

**DISEÑO Y MODELAMIENTO DE UN MOLINO DE ANILLOS
PARA LA PULVERIZACION DE MINERALES**

JAMES LARRY TAPIAS CHÁVEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2007

**DISEÑO Y MODELAMIENTO DE UN MOLINO DE ANILLOS
PARA LA PULVERIZACION DE MINERALES**

JAMES LARRY TAPIAS CHÁVEZ

**Trabajo de Grado para optar el Título de
Ingeniero Mecánico**

Director

ALFREDO PARADA

Ingeniero Mecánico

Codirector

IVÁN URIBE PÉREZ

Ingeniero Metalúrgico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2007

DEDICATORIA

A DIOS por permitirme lograr un objetivo más en mi proyecto de vida, a mi padre Heriberto Tapias Cardona y mi madre Maria Chávez Montes por todo su apoyo, comprensión, sabios consejos y sobre todo el AMOR que me brindaron para poder llevar a cabo este sueño que venimos compartiendo juntos hoy y siempre.
Gracias.

James Larry Tapias Chávez

AGRADECIMIENTOS

Al Director de este Proyecto de grado Ingeniero ALFREDO PARADA CORRALES.

Al Co-director de este proyecto de grado Ingeniero IVÁN URIBE.

A mis profesores, compañeros, amigos, familiares, que de una u otra manera me brindaron su apoyo y conocimiento para que este proceso de aprendizaje culminará satisfactoriamente alcanzando de manera altiva tan importante meta.

Gracias.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. CAPITULO 1	4
DESCRIPCION DE LA TECNICA DE LA PULVERIZACION	4
1.1. PULVERIZACION	4
1.2.	5
1.3. TEORÍA DE LA PULVERIZACIÓN	8
1.4. EFICACIA DE LA DESINTEGRACIÓN	9
1.5. RELACIONES EMPÍRICAS: LEYES DE RITTINGER Y DE KICK	10
1.6. LEY DE BOND E ÍNDICE DE TRABAJO	11
2. CAPITULO 2	13
CARACTERÍSTICAS DE LOS MINERALES	13
2.1. MINERALES	13
2.1.1. dureza	14
2.1.2. densidad	16
2.1.3. brillo	17
2.1.4. color	18
2.2. INFORMACIÓN NECESARIA EN LA PREPARACIÓN DE MINERALES	19
2.3. MINERALOGIA	20
2.3.1. Minerales Cuarcíticos	21
2.3.2. Minerales Metamórficos	22
2.4. TAMIZADO Y DIVISION DE MUESTRAS	23
2.4.1. Tipos de molino y tamaño promedio de partícula obtenida	25
2.4.2. Escala estándar de Tamices Analíticos TYLER	26

3. CAPITULO 3	28
TIPOS DE MOLINOS DE ANILLOS	28
3.1. Molino NAEF HNZ-1769C	28
3.2. Pulverizador FRITSCH 9	29
3.3. MOLINO DE ANILLOS ROCKLABS	30
3.4. NUEVOS DISEÑOS	31
4. CAPITULO 4	32
VARIABLES DEL PROCESO DE PULVERIZACION	32
4.1. TIPO DE MOLINO	32
4.2. CONJUNTO DE MOLIENDA	33
4.3. VELOCIDAD DE MOLIENDA	33
4.4. TIEMPO DE MOLIENDA	34
4.5. CAPACIDAD	34
4.6. TAMAÑO DE ALIMENTACIÓN Y DESCARGA	34
4.7. ATMÓSFERA	35
5. CAPITULO 5	36
RESORTES	36
5.1. ESTABILIDAD DE LOS RESORTES	36
5.2. VIBRACIONES DE RESONANCIA	37
5.3. FLEXIÓN Y PANDEO EN RESORTES HELICOIDALES	40
6. CAPITULO 6	43
1. ACEROS INOXIDABLES Y SUS TRATAMIENTOS TERMICOS	2. 43
6.1. CLASIFICACIÓN	43
6.1.1. Aceros Inoxidables Ferríticos	43
6.1.2. Aceros Inoxidables Austeníticos	44
6.1.3. Aceros Inoxidables Martensíticos	44
6.2. TRATAMIENTO TÉRMICO DE LOS ACEROS INOXIDABLES	44
6.3. TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ENDURECIMIENTO	

