

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA MECÁNICA**

**Proyecto técnico previo a la obtención del título de  
INGENIEROS MECÁNICOS**

**TEMA:  
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MOLINO ELÉCTRICO TRITURADOR  
PARA LA REUTILIZACIÓN DE RESINA POLIÉSTER EN ESCULTURAS  
RELIGIOSAS CON CAPACIDAD DE 25 KG/H.**

**AUTORES:  
CRISTIAN OSWALDO CHURO QUIMBIJURCO  
SANTIAGO XAVIER GUAMUSHIG CATOTA**

**TUTOR:  
PABLO MESÍAS ALMEIDA MOLINA**

**Quito, febrero del 2020**

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros Cristian Oswaldo Churo Quimbijurco, con documento de identificación N° 172571576-5 y Santiago Xavier Guamushig Catota, con documento de identificación N° 172360404-5, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MOLINO ELÉCTRICO TRITURADOR PARA LA REUTILIZACIÓN DE RESINA POLIÉSTER EN ESCULTURAS RELIGIOSAS CON CAPACIDAD DE 25 KG /H.”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingenieros Mecánicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



\_\_\_\_\_  
Cristian Oswaldo Churo Quimbijurco  
C.I: 172571576-5



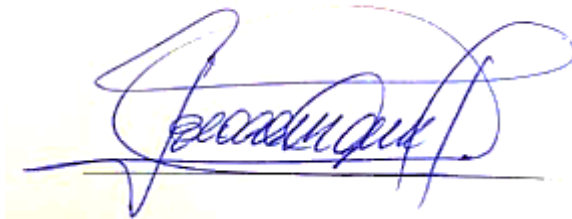
\_\_\_\_\_  
Santiago Xavier Guamushig Catota  
C.I: 172360404-5

Quito, febrero del 2020

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MOLINO ELÉCTRICO TRITURADOR PARA LA REUTILIZACIÓN DE RESINA POLIÉSTER EN ESCULTURAS RELIGIOSAS CON CAPACIDAD DE 25 KG/H.”, realizado por Cristian Oswaldo Churo Quimbijurco y Santiago Xavier Guamushig Catota, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, febrero del 2020.



Pablo Almeida Mesías Molina

C.I:1704359510

## **DEDICATORIA**

Este Trabajo de Titulación va dedicado a Dios y a mis padres por haberme apoyado durante toda la carrea, alentándome cada momento para poder cumplir una meta más en mi vida y así ser un profesional, cumpliendo con su sueño de a ver a su hijo ser una persona de bien para la sociedad.

*Cristian*

El presente Trabajo de Titulación va dedicado a mi familia por ser un soporte fundamental en toda mi vida tanto personal como académica, agradezco todo el apoyo incondicional que me ha permitido ser una mejor persona cada día y con este logro ser un excelente profesional.

*Santiago*

## **AGRADECIMIENTO**

Gracias a todos aquellos que con su apoyo y confianza nos han permitido alcanzar la meta de culminar la carrera de ingeniería mecánica, aunque se hayan presentado dificultades durante el trayecto hemos sabido perseverar, con paciencia y esfuerzo, sobre todo dedicamos este logro a nuestras familias por el apoyo incondicional recibido a cada momento de nuestras vidas.

A la Universidad Politécnica Salesiana le brindamos nuestro más sincero agradecimiento, por habernos brindado formación profesional y humana, en base a conocimientos teóricos, prácticos sin dejar de lado los valores que fueron impartidos hacia nosotros, mismos que fueron la base en la ejecución de este proyecto.

Al ingeniero Pablo Almeida M.Sc, tutor del proyecto técnico, queremos expresarle nuestro más sincero agradecimiento por haber dos brindado importantes aportes, por sus enseñanzas, por la motivación y principalmente, por el respaldo generado en el desarrollo y ejecución del Proyecto.

*Cristian y Santiago*

## ÍNDICE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR.....	ii
DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
ÍNDICE .....	v
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN .....	xiii
CAPÍTULO I.....	16
MOLINOS TRITURADORES .....	16
1.1. Fundamentación teórica .....	16
1.2. Materia prima para el relleno de esculturas .....	16
1.3. Resinas .....	17
1.3.1. Resinas de Poliéster.....	17
1.4. Molinos .....	19
1.4.1. Molino de rodillos .....	20
1.4.2. Molino de martillos .....	22
1.5. Comparación entre molinos de martillos y rodillos .....	25
1.6. Proceso de reciclaje de resina poliéster para el relleno de figuras religiosas y decorativas.....	27
CAPÍTULO II .....	29
ANÁLISIS Y DISEÑO DEL MOLINO DE MARTILLOS .....	29
1.1. Análisis de producción de resina triturada.....	29
1.1. Parámetros de diseño para martillos trituradores .....	31
1.1.1. Energía de ruptura para partículas de resina.....	31
1.1.2. Energía Potencial.....	32
1.1.3. Velocidad del martillo .....	32

1.1.4.	Energía cinética .....	33
1.1.5.	Velocidad al extremo de martillo .....	33
1.1.6.	Velocidad con carga .....	34
1.1.7.	Análisis de parámetros para el dimensionamiento de martillos .....	37
1.1.8.	Falla por cizalladura y factor de seguridad ( $\eta$ ).....	39
1.1.9.	Falla por tracción y factor de seguridad .....	42
1.2.	Diseño disco portamartillos .....	44
1.3.	Separadores de martillos (K).....	45
1.4.	Cálculo del eje secundario .....	46
1.4.1.	Diseño estático del eje secundario.....	47
1.5.	Dimensionamiento y análisis de cargas para el eje motriz .....	51
1.5.1.	Análisis en el eje principal .....	52
1.6.	Potencia del motor.....	61
1.7.	Análisis de coeficiente de fricción en la tolva .....	63
1.8.	Análisis del bastidor.....	64
1.8.1.	Cálculo de viga y columna del bastidor .....	68
1.8.2.	Esfuerzo de la soldadura.....	75
1.9.	Análisis de pernos de la cámara de molienda y bastidor .....	77
CAPÍTULO III .....		79
COSTOS .....		79
2.1.	Análisis costo .....	79
2.2.	Costo directo .....	80
2.2.1.	Análisis tiempo de uso de máquinas .....	81
2.2.2.	Costo de mecanizado.....	82
2.3.	Costo indirecto .....	83
2.4.	Costo total .....	83
2.5.	Retorno de inversión .....	83

3. Resultados de las pruebas de molienda.....	87
3.1. Análisis de muestras.....	87
CONCLUSIONES .....	89
RECOMENDACIONES .....	91
BIBLIOGRAFÍA .....	93
ANEXOS	



## Índice de Figuras

Figura 1. Tipos de molinos. ....	19
Figura 2. Molino de rodillos .....	21
Figura 3. Molino de rodillos .....	21
Figura 4. Molino de martillos.....	23
Figura 5. Molino de martillos.....	23
Figura 6. Partículas de resina reciclada.....	25
Figura 7. Pedazo de resina .....	30
Figura 8. BMC-B1 Probador de resistencia al impacto de caída libre.....	31
Figura 9. Trozos de resina con granulometría requerida.....	32
Figura 10. Impacto de materia prima con los martillos .....	37
Figura 11. Dimensiones del martillo.....	39
Figura 12. Esquema Martillo y plato porta martillos .....	40
Figura 13. Esquema de las áreas de desgarre (Ad) .....	40
Figura 14. Tensión de Von Mises en el martillo.....	42
Figura 15. Distancia de desplazamiento del martillo en milímetros.....	42
Figura 16. Factor de seguridad.....	44
Figura 17. Disco porta martillos .....	44
Figura 18. Separador de martillo.....	46
Figura 19. Esquema de conjunto eje secundario, martillos, separadores y discos.....	46
Figura 20. Diagrama de fuerzas y distancias en el eje secundario.....	47
Figura 21. Diagrama de fuerzas .....	48
Figura 22. Diagrama de momentos .....	49
Figura 23. Esfuerzo flector eje secundario.....	50
Figura 24. Distancia de desplazamiento del eje en milímetros.....	50
Figura 25. Factor seguridad.....	51
Figura 26. Esquema eje principal.....	51
Figura 27. Diagrama de fuerzas y distancias en el eje principal .....	52
Figura 28. Diagrama de fuerzas .....	53
Figura 29. Diagrama de momentos .....	53
Figura 30. Tensión Von Mises .....	60
Figura 31. Desplazamiento .....	61
Figura 32. Factor seguridad.....	61
Figura 33. Coeficientes de fricción de algunos polímeros.....	64

Figura 34. Estructura del Bastidor .....	65
Figura 35. Valores teóricos para factor K en columnas .....	66
Figura 36. Valores teóricos para factor K en columnas .....	67
Figura 37. Diagramas y fórmulas de vigas AISC-caso 13 .....	69
Figura 38. Diagramas y fórmulas de vigas AISC-caso 7 .....	71
Figura 39. Propiedades mínimas del metal de aporte de electrodos .....	73
Figura 40. Soldadura en ángulo .....	73
Figura 41. Área de garganta y altura de catetos de soldadura.....	74
Figura 42. Valores límites de garganta de una soldadura en ángulo.....	74
Figura 43. Tensión de Von mises.....	76
Figura 44. Factor seguridad.....	76
Figura 45. Molino de martillos.....	79

## Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación de molinos por su dimensión granulométrica final.....	20
Tabla 2. Parámetros técnicos del molino de rodillos .....	21
Tabla 3. Parámetros técnicos del molino de martillos .....	24
Tabla 4. Criterios para valoración de parámetros de molinos.....	25
Tabla 5. Valoración de parámetros para la selección de molino.....	27
Tabla 6. Coeficientes de fluctuación.....	34
Tabla 7. Peso de los elementos constituyentes de la capara de trituración .....	52
Tabla 8. Modelos y características técnicas de molinos de martillos .....	62
Tabla 9. Peso total de los elementos constituyentes en cámara de trituración.....	75
Tabla 10. Tipos de pernos .....	77
Tabla 11. Costos directos y costos indirectos .....	79
Tabla 12. Precio de materiales usados .....	80
Tabla 13. Precio de componentes estandarizados .....	81
Tabla 14. Total, de horas de máquina utilizas en la construcción de las partes del molino de martillos .....	81
Tabla 15. Costos total hora máquina.....	82
Tabla 16. Costos de elementos indirectos .....	83
Tabla 17. Costos totales .....	83
Tabla 18. Ingresos del taller por mese. ....	84
Tabla 19. Obtención del VAN por periodo y total.....	85
Tabla 20. Tasa de descuento y VAN.....	86
Tabla 21. Fondo neto efectivo (FNE) .....	87
Tabla 22. Valores de molienda con diferentes espesores de resina .....	88

## RESUMEN

Este proyecto propone la manufactura e implementación de un molino tipo martillos que reutiliza resina poliéster para el relleno en esculturas y productos decorativos para un taller artesanal, cubriendo una demanda de al menos 25kg/h de material triturado.

Considerando las características físicoquímicas del componente a fragmentar, este presenta una densidad de  $1.2 \text{ g/cm}^3$  y una dureza de 30 a 55 Barcol (dureza en materiales plásticos) en piezas de resina curada (estado sólido), además que su resistencia a la flexión puede alcanzar hasta los 80 MPa, es por ello que a través de la obtención de la energía de ruptura necesaria para trozos de resina de hasta 50mm x 50mm x 10mm se establecieron 16 martillos distribuidos equitativamente en la cámara de molienda, los mismos que alcanzan una fuerza de impacto aproximado de 895 N cada uno; esta máquina utiliza un motor con una potencia de 2HP y una velocidad de 1500rpm dando un radio de giro efectivo de 0.16m el cual sirvió para definir las dimensiones de los componentes que constituyen el molino.

En las pruebas de molienda se obtuvo una dimensión granulométrica de 3 mm aproximadamente cumpliendo con los requerimientos solicitados por el taller artesanal. Estas pruebas de molienda se realizaron con espesores desde 2 mm hasta 10mm con un mismo peso de 2.5kg de trozos de resina, dando un resultado aproximado para el espesor mínimo 1 minuto y con el espesor más ancho 5 minutos para culminar el proceso de trituración.

Palabras claves: granulometría, martillos, molino, resina, reutilización.

## **ABSTRACT**

This project proposes the manufacture and implementation of a hammer mill that reuses polyester resin for filling in sculptures and decorative products for a craft workshop, covering a demand of at least 25 kg / h of crushed material.

Considering the physicochemical characteristics of the component to be fragmented, it has a density of 1.2 g / cm<sup>3</sup> and a hardness of 30 to 55 Barcol (hardness in plastic materials) in cured resin parts (solid state), in addition to its resistance to bending it can reach up to 80 MPa, that is why by obtaining the necessary breaking energy for resin chunks up to 50 mm x 50 mm x 10 mm 16 hammers were distributed evenly in the grinding chamber, the same ones that reach an impact force of approximately 895 N each; This machine uses a motor with a power of 2HP and a speed of 1500rpm giving an effective turning radius of 0.16m which served to define the dimensions of the components that measure the mill.

In grinding tests, a granulometric dimension of approximately 3 mm is obtained, complying with the requirements requested by the craft workshop. These grinding tests were carried out with thicknesses from 2 mm to 10 mm with the same weight of 2.5 kg of resin pieces, giving a specific result for the minimum thickness 1 minute and with the widest thickness 5 minutes to complete the crushing process.

Keywords: granulometry, hammers, mill, resin, reuse.

## INTRODUCCIÓN

El sector artesanal ecuatoriano ha desarrollado un incremento en la elaboración de diversos productos durante los últimos diez años como resultado de los continuos pedidos que se realizan para las distintas exportaciones que así lo requieran de sus distintos trabajos. El taller artesanal “Jesucristo” fabrica y distribuye todo tipo de esculturas religiosas y decorativas relacionados con el arte, para el sector religioso y otros, para distintas partes del Ecuador, el cual debido a su creciente porcentaje de desperdicio de material resina poliéster. Debido a este antecedente los talleres artesanales han notado la necesidad de implementar nuevas técnicas de manufactura para lograr competir ante empresas más grandes y así conservarse en el comercio interno; el taller artesanal “Jesucristo” se ve en la obligación de realizar la adquisición una máquina trituradora la cual ayudará al reciclaje de la resina lo cual ayudará en gran parte a la reutilización de dicho material para la elaboración de nuevas esculturas y figuras decorativas que se realizan, actualmente, en este taller y de esta manera se contribuirá en la no contaminación del medio ambiente ya que actualmente el material desperdiciado acaba como desechos industriales y en contenedores de basura y por otro lado también se eliminará en gran parte la utilización del material sílice que sirve para dar carga (peso) a las esculturas.

Este proyecto tiene como objetivo implementar en el taller artesanal “Jesucristo” un molino triturador de resina el cual será versátil y de fácil utilización con el cual se pretende reutilizar el material desperdiciado para la elaboración de nuevas figuras religiosas y decorativas siendo así la reducción en tiempos de producción y optimizar la cantidad de imágenes religiosas que normalmente fabrica el taller

Según los requerimientos del taller el tipo de máquina trituradora será seleccionada de acuerdo al producto final requerido tomando en cuenta los diversos modelos que se comercializan, normalmente, a nivel regional. Para esta selección se considerará la cantidad de producto triturado final, periodo de funcionamiento, así como la inversión en este nuevo implemento.

Actualmente, para elaborar diferentes productos decorativos o artesanales se utilizan materiales cerámicos conjuntamente con elementos plásticos los cuales mejoran sus características físicas e involucran un ahorro en la fabricación de estatuas o diferentes artículos relacionados con el arte. Debido al avance tecnológico se ha disminuido el uso de materiales convencionales como arcilla, yeso, cemento o estuco para involucrar en mayor cantidad materiales sintéticos y derivados del petróleo en la fabricación de imágenes religiosas, recuerdos o artesanías en general, sobre todo por su gran resistencia, ligereza tales como fibra de vidrio, poliuretano, silicones, entre otros.

Debido al uso de resinas en la industria artesanal, se presenta una cantidad considerable de residuos plásticos, siendo el caso de análisis la resina poliéster, la cual es el resultado de la combinación del estireno y un fluido catalizador, este proceso es conocido como curado; posteriormente se solidifica conformando una estructura cristalina. El material sobrante solidificado o piezas que no satisfacen el estándar óptimo muchas veces son desechadas en la basura, aumentando la contaminación ambiental, sobre todo por el largo periodo de degradación que tiene el material.

Como una respuesta ante esta situación donde se dan niveles considerables de desperdicios se plantea la reutilización de la resina poliéster sólida pasando por el proceso de triturado gracias a un molino, permitiendo obtener partículas de resina que pueden ser empleadas para el relleno de otras esculturas.

Los talleres artesanales ecuatorianos realizan distintos procesos de elaboración de esculturas entre otras artesanías; actualmente la carencia de inversión en nuevos procesos de elaboración o implementos modernos como maquinaria especializada han estancado y mantenido este sistema de acciones caducas y antiguas, incitando a los propietarios de talleres optar por tecnologías actuales por ende la adquisición de nuevos equipos vanguardistas, en el caso particular de la reutilización de resina poliéster siendo esta la materia prima empleada. La ejecución de esta idea está respaldada a partir de una visión ingenieril, requiriendo pautas importantes y necesarias para la fabricación de un molino triturador, con ello obtener un óptimo funcionamiento y mejor productividad a nivel industrial, ya que para modernizar significativamente la fabricación de artesanías a base de resina e incrementar la capacidad de la industria artesanal, se busca ampliar una actualización industrial, con

un enfoque de modernización de equipos y técnicas de renovadas para la optimización de procesos.

La máquina molino triturador tiene la ventaja de aportar a la producción en el trabajo de esculturas, dando un alto grado de relevancia a esta propuesta de máquina, reafirmando y ejerciendo las técnicas y destrezas obtenidas durante el proceso de formación académica en la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana, a su vez, el taller artesanal “Jesucristo” se apoyará con la implementación de la máquina trituradora, mejorando el rellenado de esculturas religiosas y figuras decorativas reduciendo la utilización de sílice que normalmente se emplea para dar peso a dichas artesanías.

El objetivo general consiste en diseñar y construir un molino eléctrico triturador para la reutilización de resina poliéster en esculturas religiosas con capacidad de 25 kg/h.

Los objetivos específicos son:

- Estudiar la producción actual de imágenes y figuras de resina que se realizan en el taller artesanal “Jesucristo”.
- Seleccionar un equipo de trituración viable para el proyecto a través de herramientas para toma de decisiones.
- Diseñar y construir los componentes de la máquina trituradora de resina para reciclar el material desperdiciado.
- Verificar el funcionamiento de la máquina trituradora mediante pruebas de molido.
- Determinar indicadores financieros que validen la rentabilidad del proyecto.



# **CAPÍTULO I**

## **MOLINOS TRITURADORES**

### **1.1. Fundamentación teórica**

En el presente capítulo se consideran para el desarrollo del tema propuesto el aspecto teórico y los elementos necesarios que consoliden la investigación tomando en cuenta soluciones o los diferentes modelos de análisis existentes. Se presentan las principales definiciones referentes a la resina de poliéster y su empleo en el relleno de esculturas y artesanías. Se describen los diferentes tipos de molinos existentes y se fundamenta la utilización para el presente proyecto de un molino de martillos.

Según Bai [1] se estima que, de China en 2011, 547.3 – 751.5 mil toneladas de residuos plásticos ingresaron a los mares en China, con un porcentaje de incremento del 4,55% durante doce meses hasta 2017.

En el caso de México la producción de plástico en 2005 obtuvo los 359.5 mil toneladas, indicando un crecimiento del 27 % en comparación al 2004. Adicionalmente, las remesas se conservaron desde 1995 a 2005 con un porcentaje de aumento promedio al año del 19 % reforzando el comercio de piedra caliza. Este contexto, induce que la cuantía de desechos minerales y plásticos incrementen de forma continua y conveniente a la manufactura, principalmente en la fabricación de baldosas y superficies de suelos domiciliarios [2]. La producción de resinas termoplásticas, en sentido de cumplimiento a las normativas, prohíben a las mencionadas industrias fabricantes no considerar un procedimiento de cuidado al medio ambiente con características efectivas [3].

### **1.2. Materia prima para el relleno de esculturas**

Existe una amplia gama de elementos para elaboración de esculturas que se utilizan actualmente a nivel industrial, talleres artesanales o centros especializados de investigación; es comprensible que día a día la búsqueda de materiales óptimos provoque la creación unos nuevos elementos para esta finalidad en específico. Pero por lo general se pueden considerar en cuatro tipos importantes: el yeso mineral, ceras naturales, sintéticos de resina acrílica y epóxica inherente, masilla de tipo pulverizado con catalizador y tipo de uso instantáneo.

### **1.3. Resinas**

Polímeros termoestables que se endurecen en consecuencia de una reacción que ocurre al mezclarlas con un agente catalizador; los polímeros se caracterizan por ser macromoléculas constituidas por la unión de una o varias moléculas de misma naturaleza siendo el resultado de enlaces covalentes, es decir no cambian al ser expuestas al calor, irradiación o compuestos químicos [4].

Los términos macromolécula y polímero suelen ser expresadas como equivalentes, aunque estas no lo son, debido a que las macromoléculas no están conformadas por unidades de repetición y significa molécula muy grande, en el caso de los polímeros dependiendo su origen pueden ser naturales o sintéticos. Los sintéticos tienen un mayor interés desde la perspectiva comercial y comúnmente contienen entre uno y tres tipos diferentes de unidades que se repiten, mientras que los naturales conocidos también como o biopolímeros se presentan es estructuras como la celulosa, proteínas o el ADN siendo estas estructuras más complejas [5].

Las resinas se dividen en 2 grandes grupos, las naturales y las sintéticas. En este caso de estudio se prioriza el análisis de las resinas de poliéster la cual forma parte de los sintéticos.

#### **1.3.1. Resinas de Poliéster**

Las resinas de poliéster a temperatura ambiente se presentan en estado líquido [6]; en las resinas preaceleradas, por la pre añadidura de un agente catalizador se puede alcanzar el estado sólido; en las resinas no preaceleradas es necesario el uso de un acelerador y un catalizador para obtener un estado sólido en la resina [7]. En las resinas de poliéster se pueden encontrar comúnmente los siguientes tipos: resinas ortoftálticas y resinas isoftálticas. Preaceleradas y no preaceleradas (vírgenes).

##### **- Resinas Ortoftálticas**

Este tipo de resina es de uso general en ambientes no agresivos, su formulación es más simple, por ello más económicas a comparación de otras clases de resinas. A diferencia de las isoftálticas, las ortoftálticas eran comercializadas hace muchos años atrás hablando históricamente. Para la reducción de problemas en la cristalización se utiliza ácido ortoftálico en la obtención de resinas transparentes [8].

Las resinas ortoftálticas tienen la propiedad de ser disueltas en estireno además de poseer otras diversas características, como:

- a. Elevado porcentaje de no volátiles y baja viscosidad.
- b. Excelentes resistencias mecánicas.
- c. Elevada resistencia hidrolítica.
- d. Adecuada impregnación de la fibra de vidrio.
- e. Buena admisión de todo tipo de cargas.
- f. Rápido desmolde.
- g. Translúcida.
- h. Apropiado tiempo de gel.

