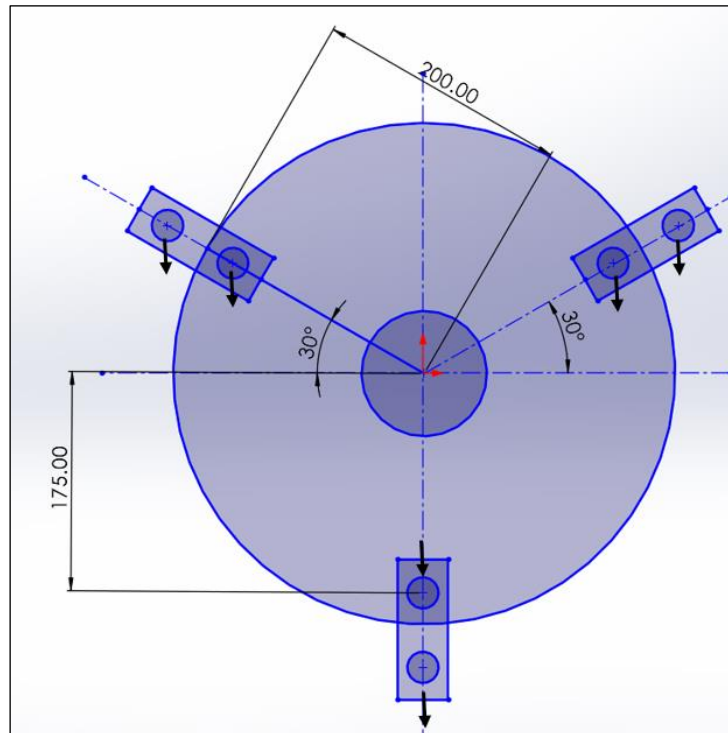


Figura 39: Torque inercial con las fuerzas de impacto.

Donde:

$$Torque_{inercial} = 2 * (\text{Peso}_{\text{Martillo}})(\text{Distancia}) * \cos 30 + (\text{Peso}_{\text{Eje secundario}})(\text{Distancia})$$

$$Torque_{inercial} = 2 * (2.139)(0.200) * \cos 30 + (8.741)(0.175)$$

$$Torque_{inercial} = 3.135 \text{ N.m}$$

➤ Torque total

Donde:

$$T_{Total} = T_{Eje} + Torque_{inercial}$$

$$T_{Total} = 103.98 + 3.135$$

$$T_{Total} = 107.115 \text{ N.m}$$

➤ Carga de impacto presente en la parte de trituración.

Para poder encontrar la carga de impacto se trabajará con el torque del eje hallado anteriormente, Q que será tomado como la distancia media del eje hacia la parte de trituración.

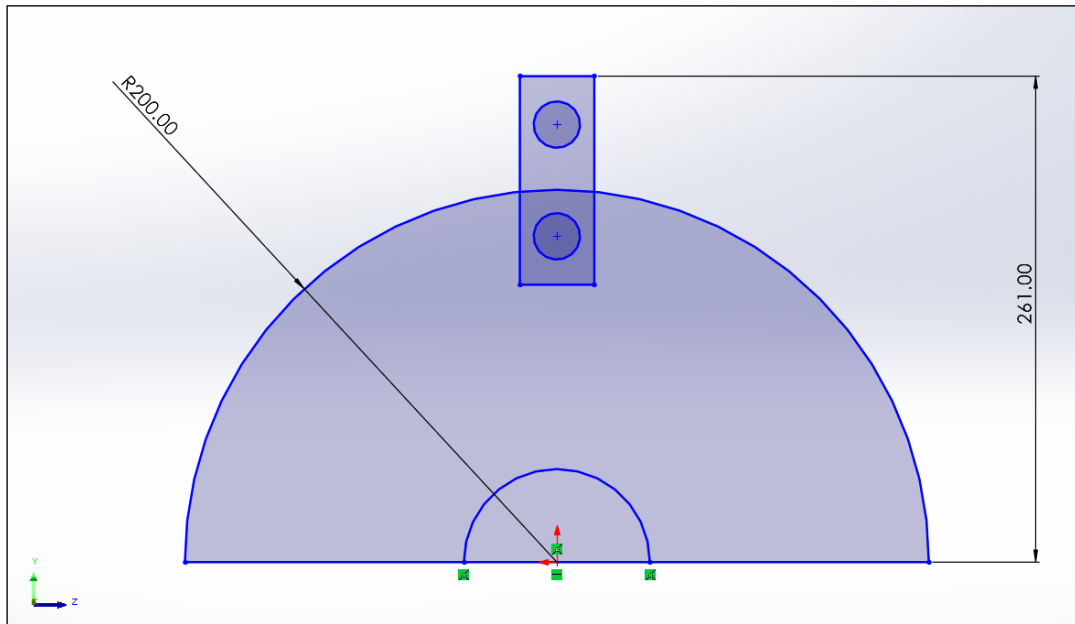


Figura 40: Distancia del centro hasta la resultante del impacto.

$$T_{Total} = 107.115 \text{ N.m}$$

$$Q = \text{Distancia} = 0.261\text{m}$$

$$\text{Peso}_{trituración} = \frac{2 * T_{Total}}{Q}$$

$$\text{Peso}_{trituración} = \frac{2 * 107.115}{0.261}$$

$$\text{Peso}_{trituración} = 820.805 \text{ N}$$

Con esto podremos obtener el peso total en la parte de trituración.

$$W_{Total} = W_{Piezas} + W_{Trituración}$$

$$W_{Total} = 301.569 + 820.805$$

$$W_{Total} = 1112.374 \text{ N}$$

➤ Carga de la polea

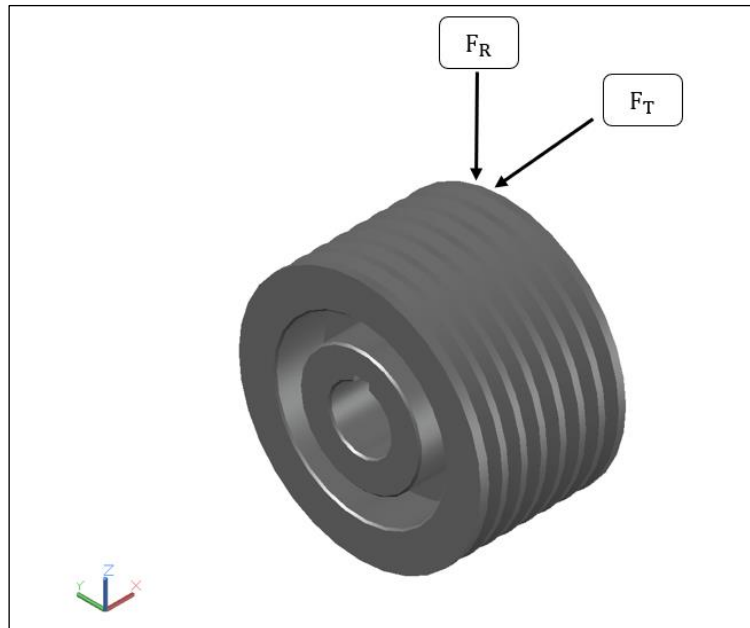


Figura 41: Cargas en la polea usando AutoCAD.

Donde:

- Carga tangencial

$$F_T = \frac{2 * T_{Eje}}{D_{Polea \ de \ eje}}$$

$$F_T = \frac{2 * 103.98}{0.135}$$

$$F_T = 1540.4 \text{ N}$$

- Carga radial

$$F_R = 1.5 * 1540.4$$

$$F_R = 2310.6 \text{ N}$$

- **Diagrama de cuerpo libre del eje principal del molino.**

Se realiza un DCL en dos dimensiones para tener en cuenta las medidas que se van a tener con el eje principal del molino a trabajar.

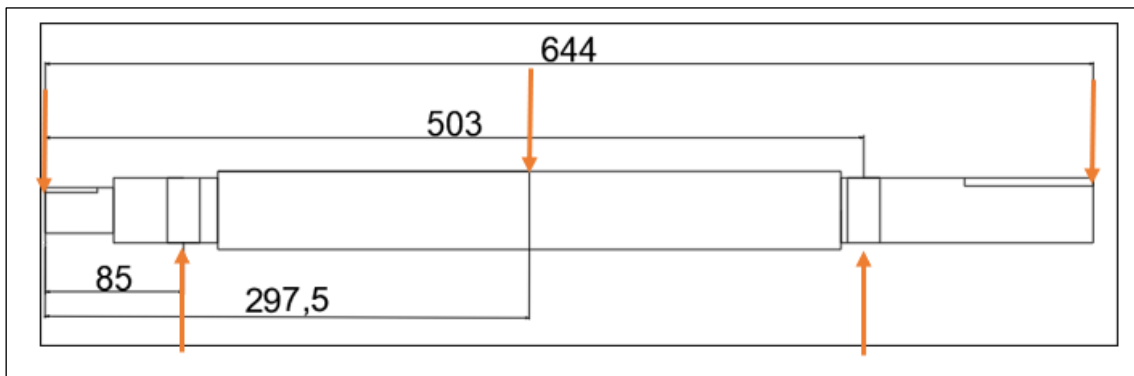


Figura 42: Dimensionamiento del eje principal.

Se realiza el DCL tridimensional donde se puede mostrar las cargas aplicadas en el eje, una carga será la del peso de la zona de trituración y la otra carga es el peso del ventilador, la fuerza de la polea será la fuerza radial, los rodamientos serán expresados como R1 y R2 y se muestra también el torque que tendrá el eje por una fuerza que se le transmite al eje. Realizaremos un estudio de cargas y esfuerzos para obtener el esfuerzo cortante y el momento flector.

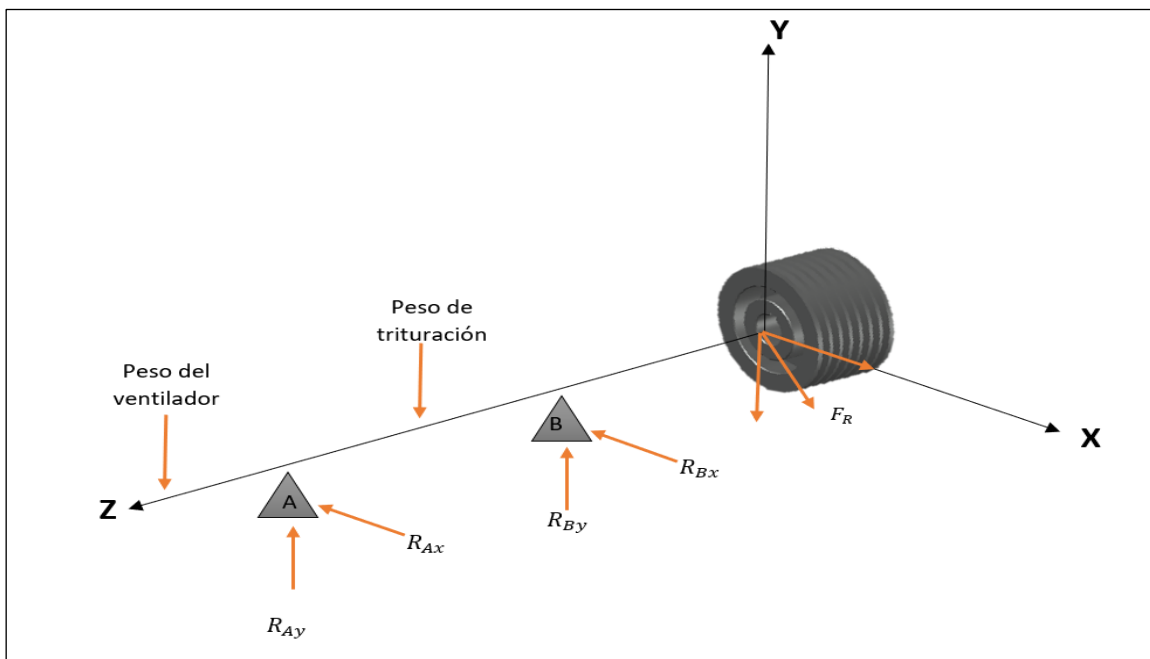


Figura 43: DCL tridimensional del eje principal.