SUPERFICIAL	46
6.3.1. Temple por inducción	46
7. CAPITULO 7	49
DISEÑO DE UN MOLINO DE ANILLOS PARA LA PULVERIZACION DE MINERALES	49
7.1. PARTES DEL MONILO DE ANILLOS	53
7.2. DISEÑO DEL SET DE PULVERIZACION	54
7.2.1. Selección de Material	55
7.3. DISEÑO DEL CIERRE DE SEGURIDAD	56
7.4. SELECCIÓN DE UN INTERRUPTOR DE SEGURIDAD	56
7.5. DISEÑO DE LA CAMPANA DEL SET DE MOLIENDA	65
7.6. DISEÑO DEL SISTEMA GENERATRIZ	68
7.6.1. Selección del Motor	72
7.7. DISEÑO DE LOS RESORTES	73
7.8. DISEÑO DE LA BASE PARA LOS RESORTES	77
7.9. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA	80
7.10. CONTROL DE POTENCIA	84
7.11. SELECCIÓN DEL CIRCUITO DE CONTROL	85
7.12. DISEÑO DE LA CUBIERTA	86
7.13. UNIDAD DE CONTROL	88
CONCLUSIONES	92
BIBLIOGRAFÍA	94
ANEXOS	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Deformación Resultante de una Red Cristalina debido	06
	a los	
	Esfuerzos	06
Figura 2	Concentración de Esfuerzo en una punta de grieta	06
Figura 3	Fracturación por Trituración	08
Figura 4	Formación de Minerales	13
Figura 5	Cristales de Cuarzo	22
Figura 6	Roca Metamórfica	26
Figura 7	Tipos de Molinos	26
Figura 8	Molino FRITSCH 9	28
Figura 9	Molino Blewler Mill	29
Figura 10	Molino Rocklabs	30
Figura 11	Estabilidad de los Resortes	37
Figura 12	Controles de Vibración	38
Figura 13	Pandeo y Flexión de Resortes Helicoidales	40
Figura 14	Curva de Templado y Recocido	45
Figura 15	Elementos del set de molienda	49
Figura 16	Vista Frontal en corte del Molino de Anillos	52
Figura 17	Forma de colocar los anillos para agregar luego el	53
	mineral	
Figura 18	Elementos constitutivos del Set de Molienda	56
Figura 19	Cierre de Seguridad	57
Figura 20	Discos de Poliuretano para Autobloqueo	58
Figura 21	Discos de Poliuretano en sus estados libre y Cargados	59
Figura 22	Diagrama de cuerpo libre de la Palanca en L (7)	59
Figura 23	Enmallado de la Palanca en L	60
Figura 24	Análisis de esfuerzos en la Palanca en L	60

Figura 25	Diagrama de cuerpo libre de la Palanca de Cierre (9)	61
Figura 26	Enmallado de la Palanca de Cierre	62
Figura 27	Análisis de Esfuerzos de la Palanca de Cierre	62
Figura 28	Diagrama de cuerpo libre del pasador	63
Figura 29	Interruptor de Seguridad	64
Figura 30	DCL de la campana del set de molienda	65
Figura 31	Enmallado de la Campana del Set de Molienda	66
Figura 32	Análisis de Esfuerzos de la Campana del Set de Molienda	67
Figura 33	Ensamble entre la adaptación, la excéntrica y el motor eléctrico	67
Figura 34	Arreglo Geométrico de los Resortes	69
Figura 35	Resorte Helicoidal Escuadrado y Amolado	75
Figura 36	Sistema de Resortes	76
Figura 37	Base para los Resortes con cargas y restricciones	77
Figura 38	Análisis de Esfuerzos en la Base para los Resortes	78
Figura 39	Estructura del Molino, Cargas y Restricciones y Enmallado	78
Figura 40	Enmallado de la Estructura del Molino	79
Figura 41	Análisis de Esfuerzos en la Estructura del Molino	81
Figura 42	Estructura del Molino de Anillos	82
Figura 43	Circuito de Potencia	82
Figura 44	Circuito de Control	84
Figura 45	Desarrollo de la Cubierta	84
Figura 46	Desarrollo de la Tapa Frontal	85
Figura 47	Desarrollo de la Tapa Superior	86
Figura 48	Cubierta	86
Figura 49	Contactador AC NC1 1210 12 Amp	87
Figura 50	Relé Térmico NR2 - 25 7-10 Amp	87

Figura 51	Timer TH3A - YA 30 min 110/220 Volt	89
Figura 52	Botonera Pulsador Doble NA/NC	89
Figura 53	Caja de Paso de 20"×20"	90
Figura 54	Caja de Paso con los elementos de control	90

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Índice de Trabajo en Minerales para Trituración Seca	12
Tabla 2	Escala de MOHS	15
Tabla 3	Densidades Promedios de los Elementos	17
Tabla 4	El Brillo en los Minerales	17
Tabla 5	Minerales Idiocromáticos con Distintos Colores	18
Tabla 6	Mallas de Tamizado TYLER	27
Tabla 7	Elementos del Molino	52
Tabla 8	Prueba de Consumo de Potencia Eléctrica	71
Tabla 9	Carga Total que Soportan los Resortes	74
Tabla 10	Cálculo de los Resortes	75
Tabla 11	Elementos del Sistema de Control	88

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1	Data Sheet Motor Eléctrico	96
Anexo 2	Propiedades Mecánicas del acero SAE AISI 410	97
Anexo 3	Propiedades Mecánicas de la Lamina Hot Rolled	98
Anexo 4	Propiedades Mecánicas del acero SAE AISI 1070	99
Anexo 5	Planos de Fabricación	

GLOSARIO

- Acero Inoxidable: aleaciones de hierro, cromo, níquel y otros elementos que junto a su proceso de fabricación se les proporcionan sus características especiales.
- Brida: Pieza metálica de conexión entre dos cuerpos sólidos.
- Conminución: Proceso de disminuir el tamaño de grano de un mineral.
- Isonorizador: Espuma que se utiliza para aislar un medio del ruido externo producido o viceversa.
- Pandeo: Efecto que sufre un elemento mecánico al sufrir excesivas cargas de presión en su eje longitudinal, generando una distorsión en este.
- Relé: Es un componente electromagnético de interconexión entre circuitos de control y circuitos a controlar. Un Relé consiste en una bobina arrollada sobre un soporte metálico de modo que, al circular por las espiras de la bobina una cierta corriente, provoca la atracción de una lamina sobre el soporte metálico que activada unos contactos eléctricos asociados.
- Templabilidad: se refiere a la capacidad relativa de un acero de ser endurecido por transformación a martensita. Es una propiedad que determina la profundidad por debajo de la superficie templada a la cual el acero se endurece o la severidad del temple requerido para lograr una cierta penetración de la dureza. Los aceros con buena templabilidad pueden endurecerse más profundamente debajo de la superficie y no requieren altas velocidades de enfriamiento. La templabilidad no se refiere a la máxima

dureza que se puede lograr en el acero; eso depende del contenido de carbono. La templabilidad de un acero se incrementa mediante la aleación. Los elementos aleantes que tienen el mayor efecto son el cromo, el manganeso, el molibdeno y el níquel en menor grado.