- **Resinas Isoftálticas**

Este tipo de resinas muestran un óptimo comportamiento mecánico, al mismo tiempo de presentar resistencia al agua y agentes químicos, también llamadas glicol estándar, su alta reactividad se considera como su primordial característica, presenta resistencia a diferentes combinaciones químicas y soporta un calor moderado. Comúnmente esta resina se presenta de dos tipos: los pres acelerados y las tixotrópicas [8]. Entre sus características fundamentales se tiene:

- a. Óptima resistencia química.
- b. Escasa absorción de agua.
- c. Elevada temperatura de deformación.

Debido a dichas propiedades se los utiliza especialmente para la manufactura de herramientas y moldes, eso se debe gracias a que poseen una alta temperatura de deformación lo que otorga que no se altere la pieza al curar en ella.

- **Isoftálticas con neopentilglicol**

Las resinas isoftálticas con neopentilglicol (ISO-N PG) presentan alto índice de reactividad, resistencia química excelente, resistente al manchado, abrasión y ralladuras. La alta utilidad de este tipo de resinas permite la fabricación de depósitos y ductos resistentes a los ataques químicos, que se encuentran expuestos al calor. Además, esta resina es utilizada como puente de adherencia entre el PVC y el FRP.

- **Resina de Viniester**

Cuando se presenten demandas de alta resistencia a solventes y elevadas temperaturas se utiliza este tipo de resinas, específicamente para la fabricación de depósitos, estanques y cañerías que deban estar en contacto de sustancias con altos niveles de corrosión [8].

- **Resina epóxica**

Este tipo de resina antes de su aplicación se combinan con un elemento endurecedor, produciéndose una reacción química, dando como resultado final un material inerte, el cual no presentan riesgos para la salud y al mismo tiempo ofrece un elevado rendimiento.

Principalmente de resinas epoxi se emplean en el ámbito de la fabricación de adhesivos, recubrimientos, revestimientos para suelos, reparación de grietas y hormigón, inclusive se las utiliza ampliamente en elementos eléctricos, electrónicos, equipos aeroespaciales, incluso en el ámbito de creación de elementos deportivos y en varias aplicaciones donde rendimiento requerido sea elevado [9].

**1.4. Molinos**

El proceso de reducción de tamaño de un material o elemento solido fragmentándolo por medios mecánicos hasta obtener un tamaño requerido se conoce como proceso de molienda. Para efectuar distintos procesos de molienda o trituración, existen una clasificación de los tipos de molinos, los cuales se utilizarán dependiendo el producto y el tamaño que se desea obtener [10].

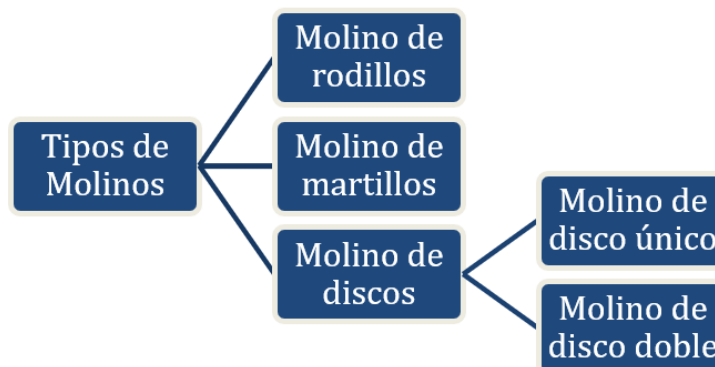


Figura 1. Tipos de molinos. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

De acuerdo al tamaño del producto final se puede elegir el tipo de molino que cumpla con el rango de reducción de tamaño deseado, presentado en la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de molinos por su dimensión granulométrica final [11]

Dimensión granulométrica	Nombre comercial	Molino
Robusto y medio	Molino Crushers	rodillos
		martillos
Medio y fino	Molino Mills o Grinders	discos
		rodillos
		martillos
Fino y pulverizados	Molino Ultrafine grinders	bolas

Para este proyecto, se requiere que el tipo de molienda en lo que refiere al tamaño de partículas de resina poliéster a obtener se encuentren en el rango de intermedio y fino, por ello se considerará el análisis entre el molino de martillos y el molino de rodillos para elegir cuál cumple con las exigencias de molienda requerida.

#### 1.4.1. Molino de rodillos

Esta máquina se utiliza para triturar trigo, inclusive para moler minerales. Este tipo de molino utiliza unos rodillos o bolas que produce que los cuerpos o materiales se presionen por su propio peso, mediante resortes, fuerza centrífuga, sistemas hidráulicos entre otros.

Estos tipos de molinos se emplean para triturar en circuito cerrado. Entre los materiales de tipo mineral que puede moler dicha máquina se tienen la caliza, cal calcinada, talco, fosfatos, carbón, grafito, entre otros. Desde hace años atrás se lo utiliza para moler materiales de gran dureza y con porosidades, incluso materiales abrasivos, como las escorias o el clinker [12].

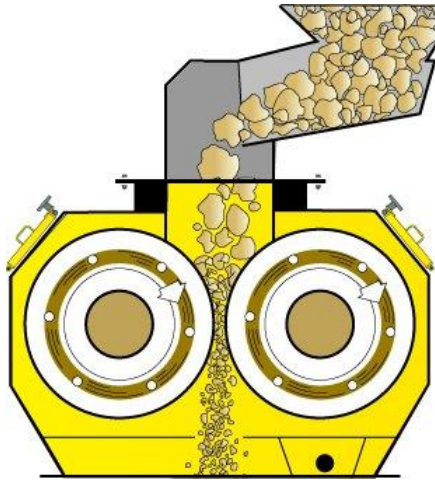


Figura 2. Molino de rodillos [13]

Las velocidades que presentan estas máquinas varían de acuerdo a la longitud y diámetro de sus rodillos, siendo las velocidades entre 20 a 300 rpm utilizadas normalmente en rodillos de diámetro grande [14].



Figura 3. Molino de rodillos [15]

Tabla 2. Parámetros técnicos del molino de rodillos [15]

Parámetros	Molino de Rodillos
Campo de aplicación	Agricultura, biología, geología, metalurgia, química, ingeniería, medicina.
Tipo de material a triturar	Blando, duro, frágil, seco o húmedo
Principio de molienda	Presión ejercida en la muestra

Granulometría inicial*	< 100 [mm]
Granulometría final*	< 0.5 [mm]
Capacidad de producción	80 -120 [Kg/h]
Potencia del motor	4 [KW]
Peso	220 [Kg]
Dimensiones	1050x700x1120 [mm]
Nivel de dificultad de construcción	Medio
Costo aproximado	4.125,00 \$
Nivel de dificultad de Mantenimiento	Medio

---

\* Según el elemento ingresado y la conformación de la máquina

#### **a. Ventajas**

- Trituración para materiales duros teniendo un gran rendimiento.
- Con la ayuda de resortes se puede tener una fuerza trituración constante.
- Facilidad en determinar la granulometría por medio de un sistema de regulación de medida.
- Al no tener excesivos elementos que comprenden su construcción tiene un nivel de dificultad medio.

#### **b. Desventajas**

- Los rodillos de este molino tienden a desgastarse con mayor facilidad que los otros mecanismos que lo comprenden.
- Consto elevado de mantenimiento cuando los rodillos sufren daños, teniendo que reemplazar los mismos por unos nuevos.
- Disminuye considerablemente su rendimiento al triturar elementos húmedos.

#### **1.4.2. Molino de martillos**

Esta máquina al principio se desarrolló considerando como punto de partida la trituración manual, el cual constituía un machacador que comprimía los granos en un

área plana de piedra. En la actualidad al mortero se lo ha reemplazado por un conjunto de mazos de acero, situados en posición horizontal sobre un árbol giratorio [16].

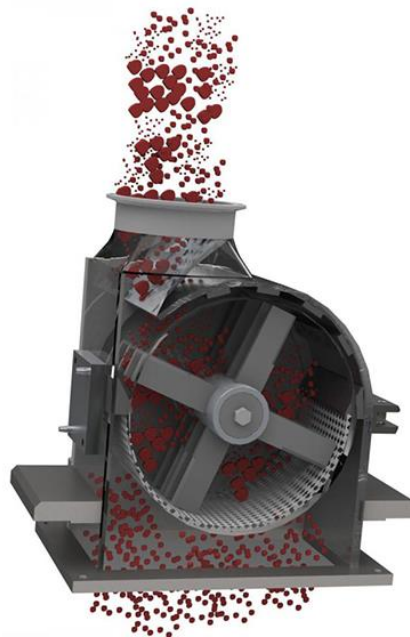


Figura 4. Molino de martillos [17]

La pulverización en este molino es a partir de corte por impacto. Al colocar el material en la tolva este cae en el depósito de trituración donde los martillos efectuarían el proceso de choque con las partículas obteniendo la trituración del material.

Apenas la muestra consigue una granulometría menor que la apertura en la criba, atraviesa dicho elemento limitador y desciende hasta un depósito receptor [18].



Figura 5. Molino de martillos [15]



Tabla 3. Parámetros técnicos del molino de martillos [18]

Parámetros	Molino de Martillos
Campo de aplicación	Agricultura, reciclaje, geología, metalurgia, química, ingeniería, medicina, vidrio / cerámica, plásticos
Tipo de material a triturar	Semiduro, frágil, seco
Principio de molienda	Impacto
Granulometría inicial*	< 50 [mm]
Granulometría final*	< 0.1 [mm]
Capacidad de producción	80 -200 [Kg/h]
Potencia del motor	1,5 [KW]
Peso	80 [Kg]
Dimensiones aproximadas	620x480x580 [mm]
Nivel de dificultad de construcción	Medio
Costo aproximado	1.256,00 \$
Nivel de dificultad de Mantenimiento	Bajo

\* Según el elemento ingresado y la conformación de la máquina

#### a. Ventajas

- Facilidad en elaboración (construcción con materiales de fácil adquisición)
- Eficiencia del molino.
- Fácil instalación y operación.
- Velocidad de rotación adecuada.
- El cambio de tamiz es rápido.
- Producción de partículas finas con tamaños semejantes.
- Limpieza y mantenimiento es sencillo y de costo bajo.

## b. Desventajas

- Problemas para moler elementos o materiales húmedos, generando el incremento de consumo de energía eléctrica, así como de potencia.

## 1.5. Comparación entre molinos de martillos y rodillos

La selección de una mejor alternativa para el proceso de molienda se efectúa un análisis comparativo de las características de los molinos anteriormente mencionados. Esta se basa en la valoración de un grupo de parámetros referentes a capacidad de molienda, potencia, sencillez de manufactura, comodidad en la manipulación, duración de la máquina, facilidad de mantenimiento, costo, entre otros; dichos parámetros influyen en la elección de la mejor alternativa que se necesita en este caso en particular cubriendo la demanda de 25 Kg/h de forma eficiente cumpliendo los objetivos planteados que requiere el taller artesanal.



Figura 6. Partículas de resina reciclada [19]

Tabla 4. Criterios para valoración de parámetros de molinos

Parámetro	Puntaje		
	1	2	3
Campo de aplicación	Agricultura, biología, geología	Agricultura, biología, geología, metalurgia, química, ingeniería, medicina.	Agricultura, reciclaje, geología, metalurgia, química, ingeniería, medicina, vidrio / cerámica, plásticos

<b>Tipo de material a triturar</b>	Blando	Frágil	Duro y semiduro
<b>Granulometría inicial* [mm]</b>	5<10	10< 50	50 < 100
<b>Granulometría final* [mm]</b>	< 1	< 0.5	< 0.1
<b>Capacidad de producción [kg/h]</b>	50 -100	100 -150	150 -200
<b>Potencia del motor [KW]</b>	1 a 2	2 a 3	3 a 4
<b>Peso [Kg]</b>	>500	De 100 a 500	De 50 a 100
<b>Espacio a ocupar aproximados</b>	De 5 m a > 10m	De 3m hasta > 5m	De 1 m hasta 3m
<b>Nivel de dificultad de construcción</b>	Alto	Medio	Bajo
<b>Costo aproximado</b>	De 5.000,00\$ hasta > 10.000,00 \$	De 2.000,00\$ hasta 5.000,00 \$	De 1.000,00\$ hasta 2.000,00 \$
<b>Nivel de dificultad de Mantenimiento</b>	Alto	Medio	Bajo

---

Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

Por cada parámetro, se debe utilizar los criterios anteriores e identificar los valores correspondientes. Luego se suman dichos valores, con el resultado obtenido se debe identificar el molino que tenga mayor puntuación para definirlo como idóneo para el trabajo requerido.

Tabla 5. Valoración de parámetros para la selección de molino

Parámetro	Puntaje	
	Molino de rodillos	Molino de martillos
<b>Campo de aplicación</b>	2	3
<b>Tipo de material a triturar</b>	3	3
<b>Granulometría inicial*</b>	3	2
<b>Granulometría final*</b>	2	3
<b>Capacidad de producción</b>	2	3
<b>Potencia del motor</b>	3	2
<b>Peso</b>	2	3
<b>Espacio a ocupar aproximados</b>	2	3
<b>Nivel de dificultad de construcción</b>	2	2
<b>Costo aproximado</b>	2	3
<b>Nivel de dificultad de Mantenimiento</b>	2	3
<b>Suma Total</b>	25	30

Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

La mejor opción según los resultados obtenidos es el molino de martillos ya que cumple los parámetros requeridos para el proceso de molienda en el taller artesanal “Jesucristo”.

### **1.6. Proceso de reciclaje de resina poliéster para el relleno de figuras religiosas y decorativas**

El nuevo proceso que se implementara en el taller artesanal “Jesucristo” propone la instalación de un molino de martillos el cual servirá para la reutilización de resina en el taller. Actualmente el taller no cuenta con ningún proceso de molido para la reutilización de la resina. Este proyecto de titulación tiene como finalidad el delineamiento y manufacturación de un molino de triturador con principio de martillos, por tal motivo su producción como funcionamiento se detalla subsiguientemente.

La fabricación inicia desde el instante en el que los desechos enteros de resina ya curada y que no pasaron los estándares de calidad son colocados en la tolva, De la tolva pasara por la cámara por medio de una abertura.

En el interior de la cámara los desechos de resina se parten al experimentar el impacto con los martillos, dando como resultado que las partículas de resina fraccionada adicionalmente choquen contra la superficie que conforma la cámara de molienda que servirá para seguir disminuyendo el tamaño granulométrico hasta atravesar por la criba.

Después de un tiempo de trituración la partícula partida caerá en un filtro de 3 mm de diámetro, siendo esta la medida requerida de la partícula de resina para poder reutilizar para el proceso en la que va a ser empleada posteriormente (el grano superior a este diámetro seguirá triturándose conforme vaya pasando a través de la criba).

Una vez los granos de resina se encuentran con las dimensiones requeridas estos serán almacenados en sacos (costales, cajas) para su posterior reutilización. Por esto, al ser los molinos de martillos más rápidos que los molinos de rodillos implica que estos logran optimizar el tiempo de molido y también se reducirán costos en el uso de materia prima dentro del taller artesanal, determinando la construcción de un molino de martillos ya que este es más competitivo para este tipo de trabajos.

Por otro lado, es importante señalar que el área necesaria que ocupará esta máquina será aproximadamente como máximo de 2 metros cuadrados lo que hace también que se optimice el espacio dentro del taller.

## CAPÍTULO II

### ANÁLISIS Y DISEÑO DEL MOLINO DE MARTILLOS

En este capítulo se procederá a realizar el análisis de los parámetros y cálculos de cada una de las partes principales que constituyen el molino de martillos:

- Martillos
- Disco porta martillo
- Separadores de martillos
- Eje secundario
- Eje principal
- Potencia del motor
- Análisis del coeficiente fricción de la tolva
- Análisis del bastidor
- Análisis de pernos de la cámara de molienda y bastidor

#### 1.1. Análisis de producción de resina triturada

Para el taller artesanal Jesucristo la capacidad de molienda establecida es de 25 kg por hora (kg/h). Para determinar la cantidad de gramos por minuto necesarias para cubrir la demanda de molienda señalada se realiza el respectivo análisis:

$$25 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1000gr}{1kg} \cdot \frac{1h}{60min} = 416.66 \frac{gr}{min}$$

Según las especificaciones de granulometría necesaria para la reutilización de esta resina, se sugiere la dimensión aproximada de cada trozo de resina al final del proceso de molienda debe ser de al menos 3 mm por 3 mm.

Es por ello que se determina por proceso experimental que un gramo equivale a 50 partículas de resina; dicho valor servirá para posteriores cálculos.

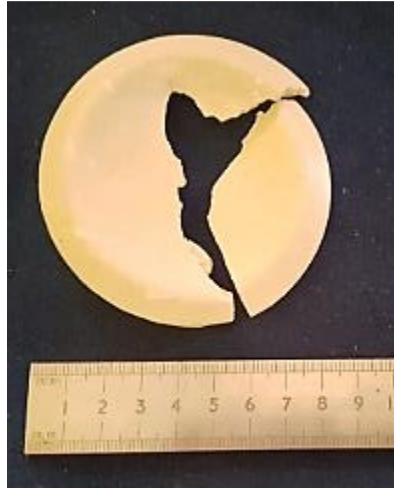


Figura 7. Pedazo de resina. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

Tomando en cuenta los 416.66 gramos por minuto, se puede definir la cantidad de partículas por minuto de resina:

$$\frac{50 \text{ partículas}}{1 \text{ gr}} \cdot \frac{416.66 \text{ gr}}{\text{min}} = 20833 \frac{\text{partículas}}{\text{min}}$$

Según las velocidades angulares utilizadas en molinos de martillos van desde 800 a 3200 rpm respectivamente [20], tomando en cuenta que estos valores tienen una variante dependiendo el material a triturarse o el tamaño de partícula. Por tal motivo se propone trabajar con una velocidad de 1500 rev/min estimando que el material a triturarse es resina poliéster.

El número de partículas por revolución servirá para establecer el número de martillos necesarios de la máquina.

$$\frac{20833 \frac{\text{partícula}}{\text{min}}}{1500 \frac{\text{rev}}{\text{min}}} = 13.88 \approx 14 \frac{\text{partículas}}{\text{rev}}$$

Se establece que el total máximo de partículas a fraccionar es 14 partículas/rev, por esta razón se considerará que cada martillo trituraría al menos 1 partícula por revolución, definiendo un mínimo necesario de 14 martillos los cuales estarán

dispuestos a 90° entre ellos, pero se optará por un total de 16 martillos para una alta disposición del mecanismo.

### **1.1. Parámetros de diseño para martillos trituradores**

La consideración inicial de diseño para los martillos es que sus dimensiones deben ser mayores a las partículas de resina trituradas al final del proceso, dado que la operación que realiza el martillo es frontal a la partícula de resina, es por ello que se realiza el análisis de los parámetros que involucran el diseño de los martillos.

#### **1.1.1. Energía de ruptura para partículas de resina**

Experimentalmente se deja descender libremente un peso de 0.5kg a una elevación de 0.5m encima un retazo resina con unas dimensiones aproximadas de 50mm x 50mm x 10mm, determinando la energía necesaria para fragmentar la resina.



Figura 8. BMC-B1 Probador de resistencia al impacto de caída libre [21]





Figura 9. Trozos de resina con granulometría requerida. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

### 1.1.2. Energía Potencial

Este fenómeno experimenta el martillo al momento de girar y al chocar con el pedazo de resina, el cual se utilizará en la nomenclatura como energía de ruptura ( $E_{ruptura}$ ) [22].

$$E_{ruptura} = m_{pesa} \cdot g \cdot h \quad (1)$$

Donde:

$m_{pesa}$  = masa a caer

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$

$h$  = altura de elevación de una pesa

Por tanto:

$$E_{ruptura} = (0.50kg) \cdot \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) \cdot (0.5m)$$

$$E_{ruptura} = 2.45Nm$$

$$E_{ruptura} = 2.45J$$

Se determina que para los trozos de resina la energía de ruptura necesaria es de 2.45J.

### 1.1.3. Velocidad del martillo

Los martillos experimentan diferentes velocidades cuando la cámara de trituración está vacía o cuando se encuentran con el material en el interior la cámara de molienda, la primera es la velocidad sin carga o al vacío ( $v_v$ ) y la otra se presenta al momento de generar el proceso de trituración cuando los retazos chocan las placas de acero

giratorias provocando la reducción en la velocidad hasta cierto punto, la cual se denomina velocidad con carga ( $v_c$ ) [23].

#### 1.1.4. Energía cinética

Es la energía en el momento del impacto del martillo con el trozo de resina [22], la cual está dada por la ecuación 2.

$$E_c = \frac{1}{2} m_{\text{trozo}} \cdot v_t^2 \quad (2)$$

Donde:

$m_{\text{trozo}}$  = masa del trozo de resina

$v_t$  = rapidez de los martillos

#### 1.1.5. Velocidad al extremo de martillo

Se la obtiene al igualar las ecuaciones de la energía cinética (ecuación 2) y de la potencial (ecuación 1) y se despeja la  $v_t$ .

$$v_t = \sqrt{\frac{m_{\text{pesa}} \cdot g \cdot h}{\frac{1}{2} \cdot m_{\text{trozo}}}} \quad (3)$$

Particularmente para comprender el cambio de rapidez que existirá en este sistema se considera los parámetros en el momento que los martillos experimentan contacto con el trozo de resina.

$$v_t = \sqrt{\frac{500gr \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 0.5m}{\frac{1}{2} \cdot 5gr}}$$

$$v_t = 31.32 \frac{m}{s}$$

Para los molinos de martillos las velocidades que se recomiendan están en los rangos de 30 m/s hasta 45 m/s, dando como válida la velocidad obtenida anteriormente [20].

### 1.1.6. Velocidad con carga

Al momento que los martillos impactan con los trozos de resina estos tienden a disminuir la velocidad del sistema, por tal motivo se considera a esta velocidad como velocidad con carga ( $v_c$ ). Para determinar dicha velocidad es necesario tomar en cuenta la ecuación de la velocidad media ( $v$ ) [24] y el coeficiente de fluctuación ( $C_s$ ) debido a que se considerara como volante de inercia al juego de martillos, los ejes secundarios y el árbol motriz, asumiéndolos a manera de un sólido [25].

$$v = \frac{v_v + v_c}{2} \quad (4)$$

$$C_s = \frac{v_v - v_c}{v} \quad (5)$$

Reemplazando la ecuación 4 en la Ecuación 5 se despeja  $v_c$  obteniendo la velocidad final con carga.

$$v_c = -v_v \cdot \frac{C_s - 2}{C_s + 2} \quad (6)$$

Según Khurmi [26] el valor adimensional de  $C_s$  para máquinas de martillos es de 0.2.

