



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**PROPUESTA TECNOLÓGICA**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE BOLAS, A ESCALA DE LABORATORIO, PARA LA PULVERIZACIÓN DE ARCILLAS UTILIZADAS EN TRABAJOS DE CERÁMICA.”**

Proyecto de Titulación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero Electromecánico

**Autores:**

Cevallos Villavicencio Cristian Ramiro

Caiza López Diego Paúl

**Tutores:**

Ing. Héctor Laurencio Alfonso. PhD

Ing. Mauro Darío Albarracín Álvarez. MSc.

**Latacunga – Ecuador**

**Julio 2019**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

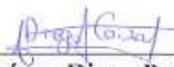
“Nosotros, **Cevallos Villavicencio Cristian Ramiro** y **Caiza López Diego Paúl**, declaramos ser autores la presente Propuesta Tecnológica: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE BOLAS, A ESCALA DE LABORATORIO, PARA LA PULVERIZACIÓN DE ARCILLAS UTILIZADAS EN TRABAJOS DE CERÁMICA.”**, siendo el Ing. PhD. Héctor Laurencio Alfonso Tutor del presente Trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en la presente Propuesta Tecnológica, son de nuestra exclusiva responsabilidad.



Sr. Cevallos Villavicencio Cristian Ramiro

C.I. 050333620-8



Sr. Caiza López Diego Paúl

C.I. 172592073-8

### AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE BOLAS, A ESCALA DE LABORATORIO, PARA LA PULVERIZACIÓN DE ARCILLAS UTILIZADAS EN TRABAJOS DE CERÁMICA.”, de Cevallos Villavicencio Cristian Ramiro y Caiza López Diego Paúl, Estudiantes de la Carrera de **INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes Científico-Técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la **FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS** de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, 19 de Julio del 2019



---

Ing. PhD.

Héctor Laurencio Alfonso

C.C. 175836725-2



Ingeniería  
Electromecánica

### APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la FACULTAD de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes: Cevallos Villavicencio Cristian Ramiro con C.I. 0503336208 y Caiza López Diego Paúl con C.I. 172592073-8, con el Título de Proyecto de Titulación “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE BOLAS, A ESCALA DE LABORATORIO, PARA LA PULVERIZACIÓN DE ARCILLAS UTILIZADAS EN TRABAJOS DE CERÁMICA.”, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, 19 de Julio del 2019

Para constancia firman:

Lector 1 (Presidente)

Nombre: Ing. Segundo Ángel Cevallos Betún

CC: 050178243-7

Lector 2

Nombre: Ing. Luigi Orlando Freire Martínez

CC: 050252958-9

Lector 3

Nombre: Ing. Luis Miguel Navarrete López

CC: 180347284

## AVAL DE IMPLEMENTACIÓN

Latacunga, 19 de julio del 2019

Estimado

**Ing. Jorge Villarroel**

**Responsable de laboratorio de Ingeniería Electromecánica**

Yo **Héctor Laurencio Alfonso** en calidad de tutor, solicito de manera más comedida se digne receptor el equipo realizado por los estudiantes **Cevallos Villavicencio Cristian Ramiro**, con cedula de ciudadanía N° 050333620-8 y **Caiza López Diego Paúl**, con cedula de ciudadanía N° 172592073-8, de la carrera de **Ingeniería Electromecánica**, cuyo tema de tesis es **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE BOLAS, A ESCALA DE LABORATORIO, PARA LA PULVERIZACIÓN DE ARCILLAS UTILIZADAS EN TRABAJOS DE CERÁMICA”**, que servirá para la realización de actividades del proyecto formativo que se encuentra en desarrollo.

Particular que pongo en su conocimiento para los fines legales pertinentes.

Atentamente,



Ing. PhD. Héctor Laurencio Alfonso

Héctor Laurencio Alfonso

C.C. 175836725-2



Sr. Cevallos Villavicencio Cristian Ramiro

C.C. 050333620-8



Sr. Caiza López Diego Paúl

C.C. 172592073-8

Firma de quien recibe:



Ing. Jorge Villarroel

C.C. 0502993491

## AGRADECIMIENTO

*Agradezco a Dios por darme todas las bendiciones en mi vida como el amor de mis padres y toda mi familia, a mi novia por ser mi compañera y la persona que estuvo en todo momento apoyándome y por estar en mi vida, ya que sin su apoyo no habría llegado a cumplir con esta meta en mi vida.*

*A cada uno de los docentes de la Universidad Técnica de Cotopaxi que compartieron sus conocimientos conmigo, y que me brindaron su ayuda en mi formación como Ingeniero Electromecánico.*

**Cristian C.**

*Agradezco a Dios por todas sus bendiciones a mi familia y amigos por el apoyo brindado y a todos quienes contribuyeron para culminar con éxito la meta propuesta.*

*A la Universidad Técnica de Cotopaxi y a todos los docentes quienes supieron impartir sus conocimientos técnicos y humanísticos, para hacer posible la preparación profesional.*

**Diego C.**

## DEDICATORIA

*Esta tesis va dedicada a mis padres Edwin y Silvia, que siempre han estado a mi lado apoyándome e incentivándome a ser mejor persona, y velando por mi bienestar, por ser mi guía y ejemplo a seguir en todo momento.*

**Cristian C.**

*Dedico el presente trabajo a mis padres Luis y Angelita que, con apoyo incondicional, amor y confianza permitieron que logre culminar mi carrera profesional, a mis hermanas y a mi acompañante de vida quienes han puesto toda su confianza para lograr un objetivo más en mi vida y principalmente a mi pequeña hija que con su afecto y cariño es motivo para cada día seguirme preparando.*

**Diego C.**

## ÍNDICE

DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	¡Error! Marcador no definido.
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN .....	ii
AVAL DE IMPLEMENTACIÓN .....	¡Error! Marcador no definido.
AGRADECIMIENTO.....	iv
DEDICATORIA .....	vi
ÍNDICE .....	vii
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT .....	xii
AVAL DE TRADUCCIÓN .....	¡Error! Marcador no definido.
1. INFORMACIÓN BÁSICA.....	1
2. DISEÑO INVESTIGATIVO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA.....	2
2.1. Título de la propuesta tecnológica.....	2
2.2. Tipo de propuesta alcance .....	2
2.3. Área del conocimiento.....	2
2.4. Sinopsis de la propuesta tecnológica.....	2
2.5. Objeto de estudio y campo de acción .....	3
2.5.1. Objeto de estudio.....	3
2.5.2. Campo de acción .....	3
2.6. Situación problemática y problema .....	3
2.6.1. Situación problemática.....	3
2.6.2. Problema .....	3
2.6.3. Causa y Efecto de la situación problemática.....	4
2.7. Hipótesis o formulación de pregunta científica.....	4
2.8. Objetivos.....	4
2.8.1. Objetivo general .....	4
2.8.2. Objetivos específicos .....	4
2.9. Descripción de las actividades y tareas propuestas con los objetivos establecidos .....	5
3. MARCO TEÓRICO .....	5
3.1. Molienda.....	5
3.2. Tipos de molinos .....	7
3.2.1. Molino de barras (rod mill).....	7

3.2.2.	Molino de bolas (ball mill).....	8
3.2.3.	Molino de compartimientos múltiples .....	9
3.2.4.	Molino de martillos .....	10
3.2.5.	Molino de rodillos .....	11
3.3.	Etapas de la molienda .....	12
3.4.	Elementos importantes en la molienda.....	13
3.4.1.	Velocidad Crítica .....	13
3.4.2.	Relaciones entre los Elementos Variables .....	13
3.4.3.	Tamaño Máximo de los Elementos Moledores.....	13
3.4.4.	Volumen de Carga.....	14
3.4.5.	Potencia .....	14
3.5.	Tipos de Molienda: Molienda Húmeda y Molienda Seca .....	14
3.6.	Cuerpos moledores .....	15
3.7.	Reducción de tamaño y tamizado de sólidos.....	15
3.7.1.	Principios generales .....	15
3.7.2.	Naturaleza de las fuerzas utilizadas en la reducción de tamaño .....	15
3.8.	Tipos de Operación de Molienda .....	16
3.9.	Arcilla .....	17
3.9.1.	Proceso de molienda de la arcilla.....	17
4.	METODOLOGÍA Y MATERIALES.....	20
4.1.	Parámetros de diseño del Molino de Bolas .....	20
4.2.	Consideraciones del diseño .....	21
4.2.1.	Tamaño de bolas y carga inicial.....	22
4.2.2.	Levantadores .....	24
4.3.	Operación del molino .....	25
4.4.	Parámetros para diseño del molino de bolas. ....	29
4.4.1.	Consideraciones para selección de material.....	29
4.4.2.	Consideraciones para el diseño del tambor. ....	29
4.4.3.	Diámetro del tambor .....	30
4.4.4.	Longitud del tambor.....	30
4.4.5.	Dimensionamiento superficies externas del tambor .....	30
4.4.6.	Peso de elementos de molienda (bolas). ....	30
4.4.7.	Potencia del motor.....	30
4.4.8.	Potencia real del motor.....	31

4.4.9.	Velocidad de giro .....	31
4.4.10.	Velocidad Crítica.....	31
4.4.11.	Paso de la cadena.....	31
4.4.12.	Número de pasos .....	31
4.4.13.	Velocidad de cadena.....	31
4.4.14.	Longitud de la cadena.....	32
4.4.15.	Par torsor de la cadena.....	32
4.4.16.	Fuerza en el eje.....	32
4.4.17.	Coeficiente de seguridad .....	32
4.5.	Diseño estático del eje.....	33
4.5.1.	Análisis de flexión.....	33
4.5.2.	Esfuerzo equivalente de Von Mises.....	33
4.5.3.	Calculo de límite a fatiga.....	33
4.5.4.	Factor de modificación.....	33
4.5.5.	Factor de seguridad para el eje.....	33
4.6.	Selección de chumaceras.....	34
4.6.1.	Carga equivalente estática.....	34
4.6.2.	Carga equivalente dinámica.....	34
4.6.3.	Vida nominal de la chumacera.....	34
4.6.4.	Diámetro.....	34
4.6.5.	Factor K.....	34
4.6.6.	Vida nominal ajustada.....	35
4.6.7.	Vida nominal de la chumacera.....	35
4.6.8.	Ecuaciones para junta soldada.....	35
4.6.9.	Esfuerzo cortante primario.....	35
4.6.10.	Esfuerzo cortante secundario.....	36
4.6.11.	Magnitud de esfuerzo cortante resultante.....	36
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	36
5.1.1.	Volumen del tambor.....	36
5.1.2.	Llenado de bolas en % y número de vueltas en porcentaje el valor crítico.....	38
5.1.3.	Peso de elementos de molienda (bolas).....	38
5.1.4.	Consideraciones de grado de llenado en húmedo.....	38
5.1.5.	Tamaño y distribución de bolas.....	39
5.1.6.	Potencia del motor.....	39

5.1.7.	Potencia real del motor.....	39
5.1.8.	Velocidad de giro .....	39
5.1.9.	Consideraciones para cálculo del eje. ....	41
5.1.10.	Selección de chumaceras.....	49
5.1.11.	Diseño soporte estructural del molino de bolas.....	51
5.1.12.	Juntas soldadas del tambor. ....	52
5.1.13.	Análisis del tambor empleando software. ....	53
5.2.	Proceso de fabricación del molino .....	54
5.3.	Normas de seguridad .....	54
5.4.	Instrucciones de funcionamiento.....	55
5.5.	Manual para mantenimiento de la máquina.....	56
6.	PRESUPUESTO .....	57
6.1.	Costos directos .....	57
6.2.	Costos indirectos .....	58
7.	ANÁLISIS DE IMPACTOS.....	58
7.1.	Impacto práctico .....	58
7.2.	Impacto ambiental .....	58
7.3.	Impacto tecnológico .....	59
8.	CONCLUSIONES .....	59
9.	RECOMENDACIONES.....	59
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	60
11.	ANEXOS.....	61

# UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADA

**TITULO: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE BOLAS, A ESCALA DE LABORATORIO, PARA LA PULVERIZACIÓN DE ARCILLAS UTILIZADAS EN TRABAJOS DE CERÁMICA.”**

**Autores:**

Cevallos Villavicencio Cristian Ramiro

Caiza López Diego Paúl

## RESUMEN

El presente proyecto permite plasmar el diseño y construcción de un molino de bolas para la pulverización de los desperdicios de arcilla en trabajos de cerámica, está diseñado para moler una capacidad de 2,5 kg, el tambor es de acero inoxidable AISI 304, sus dimensiones son 21 cm de diámetro y 30 cm de longitud ideal para soportar la fricción y las altas temperaturas, además está diseñado bajo los parámetros de molienda necesarios, es capaz de soportar hasta 10 kg, que están distribuidos en 7 kg de cuerpos moledores, y máximo 3 kg de molienda , se calculó la relación de transmisión para mantener la velocidad crítica de 60 rev/min, en la que se determina el reductor necesario y el sistema de transmisión por cadena, se realizó una selección comercial de un motor de 1 Hp, tiene una reducción a 395 rev/min, la capacidad de soporte del tambor y de la estructura está determinada mediante un software, el molino cuenta con dos tipos de accionamiento el primero es ON – OFF y el segundo es automático utilizando el temporizador que tiene un máximo de 30 horas de trabajo, en un ambiente aislado la máquina produce un ruido promedio de 90,31 dB, y el tamaño del material después de la molienda es de 75 micras, la máquina logra que los artesanos automaticen el proceso de la molienda.

**Palabras clave:** Arcilla, pulverización, molienda, trituración.

# COTOPAXI TECHNICAL UNIVERSITY

FACULTY OF SCIENCES OF ENGINEERING AND APPLIED

**THEME: “DESIGN AND CONSTRUCTION OF A BALL MILL, A LABORATORY SCALE, FOR THE SPRAYING OF CLAYS USED IN CERAMIC WORKS”**

**Authors:**

Cevallos Villavicencio Cristian Ramiro

Caiza López Diego Paúl

## ABSTRACT

The present project allows to shape the design and construction of a ball mill for the pulverization of clay waste in ceramic works, it is designed to grind a capacity of 2.5 kg, the drum is made of stainless steel AISI 304, its dimensions It is 21 cm in diameter and 30 cm in length ideal to withstand friction and high temperatures, is also designed under the necessary grinding parameters, is capable of supporting up to 10 kg, which are distributed in 7 kg of grinding bodies, and maximum 3 kg of grinding, the transmission ratio was calculated to maintain the critical speed of 60 rev/min, in which the necessary reducer and chain transmission system is determined, a commercial selection of a 1 Hp motor was made, has a reduction to 395 rev/min, the support capacity of the drum and the structure is determined by software, the mill has two types of drive the first is ON - OFF and the second is automatic using the timer that has a maximum of 30 hours of work, in an isolated environment the machine produces an average noise of 90.31 dB, and the size of the material after grinding is 75 microns, the machine makes craftsmen automate the grinding process.

**Keywords:** Clay, pulverization, grinding, crushing.



*AVAL DE TRADUCCIÓN*

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que: La traducción del resumen de la propuesta tecnológica al Idioma Inglés presentado por los señores Egresados de la **CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA** de la **FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**, **CRISTIAN RAMIRO CEVALLOS VILLAVICENCIO** y **DIEGO PAÚL CAIZA LÓPEZ**, cuyo título versa **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE BOLAS, A ESCALA DE LABORATORIO, PARA LA PULVERIZACIÓN DE ARCILLAS UTILIZADAS EN TRABAJOS DE CERÁMICA”**, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimaron conveniente.

Latacunga, Julio del 2019

Atentamente,

Lic. José Ignacio Andrade MSc.

**DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS**

CI: 050310104-0



## **1. INFORMACIÓN BÁSICA**

### **Propuesto por:**

Cevallos Villavicencio Cristian Ramiro

Caiza López Diego Paúl

### **Tema aprobado:**

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE BOLAS A ESCALA DE LABORATORIO PARA LA PULVERIZACIÓN DE ARCILLAS UTILIZADAS EN TRABAJOS DE CERÁMICA.

### **Carrera:**

Ingeniería Electromecánica

### **Director de la propuesta tecnológica**

Ing. Héctor Laurencio Alfonso. PhD

### **Equipo de trabajo:**

Ing. Héctor Laurencio Alfonso. PhD

Ing. Mauro Darío Albarracín Álvarez. MSc.

### **Lugar de ejecución:**

Provincia de Cotopaxi, cantón Latacunga

### **Tiempo de duración del proyecto:**

6 meses

### **Fecha de entrega:**

Febrero 2019

### **Línea de investigación:**

Procesos industriales.

Promover el desarrollo de tecnologías y procesos que permitan mejorar el rendimiento productivo y la transformación de materias primas en productos de alto valor añadido.

### **Sublíneas de Investigación:**

Diseño, construcción y mantenimiento de elementos, prototipos y sistemas electromecánicos.

**Tipo de propuesta tecnológica:**

Desarrollo de una tecnología que facilite la pulverización de arcillas utilizadas en trabajos de cerámica.

**2. DISEÑO INVESTIGATIVO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA****2.1. Título de la propuesta tecnológica**

Diseño y Construcción de un molino de bolas a escala de laboratorio para la pulverización de arcillas utilizadas en trabajos de cerámica.

**2.2. Tipo de propuesta alcance**

Multipropósito: Evitar el desperdicio de la materia prima (arcilla) y a su vez ayudar en el proceso de pulverizado.

Desarrollo: Con el diseño y construcción de un molino de bolas a escala de laboratorio se pretende ayudar en la pulverización de la arcilla de desecho de cerámica optimizando así el material.

**2.3. Área del conocimiento**

Ingeniería, industria y construcción 52 Ingenierías y profesiones a fines: Dibujo Técnico, mecánica, metalistería, electricidad, electrónica.

**2.4. Sinopsis de la propuesta tecnológica**

La molienda es una operación unitaria, que reduce el volumen promedio de las partículas de una muestra sólida, la reducción se lleva a cabo dividiendo o fraccionando la muestra por medios mecánicos hasta el tamaño deseado. El molino de bolas es una máquina horizontal que tiene una instalación rotativa en forma de tubo haciendo que este sea el equipo más importante de trituración de los materiales. Los molinos de bolas ofrecen en el proceso de molienda un producto más fino que otros molinos, estos molinos son movidos por una transmisión de correas trapezoidales y engranajes de mando o una reducción. En la parroquia "LA VICTORIA" del cantón Pujili el 70% de la población se dedica a la elaboración artesanal de objetos de alfarería y cerámica en los hogares de los artesanos poseen talleres donde elaboran productos de gran variedad como: ponedos, maceteros, tejas, ollas, etc. Con la fabricación de un molino de bolas se pretende ayudar en el proceso de pulverizado de la arcilla ya que este molino ofrece una mayor uniformidad en la reducción del tamaño de las partículas permitiendo así reutilizar la materia prima en posteriores trabajos disminuyendo los costos y a su vez siendo más amigable con el medio ambiente, en cambio un molino de martillo produce mayor variabilidad del tamaño de las partículas y pueden llegar hacer rugosos además de contaminar con mucho polvo.

## **2.5. Objeto de estudio y campo de acción**

### **2.5.1. Objeto de estudio**

Molino de bolas a escala de laboratorio.

### **2.5.2. Campo de acción**

Construcción de un molino de bolas.

## **2.6. Situación problemática y problema**

### **2.6.1. Situación problemática**

En Cotopaxi en la parroquia “La Victoria” del cantón Pujili la mayoría de la población se dedica a la elaboración artesanal de objetos de alfarería y cerámica. En los hogares de los artesanos poseen talleres donde elaboran productos de gran variedad y el material más utilizado es la arcilla, ya que su composición lo hace ser un material muy frágil, hay una gran probabilidad que ocurran accidentes y en la mayoría de casos este material termina en la basura.

Con la construcción de este molino de bolas a escala de laboratorio se pretende pulverizar los desechos de la materia prima, según datos de los artesanos de la parroquia La Victoria, se desperdicia semanalmente 100 lb en desechos de vasijas, cepos, etc. Se pretende reutilizar estos desechos y reducir los costos con el proceso de pulverización de la arcilla, ayudando a su vez al medio ambiente.

### **2.6.2. Problema**

Inexistencia de una máquina para aprovechar el desperdicio de la materia prima (arcilla) en el proceso de trabajos con cerámica en la parroquia “La Victoria” del cantón Pujili, en la actualidad los artesanos reutilizan los desperdicios de cerámica, con un proceso manual y demoroso, el cual consiste en dejar el material en agua por 24 horas para que se torne blando para posteriormente secarlo y triturarlo manualmente con el uso de martillos o rocas.