➤ Temporizador: Dispositivo electrónico que se utiliza para medir el tiempo que transcurre desde que se cumple una determinada condición lógica.

➤ Tratamiento térmico: Son ciclos de calentamiento y enfriamiento a los cuales se somete un material con el fin de variar su dureza para cambiar su resistencia mecánica.

➤ Recocido: Cuando un material se somete a trabajo en frío o en caliente, se inducen esfuerzos remanentes o residuales y, además, el material generalmente adquiere una gran dureza debida a estas operaciones de labrado. El objeto tratado se deja enfriar luego lentamente, por lo general en el mismo horno en el que fue tratado. El recocido se emplea para suavizar un material y hacerlo más dúctil, para eliminar esfuerzos remanentes y para refinar la estructura del grano.

➤ Templado: la rapidez de enfriamiento es el factor que determina la dureza. Una rapidez de enfriamiento controlada en un material caldeado constituye el proceso que recibe el nombre de templado. Las dos sustancias más utilizadas para templar son el agua y el aceite.

➤ Revenido: cuando una probeta de acero ha sido endurecida totalmente resulta ser dura y frágil en extremo y con esfuerzos resultantes altos. El acero queda inestable y tiende a contraerse al envejecer. Dichos esfuerzos internos pueden ser eliminados por un proceso de calentamiento ligero llamado de

alivio de esfuerzos. Después de que la probeta ha sido endurecida totalmente por el templado desde arriba de la temperatura crítica, se recalienta a una temperatura inferior a la crítica durante cierto tiempo y luego se deja enfriar al aire tranquilo.

➤ Normalizado: tiene por objeto dejar un material en estado normal, es decir, ausencia de tensiones internas y con una distribución uniforme del carbono. Se suele emplear como tratamiento previo al temple y al revenido.

➤ Vibración: Es el resultado físico a un estímulo de carácter repetitivo.

➤ Curva de Revenido: Es la curva donde se relaciona en el eje X la temperatura de revenido y en el eje Y la dureza en HRC, y es empleada para encontrar la temperatura a la cual debe ser revenido un Acero con el fin de alcanzar una dureza determinada.

➤ Picaduras: fallas que se originan con grietas superficiales y cada hueco indica un área relativamente pequeña de la superficie.

➤ Resquebrajamiento: falla que se origina con grietas por debajo de la superficie y el resultado es la formación de delgadas "hojuelas" del material superficial.

RESUMEN

TITULO: DISEÑO Y MODELAMIENTO DE UN MOLINO DE ANILLOS PARA LA PULVERIZACION DE MINERALES

Autor: James Larry Tapias Chávez**
Ing. Alfredo Parada, Ing. Iván Uribe.
Escuela de Ingeniería Mecánica, Escuela de Ingeniería Metalúrgica
Universidad Industrial de Santander
Bucaramanga, Colombia.
Febrero de 2007

DESCRIPCIÓN

La Universidad Industrial de Santander, entidad destinada a la capacitación de personal y generadora de proyectos investigativos esta interesada en implementar nuevas tecnologías en su planta física; con el propósito de mejorar las relaciones con las empresas; debido a esto, La Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales ha hecho énfasis en la adaptación de nuevos equipos en su laboratorio de minerales buscando optimizar los resultados que se obtienen a partir del análisis granulométrico de muestras de menas, solicitados por particulares que desean conocer su composición.

Frente a esta situación, Las Escuelas de Ingeniería Metalúrgica e Ingeniería Mecánica, plantearon el proyecto de diseñar un molino de anillos con características especiales como alternativa de solución, aportando desarrollo tecnológico y al mismo tiempo satisfaciendo las necesidades de los interesados.

El molino de anillos para la pulverización de minerales se diseño teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Mineral de Trabajo (menas cuarcíticas)
- Capacidad 1 Kg.
- Mesh Final 200 (74 μ c)
- Alta Eficiencia
- Contaminación Reducida
- Fácil Limpieza

FUNCIONAMIENTO

El molino de anillos opera bajo el principio de impacto y fricción, donde unos anillos concéntricos contenidos en un recipiente son sacudidos por efecto de la rotación de una excéntrica conectada al motor eléctrico acoplado al cuerpo vibratorio, donde descansan los anillos. La fuerza generada por la aceleración centrífuga al girar el motor se transmite al set de molienda, este soportado por elementos flexibles, permite la oscilación de los anillos dentro del recipiente chocando unos con otros triturando el mineral, logrando la pulverización.

* Proyecto de grado

** Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Mecánica, Director Ing. Alfredo Parada, Ing. Iván Uribe.

ASBTRACT

TITLE: DESIGN AND MODELAMIENTO OF A RING MILLS FOR THE PULVERIZATION OF MINERALS

Autor: James Larry Tapias Chávez**
Ing. Alfredo Parada, Ing. Iván Uribe.
School of Mechanical Engineering, School of Metallurgical Engineering
Industrial University of Santander
Bucaramanga, Colombia.
February of 2007

Summary: In the following work it was realized the design of a rings mill for the pulverization of minerals with the one which, the School of Engineering Metallurgical plans to improve the efficiency of the analyses that in her are made to samples of fewer of minerals, with the objective of drifting with more effectiveness the later treatments to those fewer of where they come.