Tabla 6. Coeficientes de fluctuación [26]

Tipo de máquina	$C_s$
Maquinaria de machaqueo	0.200
Maquinaria eléctrica	0.003
Maquinaria eléctrica, transmisión directa	0.002
Motores con transmisión por correas	0.030
Maquinaria para molinos harineros	0.020
Transmisión rueda dentada	0.020
Martillos	0.200
Maquinas herramientas	0.030
Maquinaria para fabricación de papel	0.025
Bombas	0.030-0.050
Maquinaria de corte	0.030-0.050
Maquinaria de hilanderías	0.010-0.020
Maquinaria textil	0.025

Se tiene  $v_t$  es igual  $v_v$ , dando a entender que la velocidad que poseen los martillos es la misma que velocidad en vacío según la ecuación 3. Sustituyendo los resultados obtenidos en la igualdad anterior:

$$v_c = -31.32 \frac{m}{s} \cdot \left( \frac{0.2 - 2}{0.2 + 2} \right)$$

$$v_c = 25.63 \frac{m}{s}$$

En el análisis de velocidades, la angular con carga requiere la dimensión del radio de giro, la cual está determinada en función a la rapidez de giro los martillos ( $v_c$ ) y las revoluciones del motor (rev/min) [27].

$$r_g = \frac{v_c \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 1500 \frac{rev}{min}}$$

(7)

$$r_g = \frac{25.63 \frac{m}{s} \cdot \frac{60s}{1min}}{\frac{2 \cdot \pi}{rev} \cdot 1500 \frac{rev}{min}}$$

$$r_g = 0.16m$$

Según el cálculo, el radio de giro es de 0.16m, siendo este reemplazado en la ecuación 8 y determinando la velocidad angular sin carga ( $\omega_t$ ) y con carga ( $\omega_c$ ) [24].

$$\omega_t = \frac{v_v}{r_g}$$

(8)

$$\omega_t = \frac{31.32 \frac{m}{s}}{0.16m} = 195.7 \frac{rad}{s}$$

$$\omega_t = 1869 rpm$$

$$\omega_c = \frac{v_c}{r_g}$$

$$\omega_c = \frac{25.63 \frac{m}{s}}{0.16m} = 160.18 \frac{rad}{s}$$

$$\omega_c = 1530 \text{ rpm}$$

Con estos valores se facilita el dimensionamiento de los martillos, discos porta martillos, eje principal, carcasa del molino, tamiz del filtrado y demás componentes del molino.

Considerando poseer un conjunto transmisor de energía se procede a obtener el valor de aceleración total del sistema utilizando las velocidades angulares anteriormente calculadas mediante la ecuación de movimiento angular desacelerado [24].

$$\omega_t^2 = \omega_c^2 + 2\alpha \cdot \theta \tag{9}$$

Una vez determinada la ecuación anterior, se observa es necesario obtener el valor de  $\alpha$  (aceleración angular), por tal motivo se realiza el despeje de dicho termino.

La configuración de separación entre los martillos tiene un valor de  $\theta=90^\circ$  que equivale a 1.57rad.

$$\alpha = \frac{\omega_t^2 - \omega_c^2}{2 \cdot \theta} \tag{10}$$

$$\alpha = \frac{\left(195.7 \frac{rad}{s}\right)^2 - \left(160.18 \frac{rad}{s}\right)^2}{2 \cdot (1.57rad)}$$

$$\alpha = 4025.75 \frac{rad}{s^2}$$

Un aspecto fundamental a considerar para el diseño de los martillos tiene que ver con las diferentes fuerzas a las que están sometidos, sobre todo para el corte de la resina ( $F_c$ ) siendo esta la necesaria para provocar la fractura del trozo de resina, la cual se obtiene experimentalmente dando como valor de la  $F_c$  máxima de 4,905 N, el cual es necesario en la determinación del valor de factor de seguridad que tendrá este elemento.

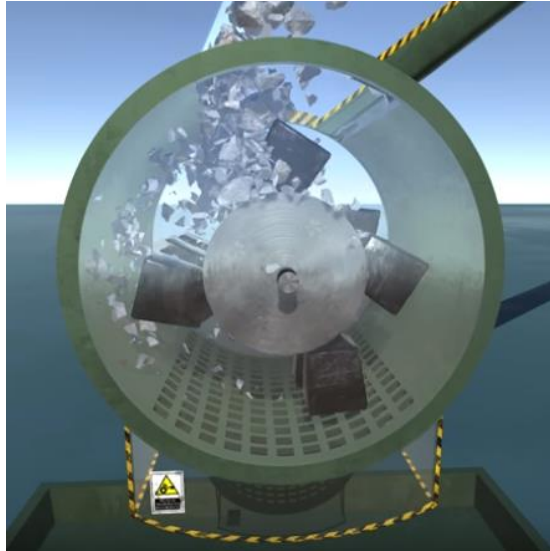


Figura 10. Impacto de materia prima con los martillos [28]

### 1.1.7. Análisis de parámetros para el dimensionamiento de martillos

La longitud de los martillos según recomendaciones de fabricantes de molinos trituradores va desde 0.1m hasta 0.12m [20], por ello se considera para los procesos de cálculo una longitud para el martillo de 0.1m, el cual facilitara la obtención de su masa, además es necesaria la ecuación de momento de fuerza de corte ( $M$ ) y otra considerando su centro de inercia [24].

$$M = F_c \cdot L_m \tag{11}$$

Donde:

$F_c = 4.905 \text{ N}$

$L_m = \text{Largo del martillo}$

$$M = I_0 + \alpha$$

(12)

Donde:

M = Momento de corte en base a su inercia

$I_0$  = Inercia del martillo

$\alpha$  = Aceleración angular del martillo

Al igualar las ecuaciones 11 y 12 se puede despejar la fuerza de corte dando como resultante la Ecuación 13.

$$F_c = \frac{I_0 \cdot \alpha}{L_m} \quad (13)$$

También es necesaria la ecuación de la inercia del martillo ( $I_0$ ) [25], la cual está dada por:

$$I_0 = \frac{1}{12} m_m \cdot L_m^2 \quad (14)$$

Para la obtención de la masa de cada martillo ( $m_m$ ) se reemplaza la ecuación 14 en 13 y obteniendo:

$$m_m = \frac{F_c \cdot 12}{\alpha \cdot L_m} \quad (15)$$

$$m_m = \frac{4.905N \cdot 12}{4025.75 \cdot 0.10m}$$

$$m_m = 0.146kg$$

$$m_m = 146g$$

El espesor del martillo se calcula en base a la ecuación 16 [22] donde se considera un valor de ancho del martillo ( $a$ ) de 25.4 milímetros debido a que de la dimensión de las partículas de resina se encuentra en la media de los 25 milímetros.

$$e = \frac{m_m}{P_e \cdot a \cdot L_m} \quad (16)$$

Donde

e = Espesor del martillo

$L_m = 0.10 \text{ m}$

$$e = \frac{0.146 \text{ kg}}{7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.0254 \text{ m} \cdot 0.10 \text{ m}}$$

$$e = 0.0073 \text{ m}$$

Según el valor obtenido, el espesor del martillo debe ser de 7,3 mm, pero se optará por utilizar un espesor de 8 mm por facilidad de construcción.

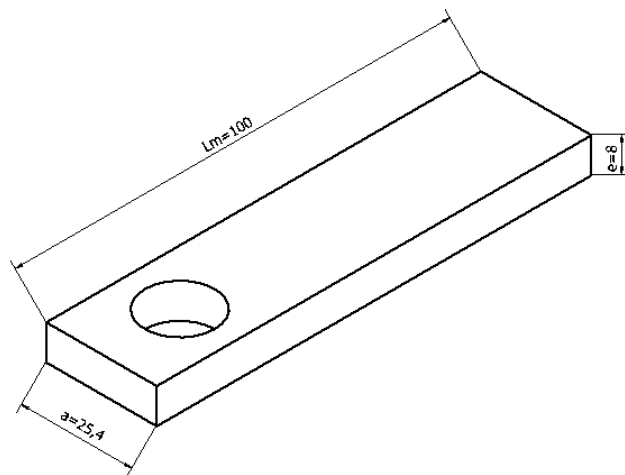


Figura 11. Dimensiones del martillo. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

### 1.1.8. Falla por cizalladura y factor de seguridad ( $\eta$ )

Existe una posibilidad de que por las fuerzas a las que están sometidas las áreas de unión de los martillos con el eje de porta martillos, estos posiblemente presenten fallas por cizalladura por lo cual es importante calcular  $\eta$  para comprobar si los parámetros seleccionados son idóneos, por tal motivo al determinar el área de desgarre ( $A_d$ ) en necesario establecer el valor de ( $b_1$ ) [25].

$$A_d = e \cdot b_1 \cdot 2 \quad (17)$$



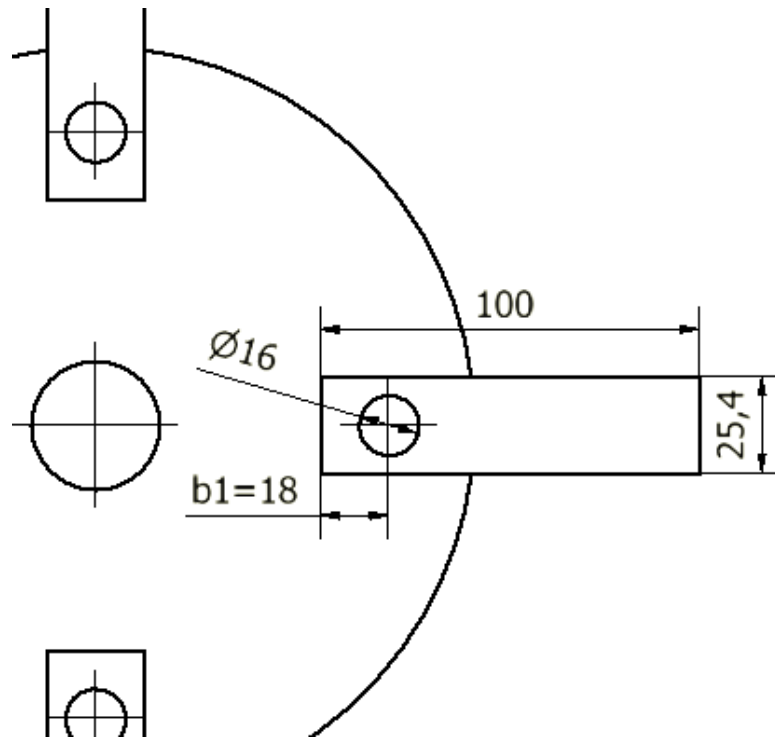


Figura 12. Esquema Martillo y plato porta martillos. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

$$A_d = 0.008m \cdot 0.018m \cdot 2$$

$$A_d = 2.88 \times 10^{-4} m^2$$

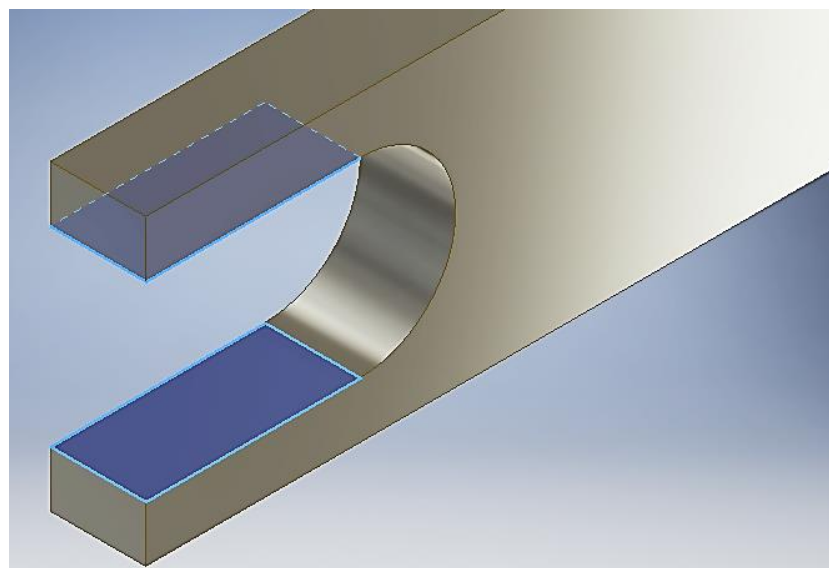


Figura 13. Esquema de las áreas de desgarre ( $A_d$ ). Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

La fuerza centrífuga [22] esta descrita por la ecuación 18:

$$F_{cf} = \omega_t^2 \cdot m_m \cdot r_g \quad (18)$$

Donde:

$F_{cf}$  = Fuerzas centrifuga

$\omega$  = Velocidad angular del martillo

$m_m$  = Masa del martillo

$r_g$  = Radio de giro

$$F_{cf} = \left(195.7 \frac{1}{s}\right)^2 \cdot 0.146kg \cdot 0.16m$$

$$F_{cf} = 894.65N$$

Una vez obtenida la superficie de rotura ( $A_d$ ) y la  $F_{cf}$  se puede realizar el cálculo del esfuerzo cortante ( $\tau$ ) [22].

$$\tau = \frac{F_{cf}}{A_d} \quad (19)$$

$$\tau = \frac{894,65N}{2.88 \times 10^{-4}m^2}$$

$$\tau = 3.10 MPa$$

Se calcula el coeficiente de seguridad a través del cortante  $\tau$  y la resistencia máxima a la fluencia para el acero de  $S_y=220$  MPa, debido a que los martillos serán fabricados con acero AISI 1018 [25]. El resultado del factor de seguridad confirmara si se presenta o no fallas por desgarramiento en el elemento.

$$\eta = \frac{S_y}{2 \cdot \tau} \quad (20)$$

$$\eta = \frac{220MPa}{2 \cdot 3,10 MPa}$$

$$\eta = 35.48$$

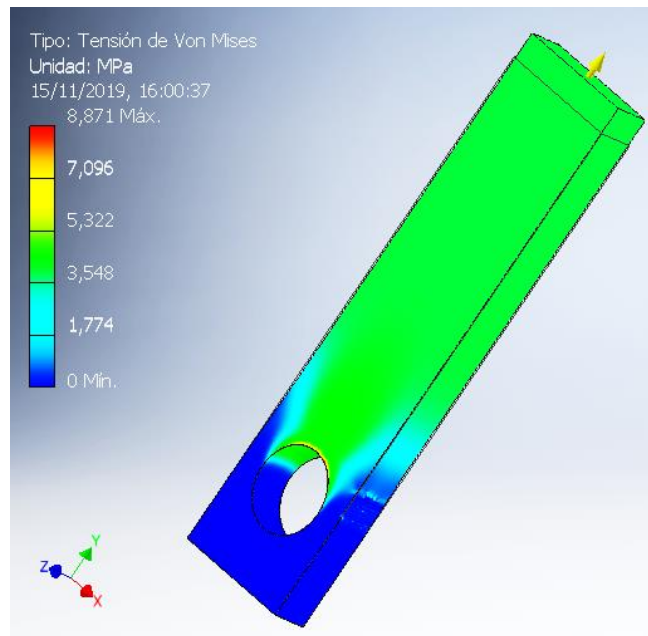


Figura 14. Tensión de Von Mises en el martillo. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

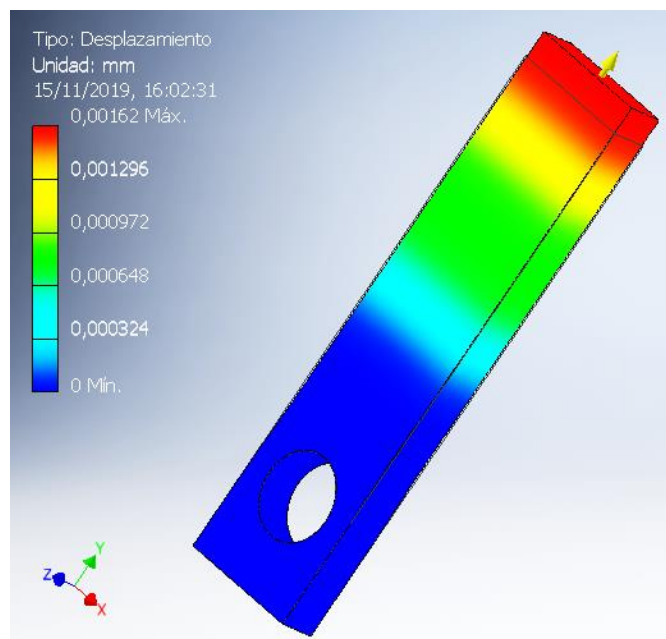


Figura 15. Distancia de desplazamiento del martillo en milímetros. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

### 1.1.9. Falla por tracción y factor de seguridad

Debido a la fuerza centrífuga que van a experimentar los martillos se calcula el esfuerzo normal de tracción utilizando el área transversal ( $A_{st}$ ).

$$A_{st} = a \cdot e \quad (21)$$

$$A_{st} = 0.025m \cdot 0.008m$$

$$A_{st} = 2 \times 10^{-4}m^2$$

Por lo tanto, el  $F_{cf} = 894.65$  N se reemplaza en la ecuación 22 según Gere [22]

$$\sigma = \frac{F_{cf}}{A_{st}} \quad (22)$$

$$\sigma = \frac{894.65N}{2 \times 10^{-4}m^2}$$

$$\sigma = 4.47 MPa$$

Del mismo modo que para el cálculo del esfuerzo por cizalladura se considera el valor del  $S_y=220MPa$  para el cálculo del factor de seguridad correspondiente [25].

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma} \quad (23)$$

$$\eta = \frac{220 MPa}{4.47 MPa}$$

$$\eta = 49.21$$

Como se aprecia en los resultados obtenidos, los valores de factor de seguridad altos se deben a que la cantidad de masa en función del tiempo que el molino entrega en producción es 25kg/h, que a comparación de otras máquinas trituradoras es una producción baja, es decir, los elementos de corte que tiene esta máquina cumplen exigencias pequeñas, no obstante esto no significa que se deben utilizar materiales de poca resistencia o menor calidad para su construcción puesto que van a estar sujetos a efectos de fatiga por corte y procesos de corrosión, es por ello según Zambrano [29] los valores en los factores de seguridad al ser grandes en comparación con los esfuerzos obtenidos no afectan el dimensionamiento de los elementos del sistema de trituración ya que al ser  $\eta$  elevado indica un sobredimensionamiento.

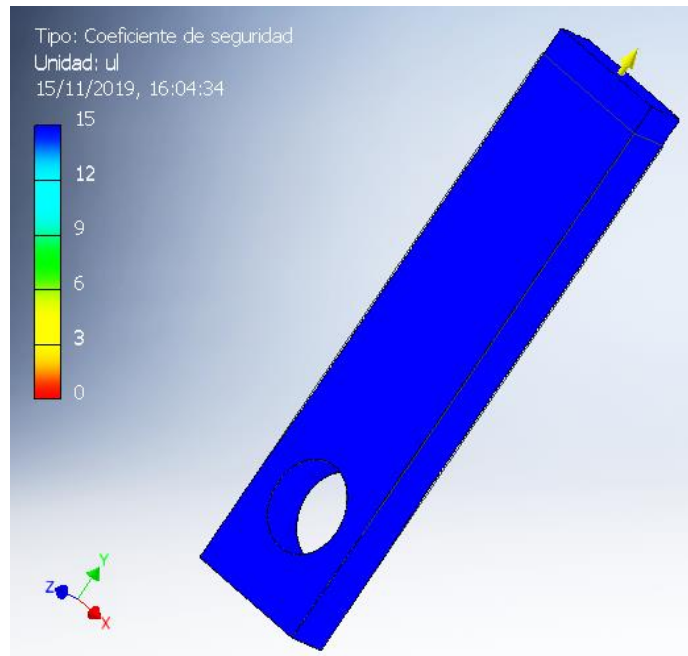


Figura 16. Factor de seguridad. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

## 1.2. Diseño disco portamartillos

Para este componente consideran los parámetros como material de construcción el acero AISI 1018, diámetro exterior de disco de 220 mm y grosor de 6 mm. El disco tiene 4 orificios de diámetros de 16mm situadas a  $90^\circ$  en los cuales se colocar los ejes porta martillos, además cuenta con un agujero en su centro de 34mm de diámetro por donde pasa el eje principal.

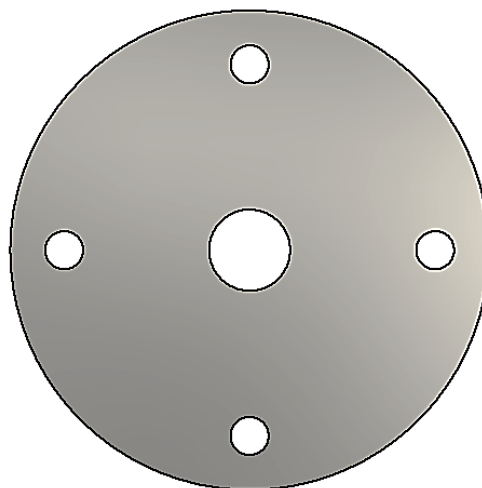


Figura 17. Disco porta martillos. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

Para el cálculo del esfuerzo cortante de este elemento se considera que las perforaciones del disco experimentan tensión debido a la existencia de la fuerza centrífuga; en cada perforación existirá un valor semejante al doble de la fuerza centrífuga[22].

$$\tau = \frac{2 F_{cf}}{A_d} \quad (24)$$

Descomponiendo  $A_d$  obtiene:

$$\tau = \frac{2 F_{cf}}{e \cdot d_1 \cdot 2}$$

$$\tau = \frac{2 \cdot 894,65 \text{ N}}{0,006\text{m} \cdot 0,016\text{m} \cdot 2}$$

$$\tau = 9319270,833 \text{ Pa}$$

$$\tau \approx 9,31 \text{ MPa}$$

El factor de seguridad es resultado obtenido en función del cortante y el esfuerzo a la fluencia del acero AISI 1018 ( $S_y=220\text{MPa}$ )

$$\eta = \frac{220\text{MPa}}{9,31 \text{ MPa}}$$

$$\eta = 23,63$$

### 1.3.Separadores de martillos (K)

Según Chicaiza [30] los fabricantes de molinos de martillos recomiendan para la longitud de los separadores considerar un coeficiente  $K$ , el cual se calcula mediante la siguiente expresión:

$$K > 3 \cdot e \text{ [mm]} \quad (25)$$

Donde:

$K$ = Longitud del separador de martillos

$e$ =espesor del martillo

$$K > 3 \cdot (8mm)$$

$$K \geq 24 mm$$

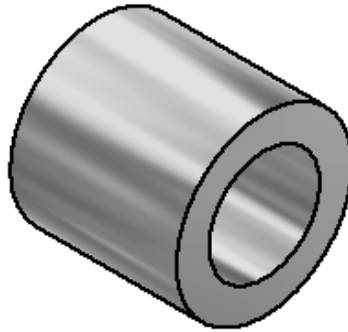


Figura 18. Separador de martillo. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

Los separadores serán manufacturados de Duralón, siendo este un polímero que por sus propiedades presenta una alta resistencia mecánica y física, evitando un desgaste prematuro de los martillos y ejes.

#### 1.4.Cálculo del eje secundario

Este elemento está construido de acero AISI 1018, con un diámetro de 16 mm y longitud de 174 mm, en el cual estarán colocados 4 martillos y 5 separadores en cada eje secundario y a su vez dicho conjunto estará soportado por los 2 discos porta martillos en los extremos.