Dicho proceso no resulta tan favorable para el trabajador ya que al dejarlo en agua se pierde tiempo, por ello algunos artesanos prefieren desechar el material, causando a largo plazo pérdidas económicas, y al desecharlos indebidamente causan daño al medio ambiente.

### 2.6.3. Causa y Efecto de la situación problemática

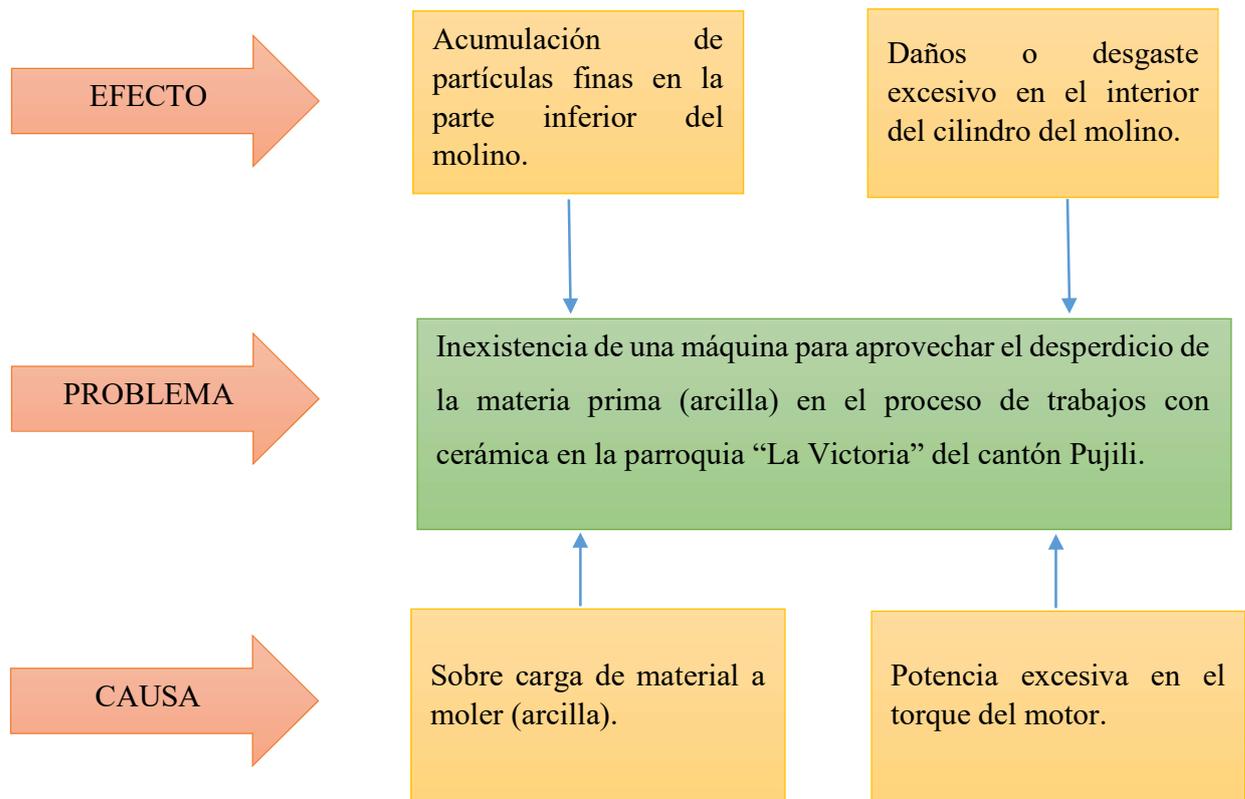


Figura 2.1. Pulverizado de arcilla.

Fuente: Autores.

### 2.7. Hipótesis o formulación de pregunta científica

Con la fabricación de un molino de bolas es posible mejorar la producción y el proceso de pulverizado de la arcilla, utilizando los desperdicios de cerámica.

### 2.8. Objetivos

#### 2.8.1. Objetivo general

Construir un molino de bolas a escala de laboratorio, mediante el uso de la tecnología que permita reutilizar el desperdicio de cerámica reduciendo el material a un tamaño apto para su reutilización en futuros trabajos de alfarería.

#### 2.8.2. Objetivos específicos

- Analizar las diferentes variables a controlar dentro de la máquina para el proceso de pulverización de la arcilla.
- Diseñar el modelo de la máquina de acuerdo a los elementos variables para una mejor visibilidad del acabado considerando los materiales.

- Construir un molino de bolas a escala, para la pulverización y aprovechar al máximo la materia prima.

## 2.9. Descripción de las actividades y tareas propuestas con los objetivos establecidos

**Tabla 2.1.** Tareas por objetivo.

Objetivos	Tareas
Analizar las diferentes variables a controlar dentro de la máquina para el proceso de pulverización de la arcilla.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Recopilar información de diferentes fuentes bibliográficas con el fin de llegar a definir las variables a controlar.</li> </ul>
Diseñar el modelo de la máquina de acuerdo a los elementos variables para una mejor visibilidad del acabado considerando los materiales.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Revisar diferentes tipos de catálogos que aporten con el modelo de la máquina.</li> <li>✓ Conceptualizar los criterios técnicos para la construcción del molino de bolas.</li> <li>✓ Analizar diferentes tipos de materiales a utilizar en la construcción de la máquina.</li> </ul>
Construir un molino de bolas a escala para pulverización de arcilla para aprovechar el uso de la materia prima.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Seleccionar los materiales ya analizados a utilizar en la construcción.</li> <li>✓ Cotizar los precios de los diferentes tipos de materiales.</li> <li>✓ Verificación metodológica del proceso de fabricación.</li> <li>✓ Construcción del molino de bolas.</li> </ul>

## 3. MARCO TEÓRICO

**Palabras claves:** Molienda, Pulverización, Velocidad Crítica, Arcillas, Trituración.

### 3.1. Molienda

Según [1] “La molienda se realiza en un molino rotatorio de carga, el que consiste en: un recipiente cilíndrico de acero, provisto con revestimientos renovables contra el desgaste, entre los cuales se ubican dispositivos denominados liners, que permiten aumentar el levante de la carga”.

Un molino rotatorio de carga también contiene una carga suelta de cuerpos de trituración, denominados medio de molienda que al girar el molino provoca que los elementos contenidos en su interior se muevan y generen la reducción de tamaño. El medio de molienda puede ser: bolas o barras de acero y en algunos casos, el mismo material de molienda.

Para [2] “La característica de un molino rotatorio de carga es el uso de cuerpos de trituración sueltos, que son grandes, duros y pesados en relación a las partículas de mena, pero pequeños en relación al volumen del molino y que ocupan ligeramente menos de la mitad del volumen del molino. El control del tamaño del producto se realiza por el tipo de medio de molienda que se usa, velocidad de rotación del molino, naturaleza de la alimentación de la mena y tipo de circuito que se utiliza. La molienda se realiza generalmente, en dos etapas: la primera desde el tamaño de descarga de la planta de chancado hasta un producto de aproximadamente 10 mallas y la segunda desde 10 mallas hasta obtener un producto liberado de 35 a 200 mallas o algunas veces más finos” Una vez que las partículas de minerales han adquirido el tamaño adecuado, son retiradas del circuito a través de operaciones de clasificación.

Para [2] el término molienda, “Básicamente se refiere a la pulverización y a la desintegración del material sólido. Específicamente, la desintegración se refiere a la reducción del tamaño de agregados de partículas blandas débilmente ligadas entre sí. Es decir, que no se produce ningún cambio en el tamaño de las partículas fundamentales de la mezcla. La pulverización, por su parte, implica la reducción del tamaño de las partículas fundamentales de las sustancias.

La molienda es una operación unitaria que, a pesar de implicar sólo una transformación física de la materia sin alterar su naturaleza, es de suma importancia en diversos procesos industriales, ya que el tamaño de partículas representa en forma indirecta áreas, que a su vez afectan las magnitudes de los fenómenos de transferencia entre otras cosas”.

Considerando lo anterior, el conocimiento de la granulometría para determinado material es de importancia, consecuentemente. La molienda es una operación unitaria que reduce el volumen promedio de las partículas de una muestra sólida. La reducción se lleva a cabo dividiendo o fraccionando la muestra por medios mecánicos hasta el tamaño deseado. Los métodos de reducción más empleados en las máquinas de molienda son compresión, impacto, frotamiento de cizalla y cortado.

Según [3] las principales clases de máquinas para molienda son:

**A) Trituradores (Gruesos y Finos).**

1. Triturador de Quijadas.
2. Triturador Giratorio.
3. Triturador de Rodillos.

**B) Molinos (Intermedios y Finos).**

1. Molino de Martillos.
2. Molino de Rodillos de Compresión. a) Molino de Tazón. b) Molino de Rodillos.
3. Molinos de Fricción.
4. Molinos Revolvedores. a) Molinos de Barras b) Molinos de Bolas. c) Molinos de Tubo.

**C) Molinos Ultrafinos.**

1. Molinos de Martillos con Clasificación Interna.
2. Molinos de Flujo Energético.
3. Molinos Agitadores.

**3.2. Tipos de molinos**

**3.2.1. Molino de barras (rod mill)**

Según [3] “El molino de Barras está formado por un cuerpo cilíndrico de eje horizontal, que en su interior cuenta con barras cilíndricas sueltas dispuestas a lo largo del eje, de longitud aproximadamente igual a la del cuerpo del molino. Éste gira gracias a que posee una corona, la cual está acoplada a un piñón que se acciona por un motor generalmente eléctrico. Las barras se elevan, rodando por las paredes del cilindro hasta una cierta altura, y luego caen efectuando un movimiento que se denomina “de cascada”. La rotura del material que se encuentra en el interior del cuerpo del cilindro y en contacto con las barras, se produce por frotamiento (entre barras y superficie del cilindro, o entre barras), y por percusión (consecuencia de la caída de las barras desde cierta altura)”.

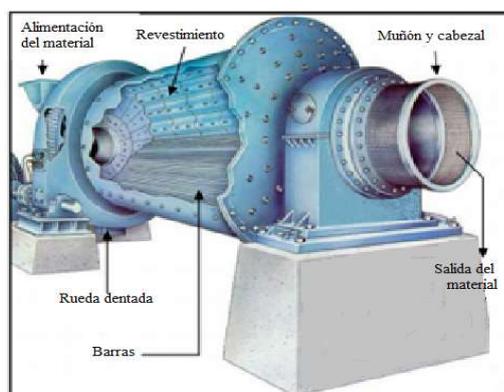
Para [3] “El material ingresa por el eje en un extremo del cilindro, y sale por el otro extremo o por el medio del cilindro, según el tipo de descarga. El cuerpo cilíndrico se construye con chapas de acero curvadas y unidas entre sí por soldadura eléctrica. La cabeza o fondo del cilindro se construye en acero moldeado o fundición, y es de forma ligeramente abombada o cónica. Habitualmente los ejes o muñones están fundidos con la cabeza, pero también pueden estar ensamblados con bridas atornilladas. Los muñones apoyan sobre cojinetes, uno en cada extremo”.

Según la investigación realizada por [4] “La parte cilíndrica, los fondos y la cámara de molienda, están revestidos interiormente por placas atornilladas de acero al manganeso o al cromo-molibdeno. Las caras internas del molino consisten de revestimientos renovables que deben soportar impacto, ser resistentes a la abrasión y promover el movimiento más favorable de la carga. Las barras generalmente, son de acero al carbono y su desgaste es alrededor de cinco veces mayor al de los revestimientos, en las mismas condiciones de trabajo”.

**Tabla 3.1.** Tipos de descarga en molinos de barras.

Tipos de Descarga			
	Rebalse	Periférica Final	Periférica Central
Tipos de Molienda	Húmeda	Seca o Húmeda	Seca o Húmeda
Tipos de Circuitos	Abierto	Abierto	Abierto
Tasa Máxima de Reducción	15-20:1	12-15:1	4-8:1
Tamaño de Molienda	Malla 10-35	Malla 4-12	Malla 3-6
Tamaño Máximo de Alimentación	< 3/4"	< 3/4"	< 3/4"
Relación L/D	1,25:1	1,25:1	1,25:1
% Típico de Vel. Crítica	60-65 %	65-70 %	65-70 %
% de Carga	40-45 %	35-50 %	30-50 %
Capacidad	Normal	Normal	Doble

Fuente: [3].



**Figura 3.1.** Molino de barras con descarga por rebalse.

Fuente: [4].

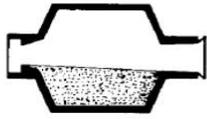
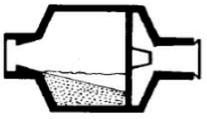
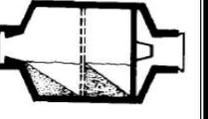
### 3.2.2. Molino de bolas (ball mill)

Según [3] “El molino de Bolas, análogamente al de Barras, está formado por un cuerpo cilíndrico de eje horizontal, que en su interior tiene bolas libres. El cuerpo gira merced al accionamiento de un motor, el cual mueve un piñón que engrana con una corona que tiene el cuerpo cilíndrico. Las

bolas se mueven haciendo el efecto “de cascada”, rompiendo el material que se encuentra en la cámara de molienda mediante fricción y percusión”.

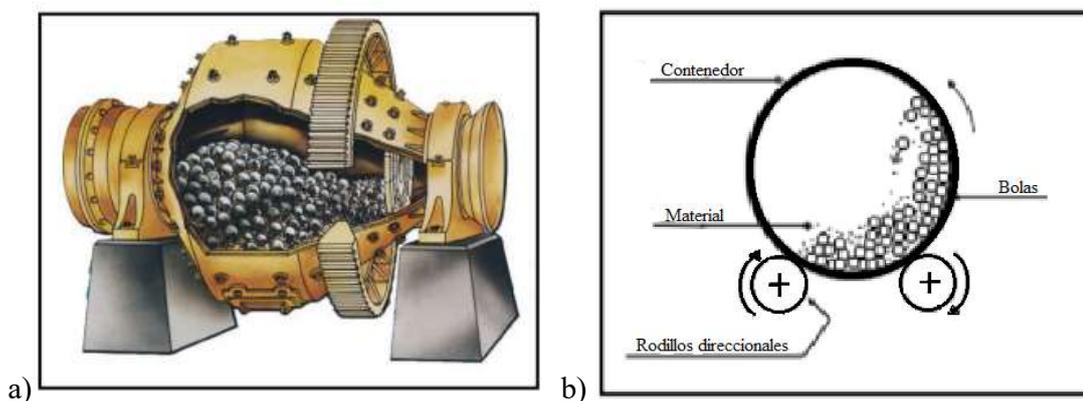
El material a moler ingresa por un extremo y sale por el opuesto. Existen tres formas de descarga: por rebalse (se utiliza para molienda húmeda), por diafragma, y por compartimentado (ambas se utilizan para molienda húmeda y seca).

**Tabla 3.2.** Tipo de descarga en molinos de bolas.

Tipos de Descarga			
	Rebalse	Diafragma	Compartimentado
Tipos de Molienda	Húmeda	Seca o Húmeda	Seca o Húmeda
Tipos de Circuitos	Cerrado	Cerrado	Cerrado o Abierto
Tamaño de Molienda	Fino – Malla 200	Intermedio (Vía Húmeda) – Malla 65-100; Fino (Vía Seca) – Malla 325	Fino – Malla 150-325
Tamaño Máximo de Alimentación	Malla 10-14	< ½”	< ½”
Relación L/D	1-1,5:1	1-1,5:1	C. Abierto: 3,5-5:1 C. Cerrado: 2,5-3,5:1
% Típico de Vel. Crítica	65-70 %	68-78%	C. Abierto: 65-75 % C. Cerrado: 70-78 %
% de Carga	40-45 %	35-50 %	30-50 %

Fuente: [3].

En lo que hace a los materiales de recubrimiento interior de la cámara de molienda, y de las bolas, corresponden análogas consideraciones a las de los molinos de Barras.



**Figura 3.2.** a) Molino de bolas, b) Sección transversal de un Molino de bolas.

Fuente: [4].

### 3.2.3. Molino de compartimientos múltiples

Según [2] “Existen molinos de dos compartimentos que constan de dos compartimentos separados en el interior del cilindro del molino. Éstos pueden contener barras y bolas, o bolas

grandes y pequeñas. Estos tipos de molinos se utilizan para hacer en un mismo aparato la molienda gruesa y la fina. La relación longitud/diámetro se encuentra acotada entre 3/1 y 5/1, los diámetros mayores oscilan entre 1,2 y 4,5 metros y las longitudes entre 6 y 14 metros. Se han utilizado en la industria del cemento y resultan también adecuados para tratar grandes volúmenes de materiales duros y abrasivos”.



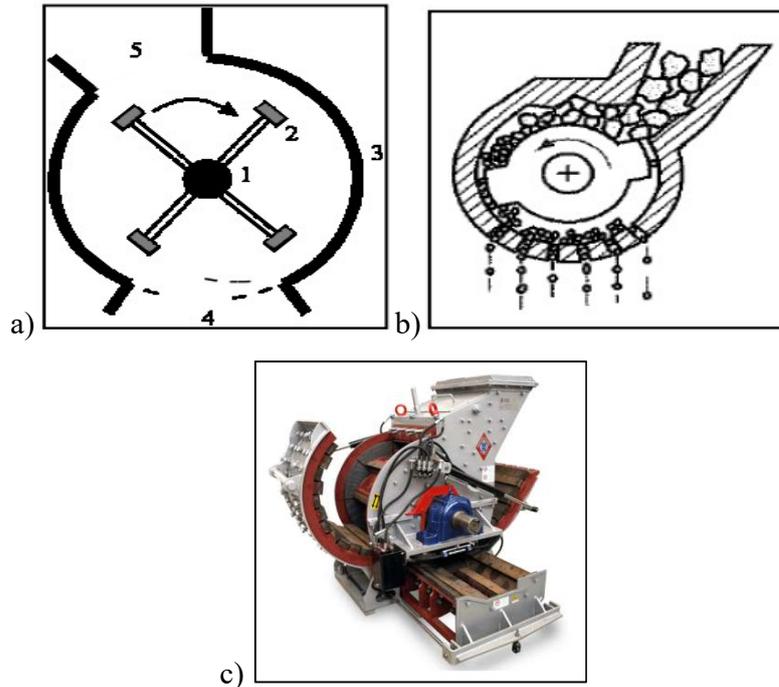
**Figura 3.3.** Molino de compartimientos múltiples.

**Fuente:** [2].

#### **3.2.4. Molino de martillos**

Según [5] “El molino de martillos actúa por efecto de impacto sobre el material a desintegrar. En la Figura 3.4 puede verse un esquema del molino, el cual cuenta con una cámara de desintegración (3), con una boca de entrada del material en la parte superior (5) y una boca de descarga cerrada por una rejilla (4). En el interior de la cámara hay un eje (1), que gira a gran velocidad y perpendicularmente a él van montados articuladamente los elementos de percusión (martillos) (2) los cuales por la fuerza centrífuga que se genera al girar el eje, se posicionan perpendicularmente en posición de trabajo. El material a moler ingresa por la boca de entrada (5) y por gravedad cae al interior de la cámara de desintegración, donde es golpeado por los martillos. Seguidamente choca contra la cámara de desintegración y nuevamente es golpeado por los martillos. Esto ocurre sucesivamente hasta que alcanza un tamaño tal que puede pasar por la rejilla de la descarga (4)”.

La reducción del tamaño se debe principalmente a las fuerzas de impacto. Con frecuencia, los martillos se sustituyen por barras. Se utilizan mucho en la industria alimenticia para moler especias, leche deshidratada, azúcares, etc. No se recomienda para la molienda fina de materiales muy duros, por el excesivo desgaste que sufren.