DESCRIPTION

The Industrial University of Santander, dedicated to the training of personal and generating of investigative projects this interested one in to develop new technologies in their physical plant; with the purpose of improving the relationships with the companies; due to this, The School of Engineering Metallurgical and Science of Materials has made emphasis in the adaptation of new teams in its laboratories of minerals with the purpose of optimizing the results that they are obtained starting from the screen analysis of samples of menas, requested by particular that want to know their composition.

In front of this situation, The School of Engineering Metallurgical and Science of Materials in coordination with the School of Mechanical Engineering, it was development the project of designing a mill of rings with characteristic special, as solution alternative, contributing technological development and at the same time satisfying the necessities of the interested parties.

The mill of rings for the pulverization of minerals it was design keeping in mind the following aspects on the pulverization of minerals

- working Mineral (menas cuarcíticas)
- Capacity of mill 1 Kg.
- Final Particle Mesh 200 (74 μ c)
- High Efficiency
- Reduced Contamination
- Easy Cleaning

OPERATION

The mill of rings operates under the impact principle and friction, where some rings concentric contents in a recipient are shaken by effect of the rotation of an eccentric connected to the electric motor couple one of the vibratory body, where they rest the rings. The force generated by the acceleration centrifuges when rotating the motor it is transmitted to the set of mill supported one for flexible elements, it allows the oscillation of the set, and the rings inside the recipient they collide and they slip some with other crushing the mineral among its faces, carrying out the pulverization.

181171811718_____

* Project of grade

** Industrial University of Santander. School of Mechanical Engineering, School of Metallurgical Engineering. Director. Ing. Alfredo Parada, Ing. Iván Uribe.

INTRODUCCIÓN

Durante casi un siglo, el proceso de reducción del tamaño se ha estudiado por lo que se refiere a la energía consumida durante el funcionamiento de un molino. Éste era un punto de partida lógico, porque la reducción del tamaño es responsable de una gran proporción de los costos de tratamiento de la mena y la energía consumida representa el mayor costo en la reducción del tamaño; Sin embargo, las relaciones entre la energía y la reducción de tamaño no definen el proceso de conminución adecuadamente.

Los Ingenieros Metalúrgicos, todavía interesados en reducir los costos, han abordado el problema de una manera diferente, primeramente estudiando el proceso de reducción de tamaño y como segundo ítem, han obtenido expresiones matemáticas que relacionen las variables de operación.

Ahora es bien reconocido que para llevar a cabo el proceso de conminución de minerales existen muchos métodos, estos y las herramientas utilizadas para lograr los propósitos varían según las necesidades del proyecto y las características de las menas a trabajar; por ejemplo, las quebrantadoras, las maquinas de corte, los molinos y los molinos de ultrafinos son equipos de reducción de tamaño, pero cada uno de ellos es utilizado para conseguir tamaños de partículas específicos.

El tema central de todas estas técnicas es dejar el mineral con el tamaño y en ocasiones con forma definida para su procesamiento posterior, ya sea por compresión, impacto, frotación o rozamiento, corte o una combinación de estas formas de reducción.

La habilidad y eficiencia de las diferentes técnicas de reducción de tamaño de minerales se evalúa en la capacidad de conseguir el particulado requerido con el menor consumo de energía. Esto ha sido investigado por distintas personas a lo largo de la historia de la trituración de minerales, aunque ha sido un proceso difícil, se han logrado adaptar modelos matemáticos para simular por ordenador las operaciones de molienda, el cual nos es útil para predecir el consumo de potencia y la distribución de tamaños de las partículas en molinos continuos, en las que las fracciones de masa están en equilibrio dinámico y no varían con el tiempo.

Actualmente la Universidad Industrial de Santander, como entidad destinada a la capacitación de personal y generadora de proyectos investigativos esta interesada en implementar y desarrollar nuevas tecnologías en su planta física, con el propósito de mejorar las relaciones con las empresas del Oriente; debido a esto, La Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales ha hecho énfasis en la adaptación de de nuevos equipos en su laboratorios de minerales con el fin de optimizar los resultados que se obtienen a partir del análisis granulométrico de muestras de menas, solicitados por entes particulares que desean conocer la composición de dichas menas.

Frente a esta situación, La Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales en coordinación con la Escuela de Ingeniería Mecánica, se desarrollo el proyecto de diseñar un molino específicamente de anillos, ya que este tipo de molino cumple con las especificaciones solicitadas por la Escuela, como el tamaño del particulado a obtener que es de 74 μm (mesh 200), fácil limpieza y el mínimo de contaminación de la muestra, aportando desarrollo tecnológico y al mismo tiempo satisfaciendo las necesidades de los interesados.

El desarrollo del proceso de diseño y la secuencia de los capítulos del contenido de la monografía fueron realizados en forma vertical de arriba hacia abajo, según la grafica en corte que aparece en la figura 16.

CAPITULO 1

1 DESCRIPCION DE LA TECNICA DE LA PULVERIZACION.

1.1. PULVERIZACION

Debido a que la mayor parte de los minerales están finamente diseminados e íntimamente asociados con la ganga, estos deben ser inicialmente desentrelazados antes de que se pueda intentar su separación. Esto se lleva a cabo por medio de la pulverización, en la cual el tamaño de la partícula de la MENA es progresivamente reducido hasta que las partículas limpias de mineral se puedan separar por medios disponibles. La primera etapa de la conminución se realiza para hacer más fácil el manejo del material, recientemente excavado por las palas, bandas y transportadoras de menas, en el caso de los productos de cantera, para producir materiales con tamaño de partícula controlado.