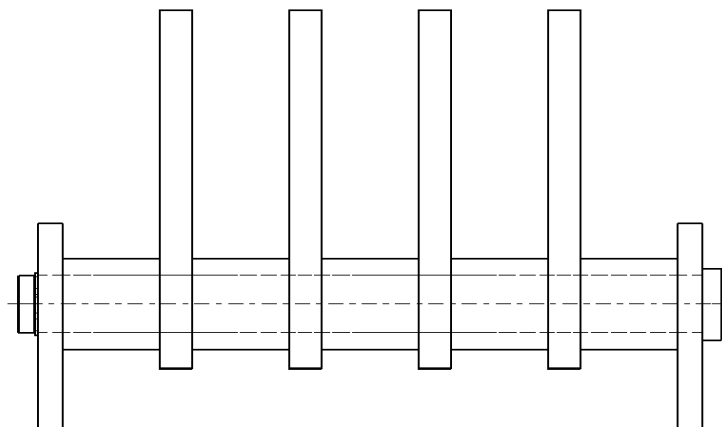


Figura 19. Esquema de conjunto eje secundario, martillos, separadores y discos. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

### 1.4.1. Diseño estático del eje secundario

Para el análisis de fuerzas se efectúa el diagrama del eje secundario, el cual se encuentra sobre 2 puntos de apoyo (disco porta martillos) y soporta la carga de 4 martillos.

Para determinar el valor de las fuerzas en los apoyos A y B se analizan las fuerzas correspondientes a cada martillo ( $F_{m1}$ ,  $F_{m2}$ ,  $F_{m3}$  y  $F_{m4}$ ), pero todas estas son iguales en relación a sus valores de fuerza centrífuga, además tienen las mismas dimensiones y disposición de separación, es por tal motivo que se denominaran a estas fuerzas como  $F_m$ .

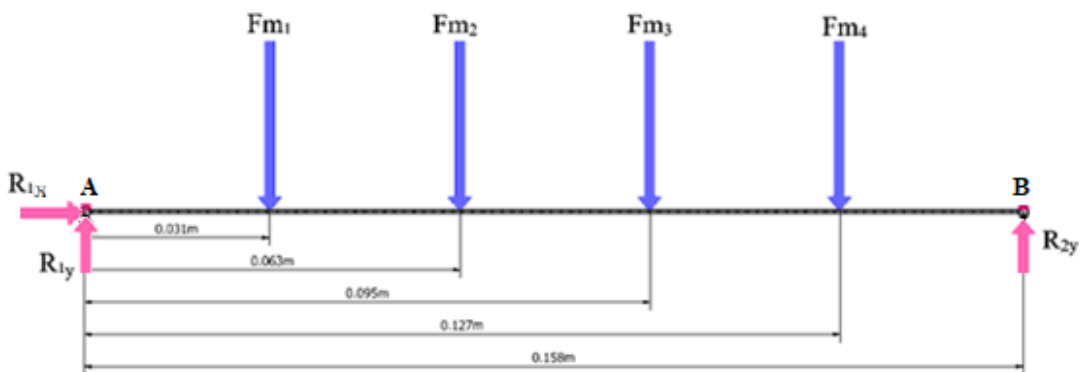


Figura 20. Diagrama de fuerzas y distancias en el eje secundario. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

Para determinar las fuerzas y reacciones en el eje se realiza una sumatoria de fuerzas dando como resultante el siguiente análisis.

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{m1} + F_{m2} + F_{m3} + F_{m4} = R_{1y} + R_{2y}$$

Como:

$$F_{m1} = F_{m2} = F_{m3} = F_{m4} = F_m$$

$$\therefore 4 F_m = R_{1y} + R_{2y} \quad (\text{Ec.1})$$

Sumatoria de momentos

$$\sum M_A = 0$$

$$F_{m1} \cdot d_1 + F_{m2} \cdot d_2 + F_{m3} \cdot d_3 + F_{m4} \cdot d_4 - R_{2y} \cdot d_5 = 0$$



$$\therefore Fm(d_1 + d_2 + d_3 + d_4) = R_{2y} \cdot d_5$$

$$R_{2y} = \frac{Fm \cdot (d_1 + d_2 + d_3 + d_4)}{d_5} \quad (\text{Ec.2})$$

Si:  $Fm = 894.65 \text{ N}$

$$R_{2y} = \frac{894.65 \text{ N} \cdot (0.031 + 0.063 + 0.095 + 0.127) \text{ m}}{0.158 \text{ m}}$$

$$R_{2y} = 1789.3 \text{ N}$$

Remplazando en la ec.1  $F_m$  y  $R_{2y}$  se tiene:

$$4 \cdot (894.65 \text{ N}) - R_{2y} = R_{1y}$$

$$4 \cdot (894.65 \text{ N}) - 1789.3 \text{ N} = R_{1y}$$

$$R_{1y} = 1789.3 \text{ N}$$

$$R_{2y} = R_{1y} = 1789.3 \text{ N}$$

Entonces:

$$R_1 = 1789.3 \text{ N}$$

$$R_2 = 1789.3 \text{ N}$$

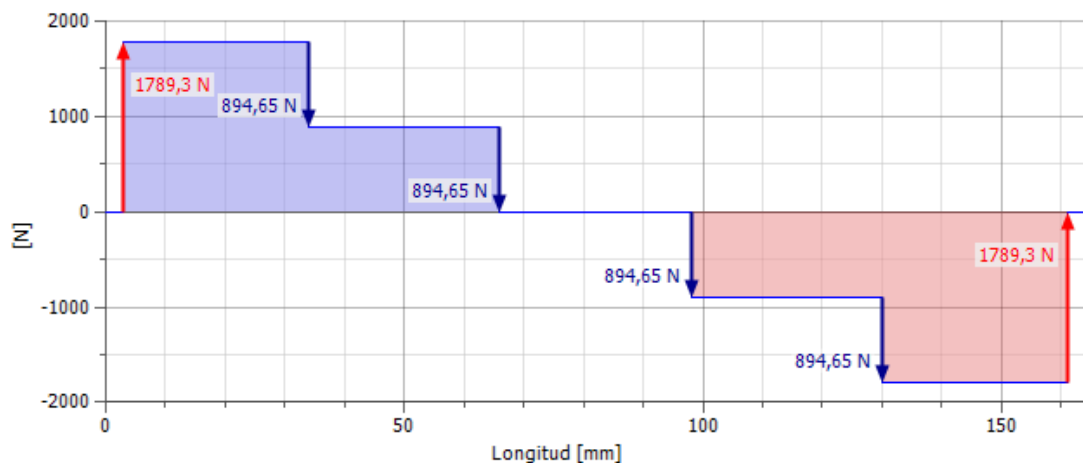


Figura 21. Diagrama de fuerzas. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

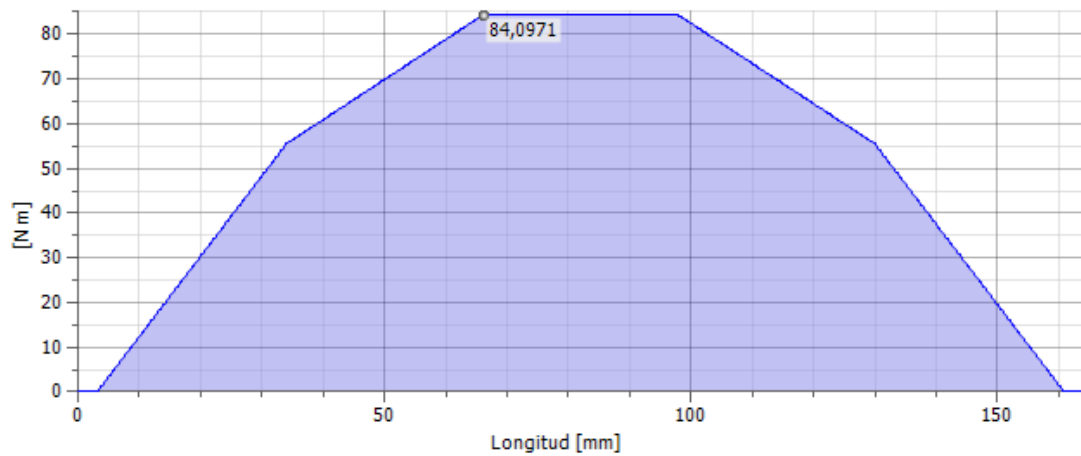


Figura 22. Diagrama de momentos. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

En los diagramas obtenidos se puede observar que el área más crítica en el eje está en la mitad de su longitud con un valor de  $M=84.09$  Nm el cual se usa la ecuación 26 del esfuerzo normal cortante, [22].

$$\sigma = \frac{M \cdot C}{I} \tag{26}$$

Desarrollando la ecuación anterior en valor de C correspondería al radio del eje.

$$\sigma = \frac{M \cdot \frac{d}{2}}{\frac{\pi \cdot d^4}{64}}$$

$$\sigma = \frac{M \cdot 32}{d^3 \cdot \pi}$$

$$\sigma = \frac{84.09 \text{ Nm} \cdot 32}{(0.016)^3 \cdot \pi}$$

$$\sigma = 209.11 \text{ MPa}$$

Para este componente se considera un acero AISI 1018 laminado en frío, el cual tiene un  $S_y$  de 370 MPa.

$$\eta = \frac{370 \text{ MPa}}{209.11 \text{ MPa}} \quad (27)$$

$$\eta = 1.76$$

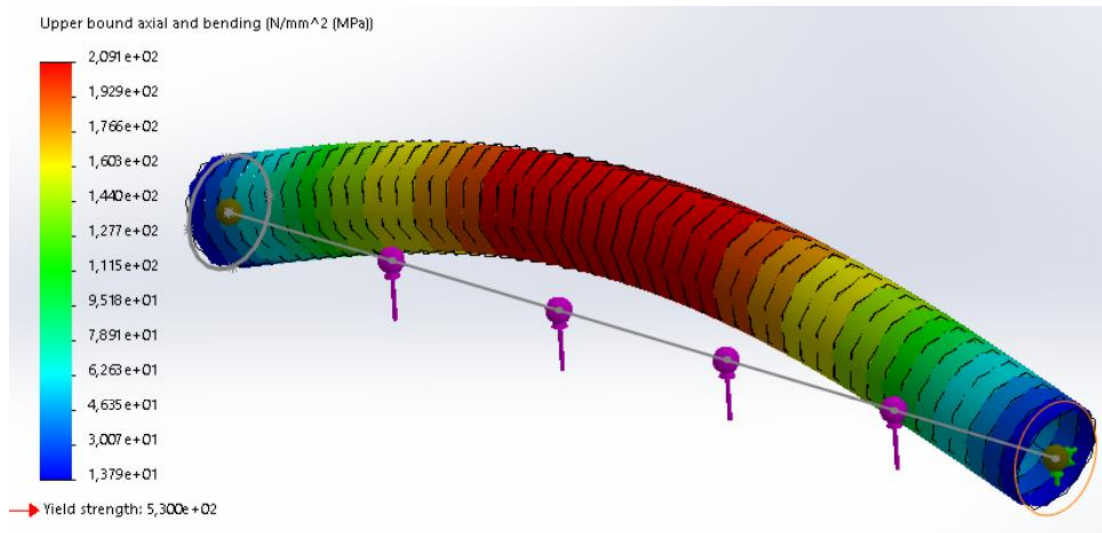


Figura 23. Esfuerzo flector eje secundario. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

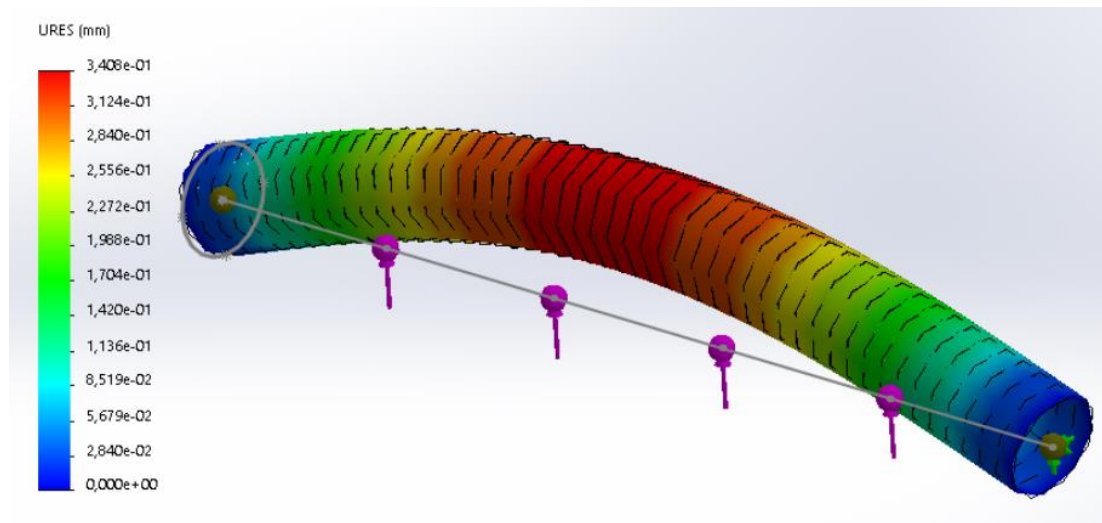


Figura 24. Distancia de desplazamiento del eje en milímetros. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

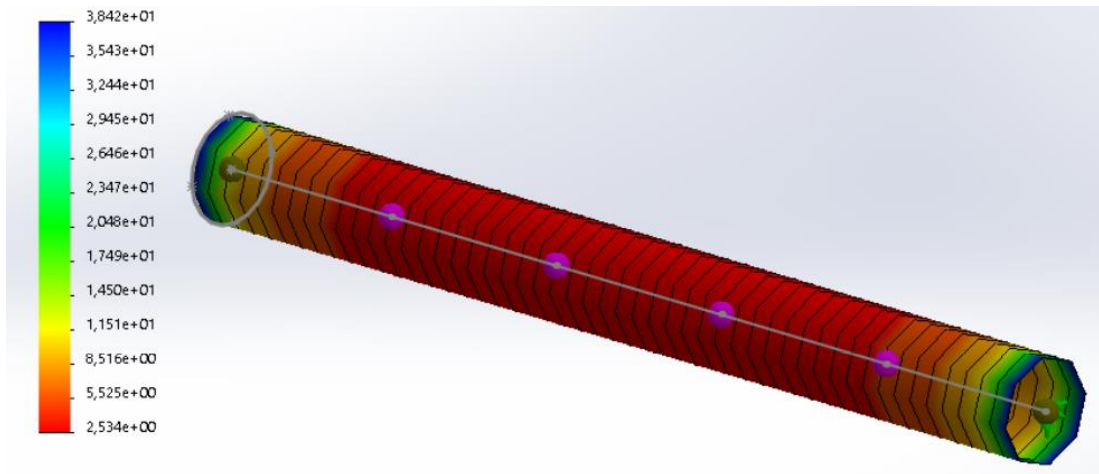


Figura 25. Factor seguridad. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

### 1.5. Dimensionamiento y análisis de cargas para el eje motriz

Los cálculos del eje motriz del molino se determinan con unas dimensiones previas, la distancia de 352 mm y 38 mm de diámetro, las cuales se analizan mediante la utilización del software Autodesk Inventor, además se toman en cuenta las características del material de fabricación (Acero AISI 1018)

Se considera que, la disposición en el árbol soporta solamente una carga total, conformada por el peso individual de los componentes como martillos, ejes secundarios, discos, entre otros que conforman el mecanismo de trituración. El peso de estos elementos se lo obtiene de forma experimental o mediante la utilización del software Autodesk Inventor, siendo estos datos expresados en la tabla 7 tomando en consideración la mayor precisión en sus valores.

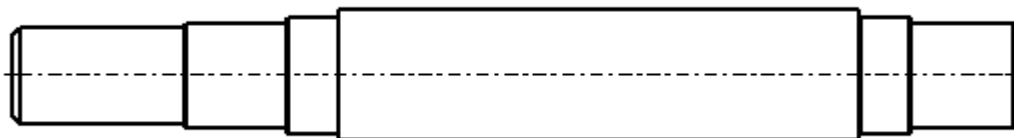


Figura 26. Esquema eje principal. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

### 1.5.1. Análisis en el eje principal

En la siguiente tabla se expresan los valores obtenidos de cada uno de los elementos que actúan como cargas sobre el eje principal

Tabla 7. Peso de los elementos constituyentes de la capara de trituración

Elementos	Peso [kg]	Cantidad	Peso total [kg]
Bocines de martillos	0,021	20	0.42
Martillos	0,147	16	2.352
Disco porta martillos	1,399	2	2.798
Ejes secundarios	0,279	4	1.116
Total =			6.686 kg

Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

El peso obtenido es de 6.686 kg, el cual se expresará en 65.58 N siendo de utilidad para el análisis del eje sometido a un momento flector, verificando si el diámetro seleccionado soporta las cargas a las que se encuentra sometido; adicionalmente se realiza el diseño del eje utilizando el software Autodesk Inventor para la comprobación de su resistencia y comportamiento al ser sometido a las cargas indicadas.

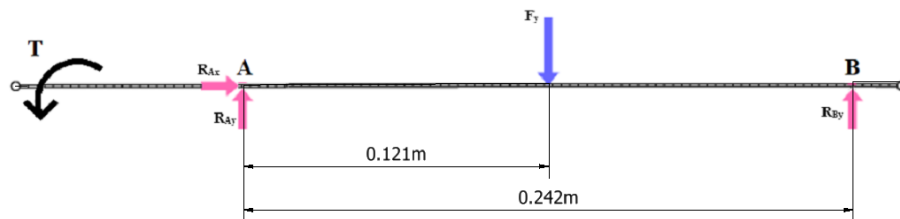


Figura 27. Diagrama de fuerzas y distancias en el eje principal. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

$$\sum M_A = 0$$

$$R_{By} \cdot (242 \text{ mm}) - F_y \cdot (121 \text{ mm}) = 0$$

$$R_{By} \cdot (242 \text{ mm}) - 65.58 \text{ N} \cdot (121 \text{ mm}) = 0$$

$$R_{By} = \frac{(65.58 \text{ N}) \cdot (121 \text{ mm})}{242 \text{ mm}}$$

$$R_{By} = 32.79 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$R_{Ay} + R_{By} - F_y = 0$$

$$R_{Ay} = F_y - R_{By}$$

$$R_{Ay} = 65.58 N - 32.79 N$$

$$R_{Ay} = 32.79 N$$

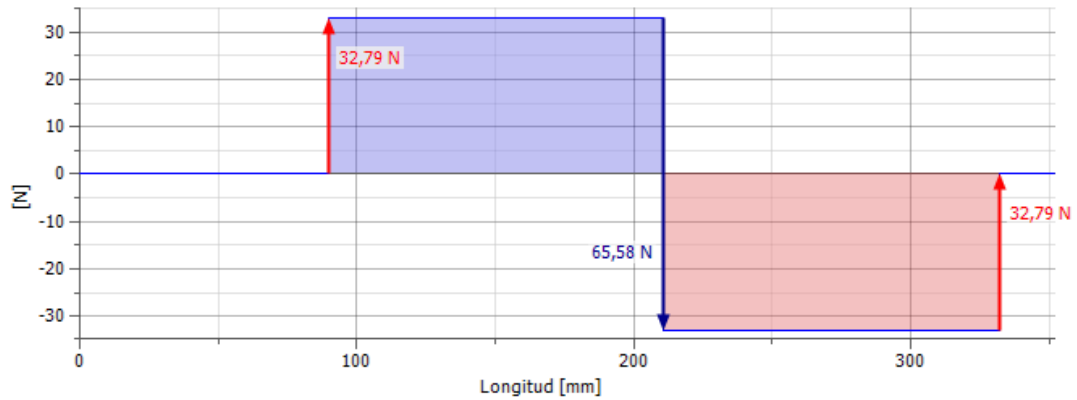


Figura 28. Diagrama de fuerzas. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

$$M_f = 0.121mm \times 32.79N$$

$$M_f = 3.9675Nm$$

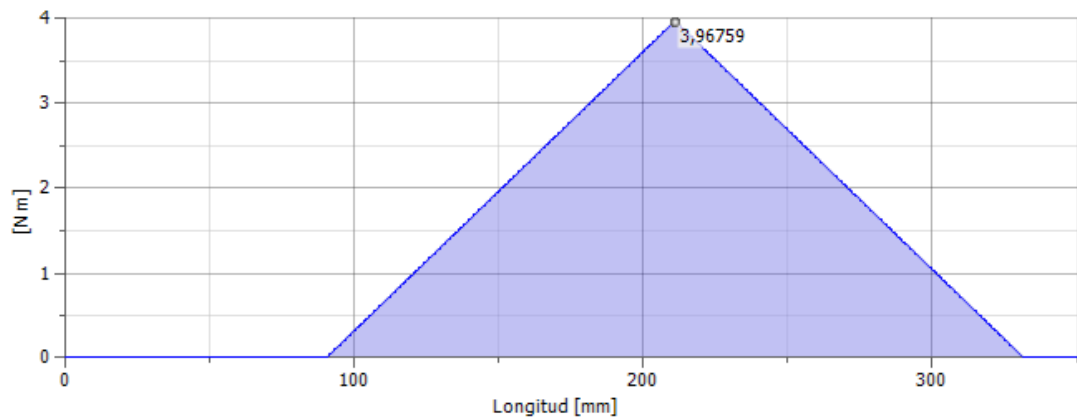


Figura 29. Diagrama de momentos. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

El momento torsor se puede calcular a partir de la potencia que transmite el eje, al cual es 2HP que corresponde a 1.5KW [25].

$$\omega_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$$

(29)

Donde:

$\omega_m$ =velocidad angular del motor

n = número de rpm

$$\omega_m = \frac{2 \cdot \pi \text{ rad}}{60 \text{ s}} \cdot \frac{1500 \text{ rev}}{\text{min}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{1 \text{ rev}}$$

$$\omega_m = 157.08 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Para calcular el momento torsor en el eje, se lo realiza por medio de la fórmula de potencia

$$P = T \cdot \omega$$

(30)

Donde:

P= potencia del motor

T= momento torsor (torque)

$$T = \frac{P}{\omega} \cdot \frac{1.5 \times 10^3 \text{ w}}{57.08 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}$$

$$T = 9.55 \text{ Nm}$$

Uno de los primeros parámetros en el análisis y diseño del eje tiene que ver con la torsión, es por ello que se realiza el cálculo de los esfuerzos que experimenta el eje de diámetro 28 mm, lo cual servirá para la comparación del esfuerzo equivalente obtenido con el límite elástico del material, con ello la obtención del factor de seguridad el cual indicará si el elemento podría o no fallar.

$$I = \frac{\pi \cdot d^4}{64}$$

(31)

Donde:

I= inercia

d= diámetro del eje

$$\sigma_f = \frac{M_f \cdot r}{I} \quad (32)$$

Donde:

$M_f$ = momento flector

r= radio del eje

Reemplazando la ecuación 31 en la ecuación 32 se tiene:

$$\sigma_f = \frac{M_f \cdot r}{\frac{\pi \cdot d^4}{64}}$$

$$\sigma_f = \frac{M_f \cdot \frac{d}{2}}{\frac{\pi \cdot d^4}{64}}$$

$$\sigma_f = \frac{32 \cdot M_f}{\pi \cdot d^3}$$

Si el  $M_f = 3.97 \text{ Nm}$  entonces:

$$\sigma_f = \frac{32 \cdot (3.97 \text{ Nm})}{\pi \cdot (28 \times 10^{-3} \text{ m})^3}$$

$$\sigma_f = 1.84 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_f = 1.84 \text{ MPa}$$

Se realiza el análisis en cortante mediante la ecuación 33.

$$\tau_{max} = \frac{T \cdot r}{J} \quad (33)$$



Donde:

$\tau_{max}$  = esfuerzo cortante máximo

J = momento torsor

$$J = \frac{\pi}{2} \cdot r^4 \quad (34)$$

Reemplazando la ecuación 34 en la ecuación 33.

$$\tau_{max} = \frac{T \cdot r}{\frac{\pi}{2} \cdot r^4}$$

$$\tau_{max} = \frac{2 \cdot T}{\pi \cdot r^3}$$

Si  $T = 9.55 \text{ Nm}$  y  $r = 14 \text{ mm}$ , entonces:

$$\tau_{max} = \frac{2 \cdot 9.55 \text{ Nm}}{\pi \cdot (14 \times 10^{-3} \text{ m})^3}$$

$$\tau_{max} = 2.22 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$\tau_{max} = 2.22 \text{ MPa}$$

Con los valores obtenidos se procede con el cálculo del esfuerzo equivalente

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_f^2 + 3 \cdot \tau_{max}^2} \quad (35)$$

Donde:

$\sigma_{eq}$  = esfuerzo equivalente

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(1.84 \text{ MPa})^2 + 3 \cdot (2.22 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_{eq} = 4.26 \text{ MPa}$$

Se determina el factor de seguridad que presente el elemento tomando en cuenta el valor del  $S_y=370$  MPa para este material.