**Figura 3.4.** a) Esquema de molino de martillos b) Corte de Molino de martillos, c) Molino de Martillos.

**Fuente:** [4].

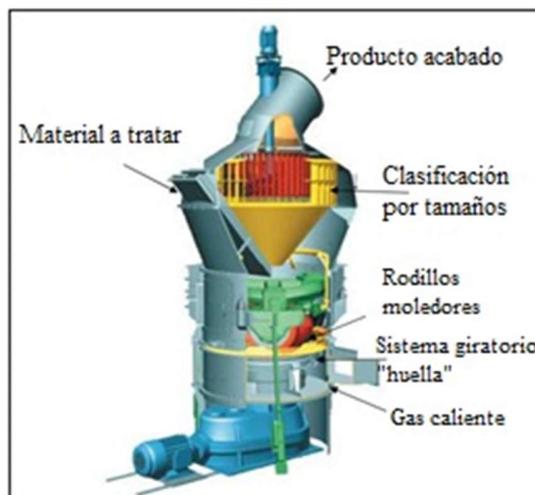
### 3.2.5. Molino de rodillos

Es muy utilizado en las plantas de molienda de cemento (vía seca). El molino consta de tres rodillos moledores grandes, los cuales son mantenidos a presión por medio de cilindros hidráulicos, sobre un mecanismo giratorio con forma de disco sobre el que existe una huella. El material a moler se introduce a través de una boca de alimentación ubicada al costado de la estructura principal, y cae directamente en las huellas de molido (pistas).

Según [4] “A medida que el material es molido por los rodillos, se va desplazando por fuerza centrífuga, hacia los bordes del sistema giratorio, ubicándose en el perímetro. Simultáneamente, una corriente lateral de gas caliente entra fuertemente a la zona de molido a través de un anillo que la rodea; por su acción, el material molido es levantado hacia la zona superior de la caja y el producto de medida aceptable pasa a través de un clasificador hacia una puerta de descarga”

Según las investigaciones de [4] “Este molino admite materiales de alimentación de hasta 50 mm (2”) y tiene una capacidad de molienda entre 50 y 100 tn/hora; hay unidades que admiten tamaños de alimentación mayores y por ende tienen mayores capacidades de producción. El consumo de

energía es de alrededor del 50% de la energía consumida por un molino de Bolas que realice un trabajo equivalente”.



**Figura 3.5.** Molino de rodillos.

**Fuente:** [4].

### **3.3. Etapas de la molienda**

La primera etapa consiste en fraccionar sólidos de gran tamaño. Para ello se utilizan los trituradores o molinos primarios. Los más utilizados son: el de martillos, muy común en la industria cementera, y el de mandíbulas. En los molinos de mandíbulas la alimentación se recibe entre las mandíbulas que forman una "V". Una de las mandíbulas es fija, y la otra tiene un movimiento alternativo en un plano horizontal.

La segunda etapa sirve para reducir el tamaño con más control, manejándose tamaños intermedios y finos. Para esta etapa el molino más empleado en la industria es el molino de bolas. El molino de bolas lleva a cabo la mayor parte de la reducción por impacto. Cuando éste gira sobre su propio eje, provoca que las bolas caigan en cascada desde la altura máxima del molino.

Según [3] “Esta acción causa un golpeteo sobre el material a moler; además de un buen mezclado del material. De esta manera la molienda es uniforme. El molino de bolas a escala industrial trabaja con flujo continuo teniendo dos cámaras en su interior; la primera contiene bolas grandes de dos a tres pulgadas de diámetro, mientras la segunda tendrá bolas de 1 a 1 1/2 pulgadas. Estos molinos generalmente trabajan en circuito cerrado.”

Según [6] “Se debe realizar la validación del diseño y desarrollo de acuerdo con lo planificado para asegurarse de que el producto resultante es capaz de satisfacer los requisitos para su aplicación especificada o uso previsto, cuando sea conocido. Siempre que sea factible, la

validación debe completarse antes de la entrega o implementación del producto. Deben mantenerse registros de los resultados de la validación y de cualquier acción que sea necesaria”

### **3.4. Elementos importantes en la molienda**

Existe una serie de elementos importantes que influyen en la molienda de los materiales. Estos son:

- Velocidad Crítica.
- Relaciones entre los elementos variables de los molinos.
- Tamaño máximo de los elementos moledores.
- Volumen de carga.
- Potencia.
- Tipos de Molienda: húmeda y seca.

#### **3.4.1. Velocidad Crítica**

La velocidad crítica para un molino y sus elementos moledores es aquella que hace que la fuerza centrífuga que actúa sobre los elementos moledores, equilibre el peso de los mismos en cada instante.

#### **3.4.2. Relaciones entre los Elementos Variables**

El diámetro del molino, su velocidad, y el diámetro de los elementos moledores son los elementos variables del proceso. Teniendo en cuenta que en la molienda se emplean elementos moledores de distintos tamaños, las relaciones entre los elementos variables son:

- A mayor diámetro de bolas, mayor es la rotura de partículas grandes (percusión).
- A menor diámetro de bolas, mayor es la molienda de partículas pequeñas por una mayor superficie de los elementos moledores (fricción).
- A mayor diámetro de bolas, mejora la molienda de material duro (percusión).
- Para igual molienda, a mayor diámetro del molino o mayor velocidad, menor el diámetro necesario de bolas.

#### **3.4.3. Tamaño Máximo de los Elementos Moledores**

En los molinos de barras y bolas, los elementos moledores no tienen todos los mismos tamaños, sino que a partir de un diámetro máximo se hace una distribución de los mismos en tamaños inferiores.

### 3.4.4. Volumen de Carga

Los molinos de bolas y barras no trabajan totalmente llenos. El volumen ocupado por los elementos moledores y el material a moler referido al total del cilindro del molino, es lo que se denomina Volumen de Carga.

### 3.4.5. Potencia

La potencia máxima se desarrolla cuando el volumen de carga es del 50% aproximadamente, sin embargo, generalmente se trabaja entre un 30% y un 40% ya que como la curva es bastante plana, la potencia entregada es similar a la del 50%.

## 3.5. Tipos de Molienda: Molienda Húmeda y Molienda Seca

La molienda se puede hacer a materiales secos o a suspensiones de sólidos en líquido (agua), el cual sería el caso de la molienda Húmeda. En la molienda húmeda el material a moler es mojado en el líquido elevando su humedad, favoreciéndose así el manejo y transporte de pulpas, que podrá ser llevado a cabo por ejemplo con bombas en cañerías.

En la molienda húmeda moderna, luego del proceso de desintegración, la clasificación de partículas se llevará a cabo en hidro ciclones y si se desea concentrar el mineral se podrá hacer una flotación por espumas. El líquido, además, tiene un efecto refrigerante con los calores generados en el interior.

**Tabla 3.3.** Diferencias entre molienda húmeda y molienda seca

<b>Molienda Húmeda</b>	<b>Molienda Seca</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Requiere menos potencia por tonelada tratada.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Requiere más potencia por tonelada tratada.</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• No requiere equipos adicionales para el tratamiento de polvos.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Si requiere equipos adicionales para el tratamiento de polvos</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Consume más revestimiento (por corrosión).</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Consume menos revestimiento</li></ul>

Fuente: [3].

### **3.6. Cuerpos moledores**

Los cuerpos moledores suelen ser:

- **Barras:** Están fabricadas de acero con alto contenido en carbono. Poseen un alto límite elástico para evitar que se tuerzan las barras evitando que se rompan o se traben con otras barras. Los molinos de barras se emplean para moliendas más gruesas.
- **Bolas:** Pueden estar fabricadas de acero de fundición, acero forjado y éste puede estar aleado al Cr-Mo, para ser resistentes al desgaste por impacto o aleado con Ni (Ni-hard), para ser resistentes a la abrasión (bolas de acero muy duro), en ocasiones no son esféricas, sino que toman formas cilíndricas. Los molinos de bolas se emplean para moliendas finas.
- **Propio mineral:** Los cuerpos de molienda van a ser el propio mineral o un porcentaje de mineral y otro de bolas u otro tipo.

### **3.7. Reducción de tamaño y tamizado de sólidos**

#### **3.7.1. Principios generales**

En la industria suele ser necesario desmenuzar los sólidos, mediante la aplicación de fuerzas mecánicas. Las razones para esta reducción de tamaño son las siguientes:

- a) La reducción de tamaño puede facilitar la extracción de un determinado constituyente deseado, por ejemplo, en la obtención de harina a partir de granos de trigo, o de jarabe, a partir de caña de azúcar.
- b) La reducción a un tamaño definido puede constituir una necesidad específica de producto, como sucede, por ejemplo, en la preparación de especias y en el refinado del chocolate.
- c) Una disminución del tamaño de partícula de un material aumenta la superficie del sólido, lo que resulta favorable en muchos procesos de velocidad, por ejemplo:
  1. El tiempo de secado de los sólidos húmedos se reduce mucho aumentando su área superficial.
  2. La velocidad de extracción de un soluto deseado crece al aumentar el área de contacto entre el sólido y el disolvente.
  3. El tiempo necesario para ciertas operaciones-horneo, escaldado, etc.- se puede reducir troceando los productos sometidos al proceso.

#### **3.7.2. Naturaleza de las fuerzas utilizadas en la reducción de tamaño**

En general, se pueden distinguir tres tipos de fuerzas. Los tipos de fuerzas que predominan en algunas de las trituradoras de uso frecuente en la industria alimentaria son las siguientes:

**Tabla 3.4.** Fuerzas en trituradoras industriales.

<b>Fuerza</b>	<b>Principio</b>	<b>Aparato</b>
Compresión	Compresión (cascanueces)	Rodillos trituradores
Impacto	Impacto (bolas)	Molino de bolas
Cizalla	Frotamiento (piedra de molino)	Molino de discos

**Fuente:** [7]

Según [7] la definición de cada una de las fuerzas son las siguientes:

- “Las fuerzas de compresión se utilizan para la trituración grosera de productos duros.
- Las fuerzas de impacto se pueden considerar de uso general, empleándose en la molienda fina, media, y gruesa de muy diversos productos alimenticios.
- Las fuerzas de cizalla en aparatos para la trituración de productos blandos, no abrasivos, para obtener piezas de tamaños muy pequeños, es decir, en la molienda fina”.

### **3.8. Tipos de Operación de Molienda**

Se distinguen varios tipos de operación de molienda, a continuación, revisaremos algunos que son más relevantes para el alcance de éste tópico.

#### **a) Molienda convencional por bolas.**

Es un método de reducción de tamaños de partículas en que el medio molidor está constituido por bolas de acero. Las bolas de acero generalmente son esféricas, pero pueden presentar formas variadas: cónicas, cilíndricas u otras formas irregulares.

La eficiencia de la molienda depende del área superficial del medio de molienda. Así, las bolas deben ser tan pequeñas como sea posible. Su carga se gradúa de manera tal, que las bolas grandes sean suficientemente pesadas como para moler las partículas más grandes y más duras que las partículas de alimentación. El volumen de la carga de bolas corresponde a alrededor del 40 a 50 % del volumen interior del molino. Es posible utilizar una carga levemente mayor o igual al 50 % del volumen total del molino, para maximizar el consumo de potencia en la molienda.

#### **b) Molienda Autógena**

Es un método de reducción de tamaño en el cual los medios molidores, están formados principalmente por colpas de la mena que se procesa, obtenidas y seleccionadas de una etapa de reducción de tamaño anterior.

### c) Molienda Semiautógena

Según [2] “Es un método de reducción de tamaño en el cual los medios moledores, están formados tanto por colpas de la mena que se procesa, como por un porcentaje del volumen total del molino correspondiente a bolas de acero. Este porcentaje puede variar entre un 4 a 14%, siendo el valor más usado un 8%. La carga máxima de bolas corresponde a valores de 12 a 14%, límite impuesto por el desgaste excesivo de las bolas y liners, y además por los problemas mecánicos que surgen al usar cargas de bolas mayores”

## 3.9. Arcilla

En la industria cerámica se genera una gran cantidad de residuos, normalmente depositados en los vertederos. Cada tres años una hectárea es contaminada por ellos. Así, la recuperación y reciclaje de residuos de valor económico es una solución atractiva en relación a su disposición debido a la reducción tanto del consumo de materias primas como de la contaminación ambiental.

Según [8] “las arcillas se caracterizan por adquirir plasticidad al ser mezclado con agua, sonoridad y dureza al extraer su humedad por encima de 800 °C. Es uno de los materiales más baratos y de amplio rango de utilidad en manufactura, industria y ciencias”.

### 3.9.1. Proceso de molienda de la arcilla

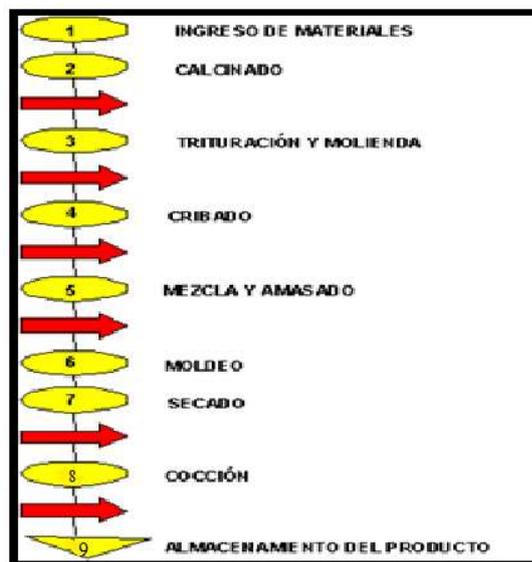


Figura 3.6. Proceso productivo de la arcilla

Fuente: [9].

A continuación, se presenta una explicación del proceso productivo a nivel microempresa/artesanal:

Cabe mencionar que no todas las personas que se dedican a realizar elementos de arcilla utilizan el mismo procedimiento para la molienda de la misma, en este caso según [9] éste es el procedimiento general que se suele utilizar.

**3.9.1.1. Ingreso de materiales y almacenamiento.** La materia prima se recibe a granel (sin embazar) y se almacena.

**3.9.1.2. Calcinación.** La calcinación es un tratamiento térmico a alta temperatura que se aplica a las materias primas para el proceso. Tiene como objetivos: desprender los componentes volátiles combinados químicamente, desarrollar el estado físico deseado y producir contracción, con el fin de eliminarla durante la cocción final. El proceso se efectúa en hornos periódicos.

**3.9.1.3. Trituración.** Las arcillas duras requieren trituración previa en terrones suficientemente pequeños para el equipo de molienda. Existen trituradoras de mandíbulas, giratorias o de rodillos, según las propiedades físicas de la arcilla. Los terrones se muelen (molienda) usualmente en una artesa seca con objeto de reducirlos al tamaño adecuado para después cribarlas en un molino de fondo perforado para que pase el material molido. En el caso de la molienda muy fina, se usan molinos de bola de cilindros y de anillos.

Aunque también existen personas que no tienen este tipo de molinos, y el procedimiento es distinto, recogen todos los desperdicios de arcilla ya sea húmeda o seca y lo ponen en agua para que se vaya diluyendo y haciéndose suave para su reutilización.

**3.9.1.4. Cribado.** Se usan varios modelos de cribas para las arcillas refractarias; las más comunes son del tipo vibratorio. En general, todos los tamaños de arcilla que pasan por la criba se emplean para hacer tabique. La operación de cribado es complicada y exige un control riguroso para obtener el tamaño de grano que proporcione la máxima densidad y resistencia en el producto. Se usan dos métodos: uno semicontínuo; y el otro, de clasificación de grano por máximo y mínimo de intervalo.

En el semicontinuo se combinan dos lotes de material en proporciones que den el tamaño deseado. El primer lote es un material clasificado de modo continuo en el cual el tamaño mayor es del grosor adecuado. El otro lote se muele finamente para que contenga una proporción alta del tamaño mínimo deseado.

- 3.9.1.5. Mezcla y amasado.** Obtener mezcla homogénea de los ingredientes del lote, eliminando las burbujas de aire atrapado. En el proceso de moldeo se necesitan tres tipos de mezcla: manual, de barro duro y de prensado en seco. Los lotes para el tabique manual contienen de 10 a 20% de agua; los de barro duro, de 10 a 15% de agua, y los de prensado en seco, 5% de agua. La mezcla de ladrillo manual se prepara en una artesa húmeda. La de barro duro se trabaja en una malaxadora, artesa semicircular en la cual un eje de revolución, de paletas inclinadas, agita y mezcla la arcilla.
- 3.9.1.6. Moldeo.** El moldeo manual del tabique de sílice es esencialmente igual al de arcilla, salvo que la mezcla se apisona en moldes de acero con mazos pesados en vez de arrojarse simplemente en el molde. En el proceso de prensado en seco, el tabique de sílice se moldea por prensa mecánica igual que el ladrillo de arcilla.
- 3.9.1.7. Secado.** Se usan dos métodos de secado para el producto de arcilla refractaria. El del piso caliente a temperatura regulada y calentado por conductos de vapor o de aire caliente se adapta mejor al ladrillo moldeado a mano y a las formas grandes. Los secadores de túnel, calentados por el calor residual de los hornos o por serpentines de vapor, se usan comúnmente para productos de barro duro y para algunos prensados en seco. Estos últimos, a causa del bajo contenido de humedad de la mezcla, se endurecen directamente en el horno, sin necesidad de tratamiento de secado.
- 3.9.1.8. Cocción.** Es el tratamiento térmico final en hornos, al cual se somete para conseguir aglutinación y otras propiedades físicas y químicas necesarias. Las temperaturas máximas empleadas en el de arcilla varían de 1,100°C a 1,650°C, según el tipo de producto manufacturado.
- 3.9.1.9.** Los hornos empleados son de tipo periódico o continuo. Los hornos periódicos son de sección transversal circular o rectangular y operan según el

principio de tipo descendente. El tiempo necesario para el ciclo de cocción completo depende del tamaño del horno

**3.9.1.10. Almacén de producto terminado.** Finalmente se traslada al almacén de producto terminado.

## **4. METODOLOGÍA Y MATERIALES**

### **4.1. Parámetros de diseño del Molino de Bolas**

Según [10] “La construcción de todo aparato eléctrico y electrónico debe ser realizada bajo la dirección técnica y responsabilidad de un profesional de la ingeniería eléctrica o electrónica, y este debe certificar la calidad tanto de la ejecución como el hecho de que todos los materiales y equipos utilizados sean aceptados por el INEN o por el órgano regulador competente”.

En la selección del tipo de equipo (bolas) acorde con las necesidades del taller artesanal, según [10] se tiene en consideración los siguientes parámetros principales:

- Razón largo/diámetro (entre 0.5m y 1m).
- “Feed Size” o tamaño del material de alimentación.
- Razón de reducción (en el caso de los molinos de bolas, varía entre 20:1 y 200:1, muy por sobre las razones típicas de los molinos de barras que es entre 15:1 y 20:1).

Según [10] “toda instalación deberá ejecutarse de acuerdo a un proyecto técnicamente concebido, el cual deberá asegurar que la instalación no presenta riesgos para operadores o usuarios, sea eficiente, proporcione un buen servicio, permita un fácil y adecuado mantenimiento y tenga la flexibilidad necesaria como para permitir modificaciones o ampliaciones con facilidad”.

Según [11] “la soldadura por puntos, es el tipo de soldadura que, a través de presión y temperatura, se calientan las dos piezas que se quieren soldar usando una corriente eléctrica con temperaturas lo suficientemente altas para la fusión y también se ejerce una presión entre las dos piezas a soldar”

Según [12] “El proceso de soldadura de puntos es el más difícil entre los métodos de soldadura por resistencia. Cabe destacar que un gran punto a favor a la soldadora de presión es que el proceso se considera limpio, rápido y fuerte”.

Estas deben estar dentro de la ranura o si se debe permitir que estén fuera de la misma, para proporcionar la categoría prevista de rango de esfuerzo.

#### **4.2. Consideraciones del diseño**

Según [13] Se tienen los siguientes enfoques y consideraciones al momento de diseñar el molino:

- Tamaño del molino (razón largo/diámetro).

Estimación inicial de la capacidad del molino. De manera de poder estimar los parámetros siguientes:

- Sistema de alimentación (ángulos, diámetros de entrada, etc.).
- Alimentador de material a procesar
- Sistema de descarga
- Número de elevadores del molino.
- Material de Recubrimientos

Las carcasas y los alojamientos de los rodamientos deben inspeccionarse periódicamente para detectar daños. Las fisuras y roturas deben ser reparadas y los ajustes deben ser restaurados de acuerdo con las especificaciones del fabricante.

Según [10] “De acuerdo al ambiente en que se instalen los equipos deberán contar con las siguientes protecciones:

- Protección contra la intemperie.
- Protección contra la acción del aire salino.
- Protección contra agentes químicos y vapores corrosivos.

Esta protección es opcional ya que depende del lugar donde vaya a funcionar el molino de bolas.

- Tipo de superficie interna del molino (suave, rugoso u ondulado).
- Reducción de tamaño de las partículas consideradas.