En la explotación se usan explosivos para remover las menas del lecho natural en que se encuentren y la explosión se puede considerar como la primera etapa de la pulverización. La reducción de tamaño en la planta de procesamiento de minerales o molinos, tiene lugar como una consecuencia de los procesos de trituración y molienda. La trituración reduce el tamaño de la partícula del mineral tal como sale de la mina hasta un nivel tal que la molienda sea posible, hasta que el mineral y la ganga se produzcan como productos separados.

La trituración se realiza por compresión de la MENA contra superficies rígidas o por impacto contra superficies, con un recorrido de movimiento rígidamente forzado. Esto contrasta con la molienda la cual es efectuada por

la abrasión o por impacto de la MENA mediante el libre movimiento del medio de molienda tal como barras, bolas y guijarros.

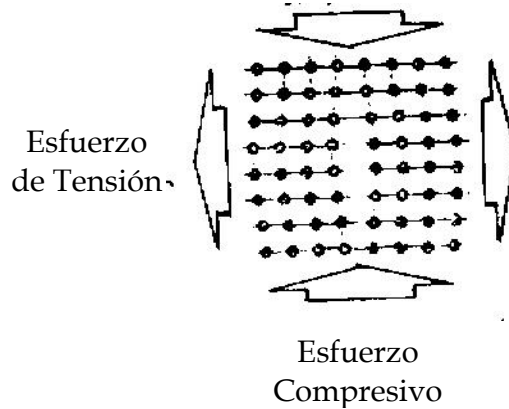
La trituración usualmente es un proceso seco y se ejecuta en varias etapas. Con pequeñas relaciones de reducción que varían de tres a seis en cada etapa. La relación de reducción de una etapa de trituración se define como la relación del tamaño máximo de la partícula que entra a la trituradora al tamaño máximo de la partícula que sale de ella.

En las últimas etapas de la pulverización se utilizan molinos de rodamiento de bolas o barras de acero, o MENA clasificada como medio de molienda. Generalmente la molienda se realiza en húmedo para suministrar un lodo o pulpa de alimentación al proceso de concentración, aunque la molienda en seco tiene aplicaciones limitadas.

1.2. PRINCIPIOS DE LA PULVERIZACIÓN

La mayor parte de los minerales son materiales cristalinos en los cuales los átomos están acomodados regularmente en formaciones dimensionales. La configuración de los átomos esta determinada por el tamaño y los tipos de enlaces físicos y químicos que los mantienen unidos. En la red cristalina de los minerales, estos enlaces interatómicos son efectivos solamente sobre pequeñas distancias y pueden desaparecer si se extienden o se dilatan por un esfuerzo de tensión. Tales esfuerzos se pueden generar por una carga de tensión o compresión.

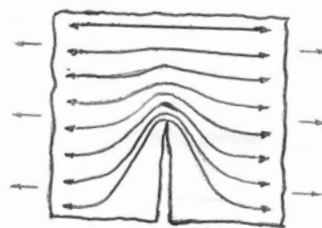
Figura 1 Deformación Resultante De Una Red Cristalina Debido A Los Esfuerzos Internos De Tensión O Compresión.



Fuente: Manual de Mineralogía de Dana.

Aun cuando las rocas tienen carga uniforme, los esfuerzos internos no están igualmente distribuidos, ya que la roca consiste en una variedad de minerales dispersos en forma de granos de varios tamaños. La distribución del esfuerzo depende de las propiedades mecánicas de los minerales individuales, pero es más importante la presencia de grietas o defectos en la matriz, ya que estos actúan como sitios de concentración de esfuerzos.

Figura 2 Concentración De Esfuerzo En Una Punta De Grieta.



Fuente: Manual de Mineralogía de Dana.

Se ha demostrado que el incremento del esfuerzo en un sitio en particular es proporcional a la raíz cuadrada de la longitud de la grieta perpendicular a la

dirección del esfuerzo. Por lo tanto, hay un valor crítico para la longitud de la grieta en cualquier nivel particular de esfuerzo en la cual el nivel del aumento del esfuerzo en el extremo de la grieta es suficiente para romper el enlace atómico en ese punto. Dicha ruptura del enlace aumenta la longitud de la grieta incrementando la concentración de esfuerzos y causa una rápida propagación de la grieta a través de la matriz y de este modo se produce la fractura.

Aunque las teorías de la reducción de tamaño consideran que el material es quebradizo, los cristales pueden de hecho, almacenar energía sin quebrarse y liberan esta energía cuando desaparece el esfuerzo. Esto se conoce como comportamiento elástico. Cuando ocurre la fractura, una parte de la energía almacenada se transforma en energía superficial libre. Es la energía potencial de los átomos en las superficies recientemente producidas. Debido a este incremento de energía superficial, las superficies recientemente formadas con frecuencia son más activas químicamente y son más apropiadas a la acción de los reactivos de flotación, u otros.

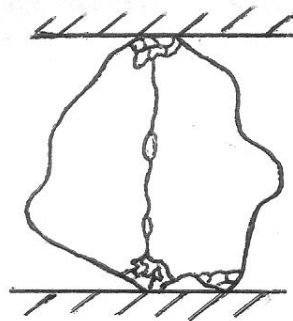
Griffith demostró que los materiales fallan por propagación de la grieta cuando esto sea energéticamente factible, es decir, cuando la energía liberada por disminución de la energía de deformación sea más grande que la energía de la nueva superficie producida. Los materiales quebradizos suavizan la energía de deformación principalmente por propagación de la grieta, mientras que los materiales duros pueden disminuir la energía de deformación sin propagación de la grieta por el mecanismo de flujo plástico, donde los átomos o moléculas se deslizan unos sobre otros y la energía se consume cuando se distorsiona la forma del material. La propagación de la grieta también se ve impedida al encontrarse con otras grietas o por el

encuentro de los límites de los cristales. Las rocas de grano fino generalmente son más duras que las de grano grueso.