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma_{eq}}$$

$$\eta = \frac{370 \text{ MPa}}{4.26 \text{ MPa}}$$

$$\eta = 86.85$$

El límite de fatiga en el eje se lo calcula mediante los factores  $k$  y  $s$ , los cuales determinan el si el elemento cargado a condiciones cíclicas falla durante un determinado tiempo, es por ello que según el análisis en ejes de Budinas [25] se utilizan todos los factores anteriormente mencionados.

$$S_{10^3} = 0.9 \cdot S_{ut} \tag{36}$$

$$S_{10^3} = 0.9 \cdot (440 \text{ MPa})$$

$$S_{10^3} = 396 \text{ MPa}$$

$$S'_e = 0.5 \cdot S_{ut} \tag{37}$$

$$S'_e = 0.5 \cdot (440 \text{ MPa})$$

$$S'_e = 220 \text{ MPa}$$

El factor de acabado superficial por maquinado ( $k_a$ ) está dada por la ecuación 38, donde el valor  $a= 4.51$  y  $b=-0.265$ , los cuales se encuentran tabulados en el anexo 3.

$$k_a = a \cdot S_u^b \tag{38}$$

$$k_a = 4.51 \cdot 440^{-0.265}$$

$$k_a = 0.898$$

Factor de tamaño ( $k_b$ ) [25] para un rango de diámetros está dado por una determinada ecuación como se visualiza en el anexo 4 y con resultados pueden expresarse para torsión y flexión.

$$k_b = 0.86$$

Factor concentrador de esfuerzos ( $k_f$ ) se determina según el anexo 6 mediante la utilización de sus respectivas graficas de factores teóricos.

$$k_t = 1.7 \quad \begin{cases} \frac{D}{d} = 1.07 \\ \frac{r}{d} = 0.07 \end{cases}$$

$$k_f = 1 + q(K_t - 1)$$

(39)

Donde:

$k_f$ = factor concentrador de esfuerzos

$q$ = sensibilidad de las muescas (anexo 7)

$$k_f = 1 + 0.7(1.7 - 1)$$

$$k_f = 1.49$$

Determinado el valor de  $k_f$  se obtiene el factor de confiabilidad ( $k_e$ )

$$k_e = \frac{1}{K_f}$$

(40)

$$k_e = \frac{1}{1.49}$$

$$k_e = 0.67$$

Con los factores  $K$  obtenidos anteriormente se calcula el límite de resistencia a la fatiga ( $S_e$ ) [25].

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_e \cdot S_e'$$

(41)

$$S_e = 0.898 \cdot 0.86 \cdot 0.67 \cdot 220 \text{ MPa}$$

$$S_e = 113.83 \text{ MPa}$$

Para el dimensionamiento del eje se considera el momento flector y torsor máximo y se determina mediante la ecuación 42 y se propone un coeficiente de seguridad  $\eta=3$ .

$$d^3 = \frac{32 \cdot M_f \cdot \eta}{\pi \cdot S_e} \quad (42)$$

$$d^3 = \frac{32 \cdot 3.97 \text{ Nm} \cdot 3}{\pi \cdot 113.83 \times 10^6 \text{ Pa}}$$

$$d^3 = 1.066 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$d = 10.21 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$d = 10.21 \text{ mm}$$

Puesto que se obtuvo un diámetro de 10.21mm para soportar las cargas indicadas, se procede a una verificación del valor antes obtenido mediante el análisis de cortante y el criterio de Tresca para la tensión de fluencia en torsión.

$$\tau_m = \frac{16 \cdot T}{\pi \cdot d^3} \quad (43)$$

$$\tau_m = \frac{16 \cdot 9.55 \text{ Nm}}{\pi \cdot (10.21 \times 10^{-3} \text{ m})^3}$$

$$\tau_m = 45.69 \text{ MPa}$$

A través del criterio de Tresca, la tensión de fluencia en torsión es:

$$S_{ys} = 0.5 S_y \quad (44)$$

$$S_{ys} = 0.5 \cdot 370 \text{ MPa}$$

$$S_{ys} = 185 \text{ MPa}$$

Para aplicar el método general de fatiga se tiene:

$$\tau_m \leq 0.5 \cdot S_{ys}$$

$$45.69 \text{ MPa} < 0.5 \cdot (185 \text{ MPa})$$

$$45.69 \text{ MPa} < 92.5 \text{ MPa}$$

Confirmando el cumplimiento el criterio anterior, se realiza un nuevo cálculo del diámetro del eje para constatar si existe algún cambio significativo en sus dimensiones.

$$d^3 = \frac{32 \cdot \eta}{\pi} \left[ \frac{M_f}{S_e} + \frac{\sqrt{3} \cdot T}{2 \cdot S_y} \right] \quad (45)$$

$$d^3 = \frac{32 \cdot 3}{\pi} \left[ \frac{3.97 \text{ Nm}}{113.83 \text{ MPa}} + \frac{\sqrt{3} \cdot 9.55 \text{ Nm}}{370 \text{ MPa}} \right]$$

$$d^3 = 1.74 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$d = 12.04 \text{ mm}$$

Al constatar que el diámetro teórico del eje es de 12mm, se entiende que es suficiente para soporta las cargas previstas, es por ello que al comparar dicho valor con el diseño original del árbol con diámetro mínimo de 28 mm se concluye que no presenta fallas por esfuerzos cortantes o flexionantes, además este diámetro mínimo de diseño se lo toma considerando que el mecanismo experimenta altas revoluciones.

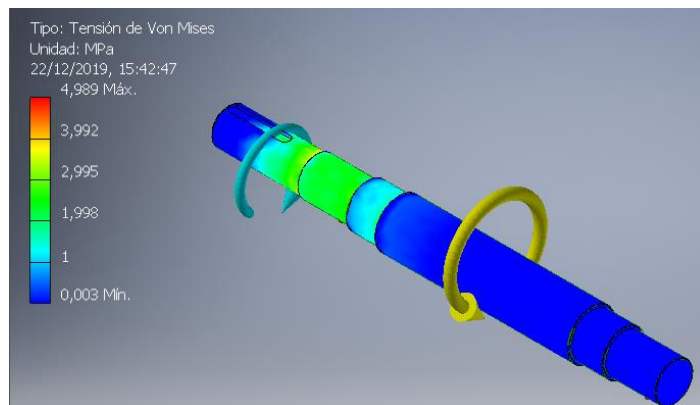


Figura 30. Tensión Von Mises. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

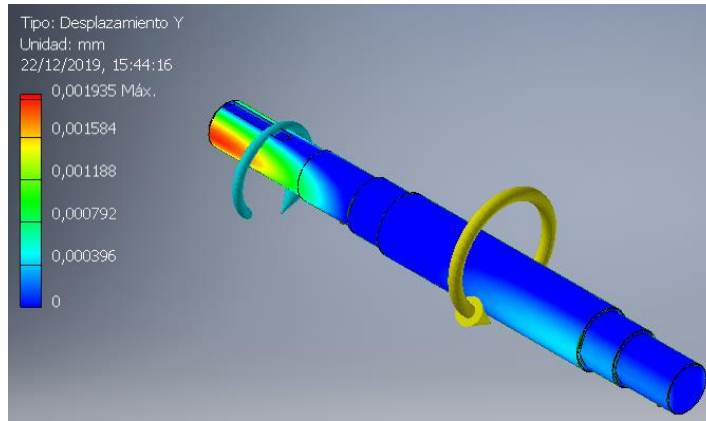


Figura 31. Desplazamiento. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

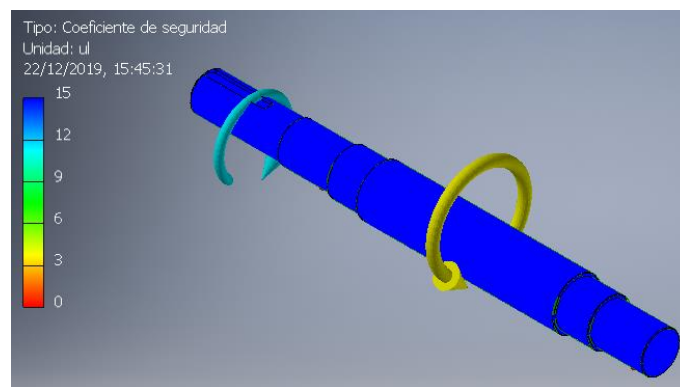


Figura 32. Factor seguridad. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

### 1.6.Potencia del motor

Para establecer la potencia necesaria para triturar un elemento solido de un tamaño a una menor partícula se utilizan las leyes de la molienda, pero estas ecuaciones comúnmente se las utiliza para una granulometría ultrafina medida en nanómetros, lo que genera que no se puedan aplicar para el tipo de grano a obtener en este proyecto, por tal motivo el modelo de Rittinger ( $K_r$ ) para la molienda provee una buena aproximación en lo que respecta a potencia de motores en trituraciones finas las cuales no exceden las 10 ton/h. El uso de esta ecuación da una ventaja al tomar en consideración las dimensiones iniciales y finales de las partículas a molerse.

$$\frac{P}{C} = K_r \left( \frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right) \quad (46)$$

Donde

P= potencia del motor [HP]

C= cantidad de molienda por hora

K<sub>r</sub>= 1.2 (operaciones con sólidos)

D<sub>1</sub>= Dimensión de grano previo a ser molido

D<sub>2</sub>= Dimensión de grano final triturado

$$\frac{P}{0.025 \frac{\text{Ton}}{\text{h}}} = 1.2 \frac{\text{HP} \cdot \text{cm}}{\text{Ton} \cdot \text{h}} \cdot \left( \frac{1}{0.3\text{cm}} - \frac{1}{4.5\text{cm}} \right)$$

$$P = 0.0993HP$$

El valor de la potencia que se obtuvo es muy bajo, por tal motivo se recurre a tomar en cuenta la potencia que se utiliza en máquinas de molienda y con ello optar por la mejor alternativa.

Según los fabricantes de molinos de martillos, para una producción de molienda de 50 a 300 kg/h es necesario utilizar diferentes velocidades, así como potencia dependiendo el tamaño de partícula final que se requiera, siendo una velocidad alta para un granulado más fino y una velocidad baja para un granulado grueso.

Tabla 8. Modelos y características técnicas de molinos de martillos [31]

<b>Motor [HP]</b>	<b>Cámara de molienda [mm]</b>	<b>Número de martillos</b>	<b>Producción [kg/h]</b>	<b>Peso estimado del molino [kg]</b>
3 a 5	150 (6") x 250	16	50 a 300	70
7.5 a 10	250 (10") x 400	24	300 a 500	150
10 a 15	400 (16") x 600	32	500 a 1000	200
15 a 20	500 (20") x 750	50	1000 a 2000	250
20 a 25	600 (24") x 900	72	2000 a 3000	300
30 a 40	1000 (40") x 1500	120	4000 a 5000	500

Según la tabla 8, en un molino de 16 martillos con un motor de 3HP se logra una producción de 50 kg/h, en el caso de este proyecto se requiere solo 25g/h es por tan motivo que se realiza el análisis de potencia sobre producción.

$$\frac{3HP}{50 \frac{kg}{h}} = \frac{P}{25 \frac{kg}{h}}$$

$$P = \frac{3HP \cdot 25 \frac{kg}{h}}{50 \frac{kg}{h}}$$

$$P = 1.5HP$$

El valor de 1.5HP bastaría como mínimo para este proyecto, pero por motivos de pérdidas de potencia al momento de triturar el material se opta por un motor de 2HP.

### 1.7. Análisis de coeficiente de fricción en la tolva

Se analiza el factor de fricción entre la tolva y los trozos de resina poliéster con la finalidad de que no exista la acumulación del material a moler sobre la superficie de la tolva; es por ello que se comprueba este factor con un ángulo de inclinación de 12° para la tolva.

$$\theta = \tan^{-1} \cdot \mu \tag{47}$$

Donde:

$\theta$ =ángulo de inclinación

$\mu$ =Factor de fricción

$$\mu = \tan\theta$$

$$\mu = \tan(12^\circ)$$

$$\mu = 0.21$$



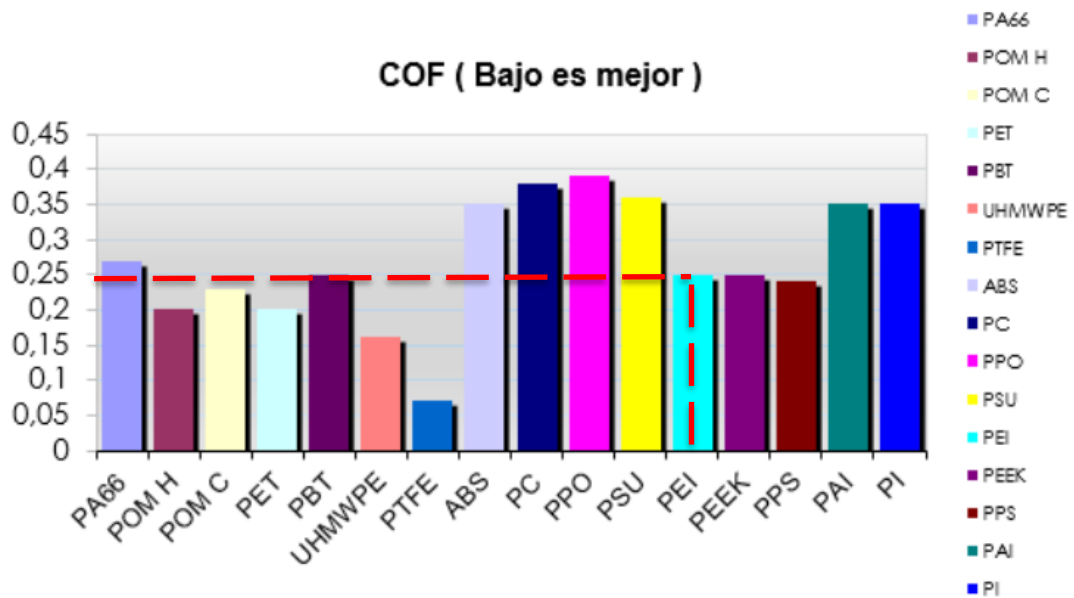


Figura 33. Coeficientes de fricción de algunos polímeros [32]

Con el coeficiente de fricción obtenido presenta una característica similar al coeficiente de fricción que corresponde a la poliamida-imida, el cual es un polímero termoplástico utilizada en moldeados por inyección o compresión y utilizado en una variedad de productos al igual que la resina poliéster [33].

### 1.8. Análisis del bastidor

En esta sección, el diseño de la estructura permite comprobar si el material elegido para la construcción del bastidor de la máquina cuenta con la solidez necesaria para soportar los elementos que constituyen el molino de martillos, así como las diferentes cargas generadas por el propio peso del material o cargas a las que va a ser sometida la estructura, la cual es elaborada de tubo cuadrado de 40mm con un espesor de 3mm.



Figura 34. Estructura del Bastidor. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

Para el análisis y diseño es necesario conocer la esbeltez del tubo, por tal motivo se calcula el radio de giro mediante la ecuación 48:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A_s}} \quad (48)$$

Donde:

$r$  = radio de giro

$A_s$  = área de la sección transversal

$I$  = inercia del elemento

Por tablas de propiedades de los tubos de acero de la dimensión dada establece que los valores de  $A_s = 4.44 \text{ cm}^2$  y de  $I = 10.20 \text{ cm}^4$ .

$$r = \sqrt{\frac{10.20 \text{ cm}^4}{4.44 \text{ cm}^2}}$$

$$r = 1.512 \text{ cm}$$

Una vez determinado el radio de giro del tubo se puede obtener el valor de la esbeltez considerando el factor K que se puede encontrar en la figura 35 para el tipo de apoyo que tiene el tubo que cumple una función de columna.

$$\lambda = \frac{K \cdot L}{r} \tag{49}$$

Donde:

$\lambda$ = esbeltez

L= longitud del tubo

$K = 1$

TABLE C-A-7.1 Approximate Values of Effective Length Factor, K						
Buckled shape of column is shown by dashed line	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Theoretical K value	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Recommended design value when ideal conditions are approximated	0.65	0.80	1.2	1.0	2.1	2.0
End condition code	Rotation fixed and translation fixed Rotation free and translation fixed Rotation fixed and translation free Rotation free and translation free					

Figura 35. Valores teóricos para factor K en columnas [34]

$$\lambda = 1 \cdot \frac{36.5 \text{ cm}}{1.512 \text{ cm}}$$

$$\lambda = 24.14$$

$$f_a = \frac{P}{A}$$

$$f_a = \frac{173.886 \text{ N}}{4.44 \text{ cm}^2}$$

(50)

$$f_a = \frac{173.886 N}{4.44 \times 10^{-4} m^2}$$

$$f_a = 0.395 MPa$$

Si  $\lambda = 24.14$

**Table 4-22  
Available Critical Stress for  
Compression Members**

$F_y = 35$ ksi			$F_y = 36$ ksi			$F_y = 42$ ksi			$F_y = 46$ ksi			$F_y = 50$ ksi		
$\frac{KL}{r}$	$F_{cr}/\Omega_c$	$\phi_c F_{cr}$	$\frac{KL}{r}$	$F_{cr}/\Omega_c$	$\phi_c F_{cr}$	$\frac{KL}{r}$	$F_{cr}/\Omega_c$	$\phi_c F_{cr}$	$\frac{KL}{r}$	$F_{cr}/\Omega_c$	$\phi_c F_{cr}$	$\frac{KL}{r}$	$F_{cr}/\Omega_c$	$\phi_c F_{cr}$
	ksi	ksi		ksi	ksi		ksi	ksi		ksi	ksi		ksi	ksi
1	21.0	31.5	1	21.6	32.4	1	25.1	37.8	1	27.5	41.4	1	29.9	45.0
2	21.0	31.5	2	21.6	32.4	2	25.1	37.8	2	27.5	41.4	2	29.9	45.0
3	20.9	31.5	3	21.5	32.4	3	25.1	37.8	3	27.5	41.4	3	29.9	45.0
4	20.9	31.5	4	21.5	32.4	4	25.1	37.8	4	27.5	41.4	4	29.9	44.9
5	20.9	31.5	5	21.5	32.4	5	25.1	37.7	5	27.5	41.3	5	29.9	44.9
6	20.9	31.4	6	21.5	32.3	6	25.1	37.7	6	27.5	41.3	6	29.9	44.9
7	20.9	31.4	7	21.5	32.3	7	25.1	37.7	7	27.5	41.3	7	29.8	44.8
8	20.9	31.4	8	21.5	32.3	8	25.1	37.7	8	27.4	41.2	8	29.8	44.8
9	20.9	31.4	9	21.5	32.3	9	25.0	37.6	9	27.4	41.2	9	29.8	44.7
10	20.9	31.3	10	21.4	32.2	10	25.0	37.6	10	27.4	41.1	10	29.7	44.7
11	20.8	31.3	11	21.4	32.2	11	25.0	37.5	11	27.3	41.1	11	29.7	44.6
12	20.8	31.3	12	21.4	32.2	12	24.9	37.5	12	27.3	41.0	12	29.6	44.5
13	20.8	31.2	13	21.4	32.1	13	24.9	37.4	13	27.2	40.9	13	29.6	44.4
14	20.7	31.2	14	21.3	32.1	14	24.8	37.3	14	27.2	40.9	14	29.5	44.4
15	20.7	31.1	15	21.3	32.0	15	24.8	37.3	15	27.1	40.8	15	29.5	44.3
16	20.7	31.1	16	21.3	32.0	16	24.8	37.2	16	27.1	40.7	16	29.4	44.2
17	20.7	31.0	17	21.2	31.9	17	24.7	37.1	17	27.0	40.6	17	29.3	44.1
18	20.6	31.0	18	21.2	31.9	18	24.7	37.1	18	27.0	40.5	18	29.2	43.9
19	20.6	30.9	19	21.2	31.8	19	24.6	37.0	19	26.9	40.4	19	29.2	43.8
20	20.5	30.9	20	21.1	31.7	20	24.5	36.9	20	26.8	40.3	20	29.1	43.7
21	20.5	30.8	21	21.1	31.7	21	24.5	36.8	21	26.7	40.2	21	29.0	43.6
22	20.4	30.7	22	21.0	31.6	22	24.4	36.7	22	26.7	40.1	22	28.9	43.4
23	20.4	30.7	23	21.0	31.5	23	24.3	36.6	23	26.6	40.0	23	28.8	43.3
24	20.3	30.6	24	20.9	31.4	24	24.3	36.5	24	26.5	39.8	24	28.7	43.1
25	20.3	30.5	25	20.9	31.4	25	24.2	36.4	25	26.4	39.7	25	28.6	43.0
26	20.2	30.4	26	20.8	31.3	26	24.1	36.3	26	26.3	39.6	26	28.5	42.8
27	20.2	30.3	27	20.7	31.2	27	24.0	36.1	27	26.2	39.4	27	28.4	42.7
28	20.1	30.3	28	20.7	31.1	28	24.0	36.0	28	26.1	39.3	28	28.3	42.5
29	20.1	30.2	29	20.6	31.0	29	23.9	35.9	29	26.0	39.1	29	28.2	42.3
30	20.0	30.1	30	20.6	30.9	30	23.8	35.8	30	25.9	39.0	30	28.0	42.1
31	20.0	30.0	31	20.5	30.8	31	23.7	35.6	31	25.8	38.8	31	27.9	41.9
32	19.9	29.9	32	20.4	30.7	32	23.6	35.5	32	25.7	38.6	32	27.8	41.8
33	19.8	29.8	33	20.4	30.6	33	23.5	35.4	33	25.6	38.5	33	27.7	41.6
34	19.8	29.7	34	20.3	30.5	34	23.4	35.2	34	25.5	38.3	34	27.5	41.4
35	19.7	29.6	35	20.2	30.4	35	23.3	35.1	35	25.4	38.1	35	27.4	41.2
36	19.6	29.5	36	20.1	30.3	36	23.2	34.9	36	25.2	37.9	36	27.2	40.9
37	19.5	29.4	37	20.1	30.1	37	23.1	34.8	37	25.1	37.8	37	27.1	40.7
38	19.5	29.3	38	20.0	30.0	38	23.0	34.6	38	25.0	37.6	38	26.9	40.5
39	19.4	29.1	39	19.9	29.9	39	22.9	34.4	39	24.9	37.4	39	26.8	40.3
40	19.3	29.0	40	19.8	29.8	40	22.8	34.3	40	24.7	37.2	40	26.6	40.0

ASD      LRFD  
 $\Omega_c = 1.67$        $\phi_c = 0.90$

Figura 36. Valores teóricos para factor K en columnas. [34]

$$\therefore f_a = 20.35 Ksi$$

$$f_a = 140.30 MPa$$

El límite de fluencia del tubo cuadrado de acero estructural con especificaciones ASTM A500 o AISI A500 posee un valor de 270 MPa.

$$S_y = 270 MPa$$

$$f_{b_x} = \frac{M_x}{S_y}$$

$$f_{b_x} = \frac{18.95 Nm}{4.16 cm^3}$$

$$f_{b_x} = \frac{18.95 Nm}{4.16 \times 10^{-4} m}$$

$$f_{b_x} = 0.046 MPa$$

$$f_{b_x} = 0.66 \cdot S_y$$

$$f_{b_x} = 0.66 \cdot 270 MPa$$

$$f_{b_x} = 178.2 MPa$$

### 1.8.1. Cálculo de viga y columna del bastidor

#### a. Viga 1

Este elemento soporta el peso de las carcasas superior e inferior del molino de martillos, es por ello que las reacciones y esfuerzos se analizan por el método de la AISC [34].