Como antecedente, se tiene que la reducción del tamaño de las partículas de mineral es proporcional a la masa de la bola y al área de superficie de ésta. Por otro lado, si se consideran los dos mecanismos de degradación del material (impacto y desgaste) se tiene que la reducción por impacto es directamente proporcional al cubo de la masa de la bola (desgaste por Impacto  $\alpha$

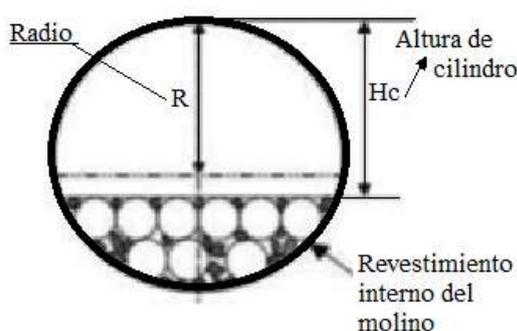
M3) y que la degradación por desgaste es inversamente proporcional a la superficie de la bola (degradación por desgaste  $\propto S^{-1}$ ).

La reducción en el material a su vez depende de los siguientes factores, expresados de manera cualitativa:

- Características de carga (masa, volumen, dureza, densidad, distribución de tamaño de la partícula de material procesado, etc.)
- Características de la molienda (masa, densidad, número de bolas, tamaño de bolas, etc.).
- Velocidad de rotación del molino.
- Volumen de carga de material procesado.

Según [2] “Dependiendo del nivel de carga del molino se tendrá diversos resultados (varía la carrera de las bolas, la amortiguación del impacto, etc.). El óptimo de llenado del molino depende del tipo de molienda que se lleva a cabo y la potencia invertida en el proceso. Normalmente el volumen ocupado por material procesado con respecto al total del molino representa entre un 40 a 50 % del volumen interior del molino. Es posible utilizar una carga levemente mayor o igual al 50 % del volumen total del molino, para maximizar el consumo de potencia en la molienda. Este volumen contempla tanto el material procesado como las bolas del molino”.

- Carga siendo procesada en términos de altura de llenado. A continuación, se muestra un esquema donde se puede apreciar los modelos de altura de llenado que se usan en el diseño.



**Figura 4.1.** Esquema altura de carga del molino.

**Fuente:** [2].

#### **4.2.1. Tamaño de bolas y carga inicial.**

Según [14] se debe considerar los siguientes parámetros:

- Alimentación de bolas: Índice de trabajo (KWh/t), densidad de pulpa, tamaño de partículas.
- Características del molino: Diámetro del molino, velocidad de rotación de éste.
- Tamaño de bolas de reemplazo. Teniéndose en cuenta que las bolas sufren desgaste durante la operación del molino, éstas deben ser reemplazadas en un intervalo de tiempo determinado.

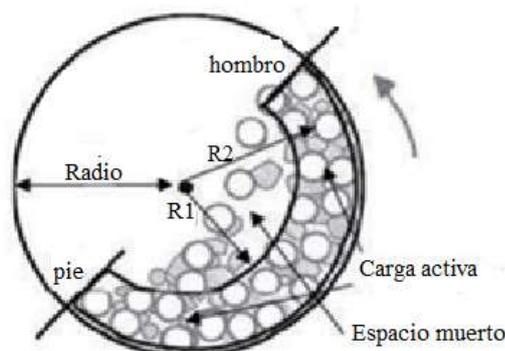
Este desgaste en las bolas se relaciona con las variables de la siguiente manera:

- Desgaste de bola  $\propto$  Superficie de la bola por unidad de masa ( $m^2/kg$ ).
- Desgaste de bola  $\propto D^{-1}$  (diámetro de la bola).

Además, dentro del diseño del molino, se consideró el desgaste de las bolas como un factor importante en el diseño. Otros factores importantes para el diseño son:

- Rotación del molino y velocidad crítica. Esto último estará determinado por la masa de las bolas, coeficiente de fricción de paredes, etc.

Según [13] “Se debe inspeccionar los núcleos de las partes rotativas para detectar evidencias de ajustes flojos en el eje, buje, araña o en lo que haya sido utilizado para ensamblar el paquete del núcleo. El diámetro exterior de las láminas de las partes rotativas debe estar en buenas condiciones y concéntrico en relación con los asientos de los rodamientos en el eje”



**Figura 4.2.** Movimiento de la carga dentro del molino.

**Fuente:** [2].

- Condiciones iniciales del molino y carga inicial de bolas.

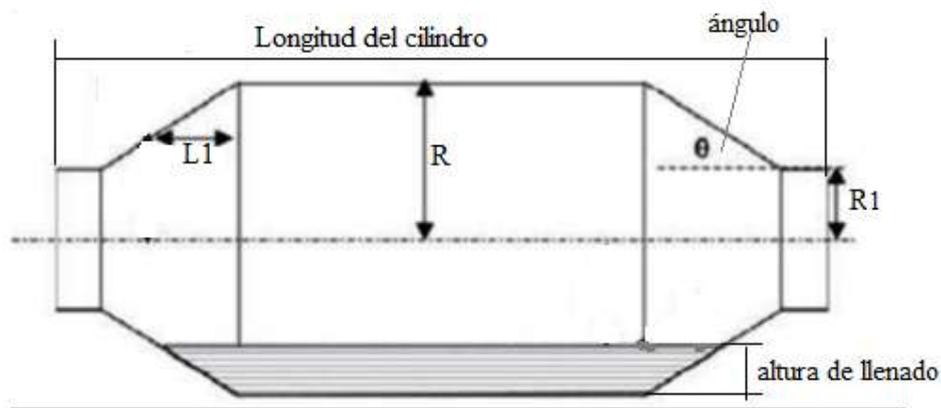
Este tema es de vital importancia al tenerse en consideración el torque inicial necesario para el equipo diseñado. El factor de importancia en este aspecto es el volumen de carga de bolas ( $V_{bolas}$  vs.  $V_{molino}$ ).

- Potencia teórica del molino.

De esta estimación y con criterios razonables se estableció la potencia de diseño del molino. Este factor es muy importante para considerar el inicio de la operación del molino, momento en el que se debe vencer un torque inicial por lo que el motor utilizado debe cumplir con ciertas condiciones. En general la potencia es función de:

- Dimensiones del molino
- Porcentaje de carga de bolas.
- Velocidad de rotación del molino.
- El tipo de molino considerado.

A continuación, se presentan dos esquemas que ilustran estos parámetros.



**Figura 4.3.** Dimensiones generales del molino.

**Fuente:** [2].

#### 4.2.2. Levantadores

Los levantadores son usados para promover la operación de molienda al levantar las rocas y bolas con el fin de que caigan de cierta altura y se genere así una mejor reducción por impacto y por desgaste. El número de levantadores está dado generalmente por la siguiente regla:

- $N^{\circ} \text{ Levantadores} = 3.3 \cdot \pi \cdot D = 39,5 \approx 40$  Doble onda
- $N^{\circ} \text{ Levantadores} = 6.6 \cdot D = 25,1 \approx 26$  Onda simple

Dónde: D es el diámetro del molino en metros.

Los levantadores están ubicados en la camisa del molino, esta es la estructura interna del molino cuya función consiste en proteger la estructura del molino al desgaste y ser una plataforma base de los levantadores.

Según [13] “Se debe examinar las láminas o chapas de los núcleos del estator y de las partes rotativas para detectar si hay evidencias de puntos calientes, daño físico o partes faltantes”.

Según [13] “Las camisas pueden ser de distintos materiales como acero al magnesio, níquel endurecido o aceros de alto carbono, en general se busca que el material sea resistente al desgaste y al impacto. La altura de las ondas que poseen las camisas suelen ser de entre 1.5 a 2 veces el espesor de ésta. Además, suelen usarse camisas con doble onda para un tamaño de bolas menor de 60 mm y de onda simple para tamaños mayores de 60 mm, como las bolas usadas en el molino son de 1 pulgada se escoge el diseño de onda doble”.

Las láminas del estator no deben estar flojas dentro de la carcasa. Si aplica, el diámetro interior de las láminas del estator debe estar en buen estado y concéntrico en relación con el diámetro del anillo de ajuste de la carcasa.

### **4.3. Operación del molino**

La operación del molino consiste en moler el mineral y la roca producto de la rotación, esta rotación es soportada por los “trunnions” y otorgada por medio de un sistema piñón corona. Una porción de la carga del molino es arrastrada por éste a lo largo del perímetro debido a la rotación, al exceder un cierto ángulo parte de la carga se desliza por la camisa mientras otra parte cae como cascada, esto genera el desgaste por abrasión y por impacto respectivamente.

Como se vio anteriormente la reducción por impacto es proporcional a la masa de la bola y la reducción por abrasión es inversamente proporcional a la superficie de ésta.

El balance de estas energías de trituración se logra al manejar diversos parámetros como volumen de carga de pulpa, volumen de bolas, velocidad de rotación, entre otros.

El primer paso consiste en interpretar los requerimientos del diseño del molino de acuerdo con las necesidades del problema (Tabla 4.1), para esto es necesario fijar las metas del diseño del molino y evaluarlas con base en criterios de ingeniería.

**Tabla 4.1.** Requerimiento del diseño.

<b>Id</b>	<b>Concepto</b>	<b>Función</b>
1	Tipo de molino	Bolas de acero
2	Tipo de energía	Eléctrica
3	Tipo de transmisión	Engranés
4	Entrada de producto	Manual con posibilidad a automática
5	Salida de producto	Semiautomática
6	Tipo de motor	Trifásico/Reductor
7	Operación y control	Automática
8	Seguridades	Automática
9	Ensamble	Modular
10	Dimensionamiento	Compacto

Fuente: [2].

A continuación, se muestra la metodología de cálculo utilizada para la construcción del molino junto a los resultados obtenidos.

**Tabla 4.2.** Metodología de cálculo.

<b>Cálculos</b>	<b>Ecuación</b>	<b>Resultado</b>
<b>Diseño del tambor</b>		
Volumen de la arcilla	$v_{arcilla} = \frac{m}{\delta}$	1799 $cm^3$
Peso máximo de la arcilla	$m = \delta * V$	6.60 $kg$
Volumen total del tambor	$V_t = 4 * v_{arcilla}$	7.196 * 10 <sup>-3</sup> $m^3$
Radio del tambor	$r^3 = \frac{V_t}{2.2 * \pi}$	0.101m

Diámetro del tambor	$D = 2 * r$	0.203 m
Longitud del tambor	$L = 1.2 * D$	0.304 m
Diámetro de superficies externas	$D_s = D + 2f$	0.208 m
<b>Cálculos para los elementos de molienda</b>		
Volumen real del tambor	$V_{ta} = \frac{\pi * D^2 * L}{4}$	0.011m <sup>3</sup>
Peso de las bolas	$P_B = V_{ta} * 0.25 * 0.6 * \delta_{bo}$	6.705 kg
Peso máximo de bolas	$m = \delta * V$	6.60 kg
<b>Potencia del motor</b>		
Potencia teórica necesaria	$P_t = 12.5 H$	0.4375 Hp
Potencia real del motor	$P_r = P_t + 20 \% * P_t$	0.526 Hp
Velocidad crítica	$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D}}$	60.42 rpm
<b>Cálculos para la transmisión por Cadena</b>		
Paso de la cadena	$P = \sqrt[3]{\left(\frac{3640}{n_1}\right)^2}$	11.61 mm
Numero de pasos	$Cx = \frac{C}{P}$	21.988
Velocidad de la cadena	$V = \frac{P * Z_1 * n_1}{1000}$	23.368 $\frac{m}{min}$
Longitud de la cadena	$L = 2C + \frac{Z_1 + Z_2}{2} * P + \frac{\left(\frac{Z_1 + Z_2}{6.28}\right)^2}{C} * P_2$	816.15mm
Par de torsión de la cadena	$\tau = \frac{P}{n}$	0.05 KNm

Fuerza en el eje	$\tau = F * r$	1.66 KN
Coefficiente de seguridad	$k = \frac{\text{Carga de Cadena}}{\text{Carga soportada}}$	12.62
<b>Material del tambor</b>		
Material AISI 304	$n = \frac{S_y}{\sigma_{eq}}$	88.57 MPa
<b>Diseño estático del eje</b>		
Análisis de flexión	$\sigma = \frac{M * \frac{d}{2}}{\pi * \frac{d^4}{64}}$	845.43 $\frac{KNm}{d^3}$
Torque de la cadena	$T = F * r$	41.5 KN
Análisis a Torsión	$\tau = \frac{16 * T}{\pi * d^3}$	211.35 $\frac{Nm}{d^3}$
Diámetro de la cadena (Esfuerzo de Von Mises)	$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{x^2} + 3 * \tau_{xy^2}}$	0.021 mm
Factor de seguridad	$n = \frac{310 MPa}{56.22 MPa}$	5.51
Cargas internas	$\sigma_{xa} = \frac{32 * M}{\pi * d^3}$	61.91 MPa
Esfuerzos equivalentes de la cadena.	$\sigma_{eqm} = \sqrt{\sigma_{xm^2} + 3 * \tau_{xym^2}}$	22.34 MPa
Factor de modificación	$Ka = a * Sut^b$	0.98
Factor de tamaño	$Kb = 0.879 * d^{-0.107}$	0.879
Límite a fatiga para AISI 304	$Se = Ka * kb * Kc * Kd * Ke * Kf * Se'$	159.34 MPa
Factor de seguridad para el eje	$\frac{\sigma_{eqa}}{Se} + \frac{\sigma_{eqm}}{Sut} = \frac{1}{n}$	n= 2.53

Selección de chumacera		
Carga equivalente estática	$P_o = 2.7 Tr + Ta$	584.66 N
Carga equivalente dinámica	$P_o = 1.2 Fr + Fa$	259.85 N
Diámetro de chumaceras	$d_m = 0.5 (d + D)mm$	38.5 mm
Coefficiente de seguridad	$k = \frac{V2}{V1}$	1.095 mm <sup>2</sup> /s

#### 4.4. Parámetros para diseño del molino de bolas.

##### 4.4.1. Consideraciones para selección de material.

\*Material resistente a la Humedad \*Material resistente a golpes. \*Moldeable.

\*Soldable. \*Disponibilidad en el mercado.

AISI 304 cumple con las consideraciones planteadas y se empieza a trabajar con el material mencionado.

##### 4.4.2. Consideraciones para el diseño del tambor.

El tambor se ha diseñado para moler 2,5 kg de residuos de arcilla como referencia para obtener el volumen total del material se partió de la densidad de la arcilla ( $1,39 \frac{gr}{cm^3}$ )

- Cantidad de material de molienda: 2500 gr
- Densidad del material (Arcilla):  $\delta_{arcilla} = 1,39 \frac{gr}{cm^3}$

$$\delta = \frac{m}{v} \quad (4.1)$$

$\delta$ : Densidad en  $\frac{gr}{cm^3}$

$m$  = masa en gr

$v$  = volumen en  $cm^3$

Para saber el volumen total del tambor se utilizó la siguiente fórmula.

$$V_t = \pi * r^2 * L \quad (4.2)$$

$V_t$  = Volume Total.

$V_m$  = Elementos Moledores

L= Longitud del Tambor

#### 4.4.3. Diámetro del tambor

$$D = 2 * r \quad (4.3)$$

r= Radio

D= Diámetro

#### 4.4.4. Longitud del tambor

$$L = 1.5 * D \quad (4.4)$$

D= Diámetro.

1.5= Relación de longitud Diámetro para un molino de bolas.

#### 4.4.5. Dimensionamiento superficies externas del tambor

$$Ds = D + 2f \quad (4.5)$$

Ds = Diámetro de superficies externas en m.

D = Diámetro del tambor en m.

f = espesor en m.

#### 4.4.6. Peso de elementos de molienda (bolas).

$$P_B = V_{ta} * 0.25 * 0.6 * \delta_{bo} \quad (4.6)$$

$V_{ta}$  = Volumen del tambor.

$\delta_{bo}$  = Peso de bolas.

#### 4.4.7. Potencia del motor

Potencia Teórica:

$$P_t = 12.5 H \quad (4.7)$$

$P_t$  = Potencia Teórica necesaria en (Cv).

H = Peso neto de la carga (ton). = sumatoria de todas las masas actuantes = 35kg

#### 4.4.8. Potencia real del motor

$$P_r = P_t + 20 \% * P_t \quad (4.8)$$

$P_r$ = Potencia real

$P_t$ = Potencia teórica

#### 4.4.9. Velocidad de giro

$$V_g = \frac{42.3}{\sqrt{D}} \quad (4.9)$$

$V_g$ = Velocidad de giro, (*rev/min*)

D= Diámetro interior del tambor, (m)

#### 4.4.10. Velocidad Crítica

$$V_r = n * \%de\ giro \quad (4.10)$$

n= Velocidad de giro

% de giro= rango entre 60% - 90%

#### 4.4.11. Paso de la cadena

$$P = \sqrt[3]{\left(\frac{3640}{n_1}\right)^2} \quad (4.11)$$

P= Paso de la cadena.

#### 4.4.12. Número de pasos

$$Cx = \frac{C}{P} \quad (4.12)$$

#### 4.4.13. Velocidad de cadena

$$V = \frac{P * Z_1 * n_1}{1000} \quad (4.13)$$

P= Paso de la cadena

$Z_1$ = Número de dientes del engranaje del motor

$n_1$  = Velocidad del engranaje del motor.

#### 4.4.14. Longitud de la cadena

$$L = 2C + \frac{Z_1 + Z_2}{2} * P + \frac{\left(\frac{Z_1 + Z_2}{6.28}\right)^2}{C} * P_2 \quad (4.14)$$

C = Distancia entre centros.

P = Paso de la cadena

$Z_1$  = Número de dientes del engranaje del motor

$Z_2$  = Número de dientes del engranaje de salida.

#### 4.4.15. Par torsor de la cadena

$$\tau = \frac{P}{n} \quad (4.15)$$

P = Paso de la cadena

n = rendimiento

#### 4.4.16. Fuerza en el eje

$$\tau = F * r \quad (4.16)$$

$\tau$  = Par torsor de la cadena

F = Fuerza del eje

r = Radio para eje a punto de fuerza

#### 4.4.17. Coeficiente de seguridad

$$k = \frac{\text{Carga de Cadena}}{\text{Carga soportada}} \quad (4.17)$$

#### 4.4.18. Cálculos con el material AISI 304.

Se trabajará con un factor de seguridad de  $n = 3.5$  y ya que el material es AISI 304 tenemos que ( $S_y = 310$  MPa)

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{eq}} \quad (4.18)$$

n = Factor de seguridad

$S_y =$  Constante

$\sigma_{eq}$  = Esfuerzo equivalente

#### 4.5. Diseño estático del eje

##### 4.5.1. Análisis de flexión.

$$\sigma = \frac{M * \frac{d}{2}}{\pi * \frac{d^4}{64}} \quad (4.19)$$

M= Momento máximo.

d= diámetro del eje.

##### 4.5.2. Esfuerzo equivalente de Von Mises.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{x^2} + 3 * \tau_{xy^2}} \quad (4.20)$$

$\sigma_{x^2}$  = Esfuerzo en el eje x

$\tau_{xy^2}$  = Análisis de torsión

##### 4.5.3. Cálculo de límite a fatiga.

$$S_e = K_a * k_b * K_c * K_d * K_e * K_f * S_e' \quad (4.21)$$

$K_a$  = Factor de modificación

$k_b$  = Factor de tamaño

$K_c$  = Factor de modificación de carga

$K_d$  = Factor de modificación de temperatura

$K_e$  = Factor de confiabilidad

$K_f$  = Factor de efectos varios

##### 4.5.4. Factor de modificación.

$$K_a = a * S_{ut}^b \quad (4.22)$$

$S_{ut}^b$  = constante (310)

##### 4.5.5. Factor de seguridad para el eje.

$$\frac{\sigma_{eqa}}{S_e} + \frac{\sigma_{eqm}}{S_{ut}} = \frac{1}{n} \quad (4.23)$$

$\sigma_{eqm}$  = Esfuerzos equivalentes

$S_e$  = Limite a fatiga de AISI 304

#### 4.6. Selección de chumaceras.

##### 4.6.1. Carga equivalente estática

$$P_o = 2.7 Tr + Ta \quad (4.24)$$

Tr = Carga Radial.

Ta = Carga Axial.

##### 4.6.2. Carga equivalente dinámica.

$$P_o = 1.2 Fr + Fa \quad (4.25)$$

Fr = Carga radial.

Fa = Carga Axial.

##### 4.6.3. Vida nominal de la chumacera

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \quad (4.26)$$

C = Capacidad de carga

P = Carga equivalente dinámica.