La energía que se requiere para la conminución disminuye con la presencia de agua y puede reducirse aun más por reactivos químicos que se adsorben sobre el sólido. Esto sucede debido a la disminución de la energía superficial en la absorción, suponiendo que el aditivo pueda penetrar dentro de la grieta y reduzca la resistencia axial del enlace en el extremo de la grieta antes de la ruptura.

Las partículas reales tienen forma irregular y la carga no es uniforme sino que se realiza a través de puntos o pequeñas áreas de contacto.

Figura 3 Fracturación Por Trituración.



Fuente: Manual de Mineralogía de Dana.

1.3. TEORÍA DE LA PULVERIZACIÓN

La teoría de la pulverización se ocupa de la relación entre la energía consumida y el tamaño de partícula del producto obtenido partiendo de un tamaño de alimentación dado.

El problema más grande está en el hecho de que la mayor parte de la energía consumida por una máquina para molienda es absorbida por la misma máquina y solamente una pequeña fracción de la energía total está disponible para el quebrado del material. Otro factor es que un material plástico absorbe energía en el cambio de forma, la que retendrá sin crear nueva superficie significativa.

Todas las teorías de la reducción de tamaño asumen que el material es frágil, de manera que no absorber energía en procesos tales como elongación o contracción la cual finalmente no se utiliza en el quebrado.

1.4. EFICACIA DE LA DESINTEGRACIÓN

La relación entre la energía superficial creada por la desintegración mecánica y la energía absorbida por el sólido es la eficacia de desintegración η_c . Si e_s es la energía superficial por unidad de área, en pies por libra fuerza por pie cuadrado, y A_{wb} y A_{wa} son las áreas por unidad de masa de producto y de alimentación, respectivamente, la energía absorbida por una unidad de masas de material W_n es:

Ecuación 1

$$W_n = \frac{e_s * (A_{wb} - A_{wa})}{\eta_c}$$

La energía superficial creada por fractura es pequeña con la energía mecánica total almacenada en el material en el momento de la ruptura, y la mayor parte de esta última se convierte en calor. Por tanto, las eficacias de trituración son bajas.

La energía absorbida por el sólido W_n es menor que la comunicada por la máquina. Parte de la entrada total de energía W se utiliza para vencer la fricción en los cojinetes y otras partes móviles, y el resto queda disponible

para trituración. La relación entre la energía absorbida y la entrada es la eficacia mecánica η_m , por lo tanto, si W es la entrada de energía,

Ecuación 2
$$W = \frac{W_n}{\eta_m} = \frac{e_s^* (A_{wb} - A_{wa})}{\eta_m^* \eta_c}$$

Si m^* es la velocidad de alimentación, la potencia consumida por la maquina es:

Ecuación 3
$$P = W m^* = \frac{m^* e_s^* (A_{wb} - A_{wa})}{\eta_c^* \eta_m}$$

1.5. RELACIONES EMPÍRICAS: LEYES DE RITTINGER Y DE KICK.

La ley de la desintegración propuesta por Rittinger en 1876 establece que el trabajo que se requiere para la desintegración es proporcional a la nueva superficie creada. Esta ley equivale a decir que la eficacia de la desintegración η_c es constante y, para una maquina y material de alimentación, es independiente de los tamaños de alimentación y del producto. Si las esfericidades Φ_a y Φ_b son iguales y la eficacia mecánica es constante, la ecuación de la potencia se puede expresar así:

Ecuación 4
$$W = \frac{P}{m} * K_r * \left(\frac{1}{D_{sb}} - \frac{1}{D_{sa}} \right)$$

En 1885 Kick propuso otra ley, basada en el análisis de esfuerzos de la deformación plástica dentro del limite de la elasticidad, que establece que el trabajo que se requiere para triturar una masa dada de material es constante para la misma relación de reducción, o sea, la relación entre el tamaño inicial de las partículas y el tamaño final de las mismas. Esto conduce a la expresión:

Ecuación 5
$$\frac{P}{m} = K_k * \text{Ln} \frac{D_{sb}}{D_{sa}}$$

Donde K_k es una constante.

Tanto la ley de Rittinger como la de Kick han demostrado ser aplicables para rangos muy limitados de tamaños de partícula. K_k y K_r se determinan experimentalmente en ensayos con la maquina que se utilizan en la realidad.

1.6. LEY DE BOND E ÍNDICE DE TRABAJO

Bond postuló que el trabajo que se requiere para formar partículas de un tamaño D_p a partir de una alimentación muy grande es proporcional a la raíz cuadrada de la relación de superficie a volumen del producto, S_p/V_p . De este se deduce que:

Ecuación 6

$$\frac{p}{m} = \frac{k_B}{\sqrt{D_p}}$$

Siendo K_B una constante que depende del tipo de maquina y del material que se tritura. Para utilizar esta ecuación se define un índice de trabajo W_i como la energía total, en kilovatios/hora por 2000 libras de alimentación, que se necesita para reducir una alimentación muy grande hasta un tamaño tal que el 80% del producto pase a través de un tamiz de 100 μ c. Esta definición conduce a una relación entre K_B y W_i . Si D_p esta en milímetros, P en kilovatios y W_i en toneladas (2000 lb) por hora,

Ecuación 7

$$K_B = \sqrt{100 * 10^{-3}} * W_i = 0.3162 * W_i$$

Si el 80% de la alimentación pasa a través de un tamaño de malla de D_{pa} mm y el 80% del producto a través de un tamaño de malla D_{pb} mm, a partir de las ecuaciones se deduce que:

Ecuación 8

$$\frac{P}{m} = 0.3162 * W_i * \left(\frac{1}{\sqrt{D_{Pa}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{Pb}}} \right)$$

El índice de trabajo incluye la fricción en el triturador, y la potencia dada por la ecuación es la potencia bruta. En la tabla 1 se muestran listan algunos minerales con sus respectivos índices de trabajo. Para molienda seca multiplicar por 4/3.