Donde quedaría expresado con sus fuerzas como:

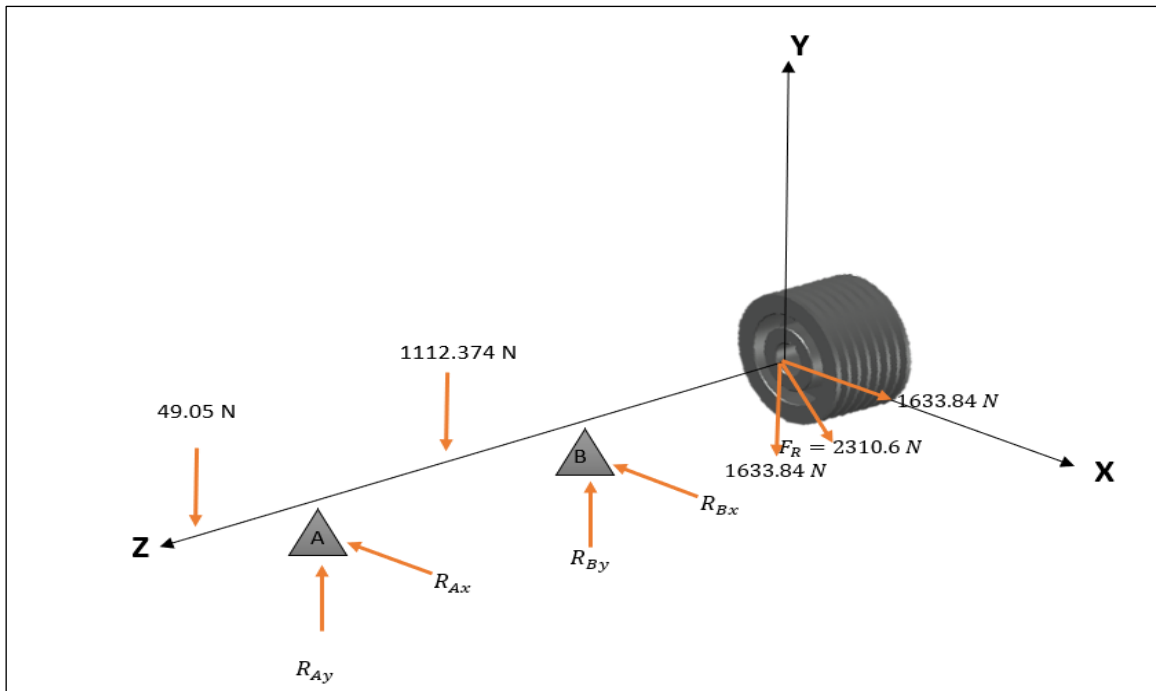


Figura 44: DCL tridimensional del eje principal con las cargas establecidas.

Ahora con la ayuda del programa MDSolids se realizará el cálculo de los esfuerzos cortantes y momentos flectores.

- **En el plano YZ.**

Donde:

$$P_1 = 49.05 \text{ N}$$

$$P_2 = 1112.374 \text{ N}$$

$$P_3 = 1633.84 \text{ N}$$

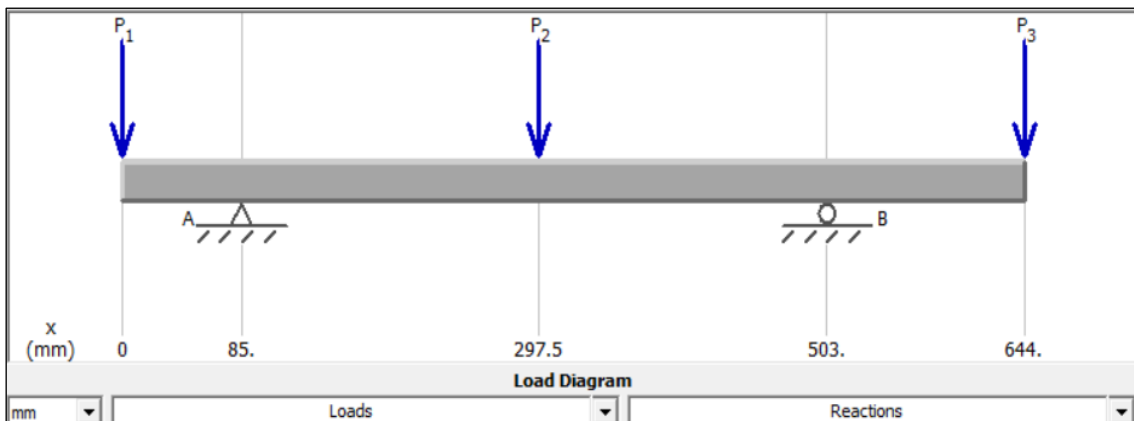


Figura 45: DCL en el plano YZ. (MDSolids)

Obtenemos:

- $R_{Ay} = 54.77 \text{ N}$
- $R_{By} = 2740.49 \text{ N}$

Se obtendrán los diagramas de los esfuerzos cortantes y los momentos máximos:

- **Diagrama del esfuerzo cortante en el plano YZ.**

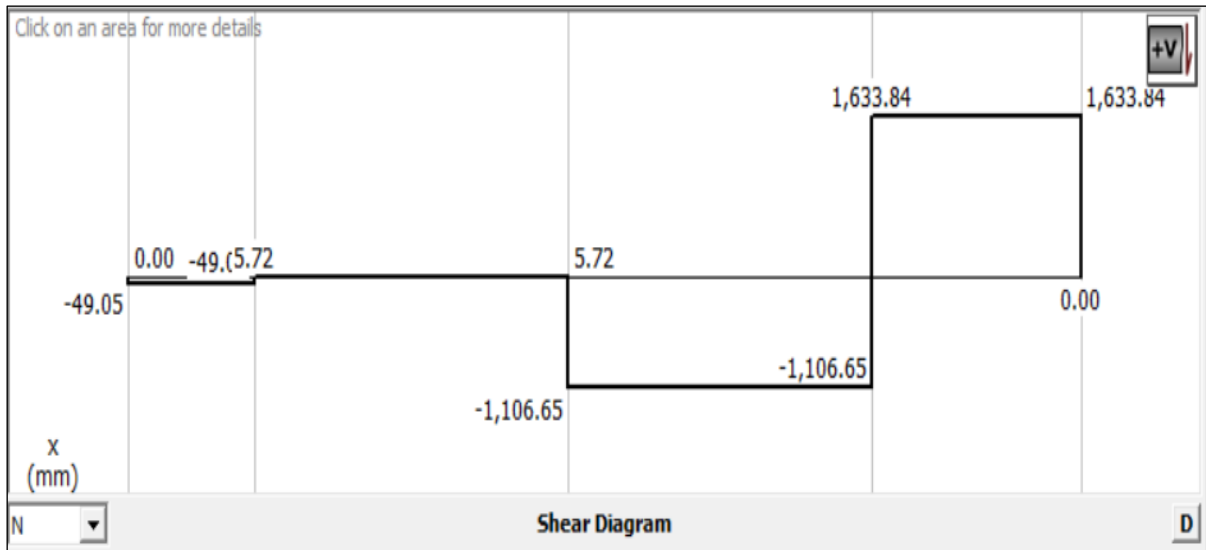


Figura 46: Esfuerzos cortantes. (MDSolids)

- **Diagrama del momento flector en el plano YZ.**

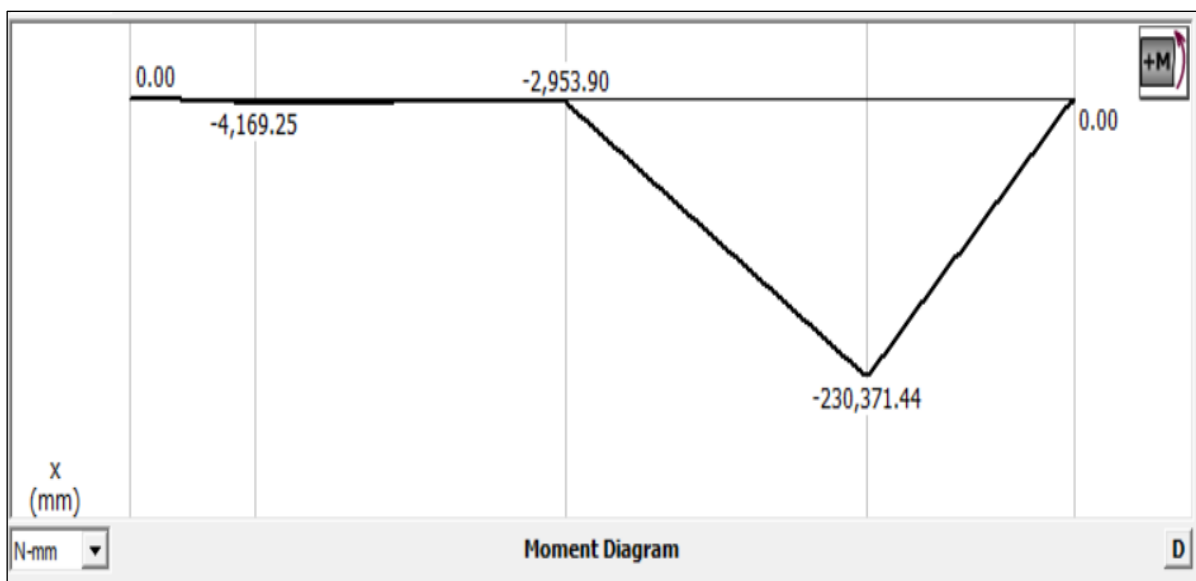


Figura 47: Momentos flectores. (MDSolids)

- **En el plano XZ.**

Donde:

$$P_1 = 1633.84 \text{ N}$$

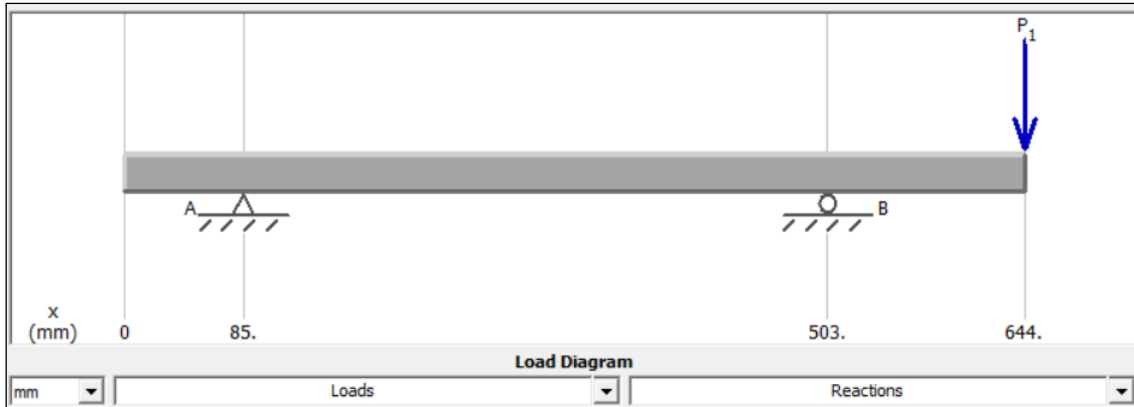


Figura 48: DCL en el plano XZ. (MDSolids)

Obtenemos:

- $R_{Ax} = -918.55 \text{ N}$
- $R_{Bx} = 3641.62 \text{ N}$

Se obtendrán los diagramas de los esfuerzos cortantes y los momentos máximos:

- **Diagrama del esfuerzo cortante en el plano XZ.**

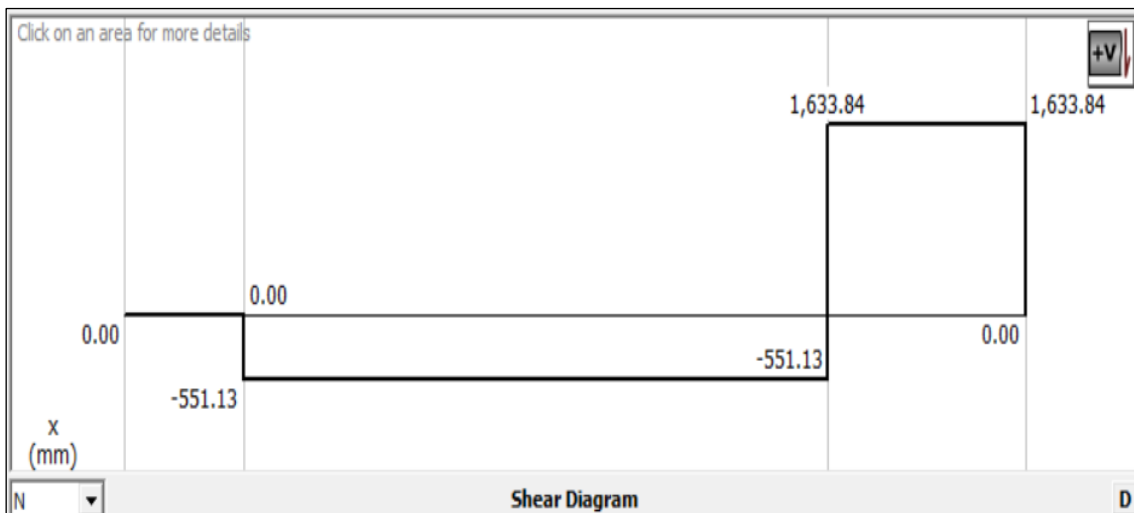


Figura 49: Esfuerzos cortantes. (MDSolids)

- Diagrama del momento flector en el plano XZ.

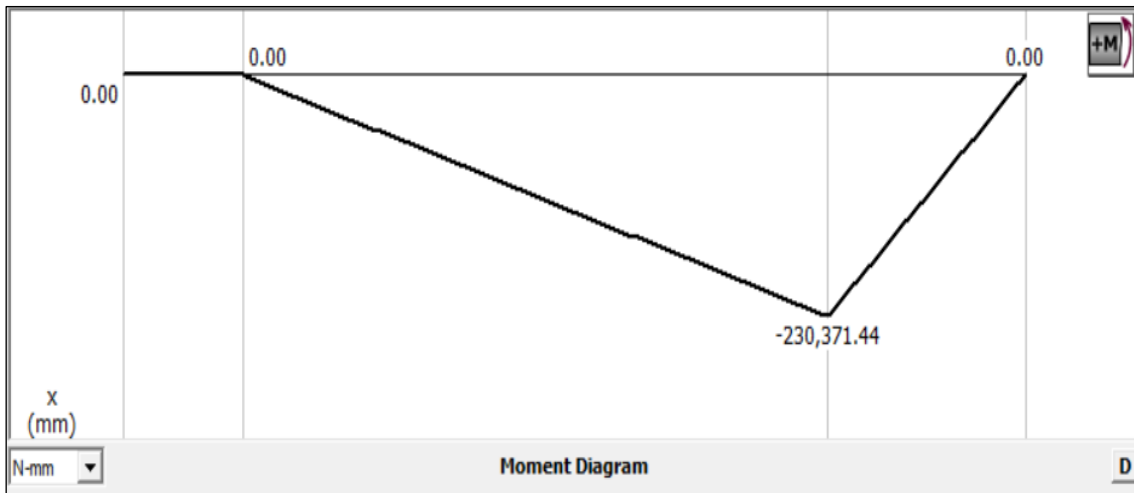


Figura 50: Momentos flectores. (MDSolids)

➤ Secciones de tensiones máximas.