##### 4.6.4. Diámetro

$$d_m = 0.5 (d + D) mm \quad (4.27)$$

d = diámetro interior

D = diámetro exterior.

##### 4.6.5. Factor K

$$k = \frac{V_2}{V_1} \quad (4.28)$$

V<sub>2</sub> = viscosidad máxima.

V<sub>1</sub> = viscosidad mínima.

#### 4.6.6. Vida nominal ajustada

$$r = \frac{hc * Pu}{P} \quad (4.29)$$

$hc$  = Grado de contaminación

$Pu$  = Carga límite de fatiga

$P$  = Carga dinámica

#### 4.6.7. Vida nominal de la chumacera

$$Lnm = a1 * a_{skf} * L10 \quad (4.30)$$

$a1$  = factor de ajuste de vida

$a_{skf}$  = factor de modificación de vida útil.

$L10$  = vida nominal en horas.

#### 4.6.8. Ecuaciones para junta soldada.

$$A = 1.414 \pi hr \quad (4.31)$$

$h$  = tamaño de la soldadura

$r$  = radio del elemento soldado

$$I = 0.707 h l_u \quad (4.32)$$

$h$  = tamaño de la soldadura

$l_u$  = segundo momento unitario del área

$$l_u = \pi r^3 \quad (4.33)$$

$r$  = radio del elemento soldado

#### 4.6.9. Esfuerzo cortante primario.

$$\tau' = \frac{F}{A} \quad (4.34)$$

$F$  = carga estática

$A$  = Área de garganta

#### 4.6.10. Esfuerzo cortante secundario

$$\tau'' = \frac{M * r}{l} \quad (4.35)$$

M= momento

r= radio de soldadura

l= momento del área

#### 4.6.11. Magnitud de esfuerzo cortante resultante.

$$\tau = (\tau'^2 + \tau''^2)^{0.5} \quad (4.36)$$

$\tau'$ = Esfuerzo cortante primario

$\tau''$ = Esfuerzo cortante secundario.

### 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

#### 5.1.1. Volumen del tambor.

Al despejar volumen de la ecuación 4.1 se obtiene:

$$v_{arcilla} = \frac{2500gr}{1,39 \frac{gr}{cm^3}}$$
$$v_{arcilla} = 1799 \text{ cm}^3$$

Ya que el volumen del cilindro debe ser mayor al volumen total de la arcilla se asume un valor 4 veces mayor, ya que necesita tener un espacio adicional para los elementos molidores.

$$V_t = 4V_m$$

$$V_t = 4 * (1.799 * 10^{-3} \text{ m}^3)$$

$$V_t = 7.196 * 10^{-3} \text{ m}^3$$

La relación de longitud diámetro de un molino de bolas es de 1 a 2.

$$\frac{L}{D} = 1 \text{ a } 2$$

$$\frac{L}{D} = 1.2$$

Utilizando la ecuación (4.2) despejamos r

$$V_t = \pi * r^2 * 1.2 r$$

$$r^3 = \frac{V_t}{2.2 * \pi}$$

$$r^3 = \sqrt[3]{\frac{7.196 * 10^{-3}}{2.2 * \pi}}$$

$$r = 0.101m$$

Utilizando la ecuación (4.3)

$$D = 2 * r$$

$$D = 0.203 m$$

Utilizando la ecuación (4.4)

$$L = 1.5 * D$$

$$L = 1.5 * 0.203$$

$$L = 0.304 m$$

El tambor para el molino tendrá un diámetro de 0.20 m y su longitud de 0.30 m

**Tabla 5.1.** Espesores de la Chapa del tambor.

<b>Diámetro del tambor del molino</b>	<b>Espesor de la chapa</b>
Hasta 1.6 m	18 mm
de 1.6 a 2.0 m	20 mm
de 2.2 a 2.4 m	25.5 mm
de 2.5 a 3.5 m	38 mm
de 3.5 a 4.50 m	58 mm
5.0 m	63.5 mm

**Fuente:** [15]

Empleando método de extrapolación, con un factor de seguridad de 0.6 se obtiene:

**Tabla 5.2.** Calculo del espesor de la chapa del tambor del molino de bolas.

<b>Diámetro del Tambor del Molino</b>	<b>Espesor de la Chapa</b>
0.203 m	3.65 mm

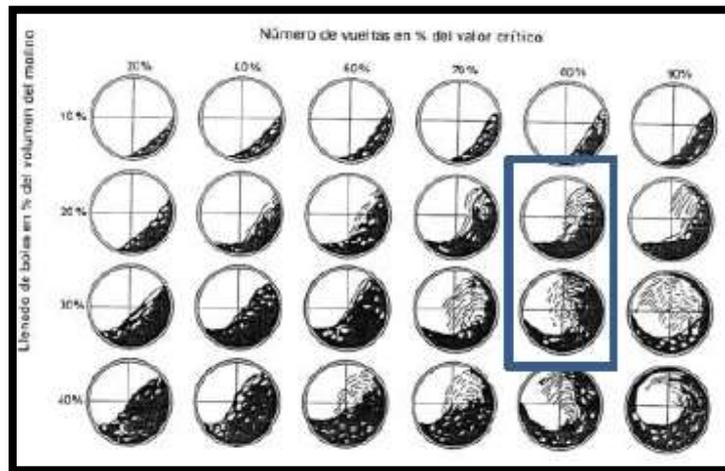
**Fuente:** Autores

#### 5.1.1.1. Dimensionamiento superficies externas del tambor.

$$D_s = 0.20 + (2 * 0.004)$$

$$D_s = 0.208 m$$

**5.1.2. Llenado de bolas en % y número de vueltas en porcentaje el valor crítico.**



**Figura 5.1.** Número de vueltas en % del valor crítico.

**Fuente:** [15]

**Nota:** Idealmente el molino cumplirá con el 80% del número de vueltas y un llenado del 25%.

**5.1.3. Peso de elementos de molienda (bolas).**

Despejando la ecuación (4.6) se obtuvo:

$$V_{ta} = \frac{\pi * D^2 * L}{4}$$

$$V_{ta} = \frac{\pi * 0.20^2 * 0.30}{4}$$

$$V_{ta} = 0.011 \text{ m}^3$$

Peso de bolas

$$P_B = 0.011 \text{ m}^3 * 0.25 * 0.6 * 4.48 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$$

$$P_B = 7.392 \times 10^{-3} \text{ ton}$$

$$P_B = 6.705 \text{ kg}$$

**5.1.4. Consideraciones de grado de llenado en húmedo**

\*Humedad del material a moler. \*Velocidad crítica del 70%. \*Densidad del agua (referencial).

Despejando la Ec (4.1) obtenemos:

$$\delta * V = m$$

**Nota:** Peso máximo  $1000 \frac{kg}{m^3} * 60\% * 0.011m^3 = m$

$$m = 6.60 \text{ kg}$$

### 5.1.5. Tamaño y distribución de bolas

Es importante saber que mientras mayor sea el material a moler, mayor debe ser el tamaño del medio de molienda.

**Tabla 5.3.** Diámetro y peso de elementos moledores del tambor.

Diámetro de bola (mm)	Cantidad (unidades)	Masa (kg)
50,8	3	1.00
25,4	18	2.00
12.7	44	2.00
0,39	56	2.00
TOTAL		6.00

Fuente: Autores

### 5.1.6. Potencia del motor

Potencia Teórica: utilizando la ecuación (4.7).

$$P_t = 12.5 * 0.035 \text{ ton}$$

$$P_t = 0.4375 \text{ Hp}$$

### 5.1.7. Potencia real del motor

Utilizando la ecuación (4.8)

$$P_r = 0.438 + 20 \% * (0.438)$$

$$P_r = 0.526 \text{ Hp}$$

**Nota:** Selección comercial del motor 1 Hp

### 5.1.8. Velocidad de giro

Aplicando la ecuación (4.9)

$$V_g = \frac{42,3}{\sqrt{0,21}}$$

$$V_g = 92,30 \text{ rmp}$$

#### 5.1.8.1. Velocidad Crítica o de referencia

Para un molino de bolas, la velocidad óptima de giro está entre 65% a 80% de la velocidad crítica.

Velocidad seleccionada 70%

Utilizando la ecuación (4.10)

$$Vr = 92,30 \text{ rpm} * 0,70$$

$$V_r = 64,61 \text{ rpm}$$

### 5.1.8.2. Consideraciones para la selección del tipo de transmisión de potencia.

El tipo de transmisión para este tipo de molinos puede ser de bandas o de cadenas, en este caso se selecciona transmisión por cadena debido a su alta fiabilidad y durabilidad.

### 5.1.8.3. Cálculos de la transmisión por cadena

Potencia Motor.	1 Hp
Mecanismos	Molino de bolas.
Velocidad eje	395 rpm
Velocidad necesaria	64,61 rpm
Distancia entre centros	279.25 m

### 5.1.8.4. Relación de transmisión y Piñones.

$$i = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{24}{20}$$

$$i = 1.2$$

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{92}{76.67}$$

$$i = 1.2$$

### 5.1.8.5. Paso de la cadena

Aplicando la ecuación (4.11)

$$P = \sqrt[3]{\left(\frac{3640}{92}\right)^2}$$

$$P = 11.61 \text{ mm}$$

Como no se tiene un paso normalizado de 11.61 se elige uno de 12.7 mm.

### 5.1.8.6. Número de pasos

Utilizando la ecuación (4.12)

$$Cx = \frac{279.25 \text{ mm}}{12.7 \text{ mm}}$$

$$Cx = 21.988$$

**Nota:** Número de pasos normalizado de cadena  $Cx = 22$

#### 5.1.8.7. Velocidad de cadena

Aplicando la ecuación (4.13)

$$V = 23.368 \frac{m}{min}$$

#### 5.1.8.8. Longitud de la cadena

Aplicando la ecuación (4.14)

$$L = 2(279.25) + \frac{20 + 24}{2} * 11.61 + \frac{(\frac{20 + 24}{6.28})^2}{279.25} * 12.7$$

$$L = 816.15mm$$

#### 5.1.8.9. Par torsor de la cadena

Aplicando la ecuación (4.15)

$$n = 60.42 \frac{rev}{min} * \frac{2\pi}{rev} * \frac{1min}{60 s} = 6.32 \frac{rad}{seg}$$

$$\tau = 6.32 \frac{rad}{seg}$$

$$\tau = 0.05 KNm$$

#### 5.1.8.10. Fuerza en el eje

Aplicando la ecuación (4.16)

$$F = \frac{0.05KNm}{0.03m}$$

$$F = 1.66 KN$$

#### 5.1.8.11. Coeficiente de seguridad

Aplicando la ecuación (4.17)

$$k = \frac{21KN}{1.66KN}$$

$$k = 12.62$$

#### 5.1.9. Consideraciones para cálculo del eje.

El eje es el elemento principal ya que este admite el movimiento del tambor.

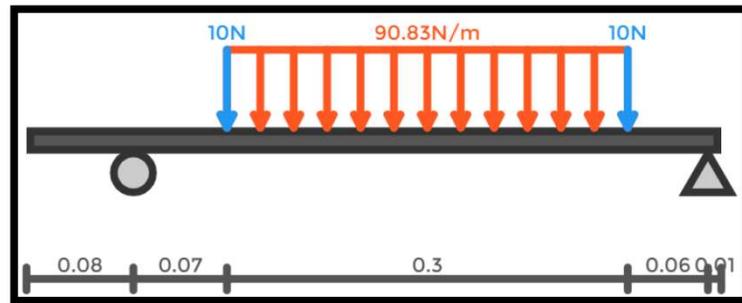
**Tabla 5.4.** Peso de elementos que intervienen en la molienda.

Elemento	Masa (kg)
Masa tambor (Seguros tapa y Soldadura)	12.86
Masa elementos de Molienda	7.21
Masa elementos a moler, incluida humedad	2.5
65% Molienda Húmeda	4.68
<b>Total</b>	<b>27.25</b>

Fuente: Autores

**5.1.9.1. Cálculo de reacciones, momentos y diagramas**

Diagrama X-Y

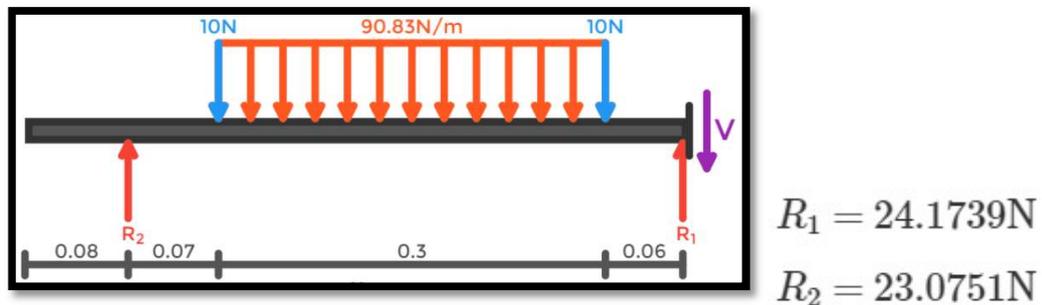


**Figura 5.2** Diagrama de cuerpo libre EJE X-Y.

Fuente: Autores

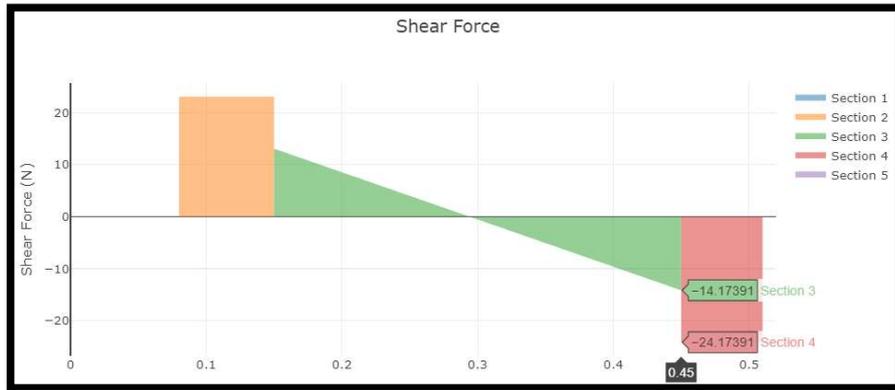
**Nota:** Las reacciones marcadas en azul son de 10 N cada una y la Carga distribuida corresponde a 90.83 N/m que representa el Peso de los elementos soportados por el eje del tambor.

**5.1.9.2. Cálculos de Reacciones, esfuerzos y momentos del eje X-Y.**

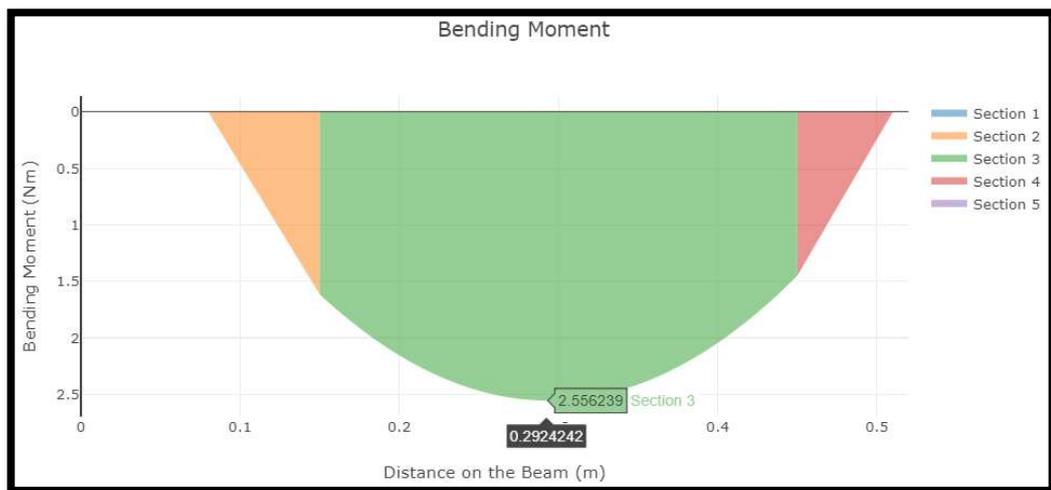


**Figura 5.3:** Diagrama de reacciones.

Fuente: Autores.

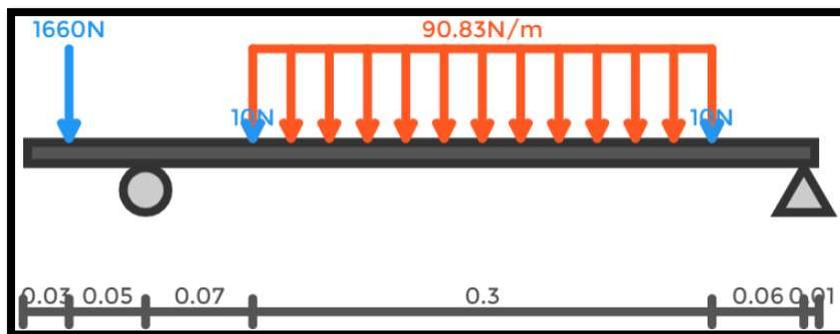


**Figura 5.4** Diagrama de fuerza cortante.  
**Fuente:** Autores.



**Figura 5.5** Diagrama de momentos.  
**Fuente:** Autores.

Diagramas del eje X-Z

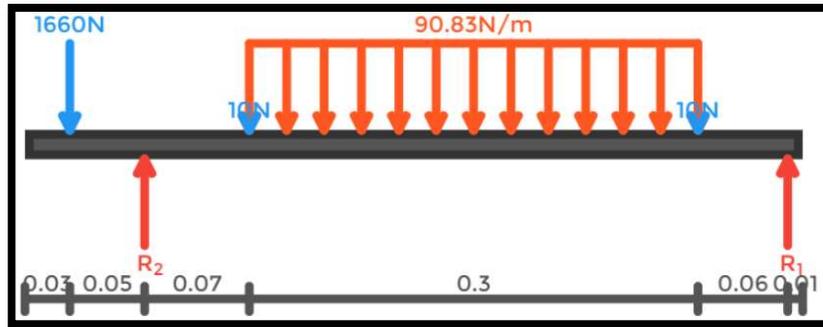


**Figura 5.6.** Diagrama del cuerpo libre en el eje X-Z.

**Fuente:** Autores.

**Nota:** Las reacciones marcadas en azul son de 10 N cada una y la Carga distribuida corresponde a 90.83 N/m que representa el Peso de los elementos soportados por el eje del tambor y la carga ejercida por la cadena de 1660 N.

### 5.1.9.3. Cálculos de Reacciones, esfuerzos y momentos del eje X.Z

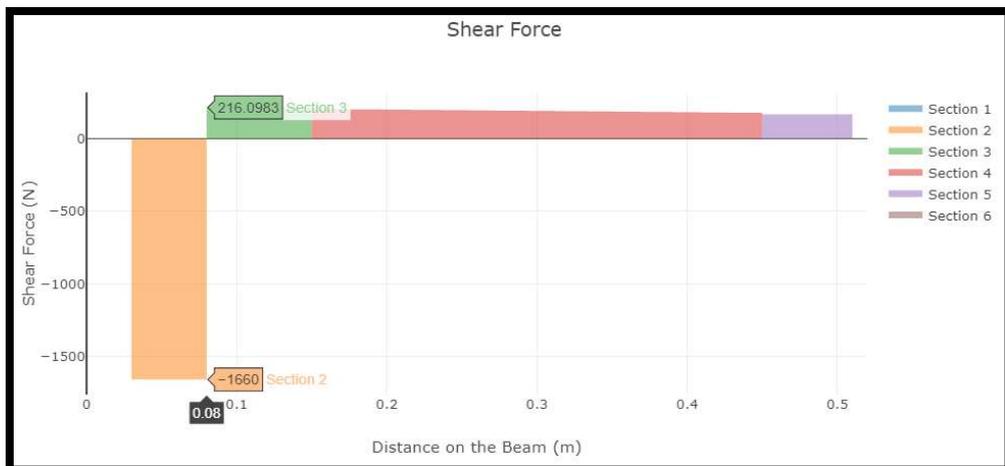


$$R_1 = -168.8493\text{N}$$

$$R_2 = 1876.0983\text{N}$$

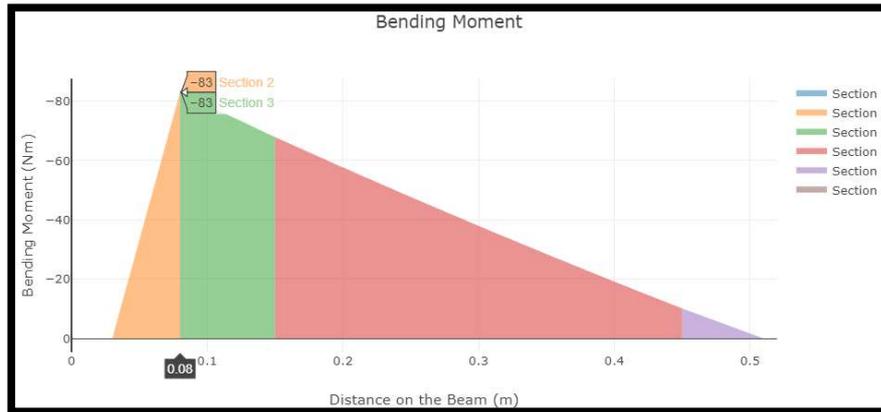
**Figura 5.7.** Diagrama de reacciones eje X-Z.