Tabla 1. Índices de Trabajo Para Trituración Seca.

Material	Dens. Relativa	Índice de Trabajo W_i
Bauxita	2.20	8.78
Clinker de Cemento	3.15	13.45
Arcilla	2.51	6.30
Carbón	1.4	13.00
Coque	1.31	15.13
Granito	2.66	15.13
Grava	2.66	16.06
Piedra Caliza	2.66	12.74
Cuarzo	2.65	13.57
Pizarra	2.63	15.87
Roca Volcánica	2.87	19.32

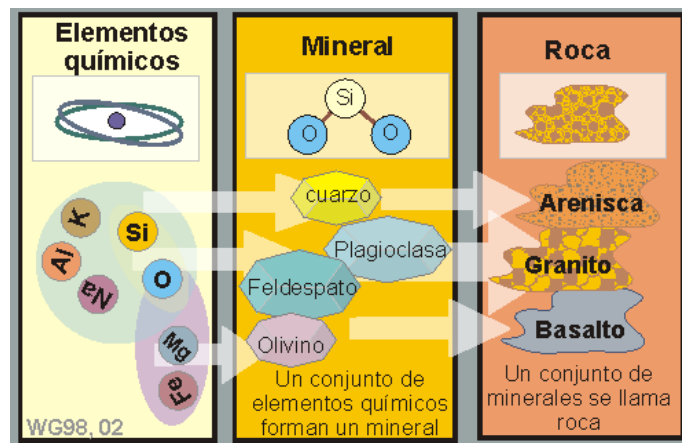
CAPITULO 2

2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MINERALES

2.1. MINERALES

Un mineral es un conjunto (natural formado) de elementos químicos. Generalmente los elementos Si, Al, K, Na, Fe, Ca, Mg, Cl, O, (entre otros) forman el mineral. Los nombres de los minerales dependen de su formula y de su estructura atómica. Un conjunto de minerales se llama roca. El nombre de la roca depende de su génesis y del contenido en minerales. Algunas rocas son monominerálicas, es decir principalmente contienen un mineral (como la caliza la calcita.).

Figura 4 Formación De Minerales.



Fuente: Manual de Mineralogía de Dana.

Los minerales son componentes naturales y materialmente individuales de la corteza rígida, son naturalmente formados, inorgánicos, en general sólidos de composición química definida y materialmente homogéneos.

Estos pueden ser Cristalinos (con estructura atómica ordenada) o Amorfos (sin estructura cristalina, vidrios naturales).

Los minerales pueden haberse formado por procesos inorgánicos o con la colaboración de organismos como por ejemplo azufre elemental, pirita y otros sulfuros, a veces pueden ser formados por reducción con la colaboración de bacterias. A veces los minerales forman parte de organismos como por ejemplo calcita, dragonita y ópalo, pueden formarse de esqueletos o conchas de microorganismos e invertebrados y apatita, que es un componente esencial de huesos y dientes de los vertebrados.

2.1.1. DUREZA

Se llama dureza al grado de resistencia que opone un mineral a la deformación mecánica. Un método útil y semicuantitativo para la determinación de la dureza de un mineral fue introducido por el químico alemán Mohs. El creó una escala de dureza de 10 niveles. Para cada nivel existe un mineral representativo y muy común. El mineral del nivel superior perteneciendo a esta escala puede rayar todos los minerales de los niveles inferiores de esta escala.

La dureza de un mineral desconocido puede averiguarse rascando entre sí una cara fresca del mineral desconocido con los minerales de la escala de MOHS. El mineral más duro es capaz de rayar el mineral más blando. Los minerales de la escala de MOHS que rayan el mineral desconocido son más duros como esto, los minerales que son rayados por el mineral desconocido son menos duros. Por tanto la dureza del mineral desconocido se estrecha entre el nivel superior del mineral que puede rayarlo y el nivel inferior del mineral que es rayado por este mineral.

Los minerales que pertenecen a la escala de MOHS se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 Escala de MOHS.

DUREZA	MINERAL	COMPOSICION QUIMICA
1	Talco , (se puede rayar fácilmente con la uña)	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
2	Yeso , (se raya con la uña con más dificultad)	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
3	Calcita , (se puede rayar con una moneda de cobre)	$CaCO_3$
4	Fluorita , (se puede rayar con un cuchillo)	CaF_2
5	Apatito , (se raya difícilmente con un cuchillo)	$Ca_5(PO_4)_3(OH-,Cl-,F-)$
6	Ortoclasa , (se puede rayar con una lija de acero)	$KAlSi_3O_8$
7	Cuarzo , (raya el vidrio)	SiO_2
8	Topacio ,	$Al_2SiO_4(OH-,F-)_2$
9	Corindón , (rubíes son formas de corindón)	Al_2O_3
10	Diamante , (el mineral natural más duro)	C

Mientras que, debido a su poca exactitud, en muchos ámbitos se han establecido otras escalas de dureza, algunas de ellas basadas en otros principios, la escala de Mohs aún se aplica en geología debido a su sencillez y la facilidad de estimar la dureza de los minerales con pocos medios.