Se determinará la zona más crítica que tiene la geometría del eje principal del molino de martillo a través del cambio de sección y de la concentración de tensiones, para poder realizar el estudio analítico. En nuestro eje podemos analizar tres distintas secciones críticas, las cuales están sometidas a cargas torsionales y flexionantes.

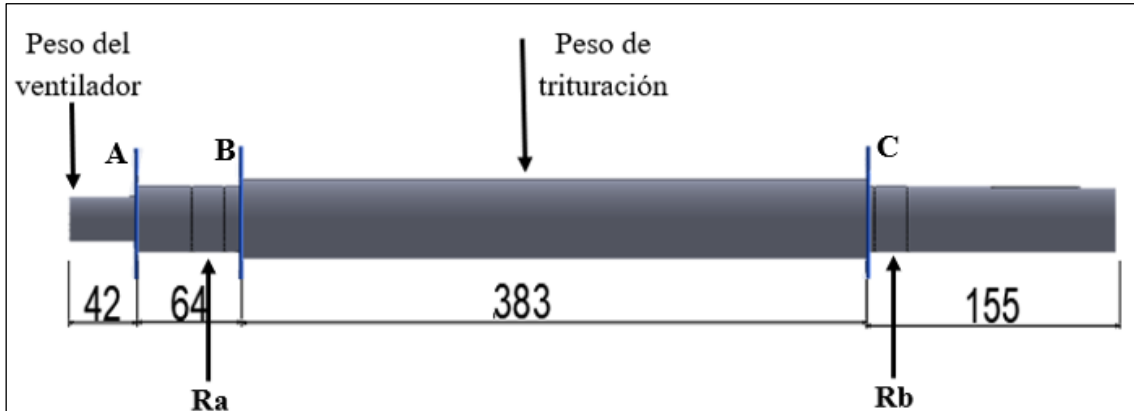


Figura 51: Secciones críticas en el eje principal.

Teniendo el dimensionamiento del eje en milímetros y visualizadas las zonas críticas, se determinó y calculo el momento flector máximo con los diagramas obtenidos anteriormente en los dos planos, obteniendo el momento flector máximo en la zona C:

$$M_C = \sqrt{(0.253 \times 10^6)^2 + (0.253 \times 10^6)^2} = 0.358 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

- **Análisis de fatiga del eje principal**

Se tendrá en cuenta que el eje principal está sometido a flexión y torsión. Para poder señalar el límite de resistencia a la fatiga.

➤ **Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga**

Para realizar los factores de modificación el límite de resistencia a la fatiga se utilizará la ecuación 7.

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S_e' \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

- Para el límite de resistencia a la fatiga, se utilizará el material Acero SAE 1020 con proceso de cementado. El cual la figura 37 nos brinda los siguientes datos:
 - Resistencia a la tensión (S_{ut}) de 760 Mpa.
 - Resistencia a la fluencia (S_y) de 443 Mpa.

Para determinar el límite de fatiga, se utilizará la ecuación 5 porque el AISI 1040 con proceso de cementado, no supera los 1400 Mpa.

$$S_e' = 0.5 \cdot S_{ut} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$S_e' = 0.5 * 760 \text{ (Mpa)}$$

$$S_e' = 380 \text{ Mpa}$$

- **F. de modificación de condición superficial**

Según la tabla 5 para un acero maquinado tendremos los valores de:

$$a = 4.51$$

$$b = -0.265$$

Remplazamos en la ecuación 8:

$$k_a = a \cdot S_{ut}^b \quad \text{Ecuación 8}$$

$$k_a = 4.51(686)^{-0.265}$$

$$k_a = 0.8$$

- F. de tamaño

Tenemos un eje rotativo, sometido a flexión y torsión es por eso por lo que el K_b será determinado por la ecuación 10, ya que el diámetro del eje de trituración es de 48 mm.

$$k_b = 1.24 \cdot d_e^{-0.107} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$k_b = 1.24(48)^{-0.107}$$

$$k_b = 0.819$$

- F. de carga

Se considero una carga por flexión donde el valor es:

$$k_c = 1$$

- F. de temperatura

La temperatura a la que está trabajando la zona de trituración del molino es de 95 °F.

$$k_d = 0.975 + 0.432(10^{-3})T_F + 0.115(10^{-5})T_F^2 + 0.104(10^{-8})T_F^3 - 0.595(10^{-12})T_F^4$$

$$k_d = 0.975 + 0.432(10^{-3}) * 70 + 0.115(10^{-5}) * 70^2 + 0.104(10^{-8}) * 70^3 - 0.595(10^{-12}) * 70^4$$

$$k_d = 1.02$$

- F. de confiabilidad

Se considera una confiabilidad del 99%, según la tabla 6 el valor será:

$$k_e = 0.814$$

- F. de efectos varios

Se considerará un factor de:

$$k_f = 1$$

➤ Límite de resistencia a la fatiga.

Los datos obtenidos se remplazarán en la Ecuación 7:

$$S_e = 0.8 * 0.819 * 1 * 1.02 * 0.814 * 1 * 343$$

$$S_e = 206.72 \text{ MPa}$$

• Concentración de esfuerzos

$$K_f = 1 + q(kt - 1) \quad \text{ó} \quad K_{fs} = 1 + q(kts - 1)$$

Donde el kf es usado para E. normales y kfs para E. cortantes.

Determinamos kt y kts :

$$\frac{D}{d} = \frac{48}{40} = 1.2$$

$$\frac{r}{d} = \frac{0.8}{40} = 0.02$$

Según la figura de eje redondo con filete en el hombro en flexión y eje redondo con filete en el hombro en torsión. Obtenemos:

- $K_t = 2,10$

- $K_{ts} = 1.75$

Para obtener el “q” que es la sensibilidad de la muesca, donde la ecuación está definida por:

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad \text{ó} \quad q_{cortante} = \frac{K_{fs} - 1}{K_{ts} - 1}$$

Determinamos q , teniendo en cuenta que $r/d=0.02$; $d = 40$, donde $r = 0.8$ mm, tenemos:

$$q = 0,65 \quad \text{y} \quad q_s = 0,7$$

Por lo tanto, calculamos el factor de concentración de esfuerzos:

$$K_f = 1 + 0.65 * (2,10 - 1) = 1,715$$

$$K_{fs} = 1 + 0.7 * (1.75 - 1) = 1,7$$

➤ Esfuerzo alternante y esfuerzo medio

Se pueden encontrar los E. de flexión y torsión suelen estar presentes en elementos alternantes y medios. Para desarrollar este estudio se combinará los distintos esfuerzos

con el método de Von Mises. Con los factores de concentración de esfuerzos obtenidos anteriormente: $K_f = 1,715$ y $K_{fs} = 1,7$. Se utilizarán las siguientes formula:

$$\sigma_c = k_f \frac{M_c}{I/C} \quad \text{donde} \quad \frac{I}{C} = \frac{\pi(d)^3}{32}$$

$$\tau_m = k_{fs} \frac{16T_m}{\pi d^3}$$

Donde:

σ_c = Es el esfuerzo flexionante debido al momento flector en C.

τ_m = Es el esfuerzo cortante debido a torque producido en el eje principal del molino.

$$\sigma_c = 1.715 * \frac{32 * 0.358 * 10^6}{\pi(40)^3}$$

$$\sigma_c = 97.72 \text{ MPa}$$

$$\tau_m = 1.7 * \frac{16 * 103.98}{\pi(0.04)^3}$$

$$\tau_m = 12.618 \text{ MPa}$$

Según Von Mises nos dice que, en la teoría de la energía de distorsión, los principales esfuerzos son σ_c y σ_m en el Circulo de Mor son los que se presenta a continuación:

$$\sigma_a = \sigma_c = 97.72 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = \sqrt{3}\tau_m = 21.855 \text{ MPa}$$

➤ Número de ciclos a la falla

Para encontrar el ciclo de fallas partiremos de la resistencia a la fatiga según la gráfica de Coffin. Obtendremos el valor de fracción de resistencia a la fatiga, f . Donde que para un AISI 1020 Cementado tendrá un $f = 0.95$

Donde:

$$a = \frac{(f * S_{ut})^2}{S_e}$$

$$b = -\frac{1}{3} \log \left(\frac{f * S_{ut}}{S_e} \right)$$

Reemplazando valores:

$$a = \frac{(0.95 * 760)^2}{206.72} = 2521.69 \text{ Mpa}$$

$$b = -\frac{1}{3} \log \left(\frac{0.95 * 760}{206.72} \right) = -0.181$$

El número de ciclos a la falla se expresará en la siguiente formula:

$$N = \left(\frac{\sigma_a}{a} \right)^{1/b}$$

Donde el número ciclos a la falla del eje principal es:

$$N = \left(\frac{97.72}{2521.69} \right)^{1/-0.181} = 6.302 * 10^7 \text{ ciclos}$$

$$N = 63.02 * 10^6 \text{ ciclos}$$

➤ **Factor de seguridad.**

Utilizando las teorías de fallas por fatiga que se utilizan para este tipo de casos, obtenemos los siguientes factores de seguridad:

➤ F.S de Goodman modificado:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$$

$$\frac{97.72}{206.72} + \frac{21.855}{760} = \frac{1}{n}$$

$$n = 1.99$$

➤ F.S de Gerber:

$$\frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{\sigma_m}{S_{ut}}\right)^2} = n$$

$$n = \frac{1}{\frac{97.72}{206.72} + \left(\frac{21.855}{760}\right)^2}$$

$$n = 2.11$$

Utilizaremos el método de Gerber por ser el más conservador.

➤ **Diagrama de criterio de fatiga de Gerber**

Para la vida infinita la falla ocurre cuando:

$$\frac{S_a}{S_e} + \left(\frac{S_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1$$

La recta de Gerber queda de la siguiente manera:

$$\frac{nS_a}{S_e} + \left(\frac{n\sigma_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1$$

$$S_a = \frac{r^2 S_{ut}^2}{2S_e} \left(-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2S_e}{rS_{ut}}\right)^2} \right)$$

Encontramos la línea de carga:

Donde:

$$r = \frac{S_a}{S_m} = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$$

Remplazamos los valores $\sigma_a = 97.72 \text{ MPa}$ y $\sigma_m = 21.855 \text{ MPa}$, encontrados anteriormente, Donde:

$$r = 4.47$$

Remplazamos:

$$S_a = \frac{4.47^2 * 760^2}{2 * 206.72} \left(-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 * 206.72}{4.47 * 760} \right)^2} \right)$$

$$S_a = 205.96 \text{ Mpa}$$

Encontramos el valor de :

$$S_m = \frac{S_a}{r} = 46.08 \text{ Mpa}$$

Aplicamos la formula del punto de intersección entre la fatiga y la fluencia al primer ciclo:

$$S_m = \frac{S_{ut}^2}{2S_e} \left(1 - \sqrt{1 + \left(\frac{2S_e}{S_{ut}} \right)^2 \left(1 - \frac{S_y}{S_e} \right)} \right)$$

Encontramos:

$$S_m = \frac{760^2}{2 * 206.72} \left(1 - \sqrt{1 + \left(\frac{2 * 206.72}{760} \right)^2 \left(1 - \frac{450}{206.72} \right)} \right)$$

$$S_m = 269.22 \text{ Mpa}$$

Donde:

$$S_a = S_y - S_m$$

$$S_a = 180.78 \text{ Mpa}$$

Fórmula para obtener la pendiente critica:

$$r_{crit} = \frac{S_a}{S_m}$$

Se obtiene:

$$r_{crit} = 0.671$$

3.3.2 Análisis de falla por fatiga mediante el software SolidWorks

- Descripción del eje principal.

Para iniciar con el estudio del eje principal, se diseñará en el programa SolidWorks con las medidas obtenidas anteriormente.