13. BEAM FIXED AT ONE END, SUPPORTED AT OTHER — CONCENTRATED LOAD AT CENTER

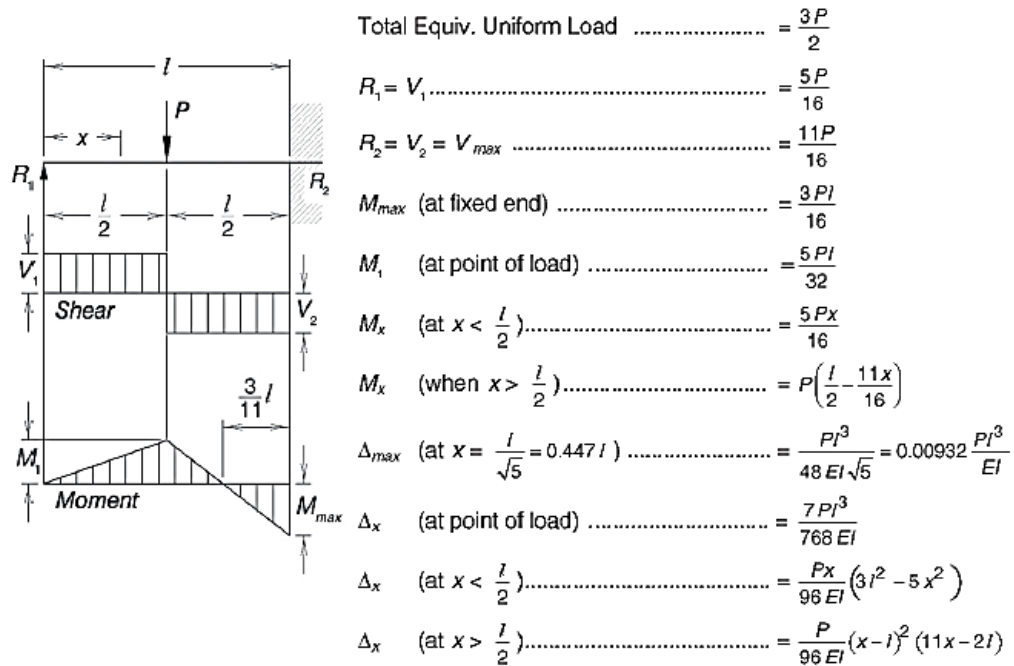


Figura 37. Diagramas y fórmulas de vigas AISC-caso 13 [34]

$$R_1 = \frac{5 \cdot P}{16} \tag{51}$$

$$R_1 = \frac{5 \cdot (253.08) N}{16}$$

$$R_1 = 79.08 N$$

$$R_2 = \frac{11 \cdot P}{16} \tag{52}$$

$$R_2 = \frac{11 \cdot (253.08) N}{16}$$

$$R_2 = 173.99 N$$

$$M_1 = \frac{5 \cdot P \cdot L}{32} \tag{53}$$

$$M_1 = \frac{5 \cdot (253.08 N) \cdot (0.24 m)}{32}$$

$$M_1 = 9.5 \text{ Nm}$$

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{3 \cdot P \cdot L}{16}$$

(54)

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{3 \cdot (253.08 \text{ N}) \cdot (0.24 \text{ m})}{16}$$

$$M_{m\acute{a}x} = 11.388 \text{ Nm}$$

- **Análisis a flexión**

$$f_b \leq f_b$$

$$f_{b_x} = 0.66 \cdot S_y$$

$$f_{b_x} = 0.66 \cdot 270 \text{ MPa}$$

$$f_{b_x} = 178.2 \text{ MPa}$$

$$f_{b_x} = \frac{M_x}{S_y}$$

$$f_{b_x} = \frac{12.261 \text{ Nm}}{4.16 \text{ cm}^3}$$

$$f_{b_x} = \frac{12.261 \text{ Nm}}{4.16 \times 10^{-4} \text{ m}}$$

$$f_{b_x} = 0.02947 \text{ MPa}$$

$$f_a = \frac{P}{A}$$

$$f_a = \frac{253.08 \text{ N}}{4.44 \text{ cm}^2}$$

$$f_a = \frac{253.08 \text{ N}}{4.44 \times 10^{-4} \text{ m}^2}$$

$$f_a = 0.57 \text{ MPa}$$

$$\lambda = 1 \cdot \frac{24 \text{ cm}}{1.512 \text{ cm}}$$

$$\lambda = 15.87$$

$$f_a = 20.83 \text{ KSI}$$

$$f_a = 143.61 \text{ MPa}$$

**b. Viga 2**

**7. SIMPLE BEAM — CONCENTRATED LOAD AT CENTER**

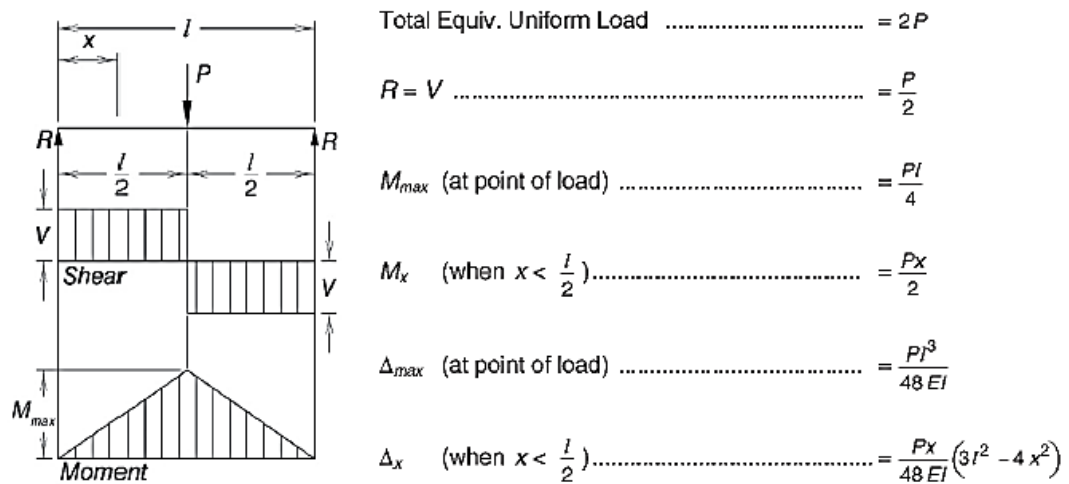


Figura 38. Diagramas y fórmulas de vigas AISC-caso 7 [34]

$$R = \frac{P}{2} \tag{55}$$

$$R_1 = \frac{(51.012) N}{2}$$

$$R_1 = 25.5N$$

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{P \cdot L}{4} \tag{56}$$

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{51012 \cdot (0.45m)}{4}$$

$$M_{m\acute{a}x} = 5.73 \text{ Nm}$$



- **Análisis a flexión**

$$f_b \leq f_b$$

$$f_{b_x} = 0.66 \cdot S_y$$

$$f_{b_x} = 0.66 \cdot 270 \text{ MPa}$$

$$f_{b_x} = 178.2 \text{ MPa}$$

$$f_{b_x} = \frac{45.03 \text{ Nm}}{4.16 \text{ cm}^3}$$

$$f_{b_x} = \frac{45.03 \text{ Nm}}{4.16 \times 10^{-4} \text{ m}}$$

$$f_{b_x} = 0.011 \text{ MPa}$$

$$f_a = \frac{P}{A}$$

$$f_a = \frac{51.012 \text{ N}}{4.44 \text{ cm}^2}$$

$$f_a = \frac{51.012 \text{ N}}{4.44 \times 10^{-4} \text{ m}^2}$$

$$f_a = 0.115 \text{ MPa}$$

$$\lambda = 1 \cdot \frac{45 \text{ cm}}{1.512 \text{ cm}}$$

$$\lambda = 29.76$$

$$f_a = 19.94 \text{ KSI}$$

$$f_a = 137.48 \text{ MPa}$$

El bastidor para el molino de martillos presenta un 60% de sus uniones entre elementos a través de soldadura, por tal motivo, al comprobar que este elemento soporta las cargas en tensión y fluencia con los esfuerzos obtenidos, se concluye que la estructura no presentará fallas o deformaciones por la carga a la que está sometida, es por ello que se ocupan electrodos E-60xx siendo estos suficientes para cumplir con la unión de los elementos que conforman el bastidor.

**Tabla 9-3**

Propiedades mínimas del metal de aporte

Número de electrodo AWS*	Resistencia a la tensión, kpsi (MPa)	Resistencia a la fluencia, kpsi (MPa)	Elongación porcentual
E60xx	62 (427)	50 (345)	17-25
E70xx	70 (482)	57 (393)	22
E80xx	80 (551)	67 (462)	19
E90xx	90 (620)	77 (531)	14-17
E100xx	100 (689)	87 (600)	13-16
E120xx	120 (827)	107 (737)	14

\*Sistema de numeración del código de especificaciones de la American Welding Society (AWS) para electrodos. En este sistema se usa como prefijo la letra E, en un sistema de numeración de cuatro o cinco dígitos en el cual los primeros dos o tres números designan la resistencia aproximada a la tensión. El último dígito incluye variables en la técnica de soldadura, como la fuente de corriente. El penúltimo dígito indica la posición de la soldadura, por ejemplo, plana, vertical o sobre la cabeza. El conjunto completo de especificaciones se puede obtener solicitándolo a la AWS.

Figura 39. Propiedades mínimas del metal de aporte de electrodos [36].

La tracción es un factor que interviene en este proceso, dando lugar a un esfuerzo o carga media en la garganta efectiva de la soldadura, con ello se establece el filete de soldadura en las partes constituyentes del bastidor.

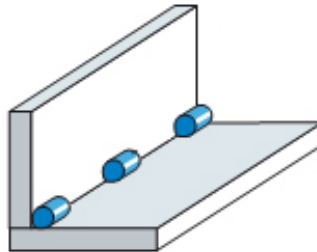


Figura 40. Soldadura en ángulo [34]

La garganta de soldadura se obtiene en función del cateto del cordón de soldadura y el ángulo  $\theta$  con valor de  $45^\circ$  [25].

$$t = \frac{h}{\cos \theta + \operatorname{sen} \theta} \quad (57)$$

Donde:

$t$  = garganta

$h$  = cateto del cordón de soldadura

$$t = \frac{5 \times 10^{-3}}{\cos(45^\circ) + \operatorname{sen}(45^\circ)}$$

$$t = 3.53 \text{ mm}$$

La unión entre los elementos que conforman el bastidor es conocido como soldadura de filete en el que el valor de la garganta obtenida es de 3.53mm para un cordón de soldadura con catetos de 5mm con una longitud de 40mm.

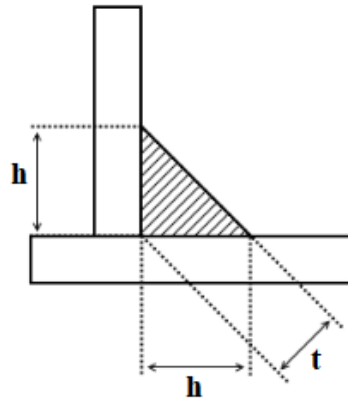


Figura 41. Área de garganta y altura de catetos de soldadura [35].

### c. Esfuerzo promedio en la soldadura

Para la longitud de soldadura ( $L=40\text{mm}$ ) se consideró las dimensiones que tiene el tubo cuadrado utilizado en la conformación del bastidor el cual posee las dimensiones de  $40 \times 3\text{mm}$  y con ello se procede a calcular el esfuerzo promedio de la soldadura.

$$\tau = \frac{F}{h \cdot L} \tag{58}$$

Donde:

$\tau$  = esfuerzo promedio en la soldadura

$$\tau = \frac{173.99 \text{ N}}{5 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot 40 \times 10^{-3} \text{ m}}$$

$$\tau = 0.87 \text{ MPa}$$

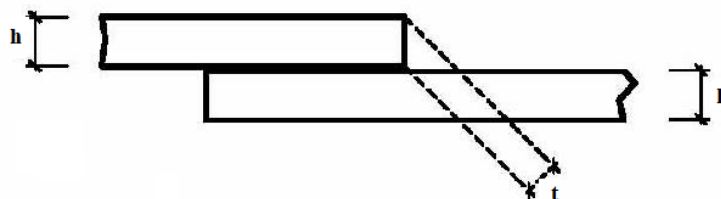


Figura 42. Valores límites de garganta de una soldadura en ángulo [36].

### 1.8.2. Esfuerzo de la soldadura

Consiste en calcular la carga o peso que pueden resistir las uniones soldadas, analizando principalmente el bastidor (armazón) ya que este es el encargado de soportar todas las partes que constituye la cámara de molienda y demás elementos mecánicos.

$$\sigma = \frac{P}{h \cdot L_w} \quad (59)$$

Donde:

$L_w$  = longitud de soldadura

P = carga aplicada

h = cateto de soldadura

Es necesario conocer la carga soportada por el bastidor, dicha carga es la suma de todos los elementos que se encuentran sobre el mismo.

Tabla 9. Peso total de los elementos constituyentes en cámara de trituración

ELEMENTOS	PESO (kg)	CANTIDAD	PESO TOTAL (kg)
Bocines de martillos	0,021	20	0.42
Martillos	0,147	16	2.352
Disco porta martillos	1,399	2	2.798
Ejes secundarios	0,279	4	1.116
Eje principal	2,482	1	2.482
Motor	20	1	20
Otros	10	1	10
Total =			39.168 kg

Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

Los 39.168 kg corresponden al peso total que soporta la estructura, aunque se lo debe tomar como una carga o fuerza que afecta al bastidor, es por ello que se multiplica por la gravedad y se tiene el valor  $P=384.238N$  y con ello se procede a reemplazar los valores en la ecuación 33.

$$\sigma = \frac{384.238 N}{4.5mm \cdot 38mm}$$

$$\sigma = 2.24 \frac{N}{mm^2}$$

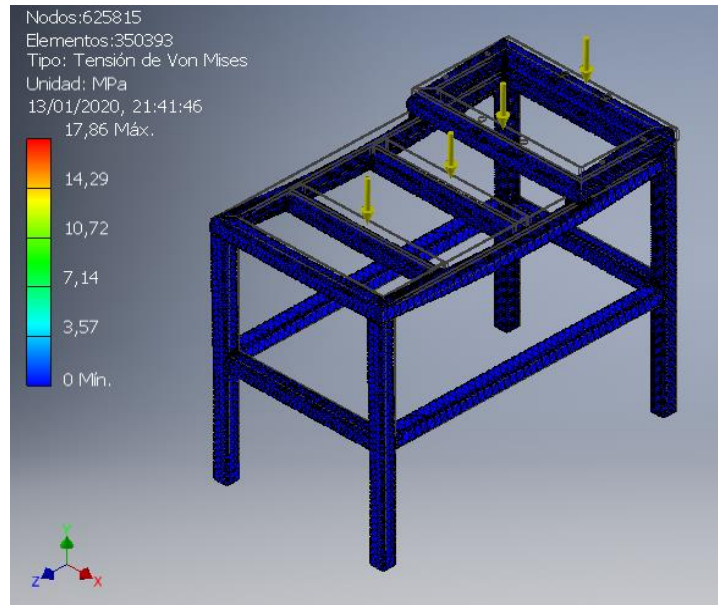


Figura 43. Tensión de Von mises. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

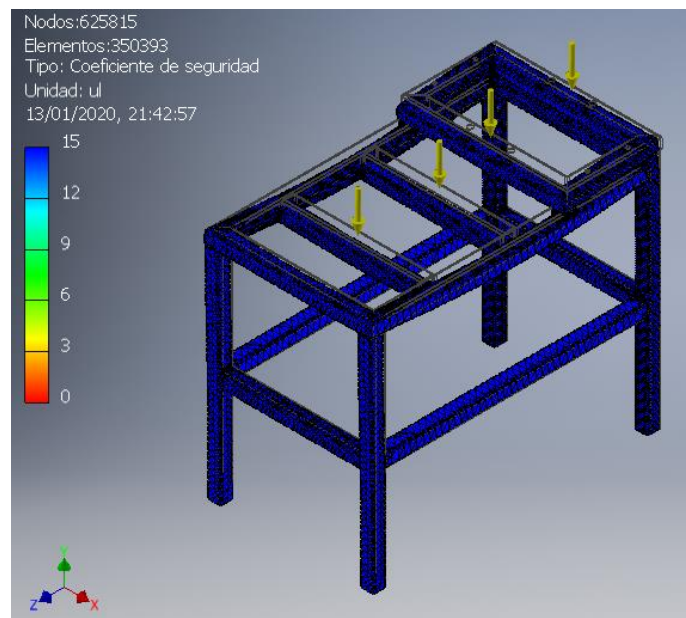


Figura 44. Factor seguridad. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

### 1.9. Análisis de pernos de la cámara de molienda y bastidor

Por la disposición que tienen los pernos entre el molino al unirse la cámara de trituración con el bastidor se analizan los pernos con grado 6.8 ya que estos están localizados en una zona crítica mencionada anteriormente, es por ello que en la tabla 10 se visualizan los datos de este tipo de elemento de fijación.

Tabla 10. Tipos de pernos [36]

TIPO	PERNOS ORDINARIOS			PERNOS DE ALTA RESISTENCIA	
	4.6	5.6	6.8	8.8	10.9
Límite de Fluencia ( $S_y$ ) $f_{yb}$ (N/mm <sup>2</sup> )	240	300	480	640	900
Resistencia a la tracción $f_{ub}$ (N/mm <sup>2</sup> )	400	500	600	800	1000

$$F_v, Rd = \frac{0.6 \cdot f_{ub} \cdot A_{Sp}}{\gamma Mb} \quad (60)$$

Donde:

$F_v, Rd$  = resistencia a cortante

$f_{ub}$  = tensión última de perno

$A_{Sp}$  = superficie resistente a tensión de perno (anexo 2)

$\gamma Mb$  = factor parcial de seguridad

El coeficiente parcial de seguridad ( $\gamma Mb$ ) representa un coeficiente de resistencia de 1.25 para este tipo de elementos [36].

$$F_v, Rd = \frac{0.6 \cdot 600 \frac{N}{mm^2} \cdot 157 mm^2}{1.25}$$

$$F_v, Rd = 45216 N$$

Cada perno tiene una resistencia a cortante de 45.216 KN, es por ello que la resistencia total a cortante es en función de los 4 pernos.

$$F_{v,Rd} = 45.216 \text{ KN} \cdot 4$$

$$F_{v,Rd} = F = 180.864 \text{ KN}$$

$$F = 180.864 \text{ KN}$$

En este análisis se establece que el perno seleccionado soporta el esfuerzo a cortante, dando un total de 181 KN que resisten los pernos.

Para el obtener del esfuerzo axial ( $\sigma$ ) se utilizan los parámetros del perno M16, así como la fuerza  $F= 180.864\text{N}$  [36].

$$\sigma = \frac{F}{A_{perno}}$$
$$\sigma = \frac{F}{\pi \cdot (d_r)^2}$$

(61)

$$\sigma = \frac{180.864 \times 10^3 \text{ N}}{\pi \cdot (0.016\text{m} - 0.002\text{m})^2}$$

$$\sigma = 293 \text{ MPa}$$

El esfuerzo axial que tienen que soportar los pernos es de 293 MPa, los cuales no exceden el valor del límite de fluencia correspondiente a los pernos de clase 6.8 que poseen un  $S_y$  de 480MPa, concluyendo que los pernos seleccionados presentan una buena resistencia a las fuerzas y cargas ejercidas.

## CAPÍTULO III

### COSTOS

#### 2.1. Análisis costo

A continuación, se analizan los costos que conllevan el diseño, la elaboración e instalación del “MOLINO DE MARTILLOS PARA LA REUTILIZACIÓN DE RESINA”, con la finalidad de determinar adecuadamente los valores de cada uno de los componentes empleados para su fabricación.

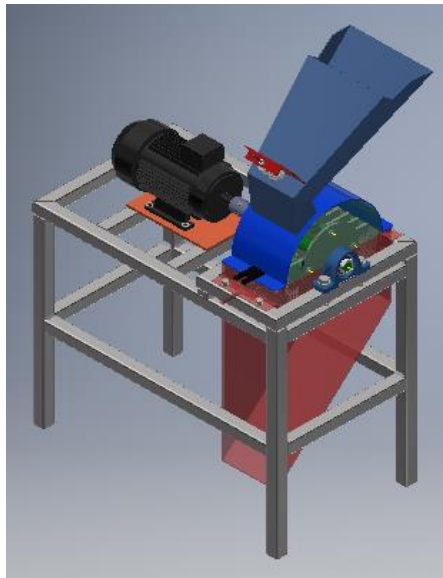


Figura 45. Molino de martillos. Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

Los costos que intervienen en este caso son dos: Costos directos y costos indirectos.

Tabla 11. Costos directos y costos indirectos

<b>Tipo de costo</b>	<b>Descripción</b>
Directo	Materiales
	Mecanizado
	Mano de obra
Indirecto	Ingeniería
	Gastos
	imprevistos

Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig



## 2.2.Costo directo

Se considera para este costo los materiales a utilizarse, así como los costes de producción (máquinas, obreros, ingeniería).