**Fuente:** Autores.



**Figura 5.8.** Diagrama de Fuerza Cortante.

**Fuente:** Autores.



**Figura 5.9.** Diagrama de momentos.

**Fuente:** Autores.

Se ha determinado todas las reacciones en el eje y el momento máximo para realizar los cálculos es el siguiente:

$$M_{max} = 83 \text{ Nm}$$

#### 5.1.9.4. Cálculos con el material AISI 304.

Se trabajará con un factor de seguridad de  $n= 3.5$  y ya que el material es AISI 304 tenemos que ( $S_y= 310 \text{ MPa}$ )

$$\sigma_{eq} = \frac{S_y}{n} = \frac{310 \text{ MPa}}{3.5}$$

$$\sigma_{eq} = 88.57 \text{ MPa.}$$

#### 5.1.9.5. Diseño estático del eje.

##### 5.1.9.5.1. Análisis a flexión.

Utilizando la ecuación (4.19)

$$\sigma = \frac{83 \text{ Nm} * 32}{\pi * d^3}$$

$$845.43 \frac{\text{KNm}}{d^3}$$

##### 5.1.9.5.2. Análisis a Torsión

$$\tau = 1.66 \text{ KN}$$

Torque generado por la cadena:

Utilizando la ecuación (4.15)

$$T = (1.66 \text{ KN} * 0.0254)$$

$$T = 41.5 \text{ KN}$$

$$\tau = \frac{16 * (41.5 \text{ KN})}{\pi * d^3}$$

$$\tau = \frac{211.35 \text{ Nm}}{d^3}$$

Esfuerzo equivalente de Von Mises

$$88.57 \text{ MPa} = \sqrt{\left(\frac{845.43 \text{ Nm}}{d^3}\right)^2 + 3 * \left(\frac{211.35 \text{ Nm}}{d^3}\right)^2}$$

$$d = 0.021 \text{ mm}$$

Se selecciona el diámetro comercial disponible del eje: 0.0254 = 1 plg.

Reemplazo diámetro en ecuaciones:

Análisis a flexión.

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

$$\sigma = \frac{83 \text{ Nm} * 32}{\pi * d^3} = \frac{845.43 \text{ Nm}}{0.0254^3}$$

$$\sigma = 51.59 \text{ MPa}$$

Análisis a Torsión.

$$\tau = \frac{16 * T}{\pi * d^3}$$

$$\tau = \frac{211.35 \text{ Nm}}{d^3} = \frac{211.35 \text{ Nm}}{0.0254^3}$$

$$\tau = 12.90 \text{ MPa}$$

Esfuerzo de Von Mises

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3 * \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(51.59)^2 + 3 * (12.90)^2}$$

$$\sigma_{eq} = 56.22 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad

$$n = \frac{310 \text{ MPa}}{56.22 \text{ MPa}}$$

$$n = 5.51$$

### 5.1.9.6. Diseño a fatiga

Cargas internas por análisis estático se consideran como despreciables, se igualan a cero.

$$\sigma_{xm} = 0$$

$$\sigma_{xa} = \frac{32 * M}{\pi * d^3}$$

$$\sigma_{xa} = \frac{32 * 99.6 \text{ Nm}}{\pi * 0.0254^3}$$

$$\sigma_{xa} = 61.91 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xya} = 0$$

$$\tau_{xym} = \frac{16 * T}{\pi * d^3}$$

$$\tau_{xym} = \frac{16 * 41.5 \text{ Nm}}{\pi * (0.0254)^3}$$

$$\tau_{xym} = 12.90 \text{ MPa}$$

#### 5.1.9.6.1. Esfuerzos equivalentes:

$$\sigma_{eqm} = \sqrt{\sigma_{xm}^2 + 3 * \tau_{xym}^2}$$

$$\sigma_{eqm} = \sqrt{0 + 3 * (12.90)^2}$$

$$\sigma_{eqm} = 22.34 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eqm} = \sqrt{\sigma_{xa}^2 + 3 * \tau_{xya}^2}$$

$$\sigma_{eqm} = \sqrt{(61.91)^2 + 0}$$

$$\sigma_{eqm} = 61.91 \text{ MPa}$$

### 5.1.9.6.2. Cálculo de límite a fatiga

A partir de la ecuación (4.18)

Los cálculos se realizan con un diámetro correspondiente a 25.4 mm.

Factor de modificación. (Maquinado).

Utilizando la ecuación (4.22)

$$K_a = 4.51 * (310)^{-0.265}$$

$$K_a = 0.98$$

Factor de tamaño

$$K_b = 0.879 * d^{-0.107}$$

$$K_b = 0.879 * (1in)^{-0.107}$$

$$K_b = 0.879$$

Factor de modificación de carga.

$$K_c = 0.85$$

Factor de modificación de temperatura.

$$K_d = 1$$

Con una confiabilidad de 99.99 %

$$K_e = 0.702$$

Factor de efectos varios.

$$K_f = 1$$

**Nota:** Se calcula para un acero AISI 304

$$S_{ut} = 620 \text{ Mpa}$$

$$S_{e'} = 0.5 * S_{ut}$$

$$S_{e'} = 0.5 * 620 \text{ MPa}$$

$$S_{e'} = 310 \text{ MPa}$$

Límite a fatiga, cálculo para AISI 304

Aplicando la ecuación (4.21)

$$S_e = 0.98 * 0.879 * 0.85 * 1 * 1.702 * 1 * 310 \text{ kg/mm}^2$$

$$S_e = 159.34 \text{ MPa}$$

#### 5.1.9.7. Cálculo de factor de seguridad para el eje.

Aplicando la ecuación (4.23)

$$\frac{61.91}{159.34} + \frac{22.34}{620} = \frac{1}{n}$$

$$n = 2.53$$

Desacuerdo a los cálculos realizados después de haber aplicado las cargas en el eje, los resultados muestran que los factores de seguridad son óptimos, debido a que son superiores a 2.

#### 5.1.10. Selección de chumaceras

Reacciones X-Y      Reacciones X-Z

$$R_{Ay} = 14.17 \qquad R_{Az} = 216.1$$

$$R_{By} = 13.07 \qquad R_{Bz} = 178.84$$

Punto de mayor carga de esfuerzos: RA. Carga resultante: 216.54 N

##### 5.1.10.1. Cálculo de carga equivalente estática

$$P_o = 2.7 (216.54 \text{ N}) + T_a$$

$$P_o = 584.66 \text{ N}$$

##### 5.1.10.2. Cálculo de carga equivalente dinámica

$$P_o = 1.2 (216.54)$$

$$P_o = 259.85 \text{ N}$$

La selección de chumaceras se dio de acuerdo al catálogo SKF de Rodamientos para ejes métricos, tabla que se puede observar en el ANEXO 1.

### 5.1.10.3. Vida nominal.

$$L_{10} = \left(\frac{14 \text{ kN}}{259.85 \text{ N}}\right)^3$$

$$L_{10} = 156392.51$$

Empleando la confiabilidad de 99% en el **ANEXO 2** se muestra los valores para el factor de ajuste de la vida del rodamiento.

La máquina trabajará a una temperatura de trabajo comprendida entre 25° C y 60° C, con lo cual se procedemos a verificar la viscosidad de Trabajo, que se puede apreciar en el **ANEXO 3**.

A partir de la ecuación (4.27)

$$d_m = 0.5 (25 + 52) \text{ mm}$$

$$d_m = 38.5 \text{ mm}$$

En el (**ANEXO 4**) se puede observar la clasificación de la viscosidad según la ISO 3448, se obtiene que se necesita una viscosidad requerida de  $V1=42 \text{ mm}^2/\text{s}$  y una  $V2= 46 \text{ mm}^2/\text{s}$ ,

### 5.1.10.4. Cálculo del factor K.

$$k = \frac{46 \text{ mm}^2/\text{s}}{42 \text{ mm}^2/\text{s}}$$

$$k = 1.095 \text{ mm}^2/\text{s}$$

Empleando el cálculo de  $a_{23}$  con un factor  $k= 1.095 \text{ mm}^2/\text{s}$  en el **ANEXO 5** se puede observar que el factor de ajuste de vida  $a_{23}= 1.15$ .

$$L_{nm} = 0.21 * 1.15 * 156392.51$$

$$L_{nm} = 37768.79$$

### 5.1.10.5. Cálculo de la vida nominal ajustada SKF

Utilizando la Ecuación (4.29)

$$r = \frac{0.1 * 0.335 \text{ KN}}{259.85 \text{ N}}$$

$$r = 0.13$$

La tabla de valor de  $a_{skf}$  mostrada en el (**ANEXO 6**) indica que el modelo de vida nominal es  $a_{skf} = 0,23$

$$L_{nm} = a_1 * a_{skf} * L_{10}$$

$$Lnm = 0.21 * 0.23 * 37768.79$$

$$Lnm = 1824.23$$

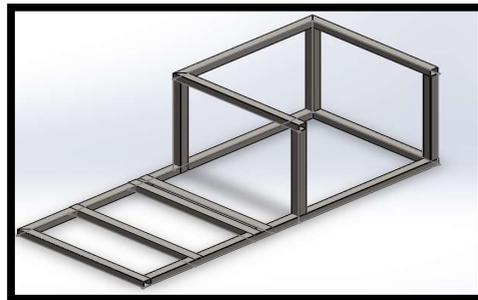
$$L_{SKF} = \frac{10^6 * Lmn}{60 * Vc}$$

$$L_{SKF} = \frac{10^6 * 1824}{60 * 60.42}$$

$$L_{SKF} = 503144.65 \text{ Horas.}$$

### 5.1.11. Diseño soporte estructural del molino de bolas.

El diseño de la estructura se caracterizará por soportar todos los elementos que van a ser parte del molino de bolas, en los cuales podemos enunciar: El Tambor, elementos moledores, material a moler, motor-reductor, elementos de control; la cual debe brindar una resistencia y rigidez adecuada.



**Figura 5.10.** Diseño digital de la estructura mediante software.

**Fuente:** Autores.

Proceso para la aplicación de diseño de la estructura utilizando tubo cuadrado de 1 pulgada.

- a) Dimensionamiento digital, se puede observar en el (ANEXO 7).
- b) Asignación, extrusión de miembro estructural, y designación de material a la estructura, que se puede apreciar en el (ANEXO 8), donde se muestra que el material apropiado es el Acero ASTM A36.
- c) Designamos que tipo de análisis vamos a realizar y designamos apoyos y cargas en la estructura.

En el (ANEXO 9) se observa que el tipo de análisis a realizar fue el análisis estático, mientras que en el (ANEXO 10) se puede observar que se ha designado una fuerza de 178,84 N, y en el (ANEXO 11) se aprecia el cálculo del factor de seguridad mediante software, en el que después de realizar los análisis y la ejecución de los mismos en el software se determina que la base de la

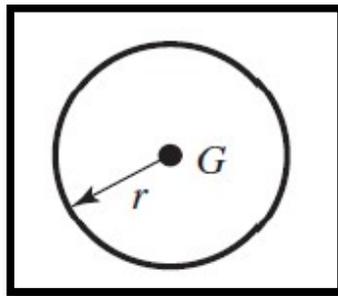
máquina cuenta con un factor de seguridad de 9.9, interpretando que la máquina va a soportar las cargas a las que va a ser sometida.

### 5.1.12. Juntas soldadas del tambor.

Consideraciones para comprobar que los soportes soldados de las juntas van a resistir.

- Los ejes se consideran como viga en voladizo.
- Se considera como carga estática de  $F = 259,85 \text{ N}$
- Material del Soporte base del Tambor: Acero Inoxidable AISI 304
- Junta soldada a Filete.
- Material de aporte: ER 308 L
- Factor de Seguridad  $n=3$ .

**Diseño:**



**Figura 5.11.** Patrón de soldadura.

**Fuente:** [16]

Reemplazando datos propios y datos obtenidos.

$$h = 0.012 \text{ m.}$$

$$r = 0.089 \text{ m.}$$

Cálculo de  $A$ ,  $I_u$ ,  $I$

$$A = 1.414 \pi * (0.012) * (0.089)$$

$$A = 4.74 * 10^{-3} m^2$$

$$I_u = \pi(0.089)^3$$

$$I_u = 2.21 * 10^{-3} m^3$$

$$I = 0.707 * (0.012) * (2.21 * 10^{-3} m^3)$$

$$I = 1.875 * 10^{-5} m^3$$

Cálculo del esfuerzo cortante primario

$$\tau' = \frac{259.85 N}{4.74 * 10^{-3} m^2}$$

$$\tau' = 54.82 kPa$$

Cálculo del esfuerzo cortante secundario

$$\tau'' = \frac{M * r}{I} \quad (4.5)$$

$$\tau'' = \frac{(1.66 kN * 1 m) * (0.0525 m)}{1.875 * 10^{-5} m^3}$$

$$\tau'' = 24.79 MPa$$

Calculo de la magnitud de esfuerzo cortante resultante.

$$\tau = (54820 Pa)^2 + (24.79 * 10^6 Pa^2)^{0.5}$$

$$\tau = 24.79 MPa$$

### 5.1.13. Análisis del tambor empleando software.

- a) Diseño del tambor en el software a utilizar, respetando las medidas y dirección de los cortes, en el (ANEXO 12), se observó el diseño dimensional del tambor.
- b) Se aplicó el material y la carga que va a soportar el tambor en el (ANEXO 13) se observa que el material adecuado para soportar la carga de la molienda es el Acero AISI 304, **mientras que en el (ANEXO14)** se observó las zonas más rígidas del tambor, representadas con flechas junto a las zonas más rígidas.

El resultado de Von Mises que se puede observar en el (ANEXO 15) nos muestra que el tambor soporta una carga de 123.866 MPa, mismo que cuenta con un factor de seguridad de 1.7 FDS.

En el (ANEXO 16) el software utilizado muestra que el tambor soporta una deformación estática de 0.02 mm con una carga de 120 MPa.

En el (ANEXO 17) se puede observar el análisis en software en el que demuestra que el tambor soporta un Factor de Seguridad de 1,7.

Después de realizado todas las simulaciones se obtiene que el tambor produce una deformación estática de 0.02 mm y su vez con una carga de 120 MPa produce un FDS de 1.7, factor que es aceptable para la aplicación de laboratorio en la cual se va a utilizar la máquina, a su vez dichos resultados nos muestran que con los datos antes mencionados el tambor va a soportar una carga máxima de 124 MPa.

## **5.2. Proceso de fabricación del molino**

- Elección del material para el tambor: de acuerdo a las condiciones que debe soportar, humedad, golpes, fricción, y por la facilidad de encontrarlo en el mercado se hace la elección de AISI 304.
- Determinar dimensiones del tambor: esto de acuerdo a la cantidad de arcilla que se planea moler, llegando a  $D= 0.20$  m,  $r= 0.10$  m,  $L= 0.30$  m.
- Grado de llenado del tambor: Se toma en cuenta los elementos moledores y el material a moler.
- Potencia del motor: con referencia al peso total tanto de los elementos moledores como de la arcilla. La elección  $P= 1$  Hp, motor comercial.
- Elección del tipo de transmisión: en este caso será por cadena, debido a su durabilidad.
- Calculo de la fuerza necesaria en el eje:  $F= 1.66$  KN
- Calculo de reacciones esfuerzos y momentos para saber la fuerza que debe soportar el molino.
- Selección de las chumaceras de acuerdo al punto de mayor carga, analizada en el cálculo anterior.
- Diseño de la estructura para el soporte del molino de bolas
- Diseño del sistema eléctrico.

## **5.3. Normas de seguridad**

- Utilizar mascarilla al momento de manipular el molino, ya que se puede inhalar polvos finos de arcilla.
- Utilizar guantes de látex al momento de manipular las esferas y la molienda
- Utilizar protectores auriculares al momento de efectuar la molienda debido al sonido que produce el golpeteo de las bolas contra el tambor.
- Limpiar el tambor del molino de bolas antes y después de la molienda.
- Utilizar gafas al momento de terminar el proceso de molienda.
- No sobre cargar el molino.

- No manipular el cilindro moedor una vez puesto en marcha,
- Asegurarse que la tapa que cubre al cilindro esté cerrada.
- No cambiar la configuración del variador.

#### **5.4. Instrucciones de funcionamiento.**

##### **a) Antes de realizar la molienda**

- Retire el protector de seguridad que cubre el tambor del molino.
- Abra la tapa del molino y cerciore que se encuentre vacío.

##### **b) Accionamiento del molino**

- Después de cerciorarse que se encuentre vacío, vierta las esferas metálicas dentro del tambor a una altura de 5 a 15 cm o coloque las esferas manualmente.
- Vierta el material de molienda, (2,5 kg)
- Cierre la compuerta y asegúrese que las tuercas estén bien ajustadas, (utilizar la llave # 14)
- Accionar el interruptor termo magnético.
- Regular el temporizador de acuerdo al tiempo que se desea moler.
- Accionar el interruptor de encendido S1, (Marcado en la parte superior del selector)
- Accionar el interruptor de puesta en marcha S1, (Marcado en la parte superior del selector)
- Cerrar la tapa protectora del tambor.

**Nota:** Al iniciar el proceso de molienda el potenciómetro debe estar ubicado en su velocidad máxima, y segundos después del encendido se puede variar, tomando en cuenta que la velocidad ideal de molienda es la velocidad media, con un tiempo programado en el temporizador de 25 minutos.

##### **c) Culminación de molienda**

- Una vez finalizado el tiempo la máquina se detendrá, y se procederá apagar primero el interruptor de puesta en marcha, luego el interruptor de encendido.
- Retire el protector de seguridad.
- Retire las tuercas de la compuerta mediante una llave de mano permitiendo que caigan las esferas y el polvo metálico al contenedor.
- Asegúrese de retirar todas las esferas y la molienda con ayuda de una brocha.
- Cierre la compuerta y retire el recipiente que contiene las esferas y la molienda.
- Utilice una bandeja para colocar la molienda obtenida.

## 5.5. Manual para mantenimiento de la máquina

Según [18] “la labor del departamento de mantenimiento, está relacionada muy estrechamente en la prevención de accidentes y lesiones en el trabajador ya que tiene la responsabilidad de mantener en buenas condiciones, la maquinaria y herramienta, equipo de trabajo, lo cual permite un mejor desenvolvimiento y seguridad evitando en parte riesgos en el área laboral”.

Según [19] “Para que el mantenimiento sea lo más eficaz posible es muy importante disponer de la mayor cantidad de información sobre las instalaciones, equipos y lugares de trabajo; para ello es básico la realización de distintos tipos de revisiones programadas y registrar documentalmente los resultados de los controles de las condiciones de trabajo y de la actividad de los trabajadores, así como las revisiones de determinados equipos de trabajo”

- Limpiar el tambor antes y después de utilizar.
- Colocar las componentes del tambor en la posición correspondiente.
- Mantener en un área seca libre de humedad con la finalidad de evitar la corrosión.
- En caso de sufrir un desperfecto las chumaceras cambiarlas por otra de la misma especificación.
- Engrasar la cadena mediante goteo o manualmente.
- Los rodamientos del motor y del reductor deben ser cambiados cada 24 meses, o cuando sea necesario.

**Tabla 5.5.** Mantenimiento de los componentes del tambor.

<b>Componente</b>	<b>Mantenimiento</b>	<b>Frecuencia</b>
Cubierta	Limpiar las superficies con una franela.	Después de cada uso.
Recipientes	Limpiar las superficies con una franela.	Después de cada uso.
Tambor	Limpiar las superficies con una franela.	Después de cada uso.
Motor	Revisión eléctrica	Cada 6 meses.
Cadena	Engrasar	Cada 2 meses.
Chumacera	Engrasar	Después de cada uso.