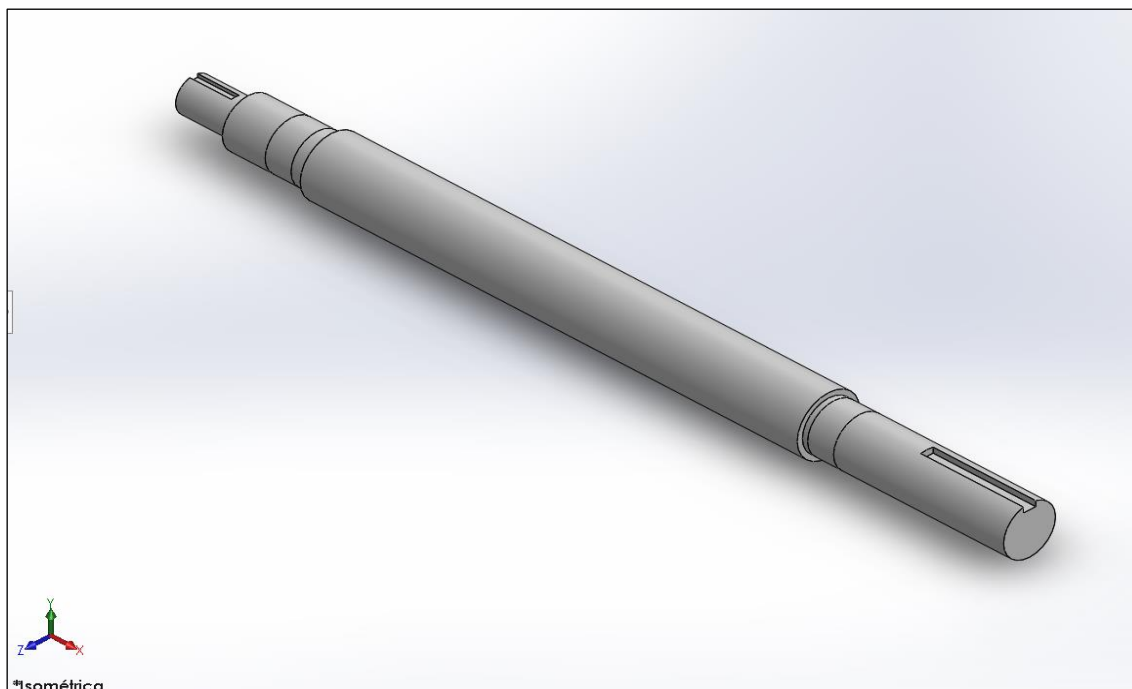


Figura 52: Eje principal del molino triturador de maíz.

- Descripción del material del eje principal.

Se tiene en cuenta el material del eje que será un Acero 1020 con una capa carburizada (cementada), con las siguientes propiedades mecánicas:

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2e+11	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.29	N/D
Módulo cortante	7.7e+10	N/m ²
Densidad de masa	7900	kg/m ³
Límite de tracción	760000000	N/m ²
Límite de compresión		N/m ²
Límite elástico	441000000	N/m ²
Coefficiente de expansión térmica	1.5e-05	/K
Conductividad térmica	47	W/(m-K)
Calor específico	420	J/(kg-K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Tabla 11: Propiedades del Acero 1020 con tratamiento de cementación.

- Cargas aplicadas al eje principal.

Las cargas que actúan en el eje son representadas en el programa SolidWorks.

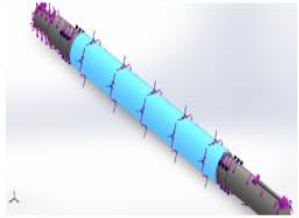
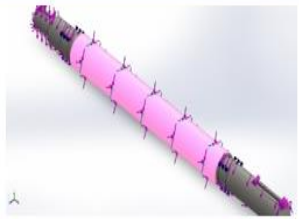
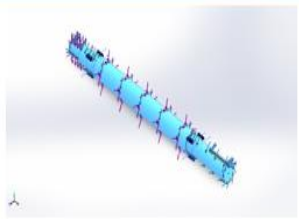
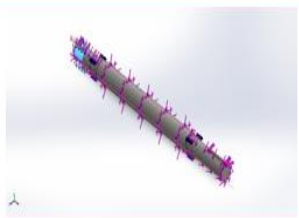
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 1,112.37 N
Torsión-1		Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar momento torsor Valor: 3.135 N.m
Torsión-2		Entidades: 12 cara(s) Tipo: Aplicar momento torsor Valor: -103.98 N.m
Fuerza-2		Entidades: 1 cara(s), 1 plano(s) Referencia: Alzado Tipo: Aplicar fuerza Valores: ---; -49.05; --- N

Figura 53: Cargas y torsión aplicada en el eje principal con SolidWorks.

- Sujeciones

Las sujeciones puestas en el eje principal son de tipo rodamiento, las cuales serán de un grosor de 20mm. La sujeción tipo rodamiento fija hará como una simulación

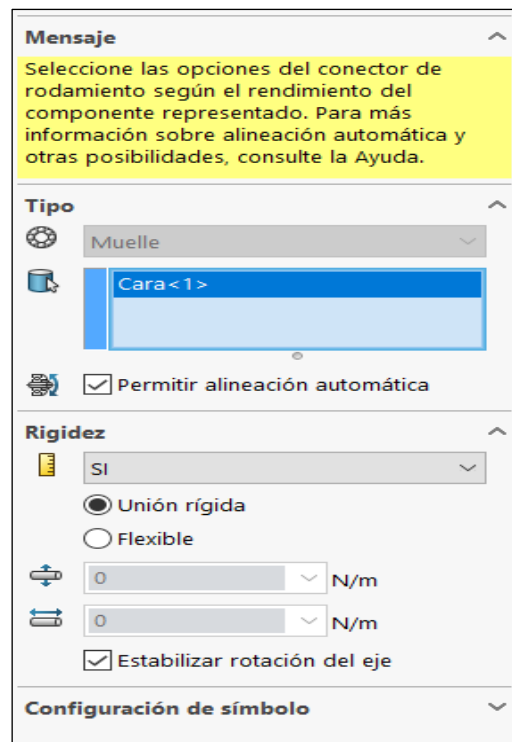


Figura 54: Ventana de SolidWorks donde se define la sujeción tipo rodamiento.

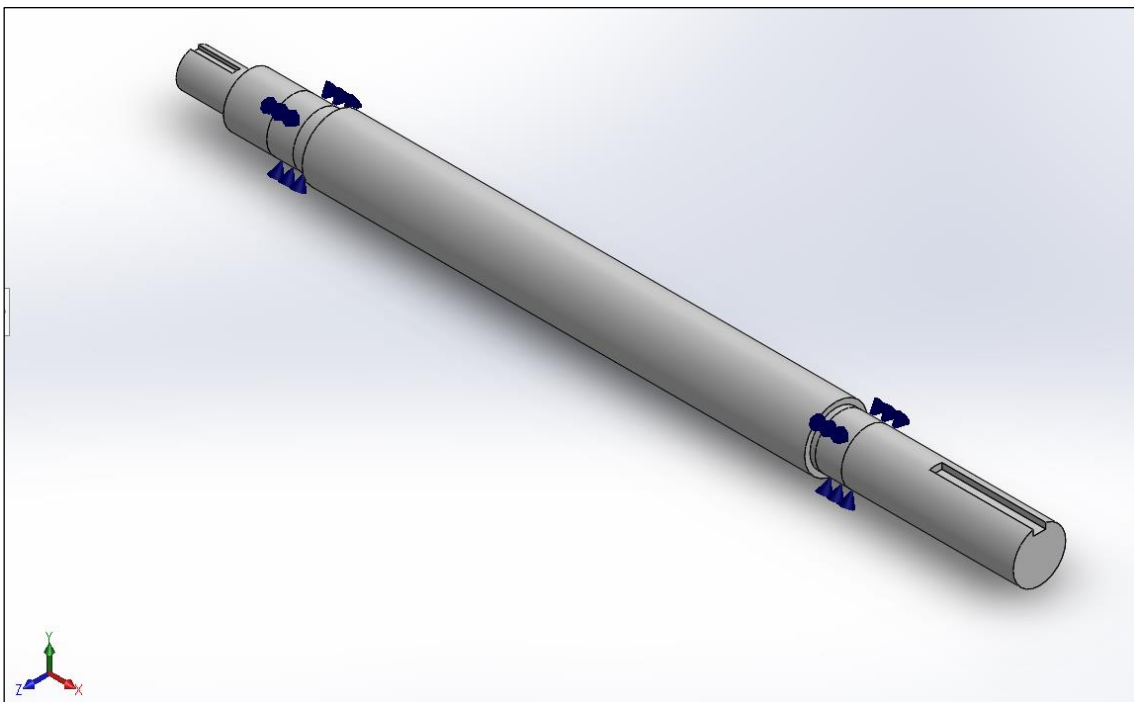


Figura 55: Muestra de sujeción de rodamientos tipo muelle del eje principal.

- **Información de malla.**

El tipo de malla aplicado será una malla solida utilizando el mallado estándar. Con el porcentaje de elementos con coeficientes de aspecto menores a 3 podemos ver que tiene

un resultado de 99.9, lo cual nos indica un mallado alto. Los resultados serán mostrados en la tabla a continuación:

Malla Detalles	
Nombre de estudio	Análisis estático 1 (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla	Desactivar
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 puntos
Tamaño de elemento	4.98436 mm
Tolerancia	0.249218 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	71937
Número total de elementos	48248
Cociente máximo de aspecto	3.8365
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	99.9
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0
Porcentaje de elementos distorsionados	0
Número de elementos distorsionados	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:03
Nombre de computadora	

Tabla 12: Descripción de Mallado del eje principal.

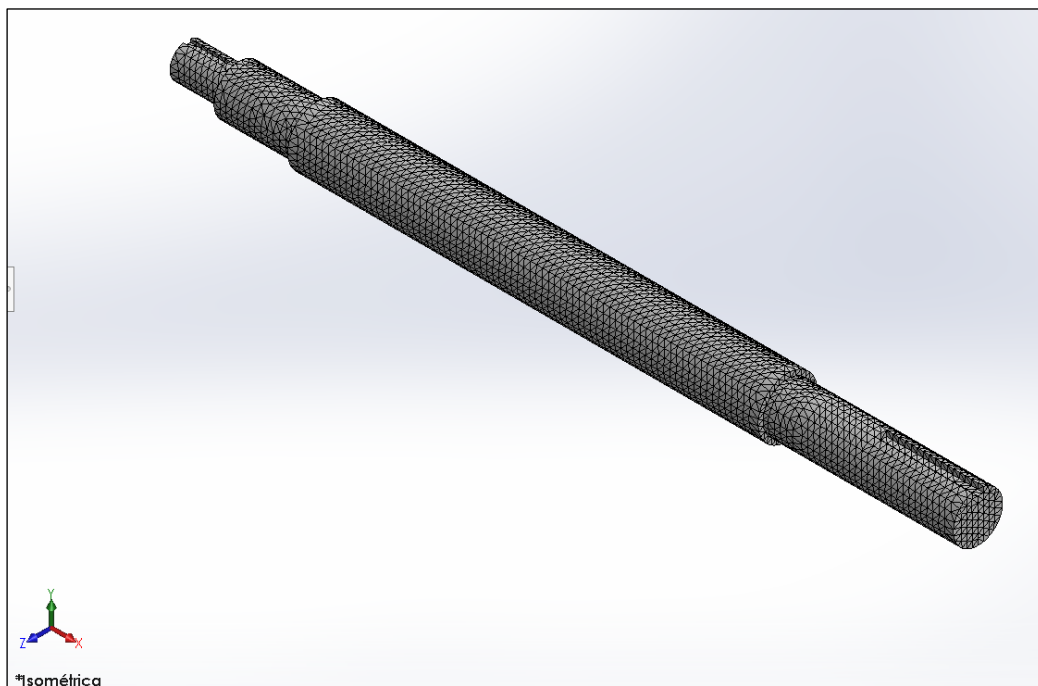


Figura 56: Mallado del eje principal.

- Distribución de tensiones.

Diseñare el eje principal con una situación balanceada, donde el análisis elementos finitos nos ayuda a representar el comportamiento que va a tener las cargas y torques en el eje principal del triturador de maíz.

En la siguiente figura, se podrá identificar las diversas vistas de la distribución de la tensión de Von Misses. Podemos visualizar las zonas más críticas se encuentran en el cambio de sección de la sección derecha de la polea.

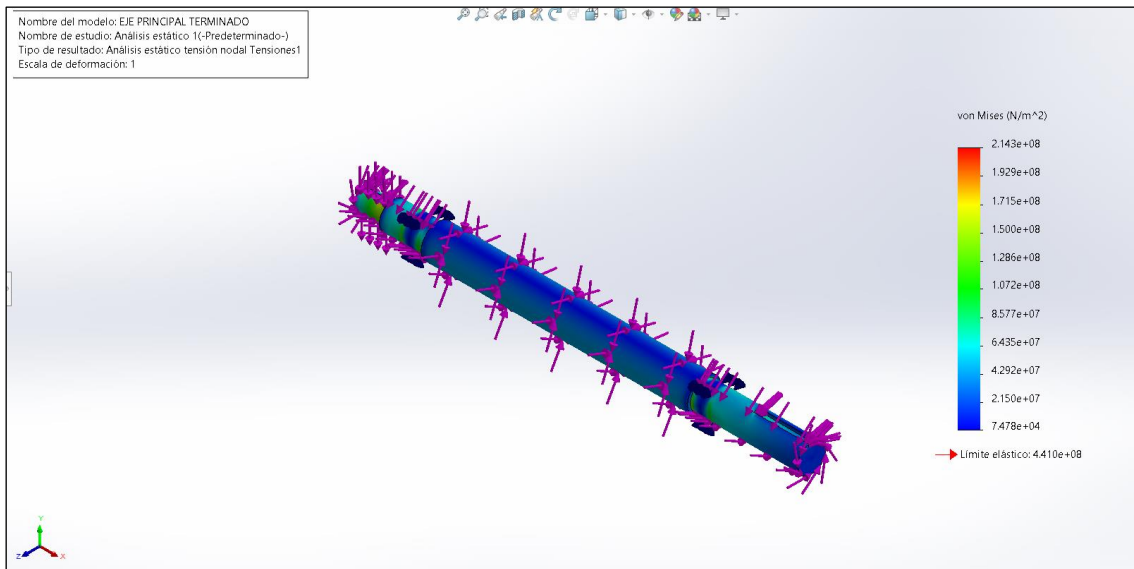


Figura 57: Distribución de la tensión de Von Misses.