Tabla 12. Precio de materiales usados

Nº	Artículo	Cantidad	Precio unitario	V.Total
1	Eje de acero de transmisión (38mm x 360mm)	1	\$8,50	\$8,5
2	Eje de acero de transmisión (16mm x 1m)	1	\$4,50	\$4,5
3	Tubo cuadrado (40mm x 3mm x 6m)	2	\$16,07	\$32,14
4	Placa de acero (105mm x 28mm x 8mm)	16	\$1,50	\$24
5	Plancha perforada (185mm x 3mm x 600mm)	1	\$6,50	\$6,50
6	Placa de acero (280 x 200 x 12mm) base motor	1	\$8,06	\$8,06
7	Placa (520 x 190 x 3mm)	1	\$3,39	\$3,39
8	Placa (1036 x 185 x 3mm)	1	\$6,58	\$6,58
9	Placa (790 x 185 x 3mm)	1	\$5,02	\$5,02
10	Placa (500 x 185 x 3mm)	1	\$3,17	\$3,17
11	Placa (790 x 400 x3mm)	2	\$10,84	\$21,69
12	Placa (550 x 650 x3mm)	1	\$4,25	\$4,25
<b>SUB TOTAL:</b>				\$127.80
<b>IVA 12%:</b>				\$15.33
<b>TOTAL:</b>				\$143.13

Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

Tabla 13. Precio de componentes estandarizados

Nº	Artículo	Cantidad	Precio unitario	V.Total
1	Perno cabeza hexagonal arandela plana, arandela presión, tuerca 3/8	8	\$0.60	\$4.80
2	Perno cabeza hexagonal arandela plana, arandela presión, tuerca 9/16	2	\$1.50	\$3.00
3	Chumacera piso Ø 30mm x	2	\$7,30	\$14,60
4	Acople	1	\$97.45	\$97.45
5	Motor eléctrico	1	\$172	\$172
6	Botonera	1	\$6.60	\$6.60
7	Cable flexible	1	\$3.00	\$3.00
8	Amarras plásticas	6	\$0.25	\$1.50
9	Taípe	1	\$0.50	\$0.50
10	Cable	1	\$3.00	\$3.00
<b>SUB TOTAL:</b>				\$306.45
<b>IVA 12%:</b>				\$36.774
<b>TOTAL:</b>				\$343.22

Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

### 2.2.1. Análisis tiempo de uso de máquinas

Para manufacturar las partes que conforman el molino se utilizan diferentes máquinas herramientas como torno, fresadora, dobladora, entre otros.

Tabla 14. Total, de horas de máquina utilizadas en la construcción de las partes del molino de martillos

Descripción	Cant.	Tiempo de uso de máquinas [h]								
		Cizalla	Amoladora	Torno	Fresa	Taladro	Baroladora	Soldadora	Compresor	Oxicorte
Martillos	16	0	0	0	4	1	0	0	0	0

Eje secundario	4	0	0	2	0	0	0	0.75	0	0
Eje principal	1	0	0	3	0,75	0	0	0	0	0
Bocines	20	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Disco porta martillos	2	0	0	3	0	1	0	0.25	0	0.25
Carcasa superior	1	1	2	0	0.75	1	0.50	0.75	0.5	0.25
Tolva	1	0,75	0.75	0	0	0	0	1.5	0.50	0.25
Carcasa inferior	1	2	0,75	0	0	0.5	0	1.25	0.50	0.25
Criba	1	0.25	0	0	0	0	0.25	0	0	0
Bastidor	1	0	1.5	0	0	0.75	0	4	1	0
<b>TOTAL, HORAS:</b>	4	5	9	5,5	4,25	0,75	8,5	2,5	1	

Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

### 2.2.2. Costo de mecanizado

Para manufacturar las partes que conforman el molino se utilizan diferentes máquinas herramientas como torno, fresadora, dobladora, entre otros.

Tabla 15. Costos total hora máquina

<b>Tipo</b>	<b>Horas empleadas</b>	<b>Precio por hora máquina</b>	<b>Costo Total</b>
Cizalla	4	\$5	\$20
Amoladora	5	\$5	\$25
Torno	9	\$10	\$90
Fresadora	5.5	\$10	\$55
Taladradora	4.25	\$8	\$34
Baroladora	0.75	\$60	\$45
Soldadora	8.5	\$5	\$42,5
Compresor	2.5	\$3	\$7,5
Oxicorte	1	\$8	\$8

	<b>SUB TOTAL:</b>	\$327
	<b>IVA 12%:</b>	\$39.24
	<b>TOTAL:</b>	\$366.24

Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

### 2.3.Costo indirecto

A este costo le corresponde diferentes factores como diseño, gastos provisionales, movilización, entre otros que no afectan en la construcción del molino.

Tabla 16. Costos de elementos indirectos

<b>Descripción</b>	<b>Costo Total (USD)</b>
Costo de ingeniería 30 Horas a 20 dólares cada hora	600
Gastos imprevistos	300

Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

### 2.4.Costo total

En este punto se realiza una suma de los costos obtenidos anteriormente los cuales permitirán establecer un valor total de la máquina.

Tabla 17. Costos totales

<b>Tipo</b>	<b>Definición</b>	<b>Costo Total</b>
	Materiales, componentes estandarizados	\$486.35
Directo	Hora de uso máquina	\$366.24
	Coste obreros	\$500
Indirecto	Coste ingenieril (30 Horas a 20 dólares c./hora)	\$600
	Gastos provisionales	\$300
<b>TOTAL:</b>		<b>\$2252.59</b>

Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

### 2.5.Retorno de inversión

Se establece el valor de retorno de la inversión mediante los flujos de caja y el porcentaje de retorno. Es por ello que la suma de los costos anteriormente obtenidos

establece un valor total de la máquina. Por tal motivo se estima un tiempo de recuperación de la inversión en 12 meses (número de periodos) teniendo una tasa de descuento del 10% (i)

- **Fondo neto efectivo (FNE)**

Este fondo se encuentra dividido en 12 meses correspondiente al año fiscal descrito en la tabla 18.

Tabla 18. Ingresos del taller por mese.

<b>Periodo</b>	<b>Fondo por periodo</b>
0	\$-2252.59
1	\$400
2	\$250
3	\$250
4	\$800
5	\$380
6	\$800
7	\$360
8	\$360
9	\$300
10	\$300
11	\$500
12	\$1100

Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

Como se puede apreciar en la tabla 18, los ingresos generados por el taller artesanal mensualmente varían por temporada, siendo los meses con mayor demanda de imágenes y artesanías en abril y diciembre generando un aumento en los ingresos de caja.

- **Valor actual neto (VAN)**

Este valor se determina mediante los valores de flujos de caja los cuales se muestran en la tabla 19, el valor inicial de inversión del molino es de \$2252.59, dicho valor se analiza considerando un pago progresivo durante el periodo de 12 meses del cual se

puede obtener indicadores positivos, negativos o nulos, el valor del fondo neto efectivo (FNE) no es otra cosa más que una ganancia que se tiene al final de cada mes después de haber realizado pagos a trabajadores, proveedores, servicios básicos, entre otras palabras es el capital inicial, a esto se suma el interés los cuales suman un monto al final de cada periodo.

Tabla 19. Obtención del VAN por periodo y total

<b>Periodo</b>	<b>Fondo neto efectivo</b>	<b>(1+i).n</b>	<b>VAN</b>
0	-2252,59		-2252,59
1	400	1,10	363,64
2	250	1,21	206,61
3	250	1,33	187,83
4	800	1,4641	546,41
5	380	1,6105	235,95
6	800	1,7716	451,58
7	360	1,9487	184,74
8	360	2,1436	167,94
9	300	2,3579	127,23
10	300	2,5937	115,66
11	500	2,8531	175,25
12	1100	3,1384	350,49
<b>Total</b>			<b>860,74</b>

Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

Finalmente, el VAN no es más que la relación entre el fondo neto efectivo y los intereses y es por ellos que si el VAN es 0 o superior a cero indica que el proyecto es viable ya que se representa un retorno de la inversión, pero en caso contrario si el VAN es negativo representaría pérdidas por ende el proyecto o inversión no es viable, siendo este caso en particular viable para su ejecución.

#### - **Tasa interna de rendimiento (TIR)**

La tasa de rentabilidad que promete este proyecto es apartir el TIR, el cual es la sumatoria de todos los valores obtenidos anteriormente en el VAN, los cuales dan un panorama acerca del tiempo que se necesitará para el retorno de la inversión.

Tabla 20. Tasa de descuento y VAN

<b>Tasa</b>	<b>Valor actual neto</b>
10%	\$363,64
10%	\$206,61
10 %	\$187,83
10 %	\$546,41
10 %	\$235,95
10 %	\$451,58
10 %	\$184,74
10 %	\$167,94
10 %	\$127,23
10 %	\$115,66
10 %	\$175,25
10 %	\$350,49
<b>TIR =</b>	<b>\$3.113,33</b>

Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

El valor final para el TIR es de \$ 3.113,3 el cual es mayor al costo inicial de la inversión de \$2252,59 avalando que el dinero invertido será recuperado antes del periodo los 12 meses previstos inicialmente; es por tal motivo que para conocer el tiempo real del retorno de la inversión es necesario establecer un análisis del periodo de recuperación (Payback Period).

**- Período medio de maduración (Payback period)**

Es el periodo de tiempo que toma recuperar la inversión de la adquisición de la máquina, en el cual se relaciona entre los valores del VAN y los periodos de recuperación, es decir al adquirir el molino de martillos la empresa tiene un egreso en su caja de \$2252, para el primer mes la empresa cancela \$364 dejando una deuda de \$1888, el proceso se repite con los respectivos valores de VAN por periodo hasta concluir a los 12 meses.

Tabla 21. Fondo neto efectivo (FNE)

<b>Mes</b>	<b>VAN</b>	<b>Entrada de efectivo acumulado</b>
0	(\$-2252)	\$-2252
1	\$364	\$-1888
2	\$207	\$-1681
3	\$188	\$-1493
4	\$546	\$-947
5	\$236	\$-711
6	\$452	\$-259
7	\$185	\$-74
8	\$168	\$94
9	\$127	\$221
10	\$116	\$337
11	\$175	\$512
12	\$350	\$862

Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

Según la tabla 21 se observa que desde el octavo mes los valores en el periodo de recuperación representan ganancias para la empresa, dando por entendido que la inversión en este proyecto se termina de pagar en séptimo mes, siendo optima la implementación de este proyecto en el taller artesanal.

### **3. Resultados de las pruebas de molienda**

Para este análisis de resultados se toman 3 grupos de resina de diferente espesor con un mismo peso inicial, los cuales tiene un tiempo de trituración distinto debido a que se necesitará un mayor o menor número de impactos para lograr fragmentar la resina y obtener la granulometría estimada de al menos 3mm aproximadamente.

#### **3.1. Análisis de muestras**

En la tabla 22 se puede apreciar los tiempos necesarios para triturar el mismo peso de resina, aunque cada trozo con diferente espesor.



Tabla 22. Valores de molienda con diferentes espesores de resina

Nº de Muestra	Espesor [mm]	Peso inicial [kg]	Volumen inicial [cm <sup>3</sup> ]	Tiempo de trituración [min]	Volumen final [cm <sup>3</sup> ]	Peso final [kg]
1	8	2,5	7680	5	4224	2,5
2	5	2,5	12000	4	6600	2,5
3	2	2,5	22500	1	12375	2,5

Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

Como se puede constatar la cantidad de resina que ingresa es la misma que sale, aunque puede presentar pérdidas muy pequeñas debido a la generación de polvo, en tanto al volumen se comprueba una disminución de alrededor del 55% respecto al volumen que ocuparía previo a ser fragmentado. El tiempo utilizado en este caso es de 5 minutos hasta completar la molienda de todo el material de espesor de 8 mm

Este caso en particular es experimentado con las demás muestras de resina de menor espesor presentando un comportamiento similar y una disminución de tiempo usando un mismo peso en todos los casos.

## CONCLUSIONES

Se estudió la producción actual del taller artesanal donde se implementó el molino de martillos, en el cual se utiliza la resina poliéster como materia prima para la manufactura mensual de 40 imágenes grandes y 400 pequeñas aproximadamente, utilizando 80 klb de resina respectivamente en cada caso, de toda la producción generada se presenta un desperdicio de al menos un 10% del material utilizado, esto se da por los distintos procesos de fabricación que experimenta cada figura.

Para la reutilización de la resina se efectuó un análisis comparativo para la selección de un molino que permita fraccionar los trozos sobrantes a una determinada granulometría y con ello aprovecharlo para su posterior utilización en el relleno de nuevas esculturas, por tal motivo la comparación entre un molino de rodillos y uno de martillos arrojo como resultados 25 y 30 puntos respectivamente, siendo de la mejor opción el molino de martillos.

Los elementos que constituyen la cámara de molienda usados en la construcción de esta máquina se eligieron través de un estudio y análisis referentes a los diversos esfuerzos o cargas que soportan, es por ello que para los martillos el esfuerzo a tracción y cortante no sobrepasan los 5 MPa manteniéndose por debajo al límite de fluencia del material (220 MPa) y por tal motivo se presenta un valor alto en el factor de seguridad ( $\eta=49$ ) el cual se justifica debido a que el nivel producción máximo de esta máquina es de 25kg/h siendo este un valor relativamente bajo a comparación de otros molinos.

El eje principal experimenta esfuerzos a torsión y flexión, es por ello que al comparar el  $S_y$  del acero (370 MPa) con el esfuerzo equivalente obtenido (4.26 MPa) se confirma que el elemento sometido a los diferentes esfuerzos no sufre fallas por fatiga, torsión o flexión.

Se comprobó que el valor teórico del eje puede tener un diámetro de al menos 12mm, por tal motivo, por cuestiones de seguridad y vida útil de la máquina se optó por un eje con un diámetro mínimo de 28 mm, el cual presenta un excelente factor de seguridad resistiendo cargas y altas revoluciones a las que va a estar sometido.

Se comprueba los tiempos aproximados de trituración mediante pruebas de molido con trozos de diferente espesor desde los 2mm hasta los 8mm teniendo como un tiempo entre los 30 minutos hasta unos 55 minutos respectivamente, confirmando el correcto funcionamiento y cumplimiento con la capacidad requerida de 25kg/h.

## RECOMENDACIONES

Cada componente del molino en lo que respecta su diseño, es fundamental definir el tipo de material a triturar ya que no todos los materiales presentan las mismas características y podrían provocar el desgaste o daño prematuro de las piezas internas en la cámara de trituración.

Considerar que esta máquina presenta un parámetro de trabajo con voltaje de 110V y hasta 27.6 A en su intensidad de corriente, por lo tal motivo la red eléctrica donde va a ser instalada esta máquina deberá cumplir con estos parámetros con finalidad de evitar daños en el motor.

Se pueden instalar sensores inductivos en el molino de martillos con la finalidad de ayudar al operador a detener la máquina en caso de presentarse algún trabamiento, además la instalación de estos dispositivos representaría un costo adicional al presupuesto destinado en la construcción del proyecto.

Para el uso del molino se recomienda mantener el molino encendido al menos 30 segundos con la cámara vacía, posteriormente en el momento de trituración supervisar el proceso hasta que se haya terminado de triturar todos los trozos de resina para poder apagarlo posteriormente.

Se deben seguir las instrucciones de funcionamiento y mantenimiento del molino de martillos con la finalidad de evitar accidentes o daños en la máquina, estos instructivos se encuentran detallados en la sección de anexos.

Revisar el estado de los martillos del molino mediante un cronograma de mantenimiento o cuando se utilice la máquina por periodos de tiempo prolongados con el fin de garantizar su vida útil.

En caso de encontrar algún elemento desgastado o en malas condiciones reemplazarlo por uno con similares características para evitar daños en el equipo o accidentes en su manipulación.

Limpiar la máquina después de su uso, procurando eliminar residuos o polvo de partes móviles o giratorias con la finalidad de evitar atascamientos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Bai, L. Zhu, G. Peng, D. Li y L. An, «Estimation and prediction of plastic waste annual input into the sea from China,» vol. 37, pp. 26-39, 2018.
- [2] . J. R. B. Chávez, L. L. Mendiola y R. Narayanasamy, «Revisión sobre el uso de residuos de mármol, para elaborar materiales para la construcción,» *Revista Arquitectura e Ingeniería*, nº 4, 2015.
- [3] H. Infante y M. Robles, «Sistema de gestión ambiental en las empresas productoras de resinas termoplásticas ¿Se Cumplen los Requisitos?,» *TELOS. Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales*, vol. X, nº 2, pp. 277 - 289, 2008.
- [4] J. X. Ramis, Estudio de la eficiencia de sistemas químicos del curado de resinas de poliéster insaturado, Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya, 1994.
- [5] A. M. Gomis, «Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades,» *Universidad de Alicante*, Vols. %1 de %217-18, 2012.
- [6] W. L. McCabe, P. Harriott. y J. C. Smith, Operaciones unitarias en Ingeniería Química, Mcgraw-Hill, 2009.
- [7] A. Gil, «Resinas de poliéster, Guías de manejo,» EAFIT, Bogotá, 2012.
- [8] Representaciones PQ, «Resinas de poliester y vinilester,» 2014. [En línea]. Available: <https://docplayer.es/11311543-Resinas-de-poliester-y-vinilester.html>. [Último acceso: 13 Mayo 2019].
- [9] EPOXY, «Manejo seguro de resinas epoxi,» PlasticsEurope, Washington, DC, 2017.
- [10] D. F. Gaitán Hernández, «Diseño de un molino triturador para polímeros termoplásticos para la empresa Industria Recuplast S.A.S.,» Universidad Libre, Bogotá, 2018.
- [11] J. Dra. Piña y V. Dra. Bucalá, «Universidad Nacional del Sur,» 5 Octubre 2013. [En línea]. Available: <https://www.criba.edu.ar/cinetica/solidos/Capitulo9.pdf>. [Último acceso: 8 Mayo 2019].
- [12] D. M. César Pleguezuelos , «Planificación del Mantenimiento de un Molino de Rodillos en una Industria dedicada la Fabricación de Carbonato de Estroncio,» Industriales ETSII UPCT, Cartagena, 2013.
- [13] Marcus, «Herramienta Electrica,» 17 Octubre 2016. [En línea]. Available: <http://electricaherramienta.blogspot.com/2016/10/trituradora-de-rodillos.html>. [Último acceso: 23 Septiembre 2019].

- [14] C. G. Salas Lara, «Diseño de un molino de rodillos para molienda de granos, destinado para el área de alimentos del CESTTA-ESPOCH,» Universidad Politecnica del Chimborazo, Riobamba, 2012.
- [15] Global trade of products, «Meelko,» 01 Enero 2019. [En línea]. Available: <http://articulo.meelko.com/352-molino-para-hacer-harina-de-trigo-hasta-600kg-hora-electrico-trifase.html>. [Último acceso: 15 Agosto 2019].
- [16] I. R. Cuadrado Moncayo y J. L. Rueda Castillo, «Diseño y construcción de un molino de martillos,» Universidad San Francisco de Quito, Quito, 2009.
- [17] Cosmos, «Molino de martillos,» Cosmos, [En línea]. Available: <https://molinodemartillos.com/images/molinodemartillos3.jpg>. [Último acceso: 23 Septiembre 2019].
- [18] Retsch, «Retsch Milling Assisting,» Molino RETSCH, 01 Enero 2005. [En línea]. Available: <https://www.retsch.es/es/productos/molienda>. [Último acceso: 15 Agosto 2019].
- [19] H. Chen, «Global Sources,» Shijiazhuang YCSD Trade Co. Ltd, 18 Enero 2013. [En línea]. Available: <https://spanish.globalsources.com>. [Último acceso: 10 Agosto 2019].
- [20] E. Msc. Flórez Solanoa, D. Ing. Nairo Cardona y C. Ing. Clavijo Ovalle, «Hammers mill design for the ceramics glue production,» *Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña. Grupo de Investigación INGAP*, pp. Ocaña, Norte de Santander, Colombia, 2014.
- [21] CIENTEC, «CIENTEC,» 10 Enero 1998. [En línea]. Available: <http://www.cientec.com.mx/es/probador-de-impacto-de-caida-libre/bmc-b1-probador-de-resistencia-al-impacto-de-caida-libre>. [Último acceso: 15 Junio 2019].
- [22] J. M. Gere, B. J. Goodno, L. P. Rosales, M. D. P. C. Villar y J. N. P. Guzmán, *Mecánica de materiales*, vol. VI, México: Thomson, 2002.
- [23] E. Robuste, «Técnica y práctica de la Industria Ladrillera,» *España*, p. 148, 2001.
- [24] R. C. Hibbeler, *Mecánica vectorial para ingenieros: Dinámica*, México: Pearson Educación, 2004.
- [25] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, Mexico: McGraw Hill, 2012.
- [26] R. S. Khurmi y J. K. Gupta, *Machine design*, S. Chand, 2005.
- [27] J. A. Pavón Céspedes, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO ARTESANAL PARA LA MOLIENDA DE GRANOS SECOS DE CAPACIDAD

- 250 KG/H.» Octubre 2013. [En línea]. Available:  
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/6940/1/CD-5195.pdf>. [Último acceso: 28 Octubre 2019].
- [28] B. Weiers, Dirección, *CaronteFX: Hammer Mill*. [Película]. España: CaronteFX, 2017.
- [29] L. R. Zambrano Santana, «Diseño de una maquina picadora de rastrojo, para produccion de abono organico,» 2014. [En línea]. Available:  
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/14653>. [Último acceso: 15 Noviembre 2019].
- [30] O. V. Chicaiza Songor, «Diseño y simulacion de una maquina trituradora para el reciclaje de botellas de vidrio,» 2015. [En línea]. Available:  
<https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/11810/1/Chicaiza%20Songor,%20Oscar%20Vladimir.pdf>. [Último acceso: 12 Agosto 2019].
- [31] Maquinova Verde, «Maquinova,» 01 Julio 2015. [En línea]. Available:  
<https://www.mezcladorasymolinos.com.mx/productos/molinos/de-martillos/>. [Último acceso: 4 Enero 2020].
- [32] C. A. Harper, «Handbook of plastics, elastomers, and composites,» de *Engineering plastic handbook*, New York, McGraw-Hill., 2002, p. 436.
- [33] Mexpolimeros, «Mexpolimeros,» 1 Junio 2019. [En línea]. Available:  
<https://www.mexpolimeros.com>. [Último acceso: 20 Diciembre 2019].
- [34] M. Hervás, «Galvanizadora Valenciana S.A.,» 11 Marzo 2001. [En línea]. Available:  
<https://www.galesa.com/web/servicios-galesa/informacion-tecnica/soldaduras-evitar-poros.html>. [Último acceso: 3 Enero 2020].
- [35] Collie Welding, «Collie Welding,» 7 Agosto 2018. [En línea]. Available:  
<https://www.colliewelding.com/filletconverter.php>. [Último acceso: 27 Diciembre 2019].
- [36] H. Rodríguez Galbarro, «Ingemecánica,» 28 Mayo 2012. [En línea]. Available:  
<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn40.html>. [Último acceso: 3 Enero 2020].
- [37] S. Arias Fernández, «Sergio Arias Fernández,» Gooyaabi Templates, 13 Julio 2016. [En línea]. Available: <http://sergioariasfernandez.blogspot.com/2014/05/expansion-termica.html>. [Último acceso: 28 Diciembre 2018].
- [38] C. S. Guallichico Guanotoa y F. P. Cabrera Contenido, «Repositorio Universidad Politécnica Salesiana,» Febrero 2017. [En línea]. Available:



- <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13673>. [Último acceso: 03 Noviembre 2019].
- [39] Indarbelt, «Fórmulas para el calculo de transmisiones,» [En línea]. Available: <http://www.indarbelt.es/html/formulas.htm#1>. [Último acceso: 03 Noviembre 2019].
- [40] W. G. Quitiaquez Sarzosa y C. I. Reina Yanque, «DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UN MOLINO PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE CHONTA (FRUTA DE PALMERAS),» Mayo 2011. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/6028>. [Último acceso: 03 Noviembre 2019].
- [41] EMERSON, «Guia de productos de transmisiones por en V y rodamientos,» Digital Vision Ltd., EE.UU., 2006.