**Fuente.** Autores.

## 6. PRESUPUESTO

### 6.1. Costos directos

Los costos directos están relacionados con los materiales utilizados para la construcción del molino, divididos en costos de materiales y costos de proceso de fabricación.

**Tabla 6.1.** Elementos mecánicos.

Material	Cantidad	Valor unitario	Total
Plancha de acero galvanizado de 2mm	1	\$ 60,00	\$ 60,00
Plancha de acero AISI 304 6 mm	1	\$ 17,00	\$ 17,00
Acero A36	1	\$ 20	\$ 20,00
Chumacera de 1 plg	2	\$ 6,00	\$ 12,00
Piñón de 1 plg	2	\$ 20	\$ 40,00
Perno milimétrico comercial	8	\$ 0,75	\$ 6,00
Rodela comercial	8	\$ 0,50	\$ 4,00
Tuerca de rosca milimétrica comercial	8	\$ 0,30	\$ 2,40
Electrodos 6011	12	\$ 0,33	\$ 4,00
Bolas de acero de 2 plg	4	\$ 5,00	\$ 20,00
Bolas de acero de 1 plg	12	\$ 2,00	\$ 24,00
Bolas de acero de 0,5 plg	40	\$ 1,00	\$ 40,00
Cadena de rodillos	1	\$ 7,00	\$ 7,00
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 256,40</b>

Fuente: Autores.

**Tabla 6.2.** Elementos eléctricos

Material	Cantidad	Valor unitario	Total
Motor reductor de 1 Hp, 395 rpm	1	\$ 300,00	\$ 300,00
Caja de conexiones	1	\$ 45,00	\$ 45,00
Condensador	1	\$ 7,00	\$ 7,00
Contactador	1	\$ 50,00	\$ 50,00
Temporizador 3S	1	\$ 5,66	\$ 5,66
Fusible	12	\$ 2,00	\$ 24,00
Selectores	2	\$ 1,50	\$ 3,00
Potenciómetro	1	\$ 39,00	\$ 39,00
Variador de voltaje	1	\$ 190,00	\$ 190,00
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 691,00</b>

Fuente: Autores.

## 6.2. Costos indirectos

Elemento	Cantidad	Valor unitario	Total
Pintura esmalte (1 litro)	2	\$ 4,00	\$ 8,00
Fondo antioxidante	1	\$ 20,00	\$ 20,00
Tiñer (1 litro)	1	\$ 1,00	\$ 1,00
Transporte	-	-	\$ 25,00
Análisis de granulometría	1	\$ 30,00	\$ 30,00
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 84,00</b>

Fuente: Autores.

**Tabla 6.4.** Inversión total

Costos	Componentes	(USD)
Directos	Elementos mecánicos	\$ 256,40
	Elementos eléctricos	\$ 691,00
	Mano de obra	\$ 250,00
Indirectos	Indirectos	\$ 84,00
<b>TOTAL</b>		<b>\$ 1.2481,40</b>

## 7. ANÁLISIS DE IMPACTOS

### 7.1. Impacto práctico

El molino de bolas está cumpliendo con las necesidades y requerimientos para las que fue diseñado, además los aspectos importantes en la construcción de una maquina como son, la seguridad del operario, están tomadas en cuenta.

### 7.2. Impacto ambiental

El molino de bolas se encuentra catalogado como una maquina industrial por tener un motor eléctrico, el mismo que genera contaminación acústica, que se encuentra en 90,31 dB, la cual es aceptable en maquinaria de uso industrial, al no generar problemas al operario en el tiempo de operación de la máquina, que es de 8 horas de trabajo al día.

### **7.3. Impacto tecnológico**

El molino de bolas tiene un mejor rendimiento que otro tipo de molinos su mantenimiento es de bajo costo y simple, así como también su uso es fácil lo que es beneficioso para la manipulación de alumnos.

## **8. CONCLUSIONES**

- Este molino ofrece una mayor uniformidad de molienda de acuerdo con la distribución de las bolas, es capaz de obtener un tamaño de 75 micras de grano, lo que lo torna ideal para reutilizar el material en futuros trabajos de alfarería. El tiempo de molienda depende de la dimensión del material que se introduzca en el molino.
- Con la implementación del variador de velocidad se logró controlar el giro del cilindro logrando una velocidad mínima a 10 Hz y una velocidad máxima a 28 Hz, logrando así mantener el movimiento cascada de las bolas en el interior del cilindro.
- El molino se diseñó para moler 2,5 kg de arcilla por ciclo, y soportar una carga máxima de 3 kg.
- El análisis de granulometría realizado mostró que el tamaño al que se reduce la arcilla después del proceso de molienda es de 75 micras, tamaño óptimo para reutilizar en trabajos de alfarería.
- En el mercado actual no se encontró un molino de bolas con similares características, por ello podemos decir que en cuanto a costo y tamaño no tiene competencia.

## **9. RECOMENDACIONES**

- Para la construcción de un molino se debe utilizar un reductor de velocidad para mantener el torque necesario.
- Seleccionar los materiales disponibles en el mercado para evitar inconvenientes.
- Una vez puesto en marcha el molino, la persona que opere la máquina no debe maniobrar el temporizador ya que se podría averiar el mismo.
- Utilizar el molino bajo la supervisión de la persona a cargo de la máquina o del taller donde se encuentre, para evitar inconvenientes.
- Evitar el contacto directo con los elementos móviles mientras el molino está en operación.
- Utilizar las instrucciones de funcionamiento descritas en el punto 5.4 para asegurar el uso correcto de la máquina.
- Mientras la máquina está en funcionamiento no se debe manipular el temporizador.

- Se debe programar tiempo antes de poner en marcha la máquina.
- Colocar en la velocidad máxima al momento de arrancar la máquina para que la rampa de aceleración no pierda torque y pueda mover el cilindro molidor con normalidad.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

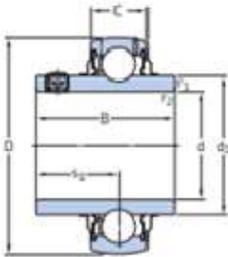
- [1] M.P.Goover, «Fundamentos de manufactura moderna, Tercera ed.,» Mexico,D.F., P.Roig, Ed, McGraw-Hill Interamericana, 2007.
- [2] J. F. A. Molina, Fundamentos teórico de molienda, Madrid, España: Operaciones Concentradora Laguna Seca – MODULO 1, 2004.
- [3] B. M. Benjamin, 29 Mayo 2012.. [En línea]. Available: [es.scribd.com/doc/18463347/8](https://es.scribd.com/doc/18463347/8).
- [4] M. Industrias, «SCRIBD,» mayo 2015. [En línea]. Available: [Materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/06\\_Apunte%20Molienda.pdf](https://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/06_Apunte%20Molienda.pdf).
- [5] D. R. y. G. Sánchez, «Diseño y construcción de una máquina para acondicionamiento final de chocolate,» Quito, 2015.
- [6] I. 9001, «Sistemas de gestión de la calidad,» Ginebra, 2015.
- [7] Wanganoff, Trituración, Molienda y Separación de Minerales, (Bilbao, España): Ed: Alsina., 2005.
- [8] G. Y. Carpio Flores, «Repositorio UTPL,» Noviembre 2013. [En línea]. Available: <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/8105/1/Flores%20Carpio,%20Yetzabel%20Gerarda.pdf>. [Último acceso: 8 Marzo 2019].
- [9] R. Otañes, «Instituto Nacional del Emprendedor,» 24 Junio 2015. [En línea]. Available: [http://www.contactopyme.gob.mx/guiasempresariales/guias.asp?s=14&guia=31&giro=5&ins=787&fbclid=IwAR21wpR7iX3gO9D8PirYOO\\_7b6dsqpXWtsmuh7dVALELYkyL\\_iZkdMzxK8w](http://www.contactopyme.gob.mx/guiasempresariales/guias.asp?s=14&guia=31&giro=5&ins=787&fbclid=IwAR21wpR7iX3gO9D8PirYOO_7b6dsqpXWtsmuh7dVALELYkyL_iZkdMzxK8w). [Último acceso: 4 Marzo 2019].
- [10] NEC, *Capítulo 15*, 2013.
- [11] P. Rosero, «Soldadoras.com.ar,» I&M, 3 Octubre 2017. [En línea]. Available: <https://soldadoras.com.ar/diccionario-soldadura/soldadoras-punto-placas-unionen/>. [Último acceso: 11 Noviembre 2018].
- [12] A. D1.1/D1.1M, *Código de soldadura estructural-acero.*, Estados Unidos, 2015.
- [13] EASA, «Reparaciones mecánicas,» de *Reparación de máquinas eléctricas rotativas*, Estados Unidos, 2015, p. 8.
- [14] R. Sullivan, *Un tratado sobre la Mecánica Interna de Bola, Tubo y Rod Mills*, Chemical Pub, 2000.

- [15] DUDA, MANUAL TECNOLÓGICO DEL CEMENTO, 1979.
- [16] E. Cabezas, Diseño y construcción de un molino de bolas, Ambato: UTA, 2018.
- [17] R. G. B. y J. K. Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, Octava ed, México D.F: McGraw-Hill/interamericana editores, 2008.
- [18] J. Molina, «Mantenimiento y seguridad Industrial Maracay,» Pereira, 2016.
- [19] I. n. d. s. e. h. e. e. trabajo, « Sistema de gestión preventiva: revisiones de seguridad y mantenimiento de equipos,» España, 2017.
- [20] M. Toapanta, IMPLEMENTACIÓN DE UNA MÁQUINA AMASADORA DE ARCILLA PARA LA ASOCIACIÓN DE PRODUCTORES Y ARTESANOS LA VICTORIA DEL CANTÓN PUJILÍ, Latacunga, 2018.
- [21] SKF, Catálogo de Rodamientos, 2019.
- [22] A. Ocampo, L. Hernández y G. Urriolagoitia, «Diseño de un molino para reciclar pastas de freno de tracto-camiones usando el método bond,» *Scielo*, vol. 24, nº 3, pp. 10-15, 19 Abril 2015.
- [23] F. Bond, «Calculos de trituración y molienda,» *British Chemical Engineering.*, 1960, pp. 378-391.
- [24] F. Hernández, «Extracción y uso de la arcilla por alfareros tradicionales,» *Herencia*, vol. 28, nº 1, 2015.
- [25] J. L. Salager, *Granulometría teoría*, Merida Venezuela, 2007.

## 11. ANEXOS

Anexo 1. Catalogo SKF Rodamientos para ejes métricos.

**Rodamientos Y SKF E2 con prisioneros, ejes métricos**  
d 20 – 45 mm



Dimensiones							Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidad límite con tolerancia de eje h6	Masa	Designación
d	D	B	C	d <sub>1</sub>	s <sub>1</sub>	r <sub>1,2</sub>	C	C <sub>0</sub>	P <sub>v</sub>			
mm						mm	kN	kN	kN	r. p. m.	kg	-
20	47	31	14	28,2	18,3	0,6	12,7	6,55	0,28	8 500	0,14	E2.YAR 204-2F
25	52	34,1	15	33,7	19,8	0,6	14	7,8	0,335	7 000	0,19	E2.YAR 205-2F
30	62	38,1	18	39,7	22,2	0,6	19,5	11,2	0,475	6 300	0,30	E2.YAR 206-2F
35	72	42,9	19	46,1	25,4	1	25,5	15,3	0,655	5 300	0,44	E2.YAR 207-2F
40	80	49,2	21	51,8	30,2	1	30,7	19	0,8	4 800	0,59	E2.YAR 208-2F
45	85	49,2	22	56,8	30,2	1	33,2	21,6	0,915	4 300	0,65	E2.YAR 209-2F

Fuente: [21]

Anexo 2. Fiabilidad según SKF.

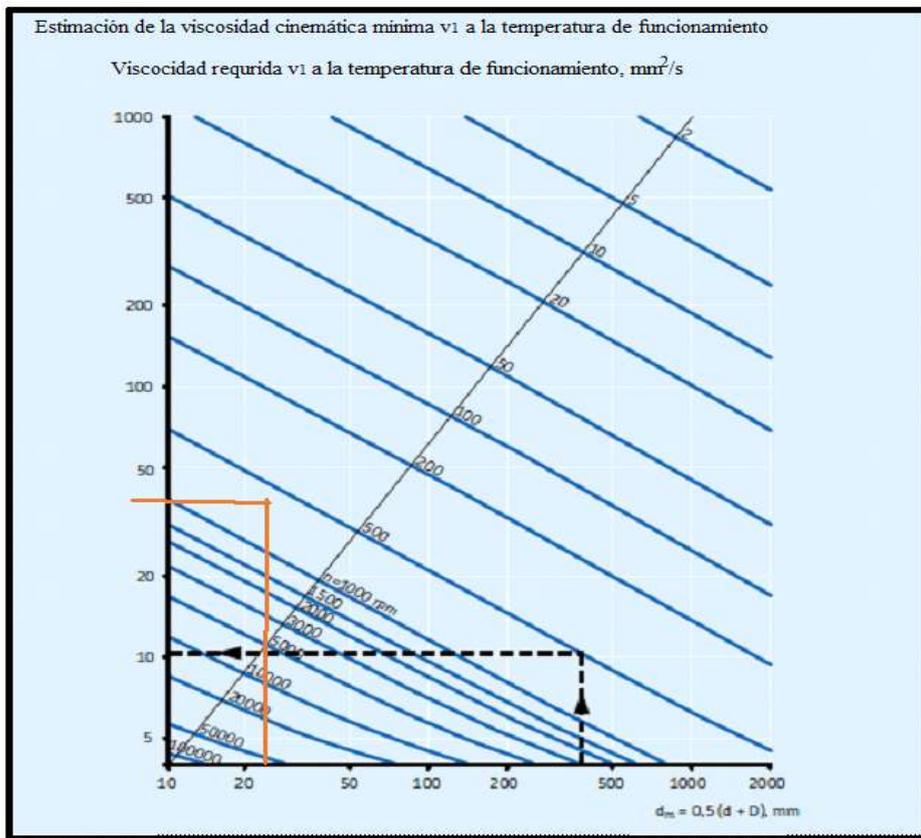
Tabla 1

Valores para el factor de ajuste de la vida  $a_1$

Fiabilidad %	Probabilidad de fallo n %	Vida nominal SKF $L_{nm}$	Factor $a_1$
90	10	$L_{10m}$	1
95	5	$L_{5m}$	0,62
96	4	$L_{4m}$	0,53
97	3	$L_{3m}$	0,44
98	2	$L_{2m}$	0,33
99	1	$L_{1m}$	0,21

Fuente: [21]

Anexo 3. Viscosidad requerida  $V_1$ .



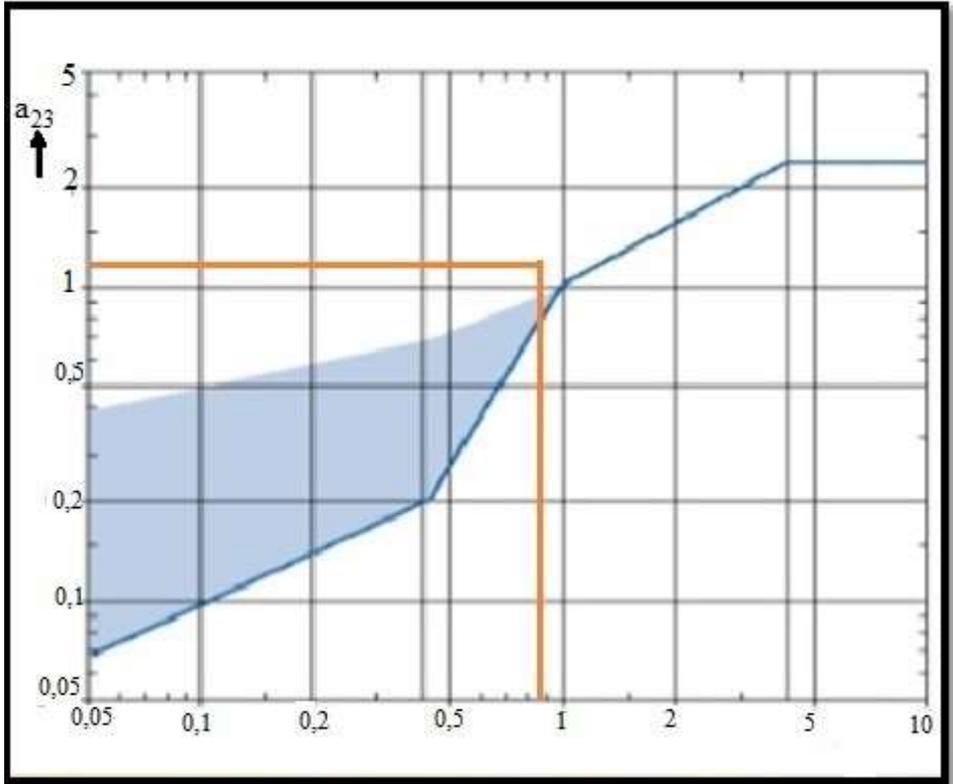
Fuente: [21]

Anexo 4. Clasificación de la viscosidad ISO.

Clasificación de viscosidad según la ISO 3448			
Grado de viscosidad	Límites de viscosidad cinemática a 40 °C		
	medio	mín	máx
–	mm <sup>2</sup> /s		
ISO VG 2	2,2	1,98	2,42
ISO VG 3	3,2	2,88	3,52
ISO VG 5	4,6	4,14	5,06
ISO VG 7	6,8	6,12	7,48
ISO VG 10	10	9,00	11,0
ISO VG 15	15	13,5	16,5
ISO VG 22	22	19,8	24,2
ISO VG 32	32	28,8	35,2
ISO VG 46	46	41,4	50,6
ISO VG 68	68	61,2	74,8
ISO VG 100	100	90,0	110
ISO VG 150	150	135	165
ISO VG 220	220	198	242
ISO VG 320	320	288	352
ISO VG 460	460	414	506
ISO VG 680	680	612	748
ISO VG 1 000	1 000	900	1 100
ISO VG 1 500	1 500	1 350	1 650

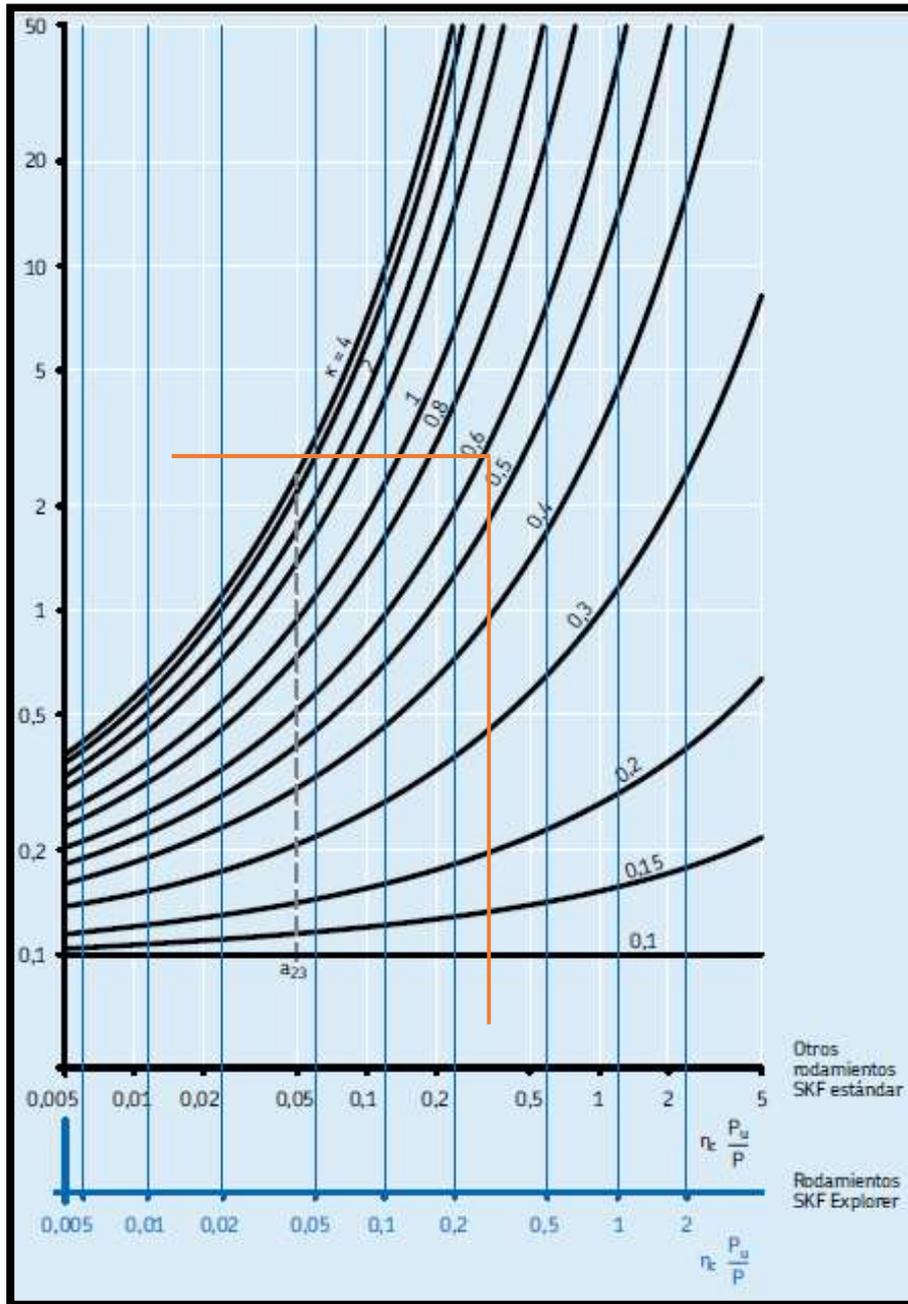
*Fuente:* [21]

*Anexo 5. Factor a23.*



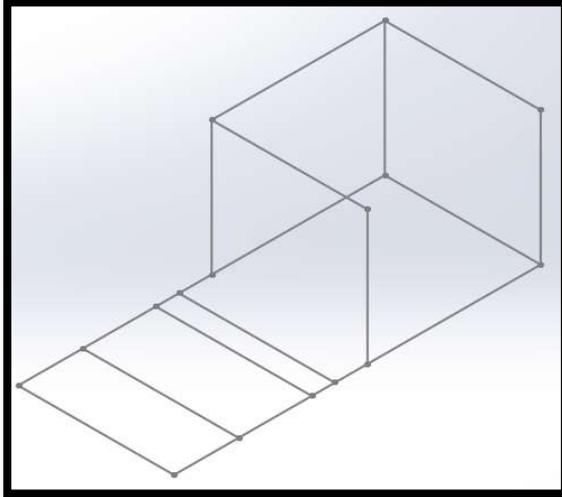
*Fuente:* [21]

*Anexo 6. Tabla valor de  $a_{skf}$*



Fuente: [21]

Anexo 7. Dimensionamiento estructural.