- Desplazamiento.

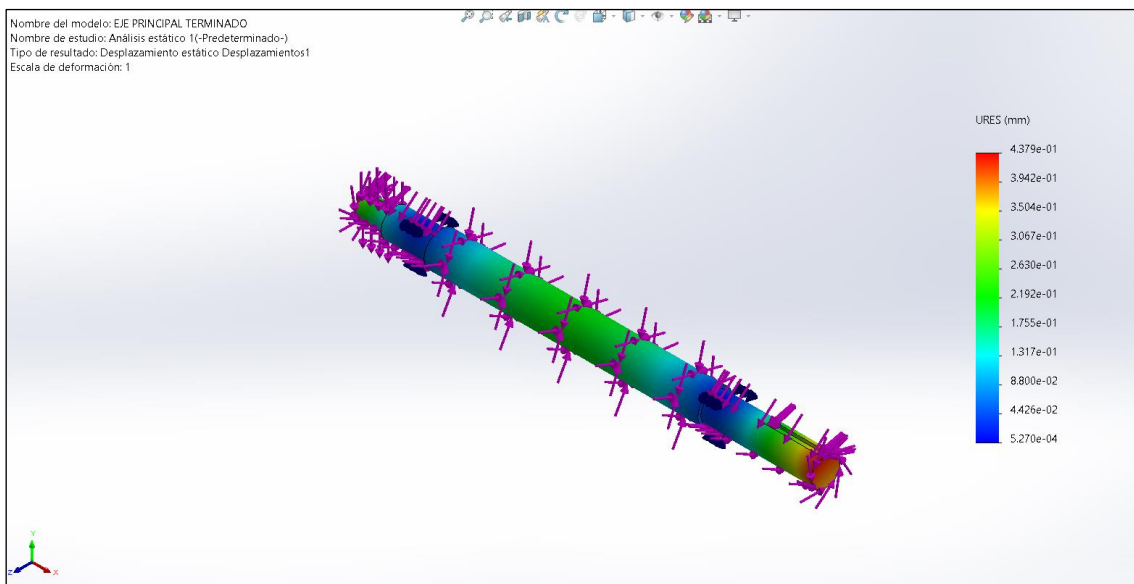


Figura 58: Distribución de desplazamiento.

- Factor de seguridad

El factor de seguridad o FS nos muestra una correlación entre la tensión de uso sobre la carga de falla, esto nos ayuda a ver la seguridad del diseño del eje.

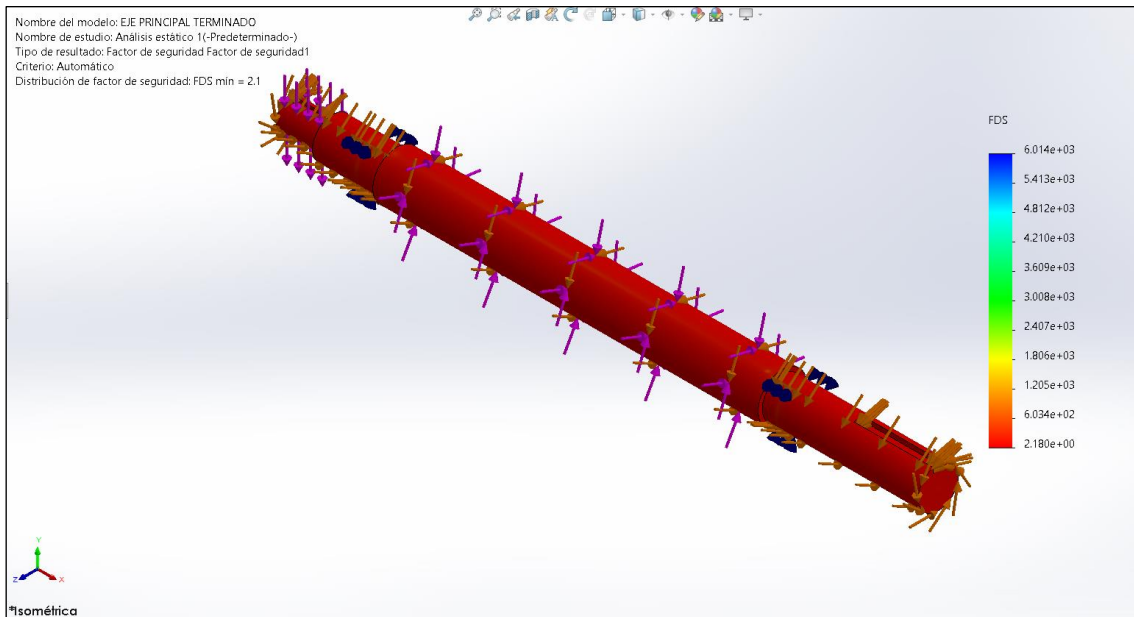


Figura 59: Factor de seguridad del eje principal.

El F.S. mínimo del eje principal es de 2.18 según se muestra en la figura 59.

- Análisis de fatiga.

Con los datos del análisis de esfuerzo, seguimos con los pasos para simular el análisis a fatiga. A continuación, se mostrarán las características y variables para dicho estudio:

Para este análisis se pondrá como una carga alternante con los datos detallados en el estudio estático. El tipo de carga será con base en O (LR = 0). Para el factor de resistencia se tomarán los siguientes valores.

$$k_f = k_a * k_b * k_c = 0.8 * 0.819 * 1 = 0.6552$$

Nombre del evento	N. ° de ciclos	Tipo de carga	Asociación de estudios		
			Nombre de estudio	Factor de escala	Incremento
Suceso-2	1000000	Con base en O (LR=0)	Análisis estático 1	1	0

Figura 60: Parámetros para el análisis de fatiga.

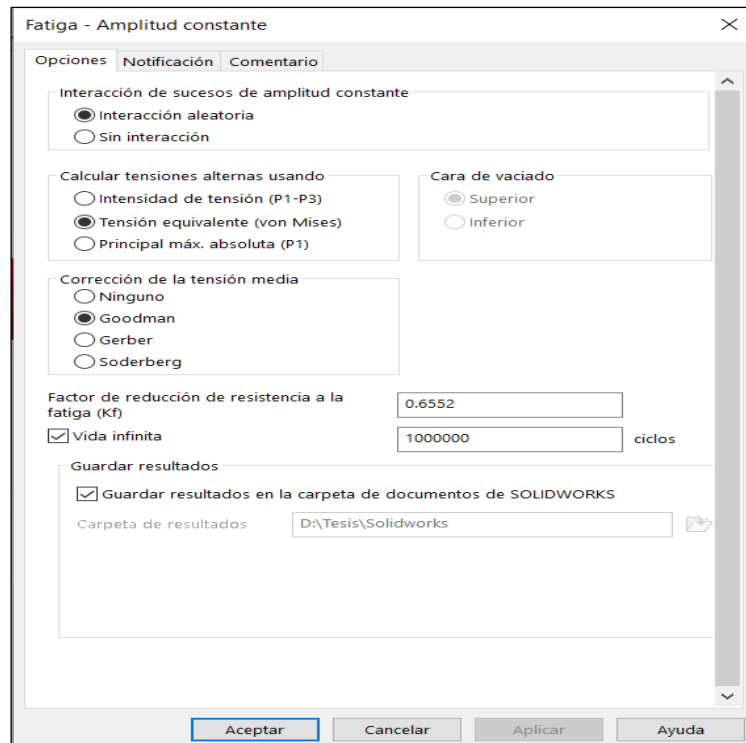


Figura 61: Ventana definición de propiedades de fatiga.

- Daño acumulado.

El factor de daño nos permite visualizar que el acontecimiento especificado consume en promedio un valor de 0.18 % de la vida del modelo. En donde el modelo no sufre daño por fatiga aplicando la carga radial de 10^6 ciclos.

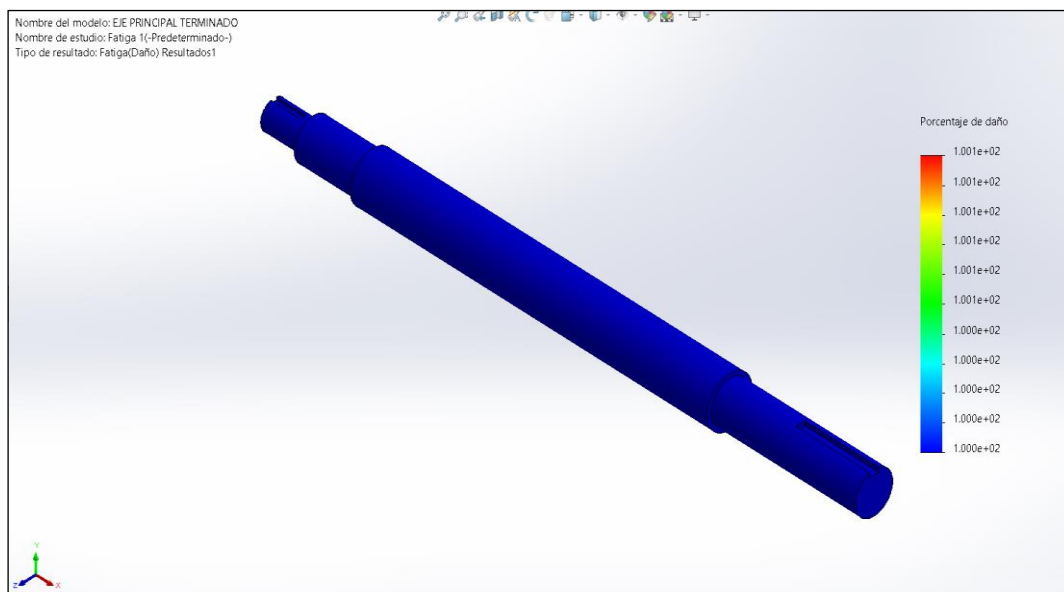


Figura 62: Daño acumulado en el eje principal.

- **Vida total.**

La influencia de vida, para las cargas seleccionadas y el número de ciclos encontrados, donde el daño por fatiga es pequeño. En el cual se determina la vida mínima de 6.302×10^6 ciclos.

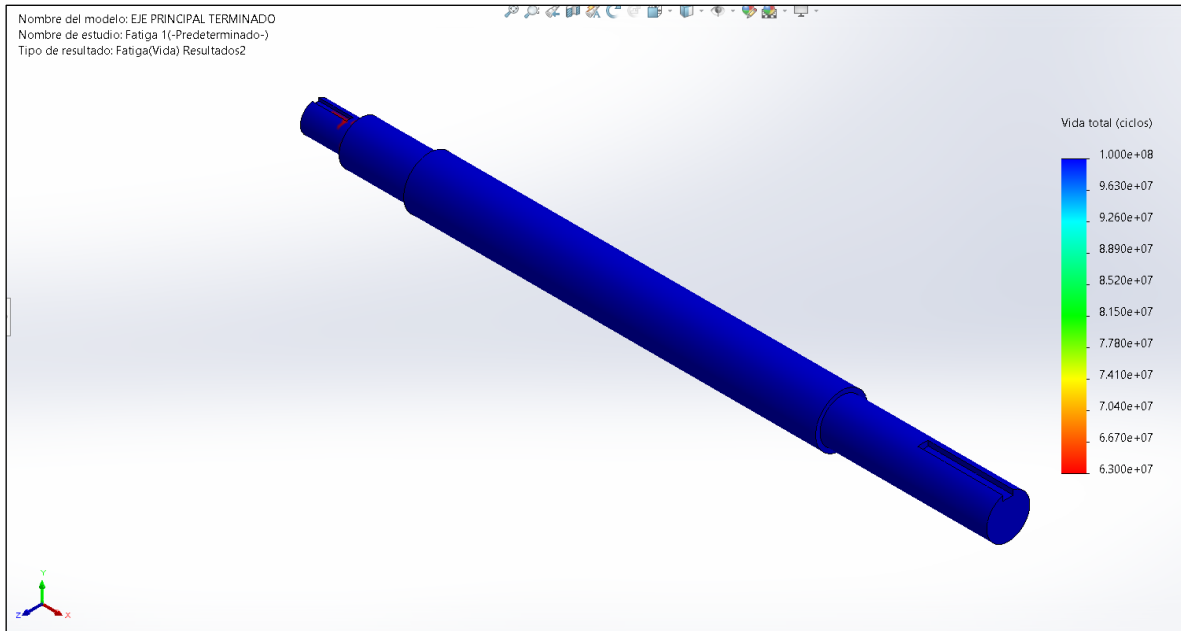


Figura 63: Vida total del eje principal.

- **Factor de carga.**

El factor de carga nos muestra que el eje principal del molino fallaría si las cargas actuales se multiplican por 1.315 (mínimo factor de carga).