## ANEXOS

### Anexo 1

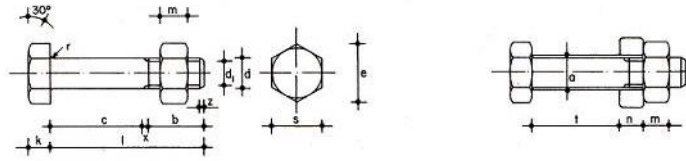
**Tabla A-20**

Resistencias mínimas determinísticas a la tensión y a la fluencia ASTM de algunos aceros laminados en caliente (HR) y estirados en frío (CD) [Las resistencias listadas son valores ASTM mínimos estimados en el intervalo de tamaños de 18 a 32 mm ( $\frac{3}{4}$  a  $1\frac{1}{4}$  pulg). Estas resistencias resultan adecuadas para usarse con el factor de diseño definido en la sección 1-10, a condición que los materiales se ajusten a los requisitos ASTM A6 o A568 o que se requieran en las especificaciones de compra. Recuerde que un sistema de numeración no es una especificación] Fuente: 1986 SAE Handbook, p. 2.15.

1	2	3	4	5	6	7	8
UNS núm.	SAE y/o AISI núm.	Procesamiento	Resistencia a la tensión, MPa (kpsi)	Resistencia a la fluencia, MPa (kpsi)	Elongación en 2 pulg, %	Reducción en área, %	Dureza Brinell
G10060	1006	HR	300 (43)	170 (24)	30	55	86
		CD	330 (48)	280 (41)	20	45	95
G10100	1010	HR	320 (47)	180 (26)	28	50	95
		CD	370 (53)	300 (44)	20	40	105
G10150	1015	HR	340 (50)	190 (27.5)	28	50	101
		CD	390 (56)	320 (47)	18	40	111
G10180	1018	HR	400 (58)	220 (32)	25	50	116
		CD	440 (64)	370 (54)	15	40	126
G10200	1020	HR	380 (55)	210 (30)	25	50	111
		CD	470 (68)	390 (57)	15	40	131
G10300	1030	HR	470 (68)	260 (37.5)	20	42	137
		CD	520 (76)	440 (64)	12	35	149
G10350	1035	HR	500 (72)	270 (39.5)	18	40	143
		CD	550 (80)	460 (67)	12	35	163
G10400	1040	HR	520 (76)	290 (42)	18	40	149
		CD	590 (85)	490 (71)	12	35	170
G10450	1045	HR	570 (82)	310 (45)	16	40	163
		CD	630 (91)	530 (77)	12	35	179
G10500	1050	HR	620 (90)	340 (49.5)	15	35	179
		CD	690 (100)	580 (84)	10	30	197
G10600	1060	HR	680 (98)	370 (54)	12	30	201
G10800	1080	HR	770 (112)	420 (61.5)	10	25	229
G10950	1095	HR	830 (120)	460 (66)	10	25	248

## Anexo 2

### Selección de pernos



Tornillo tipo	Vástago					Cabeza				Diámetro del agujero a mm	Area neta del núcleo An cm <sup>2</sup>	Area resistente Ar cm <sup>2</sup>
	Diámetro de la caña d mm	Diámetro interior d <sub>i</sub> mm	Longitud roscada b mm	Longitud de la salida x mm	Longitud del chaflán z mm	Medida entre caras s mm	Medida entre aristas e mm	Radio del acuerdo r mm	Espesor k mm			
T 10	10	8.160	17.5	2.5	1.7	7	17	19.6	0.5	11	0.523	0.580
T 12	12	9.853	19.5	2.5	2.0	8	19	21.0	1.0	13	0.762	0.843
T 16	16	13.546	23.0	3.0	2.5	10	24	27.7	1.0	17	1.440	1.570
T 20	20	16.933	25.0	4.0	3.0	13	30	34.6	1.0	21	2.250	2.750
(T 22)	22	18.933	28.0	4.0	3.3	14	32	36.9	1.0	23	2.820	3.030
T 24	24	20.319	29.5	4.5	4.0	15	36	41.6	1.0	25	3.240	3.530
(T 27)	27	23.319	32.5	4.5	4.0	17	41	47.3	1.0	28	4.270	4.560
T 30	30	25.706	35.0	5.0	5.0	19	46	53.1	1.0	31	5.190	5.610
(T 33)	33	28.706	38.0	5.0	5.0	21	50	57.7	1.0	34	6.470	6.940
T 36	36	31.093	40.0	6.0	6.0	23	55	63.5	1.0	37	7.590	8.170

Se recomienda no utilizar los tornillos cuyo tipo figura entre paréntesis.

## Anexo 3

### Parámetros del factor de modificación superficial de Marin

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	S <sub>utr</sub> kpsi	S <sub>utr</sub> MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o estirado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

### Parámetros del factor de modificación superficial de Marin

#### Anexo 4 (Factor $k_b$ )

$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ pulg} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ pulg} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$

Para carga axial no hay efecto de tamaño, por lo cual

$$k_b = 1$$

#### Anexo 5

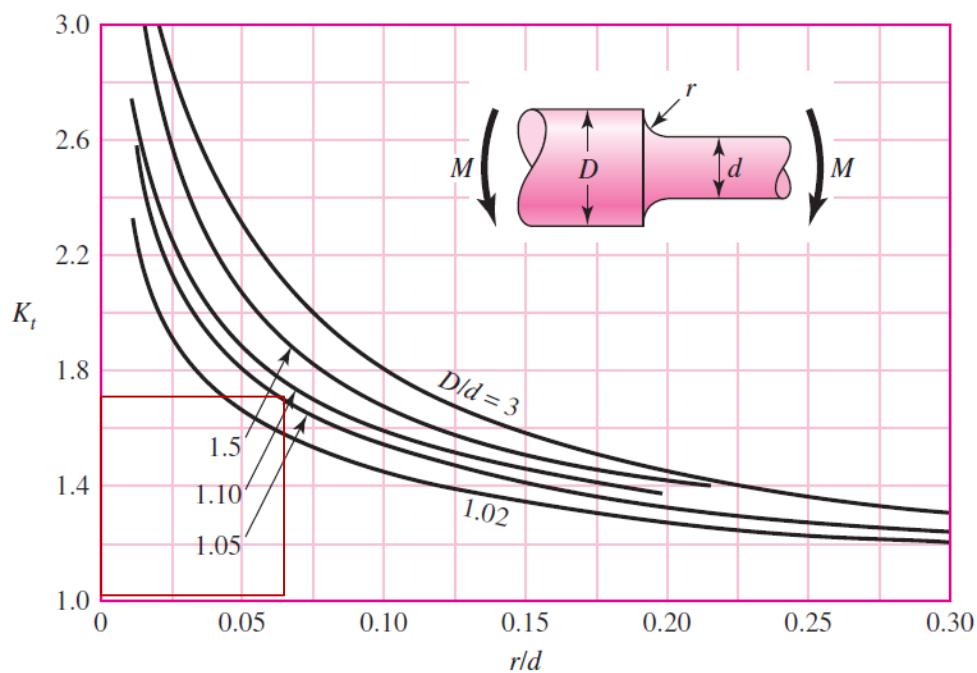
##### Factor de temperatura $k_c$

Cando se realizan los ensayos de fatiga con carga de flexión rotatoria, axial (empujar y jalar) y de torsión, los límites de resistencia a la fatiga difieren con  $S_{ut}$ . Este tema se analiza más adelante en la sección 6-17. Aquí, se especificarán valores medios del factor de carga como

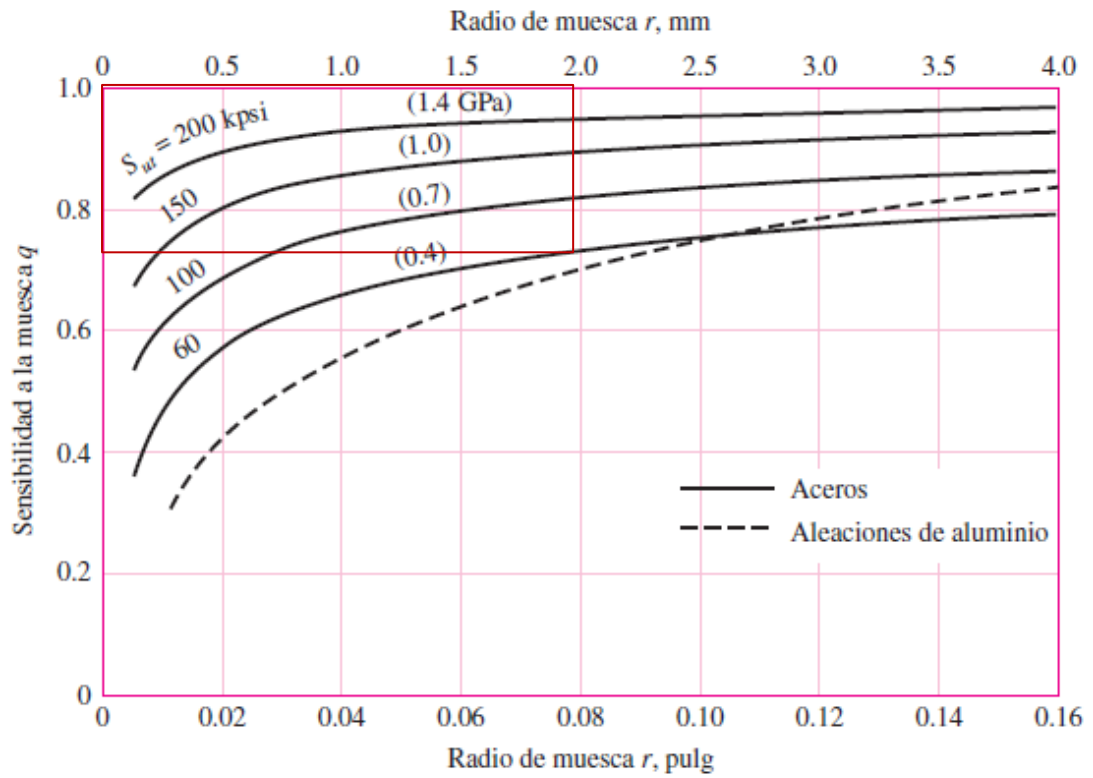
$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexión} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsión}^{17} \end{cases} \quad (6-26)$$

#### Anexo 6

Eje redondo con filete en el hombro en flexión



## Anexo 7



## Anexo 9

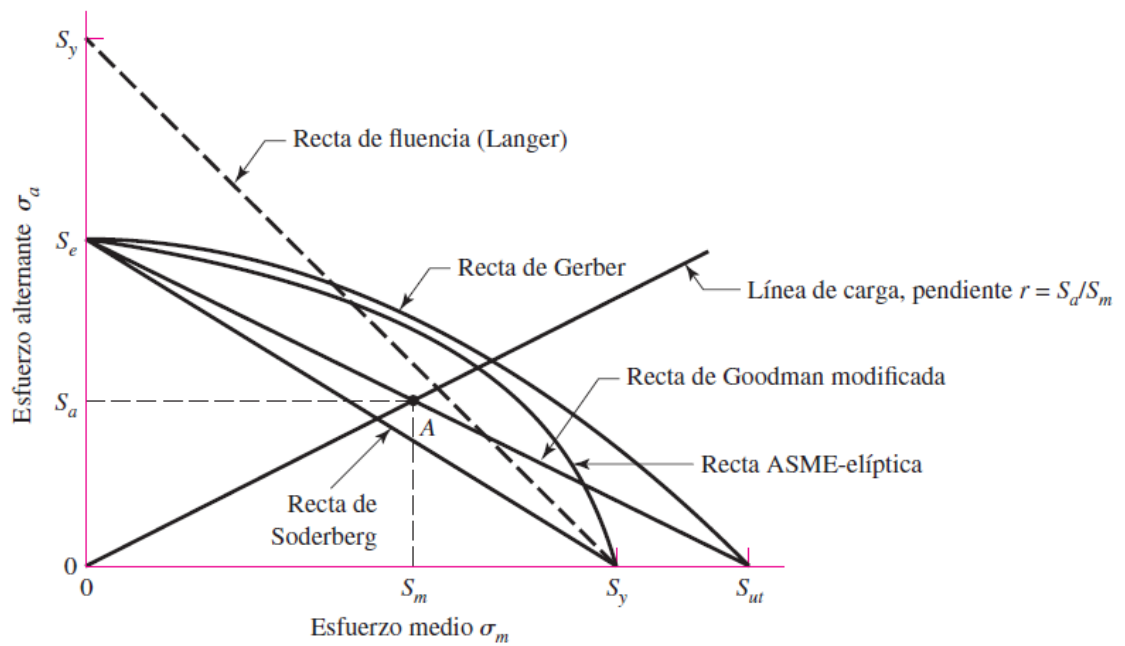


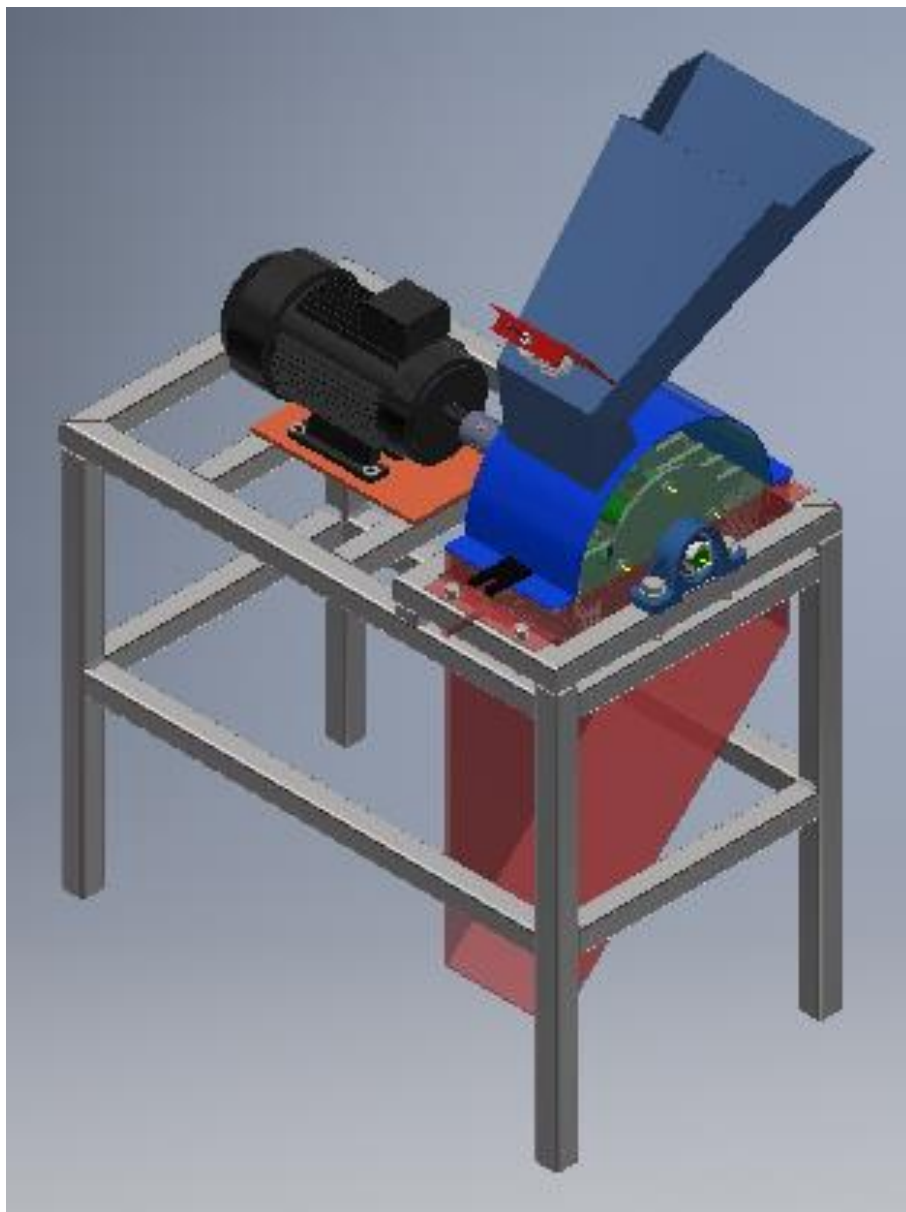
Diagrama de fatiga donde se proporcionan varios criterios de falla.

Anexo 10

# Manual de Usuario

## MOLINO DE MARTILLOS PARA RESINA POLIÉSTER

### 001



Elaborado por: Cristian Churo y Santiago Guamushig

2020

## **INSTRUCTIVO DE SEGURIDAD Y MANTENIMIENTO**

### **Instrucciones de seguridad**

Para el uso de esta máquina se recomienda tomar las respectivas normas de seguridad ya que el empleo y manipulación incorrecta de este equipo puede causar graves accidentes.

### **Puesta en marcha del molino**

1. Usar los elementos de seguridad industrial personal (EPI) como guantes, antiparras, tapones auditivos, zapatos puntas de acero.
2. Identificar la simbología de advertencia ubicada en la máquina.
3. Comprobar el buen estado y ajuste de los elementos que conforman la máquina.
4. Verificar que no exista material dentro de la cámara de molienda con el equipo apagado.
5. La cámara de molienda debe estar completamente cerrada.
6. Al poner en marcha la máquina, deberá estar encendida al menos 30 segundos sin ingresar material, con la finalidad de estabilizarlo.
7. En el momento que el molino alcance su velocidad de operación proceda a ingresar el material a triturar (resina poliéster).
8. La alimentación hacia la cámara de molienda con más material debe ser constante.
9. El material a triturar debe ser completamente sólido, ya que si se coloca resina sin curar esta puede trabar o dañar los elementos que constituyen la cámara de trituración.
10. Al finalizar el proceso de molienda es necesario que al apagar la máquina se deba esperar hasta que el mecanismo interno deje de girar por completo.
11. Si no se va a utilizar la máquina por un tiempo prolongado se recomienda desconectarla de la fuente eléctrica y verificar que no exista material residual en la cámara de molienda.

## **Mantenimiento del molino**

El mantenimiento adecuado garantiza una vida útil y un correcto funcionamiento del equipo, disminuyendo los costos en reparaciones prematuras del mismo.

### **Mantenimiento de elementos constituyentes de la máquina**

#### **Chumaceras:**

Comprobar su buen estado de forma visual.

Lubricar las chumaceras al menos una vez por mes dependiendo el tiempo de uso.

Reemplazar las chumaceras una vez haya cumplido su vida útil de trabajo o hayan sufrido algún daño ya que en este estado pueden generar vibraciones no deseadas.

#### **Motor**

Comprobar que las conexiones eléctricas estén en buen estado para evitar cortos circuitos o daños en el motor.

Verificar que el aislamiento de los cables se encuentre en óptimas condiciones, caso contrario cambiar o colocar un nuevo aislante sobre la parte afectada.

Realizar la limpieza del motor en la carcasa utilizando una brocha seca.

#### **Martillos:**

Verificar el buen estado de los martillos ya que por el proceso de trituración estos pueden sufrir un desgaste en sus aristas ocasionando que no cumplan con un correcto funcionamiento; de encontrar alguna anomalía o desperfecto se debe reemplazar por uno nuevo.

#### **Criba:**

Mantener la criba limpia, verificando que no existan agujeros con algún tipo de obstrucción, de esta forma se obtiene una cantidad constante de material triturado.



## **MONTAJE DE LA MÁQUINA**

Para el ensamblaje del molino de martillos se identificarán los diferentes elementos que lo componen, siendo estos los mecanismos motrices, transmisión, impacto y sujeción.

### **Carcasa inferior (criba)**

1. Ubicar la carcasa inferior en el bastidor.
2. Fijar con los pernos.
3. Colocar la criba.

### **Conjunto triturador**

1. Identificar el eje principal y los discos porta martillos.
2. Colocar un eje secundario en una de las perforaciones de los discos porta martillos.
3. En el eje secundario se colocarán de manera alternada un bocín separador seguido de un martillo, se realiza el mismo proceso hasta completar cinco bocines y cuatro martillos.

Se realizará el mismo procedimiento para el resto de perforaciones que tiene el disco porta martillos con cada uno de los ejes secundarios y sus componentes.

4. Para evitar que los ejes secundarios se deslicen, se debe colocar en la ranura en su extremo un anillo de retención.
5. Colocar las chumaceras el eje principal y fijarlas al eje.
6. Colocar el conjunto ensamblado con anterioridad sobre el bastidor.
7. Ubicar los pernos en los orificios de las chumaceras y el bastidor para su ajuste una vez se haya verificado su centrado.
8. Instalar en el extremo del eje principal el acople para su posterior unión con el motor.

### **Motor**

1. Colocar el motor sobre la base en el bastidor, fijándolo con pernos y tuercas sin mucho ajuste debido a que se debe centrar con el eje motriz.
2. Instalar el acople en el eje del motor.
3. Unir el eje principal con el eje del motor con ayuda del acople instalado anteriormente constatando un adecuado centrado entre ambos elementos.
4. Ajustar los pernos del motor.

### **Carcasa superior (tolva)**

4. Ubicar la carcasa superior cubriendo la cámara de molienda.
5. Fijar con los pernos y pasador para la bisagra.

### **Proceso de encendido, triturado y apagado del molino**

1. Una vez tomado en cuenta las normas de seguridad y se haya realizado la inspección de la máquina, se la conecta a la fuente eléctrica.
2. Pulsar el botón de encendido “ON” ubicado en una botonera, dejando 30 segundos de giro con la cámara de trituración vacía.
3. Se procederá a colocar el material (resina) sobre la tolva de modo constante, cayendo uniformemente en la cámara de trituración, para obtener la capacidad requerida
4. Los trozos obtenidos se depositarán en un contenedor debajo de la máquina, los cuales serán almacenados en sacos para su posterior reutilización.
5. Finalizado el proceso de molienda se presiona el botón “OFF” dando como finalizado el proceso de trituración.
6. Se debe esperar a que la máquina se detenga completamente para desconectarla de la fuente eléctrica en caso de que no se requiera triturar más material.

## PLANOS