*Fuente: Autores.*

**Anexo 8. Aplicación de material en software.**

The screenshot shows a software window titled 'Material' with a tree view on the left and a properties panel on the right. The tree view lists various materials, with 'ASTM A36 Acero' selected. The properties panel shows the following settings:

- Propiedades de material: No se pueden editar los materiales en la biblioteca predeterminada. Para editar un material, cópielo primero a una biblioteca personalizada.
- Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal
- Unidades: SI - N/mm<sup>2</sup> (MPa)
- Categoría: Acero
- Nombre: ASTM A36 Acero
- Descripción: (empty field)
- Origen: (empty field)
- Sostenibilidad: Definido

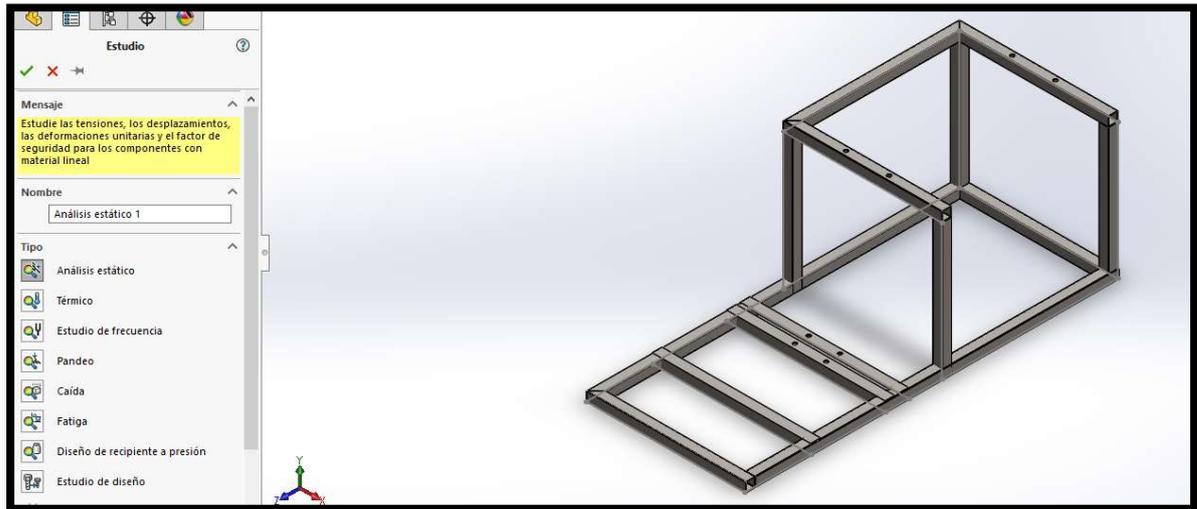
Below the properties panel is a table of material properties:

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	200000	N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.26	N/D
Módulo cortante	79300	N/mm <sup>2</sup>
Densidad de masa	7850	kg/m <sup>3</sup>
Límite de tracción	400	N/mm <sup>2</sup>
Límite de compresión		N/mm <sup>2</sup>
Límite elástico	250	N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de expansión térmica		/K
Conductividad térmica		W/(m·K)

On the right side of the screenshot, the 3D wireframe model from the previous image is shown with a grey material texture applied to its edges.

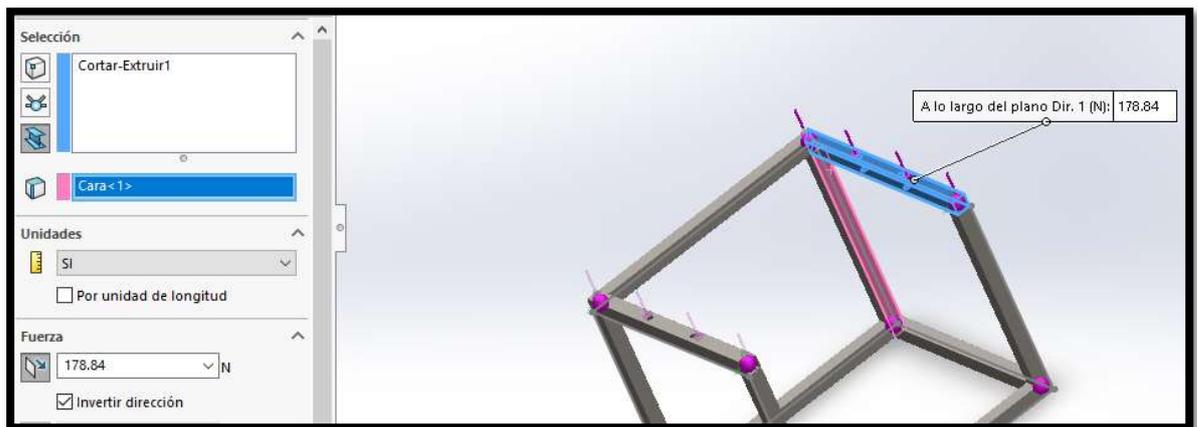
*Fuente: Autores.*

**Anexo 9. Selección de tipo de análisis.**



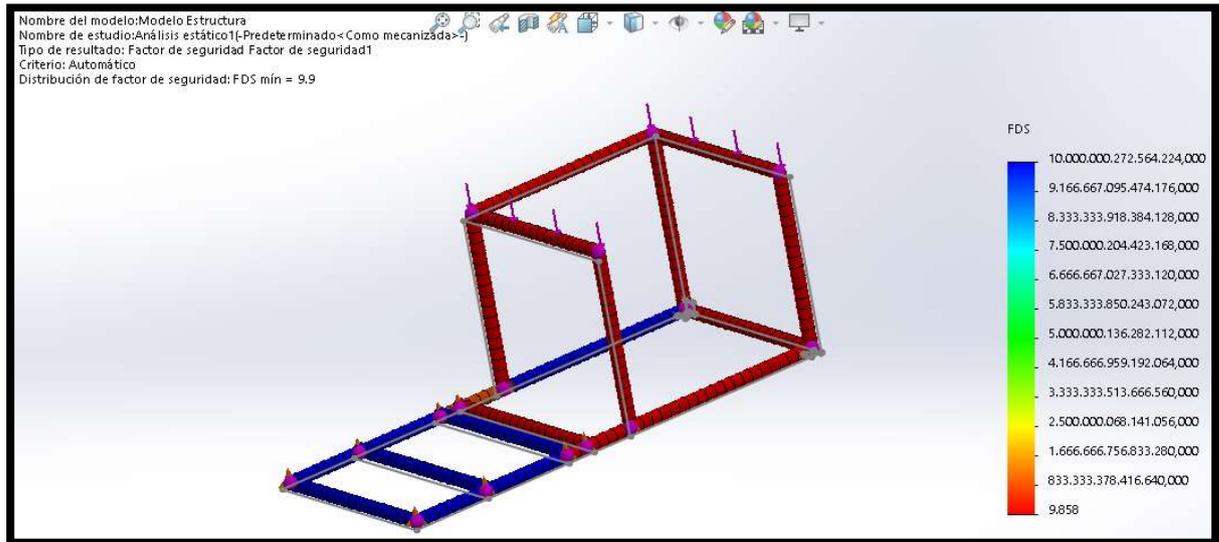
*Fuente: Autores.*

*Anexo 10. Aplicación de las reacciones.*



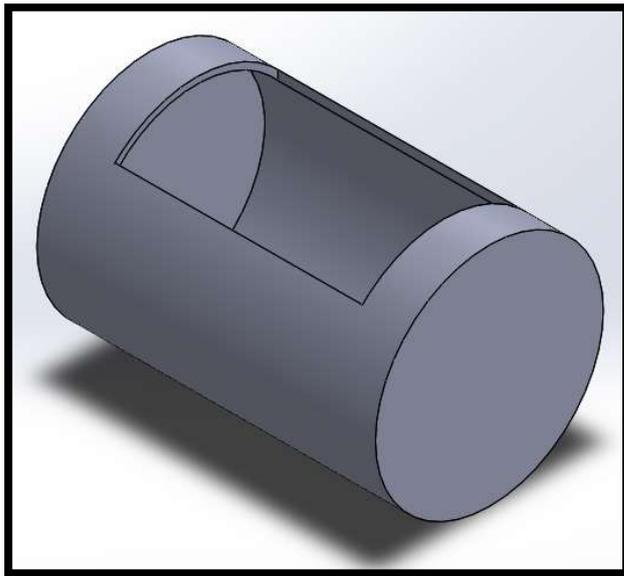
*Fuente: Autores.*

*Anexo 11. Cálculo del Factor de Seguridad DDS mediante Software.*



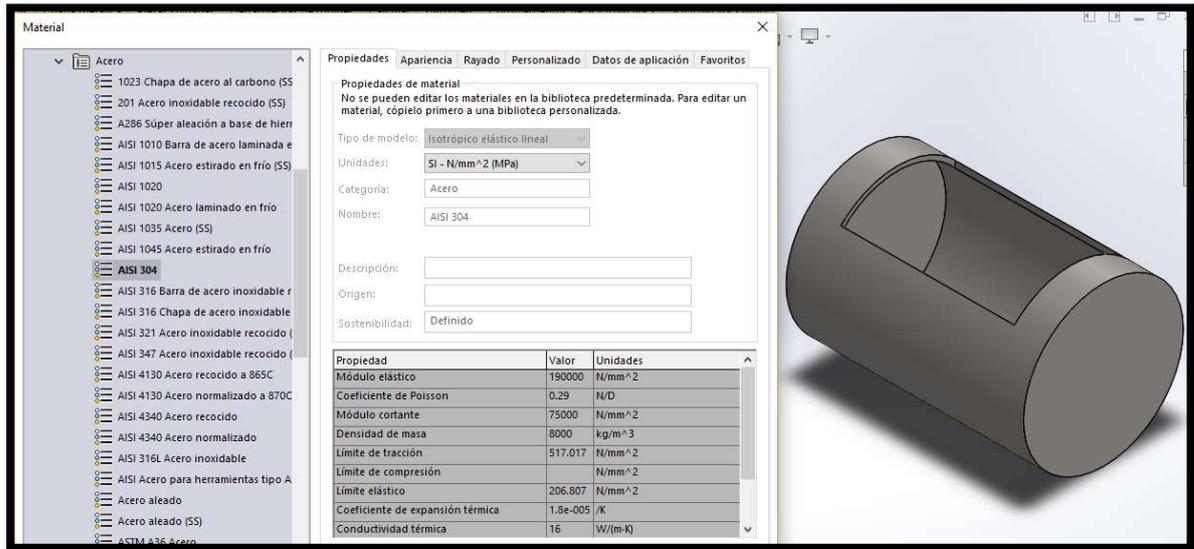
*Fuente: Autores.*

*Anexo 12. Diseño dimensional del tambor.*



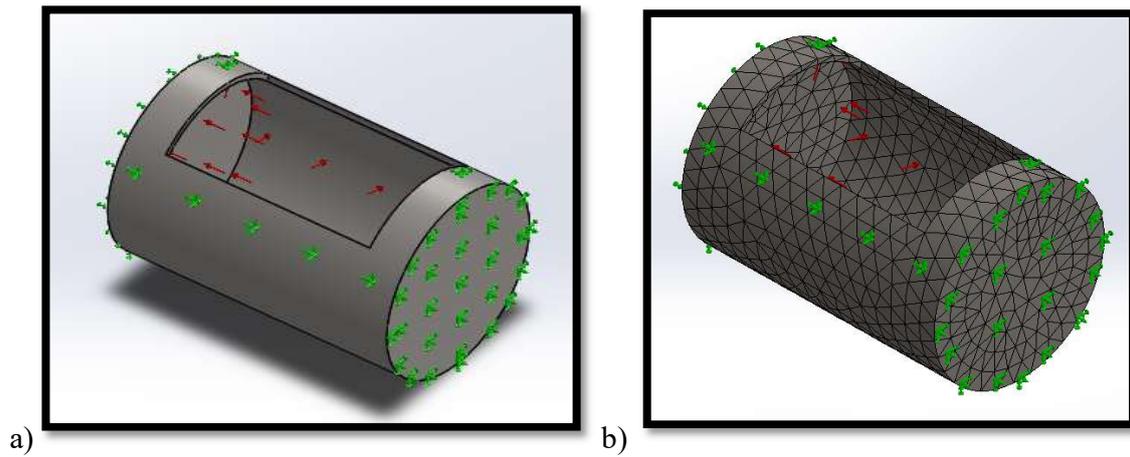
*Fuente: Autores.*

*Anexo 13. Aplicación del material.*



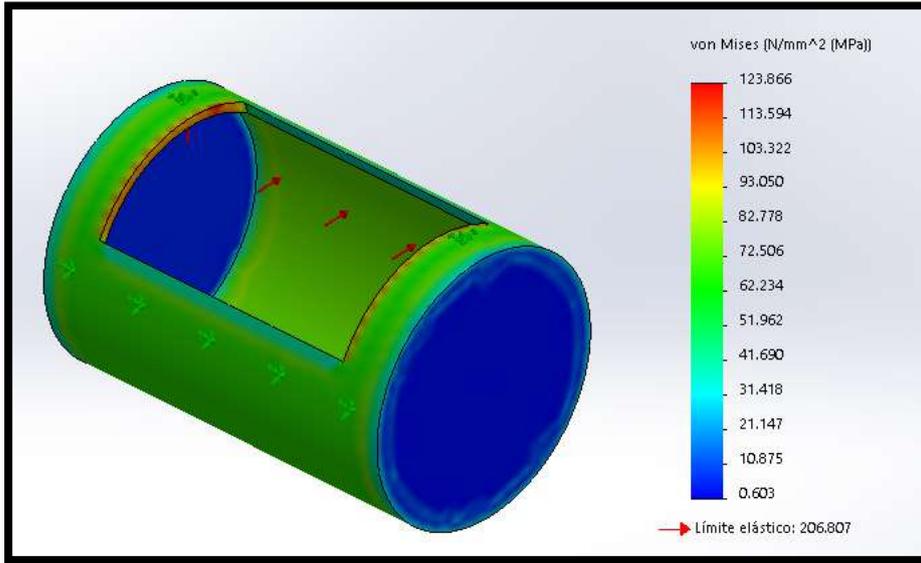
*Fuente: Autores.*

*Anexo 14. a) Aplicación de Rigidez. b) Aplicación de mallado tipo mixto enfocado a curvatura.*



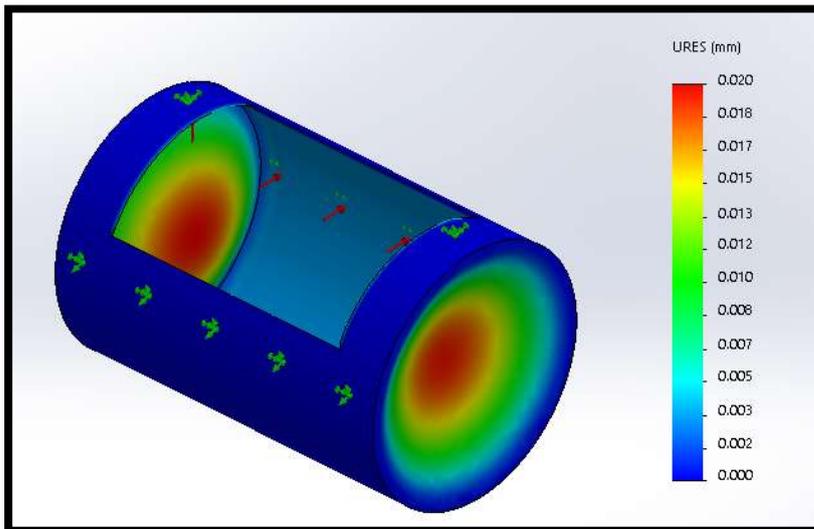
**Fuente:** Autores

*Anexo 15. Esfuerzo de VON MISES obtenido en Software.*



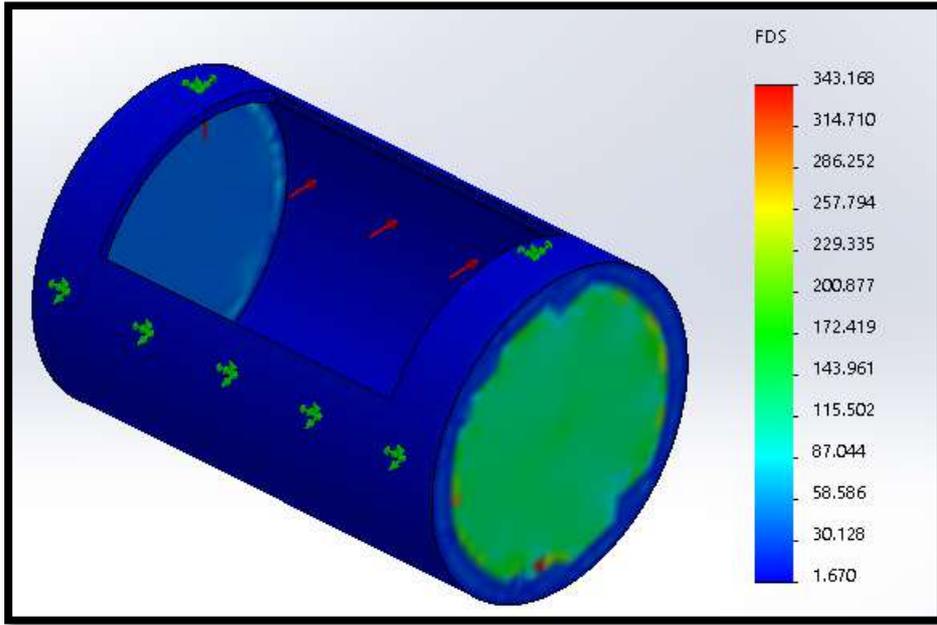
*Fuente: Autores.*

**Anexo 16.** Desplazamiento de elementos en software.



*Fuente: Autores.*

**Anexo 17.** Factor de seguridad FDS obtenidos del software.



*Fuente: Autores.*

**Anexo 18.** Tambor del molino



**Fuente:** Autores

**Anexo 19.** Motor del sistema.



**Fuente:** Autores.