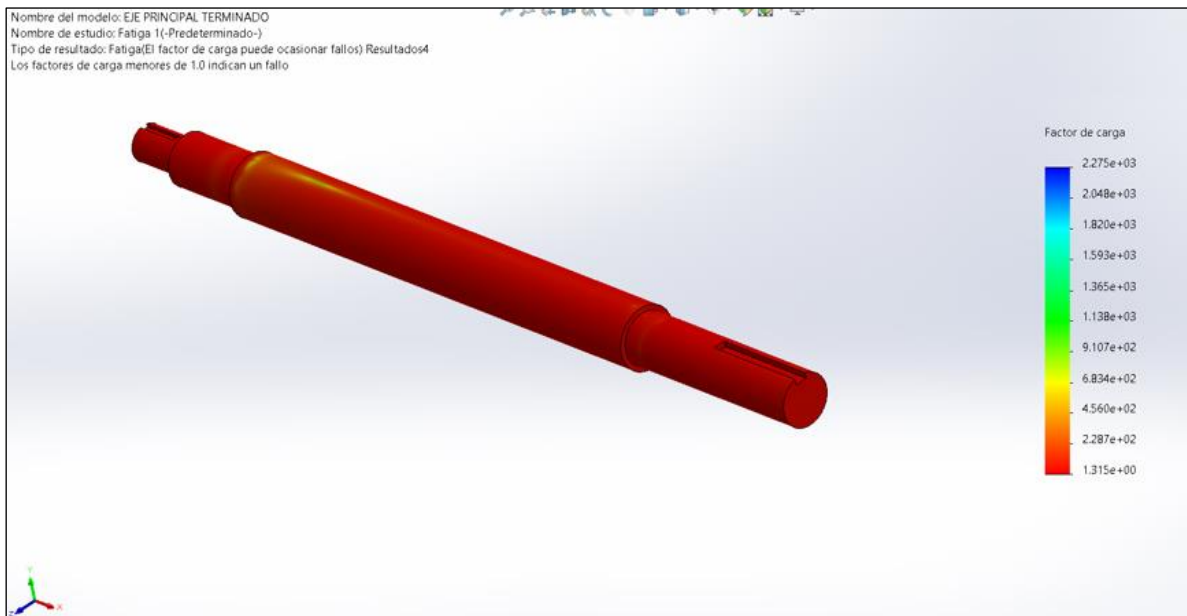


Figura 64: Factor de carga del eje principal.

- **Indicador de Biaxialidad.**

El factor de Biaxialidad realiza el trazado entre la relación del esfuerzo principal mínima alterna y esfuerzo máxima principal máxima alternante. Mediante este trazado se puede obtener un dato que nos indica el estado de la parte analizada. Si el valor es menor a uno indica un cortante puro y un valor de uno indica un estado biaxial puro.

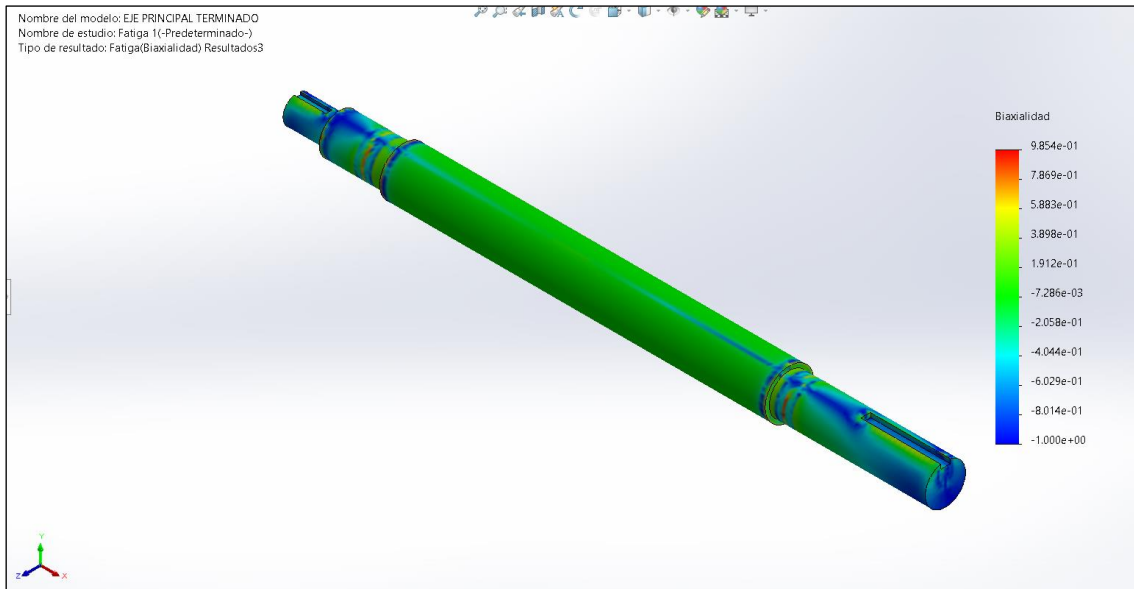


Figura 65: Indicador de biaxialidad para el eje principal del molino de maíz.

- **Curva S-N.**

La curva S-N representa la resistencia a la fatiga de un número específico de ciclos, que suele ser muy alto. Por esta razón, para mejorar la visualización y comprensión de estas curvas, a menudo se utilizan escalas logarítmicas.

El software de SolidWorks nos muestra los datos de la curva S-N para realizar análisis y determinar el resultado del daño o la vida por fatiga (vida segura).

En la Figura N ° 66, podemos ver el número de ciclos de falla por fatiga de cada nodo provocados por la tensión alterna VS. El gráfico se basa en la curva S-N y la tensión alterna en cada nodo. Puede verse en el diagrama de Gerber realizado en el análisis de fatiga que la tensión de flexión alterna es de 270 MPa, por lo que es menor que la curva S-N. Por tanto, se considerará que el eje tiene una vida útil de 10^9 ciclos.

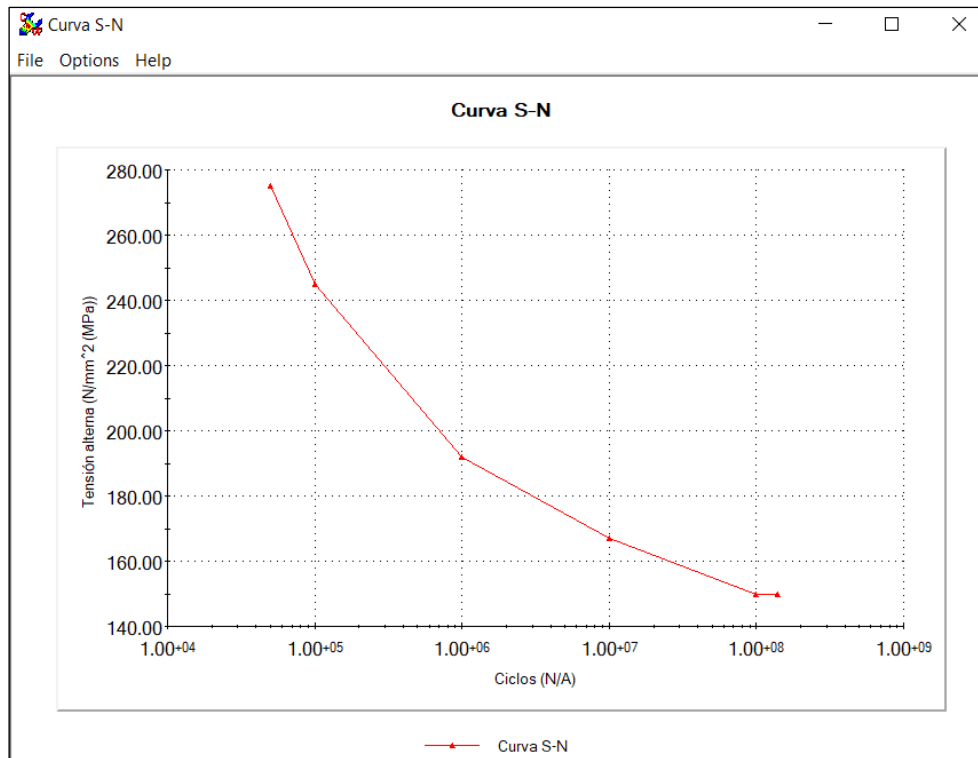


Figura 66: Curva S-N.

The figure shows the 'Material' software window with the 'Propiedades' tab selected for 'Curvas SN de fatiga'. The window displays various settings for the fatigue curve, including the origin (Log-log), interpolation method (Log-log), and a table of data points (N vs S).

Propiedades Tablas y curvas Curvas SN de fatiga Apariencia Rayado Personalizado

Origen
 Interpolación: **Log-log**
 Definir: Curva-0(R=0.6552)
 Derivar de módulo elástico del material:
 Basado en curvas de acero austenítico ASME
 Basado en curvas de acero al carbono ASME
 Definir la ecuación de fatiga S-N (para análisis de fatiga de vibración aleatorio)

Datos de tabla
 Factor de tensión (R): 0.6552 Unidades: N/m²

Puntos	N	S
1	100	1844522968
2	200	1420494700
3	500	1045936396
4	1000	840989399.3
5	2000	685512367.5
6	5000	537102473.5
7	10000	452296819.8
8	20000	392226148.4
9	50000	327208480.6
10	100000	288339222.6
11	200000	253710247.3
12	500000	219081272.1
13	1000000	200000000
14		

Buttons: Archivo, Ver, Guardar, Guardar, Config..., Aplicar, Cerrar, Ayuda

Figura 67: Propiedades de la curva SN de fatiga.

IV ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Una vez obtenido los datos del análisis de falla a fatiga para el eje principal del molino triturador de maíz mediante los métodos (analítico y SolidWorks Simulation), se podrá comparar y analizar los resultados conseguidos.

En primer lugar, observaremos los datos a la tensión máxima encontrada en el eje principal de la trituradora, en la zona de mayor concentración de esfuerzos y la razón de la fallara el eje, reconociendo los datos que suelen alterar de formas significativas los resultados de vida del eje principal. En la siguiente se mostrará los resultados obtenidos.

Tabla 13: Resultados de la tensión máxima mediante el método analítico y SolidWorks Simulation.

	<i>Esfuerzo_{Maximo}(MPa)</i>	
Sección	Calculo analítico	SolidWorks
Sección C	21.855 MPa	27.6 MPa

Se puede visualizar una diferencia entre los valores de las tensiones calculadas, en donde la tensión por el cálculo analítico es 21.855 MPa, el cual es un poco menor al valor de tensión por el método de SolidWorks que es 27.6 MPa. La precisión del método analítico es un poco menor a la del SolidWorks porque en el cálculo analítico se tiene que encontrar los factores de concentración, que se encontraron mediante graficas. En la parte de factores de corrección que fueron obtenidos mediante gráficos antes mostrados, es lo que hace que el método analítico no sea concreto como lo hace el software SolidWorks Simulation.

Ahora veremos los resultados de la vida útil del eje mediante el método analítico y el de SolidWorks con el material AISI SAE 1020 con tratamiento de cementado en el eje de principal del molino de maíz se muestran en la Tabla N°14:

Tabla 14: Resultados de la vida total mediante el método analítico y SolidWorks Simulation.

	<i>Vida total ciclos</i>	
Sección	Forma analítica	Forma SolidWorks
Sección C	$63.02 * 10^6$ ciclos	$63x10^6$ ciclos

Utilizando el método de Gerber se obtuvo los resultados de la vida total de ciclos en el eje principal del molino, el cual en ambos estudios nos da 10^6 ciclos, donde se ve que no hay diferencia entre ambos.

Donde en la forma de SolidWorks la vida total es un poco menor al método analítico donde inferimos que el software SolidWorks simulation realiza un análisis más preciso porque muestra resultados más conservadores en comparación con el método de análisis.

- Con respecto al Facto de seguridad, mostraremos los resultados en la tabla N°15.

Tabla 15: Resultados del factor de seguridad mediante el método analítico y SolidWorks Simulation.

	<i>FACTOR DE SEGURIDAD</i>	
Sección	Forma analítica	Forma SolidWorks
Sección C	2.11	2.18

Se puede notar que los factores de ambos métodos son distintos, donde la forma analítica es menor por los factores de corrección que se utilizó. Donde también por él estudia de vida a la fatiga los factores lo hacen menos impreciso. El valor de interés es el factor de seguridad más bajo, porque indica que se ha alcanzado la vida útil esperada.

V CONCLUSIONES

1. Se diagnosticó el trabajo del eje del molino triturador de maíz TN-8 marca Nogueira, donde se reconoce que el eje de acero AISI 1020 con proceso de cementación es un elemento primordial del molino; considerado como un eje que puede padecer de fallas por fricción, desgaste, vibración llegando a producirse fatiga. El eje principal puede soportar una carga de 1112.374 N y un torque medio de 103.98 N.m transmitida del motor al eje.
2. Se diseñó el eje principal junto a su capa carburizada en el programa AutoCAD y el modelamiento se dio en el software SolidWorks Simulation, teniendo los siguientes valores; medidas: 644mm de largo, el diámetro más grande es de 48 mm de ancho, la chaveta en el lado de la polea es de 79mm de largo, 9.5mm de ancho y 5mm de profundidad.
3. Para determinar las fallas por fatiga del eje principal se realizó mediante la teoría de Gerber y con SolidWorks simulation, primero se realizó un estudio analítico obteniendo las cargas y torques aplicados en el eje, con los cuales se pudieron obtener los factores de seguridad. La diferencia entre ambos métodos con respecto al factor de seguridad es de un 1.033%, llevando a la conclusión que la diferencia de esta es por los factores de correlación son los que no permiten al método analítico ser más preciso.
4. Se visualizó que la zona más crítica del eje principal es la sección C, la cual es la sección con menor vida a fatiga. Se concluyó que mediante el criterio de fatiga de Gerber que el eje con capa carburizada no fallara por fatiga, encontrando que el esfuerzo flexionantes no supera al límite de resistencia a la fatiga. Obteniendo que la vida útil del eje principal del $63.02 \cdot 10^6$ ciclos.

VI RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un estudio metalográfico más exhaustivo con la finalidad de determinar el proceso que se ha tenido con el eje y si ha sido realizado de la manera correcta. Analizando de manera microestructural al eje principal donde se puede verificar el tipo de microestructura, tratamiento térmico, tratamiento termoquímico y homogeneidad del componente mencionado.

Se recomienda realizar un análisis fractográfico para visualizar las propiedades macroscópicas de la zona que esta fracturada. El análisis nos ayudara a obtener evidencia preliminar sobre la causa, el mecanismo y la dirección de propagación de la nucleación de la grieta, y la magnitud de la carga aplicada.

VII BIBLIOGRAFÍA

- [1] Á. M. Cerón, G. A. Charry y J. J. Coronado, Análisis de falla del eje de un agitador para tratamiento de agua, Cali, 2006.
- [2] O. Villalobos Quispe, Estimacion de la vida util del eje de accionamiento de una trituradora de impacto de eje horizontal a través del análisis de falla por fatiga (Tesis de pregrado), Chiclayo, 2019.
- [3] M. Montiel Polvillo, Estimación de vida a fatiga en un eje con ajuste a presión (Titulo de pregrado), Sevilla, 2017.
- [4] P. F. García Lazo, Análisis de fatiga en piezas mecanicas usando el método de los elementos finitos (Tesis de pregrado), Piura, 2009.
- [5] J. L. Cáceres Díaz, Determinación mediante la realización análisis de falla de las causas más comunes de falla en ejes de equipos industriales. (Tesis de pregrado), Lima, 2017.
- [6] L. Atarama Valdiviezo, Sistematización de diseño de molinos de martillos fijos para grano, Piura, 2018.
- [7] Midagri, Plan nacional de cultivos (Informe Tecnico), Perú: El Perú Primero, 2018.
- [8] J. D. Delgado Delgado, Rediseño electromecánico de un molino de martillos utilizando doble eje y sistema de control automático para aumentar la eficiencia en la trituración de maíz de la empresa Molino's San Antonio de Padua S.A.C, Chiclayo, 2019.
- [9] E. Marco Esteban, Metodología para el análisis a fatiga mediante el código Pro Engineer: aplicación a un eje ferroviario (Tesis de pregrado), Madrid, 2010.
- [10] H. Mera Panadero, Metodología para el análisis de esfuerzos y a fatiga de ejes y obtención del factor de intensidad de tensiones mediante el método XFEM en Abaqus, Madrid, 2014.
- [11] R. A. Chamie Gandur, Análisis de las condiciones de falla por fatiga en un material con concentradores de esfuerzo, Bogota, 2004.
- [12] P. F. García Lazo, Análisis de fatiga en piezas mecanicas usando el método de los elementos finitos (Tesis de pregrado), Piura, 2009.
- [13] R. Budynas G. y J. Keith Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, México, 2008.

- [14] G. J. Gondar G. y R. J. Rodríguez G., Diseño y Construcción de máquina de ensayos de fatiga de muestras planas por flexión alternativa, Caracas, 2007.
- [15] L. D. Huacasi Añamuro, Predicción de la Vida Útil de Ejes de Máquina Sometidos a Fatiga por Simulación Computacional, Arequipa, 2017.
- [16] M. Escribano Ródenas, El análisis por elementos finitos: una metodología muy reciente en economía, XIV Jornadas de Asepuma y II Encuentro Internacional, Madrid, 2005.
- [17] E. V. Caro y J. V. Espinoza, Manual de MDSolids 4.1.0, Chile, 2014.
- [18] G. D. Limited, Product Overview Granta, 2018. [En línea]. Available: https://www.grantadesign.com/download/pdf/edupack2018/overview_spa.pdf. [Último acceso: 18 Octubre 2021].
- [19] (. División Pecuária Estacionaria, Tn-8 Dry Grain, Tn-8 Wet Grain, Brasil, 2021.
- [20] S. Cia General de aceros, Sae 1020 y Sae 1045, Bogota, 2015.
- [21] D. C. Bermeo Martínez, Diseño y construcción de un molino de martillos triturador de granos para granjas avícolas (Proyecto de Titulación), Ecuador, 2014.
- [22] . G. F. Casanova García y J. J. Coronado Marín, Investigación de la falla de un eje piñón conectado a una extrusora de doble tornillo, Colombia , 2009.
- [23] L. J. A. Aguiar Guzmán y H. A. Rodriguez Borja, Analisis de modos y efectos de falla para mejorar la disponibilidad operacional en la linea de produccion de gaseosas No 3 (Titulo de pregrado), Bogota, 2014.
- [24] A. J. Nieto Quijoma, Elementos de maquinas, Castilla-La Mancha, 2007.
- [25] I. R. Cuadrado Moncayo y J. L. Rueda Castillo , Diseño y contrucción de un molino de martillos (Tesis de pregrado), Quito, 2009.
- [26] N. Parida, S. Tarafder, S. Das, P. Kumar, G. Das, V. Ranganath and D. Bhattacharya, "Failure analysis of coal pulverizer mill shaft," India, 2002.

VIII ANEXOS

- **Imágenes del desmontaje y pesaje del molino triturador de martillos.**



Figura 68: Desmontado del eje principal.



Figura 69: Reconocimiento del eje principal.



Figura 70: Pesaje del eje principal.



Figura 71: Medidas del eje principal.



Figura 72: Reconocimiento de la zona de trituración del molino de martillo.



Figura 73: Pesaje de la zona de trituración.

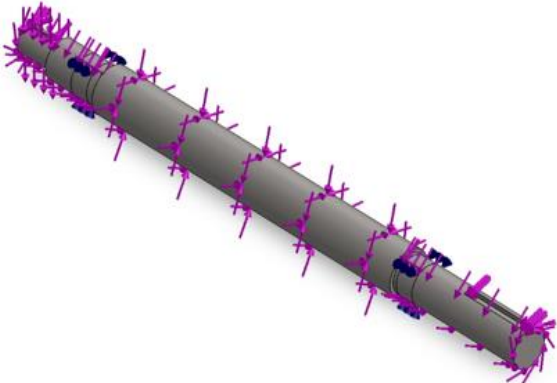


Figura 74: Obteniendo el peso de la polea.

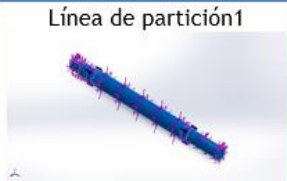


Figura 75: Medición del diámetro de la polea

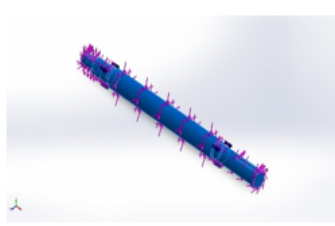
- SolidWorks Simulation



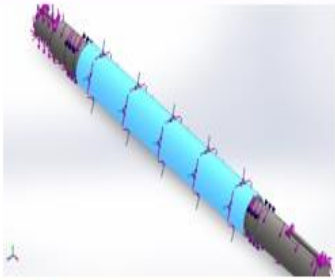
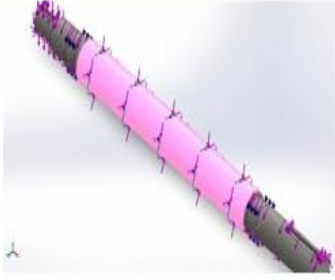
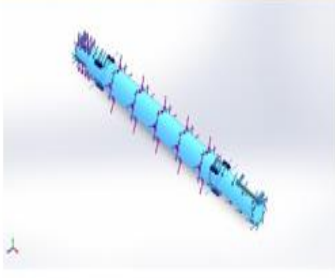
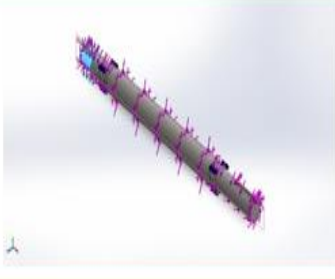
Nombre del modelo: EJE PRINCIPAL TERMINADO
Configuración actual: Predeterminado

Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Línea de partición1 	Sólido	Masa:7.82069 kg Volumen:0.00098996 m ³ Densidad:7,900 kg/m ³ Peso:76.6427 N	D:\Tesis\Solidworks\EJE PRINCIPAL TERMINADO.SLDPRT Nov 8 18:26:24 2021

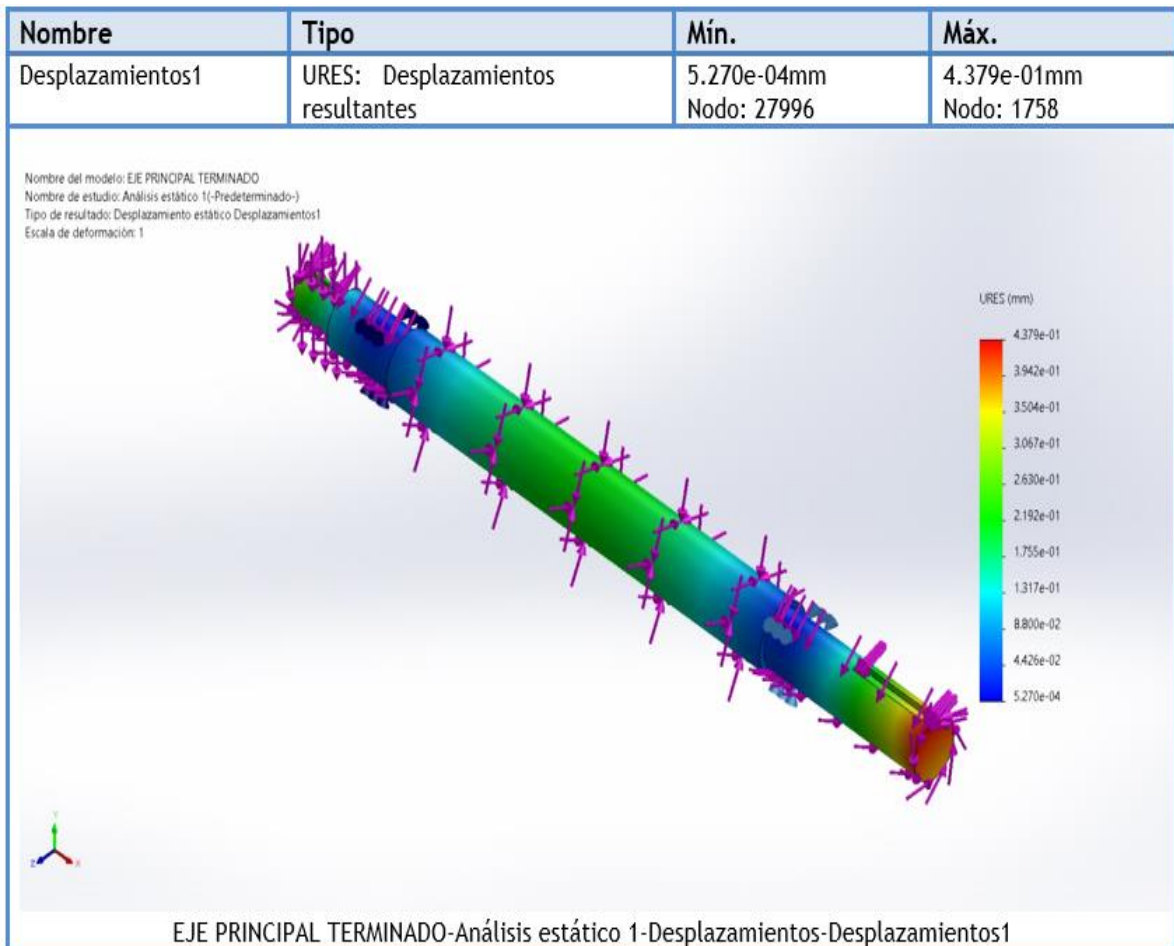
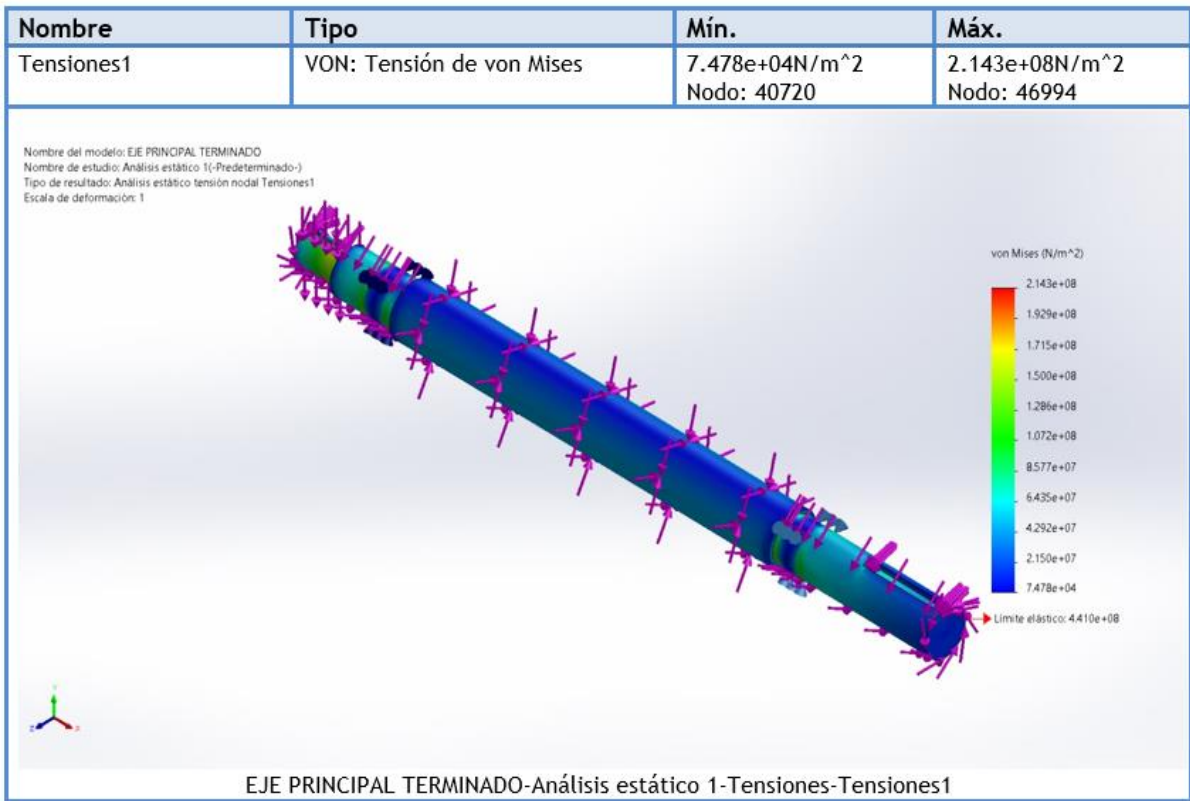
Propiedades de material

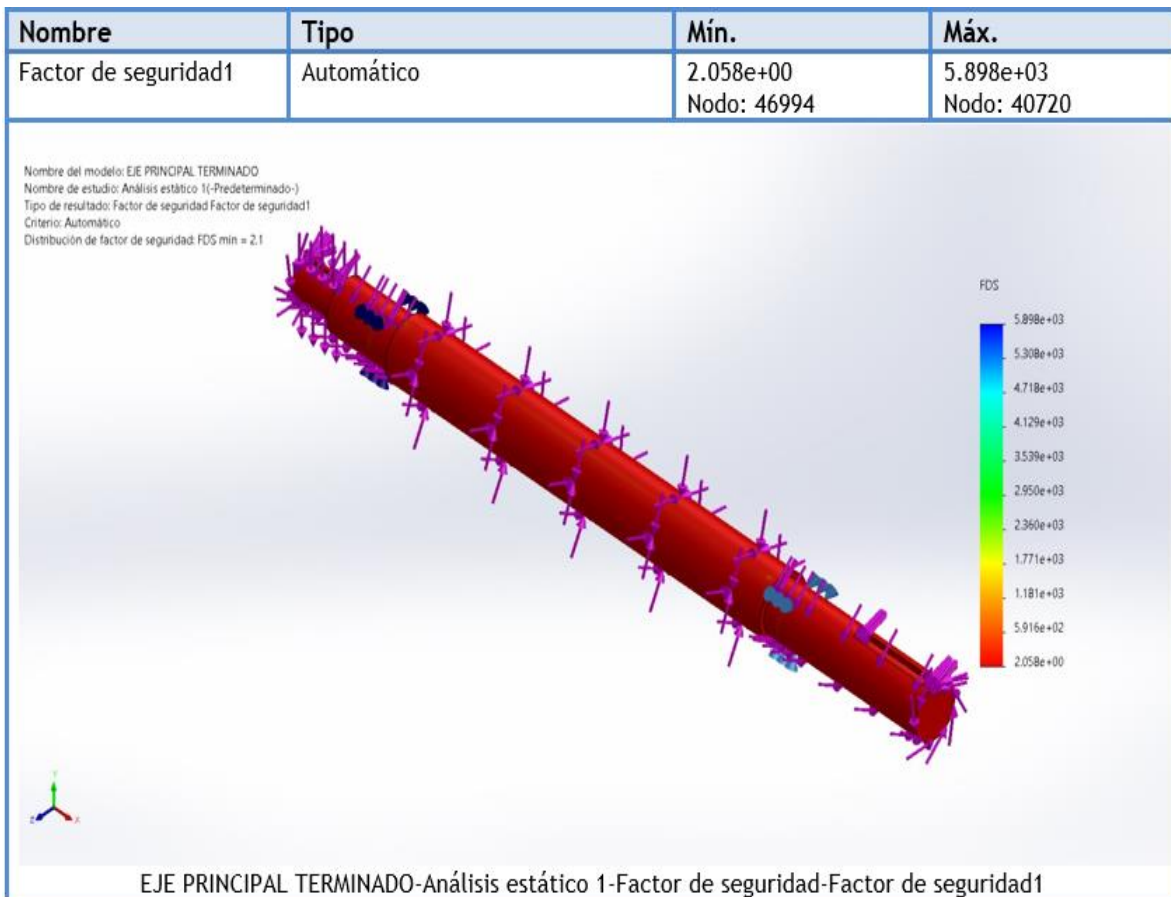
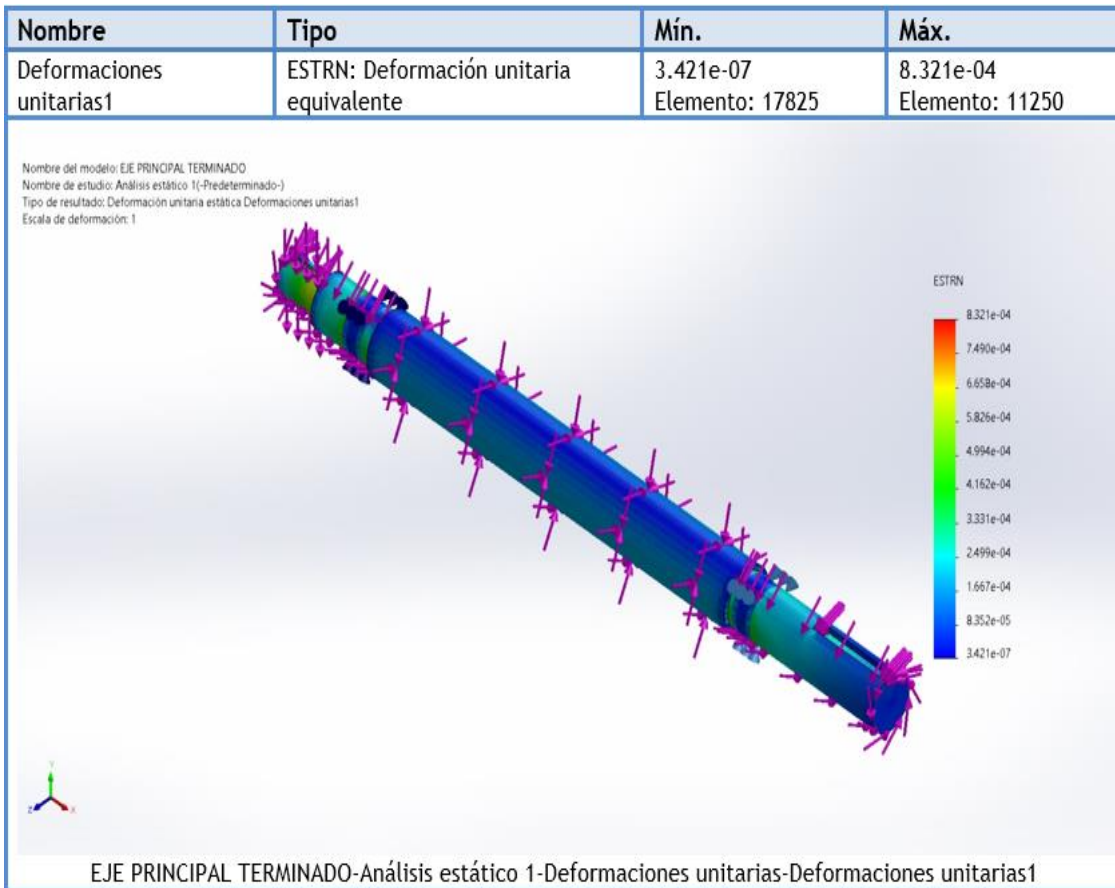
Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	Nombre: AISI 1020 - CEMENTADO Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx. Límite elástico: 4.41e+08 N/m ² Límite de tracción: 7.6e+08 N/m ² Módulo elástico: 2e+11 N/m ² Coefficiente de Poisson: 0.29 Densidad: 7,900 kg/m ³ Módulo cortante: 7.7e+10 N/m ² Coefficiente de dilatación térmica: 1.5e-05 /Kelvin	Sólido 1(Línea de partición1) (EJE PRINCIPAL TERMINADO)
Datos de curva: N/A		

Cargas y sujeciones

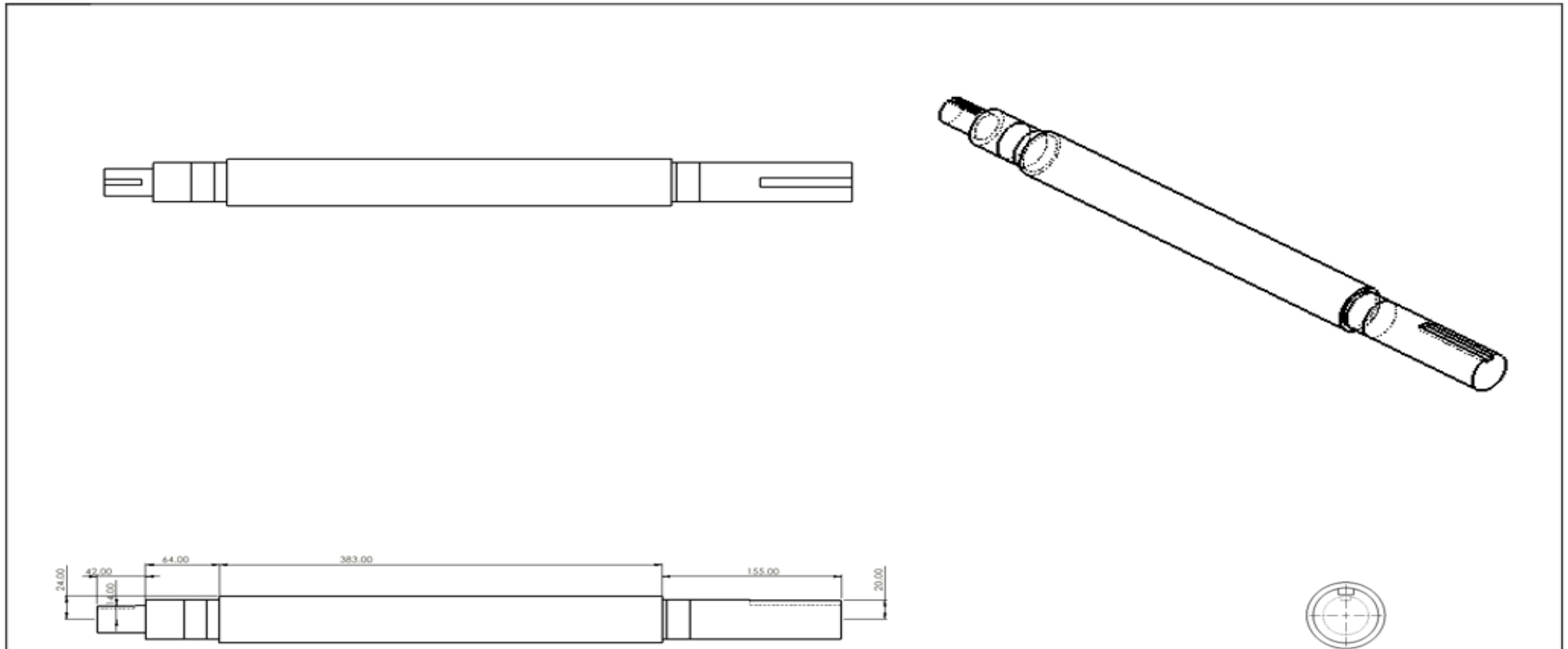
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		<p>Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 1,112.37 N</p>
Torsión-1		<p>Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar momento torsor Valor: 3.135 N.m</p>
Torsión-2		<p>Entidades: 12 cara(s) Tipo: Aplicar momento torsor Valor: -103.98 N.m</p>
Fuerza-2		<p>Entidades: 1 cara(s), 1 plano(s) Referencia: Alzado Tipo: Aplicar fuerza Valores: ---; -49.05; --- N</p>

Resultados del estudio





- Plano del eje



USAT

ESCUELA:
MECANICA ELECTRICADIBUJADO POR:
L.E. FERNÁNDEZ M.ESCALA:
1 : 50DIB. N°
01