La dureza de un mineral depende de su composición química y también de la disposición de sus átomos. Cuanto más grande son las fuerzas de enlace, mayor será la dureza del mineral.

El grafito y el diamante por ejemplo son de la misma composición química, solamente se constituyen de átomos de carbono C. El Grafito tiene una dureza según MOHS de 1, mientras que Diamante tiene una dureza según MOHS de 10.

En la estructura del diamante cada átomo de carbono - que tiene 4 electrones en su capa más exterior - puede alcanzar la configuración de ocho electrones compartiendo un par de los mismos con 4 átomos de carbono adyacentes, los cuales ocupan las esquinas de una unidad estructural de forma tetraédrica. El enlace covalente entre los átomos de carbono se repite formando una estructura continua, dentro de lo cual la energía de los enlaces covalentes se concentra en la proximidad de los electrones compartidos, lo que determina la dureza excepcional del diamante.

En la estructura del grafito, los átomos de carbono se presentan en capas compuestas por anillos hexagonales de átomos, de modo que cada átomo tiene 3 que lo rodean. Las capas de átomos del grafito están separadas una distancia relativamente grande, 3.41\AA , y quedan átomos dispuestos en forma alternada, exactamente por encima de los átomos de la capa adyacente. La causa de la poca dureza del grafito es que los enlaces entre las capas de átomos son muy débiles, mientras que los átomos en el interior de las capas están dispuestos mucho más próximos que en la estructura del diamante.

2.1.2. DENSIDAD

Cada mineral tiene un peso definido por unidad de volumen llamado **densidad**; este peso característico se describe generalmente comparándolo con el peso de un volumen igual de agua y el número resultante es lo que se llama **peso específico** o del mineral.

El peso específico de un mineral aumenta con el número de masa de los elementos que la constituyen y con la proximidad o el apretamiento en que estén arreglados en la estructura cristalina.

La mayoría de los minerales que forman rocas tienen un peso específico de alrededor de $2,7 \text{ g/cm}^3$, aunque el peso específico medio de los minerales metálicos es aproximadamente de 5 g/cm^3 .

Los minerales pesados son los que tienen un peso específico más grande que $2,9 \text{ g/cm}^3$, por ejemplo circón, pirita, piroxeno, granate.

En la tabla 3 se enuncian algunos minerales con sus respectivas densidades.

Tabla 3 Densidades Promedio de los Minerales.

Densidad g/cm^3	Mineral
2,65	Cuarzo
2,5	Feldespato
2,6-2,8	Plagioclasa
4,47	Baritina
4,9	Magnetita
5,0-5,2	Pirita
19,3	Oro

2.1.3. BRILLO

El brillo es debido por la capacidad del mineral de reflejar la luz incidente.

Algunos de ellos se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. El Brillo en los Minerales

Brillo		Ejemplos / Descripción
Metálico		pirita, magnetita, hematita, grafito
Semimetálico		uraninita (pechblenda, UO_2), goethita
No Metálico	Vítreo	cuarzo, olivino, nefelina, en las caras cristalinas, siderita
	Resinoso	Resina, p.ej. esfalerita.
	Graso	Grasoso al tacto: cuarzo, nefelina de brillo gris graso.
	Oleoso	Olivino.
	Perlado	como el brillo de las perlas, p.ej. talco, biotita, siderita

	Sedoso	como el brillo de seda: yeso de estructura fibrosa, sericita, goethita
	Mate	como el brillo de la tiza
	Adamantino	brillante: diamante, rutilo

2.1.4. COLOR

Respecto al color se distinguen dos grupos de minerales:

- Los minerales **idiocromáticos**
- Los minerales **alocromáticos**.

Se llama idiocromáticos a los minerales que tienen colores característicos relacionados con su composición, en este caso el color es útil como medio de identificación.

Tabla 5. Minerales Idiocromáticos con Colores Distintos

Mineral	Color
Magnetita	negro
Hematita	rojo
Epidota	verde
Clorita	verde
Lapis lazuli	azul oscuro
Turquesa	azul característico
Malaquita	verde brillante

Los minerales que presentan un rango de colores dependiendo de la presencia de impurezas o de inclusiones se llaman alocromáticos.

A los minerales alocromáticos pertenece por ejemplo el feldespatos potásico cuyo color varía de incoloro a blanco pasando por color carne hasta rojo intenso o incluso verde.

Cuarzo: Cuarzo puro es incoloro.

Amatista es de color púrpura característico que probablemente es debido a impurezas de Fe^{3+} y Ti^{3+} y la irradiación radioactiva.

Corindón: Corindón puro es incoloro, pero portando cromo como elemento traza es de color rojo y se lo llama rubí. El zafiro es una variedad transparente de corindón de varios colores.

Por la existencia de minerales alocromáticos el color es un medio problemático para identificar un mineral.

2.2. INFORMACIÓN NECESARIA EN LA PREPARACIÓN DE MINERALES.

En la preparación de las muestras de sustancias sólidas en el laboratorio, el proceso de molienda es una de las fases más importantes. Solamente en muy pocos casos, el análisis se puede llevar a cabo sin preparación previa.

Todos los procedimientos de molienda de muestras, producen por regla general una ampliación de superficie (debido a la disminución del tamaño medio de las partículas) y una reducción del rango de dispersión de tamaños; es decir, una menor desviación del tamaño de granulometría frente a un valor medio. Debido a la molienda se consigue, por ejemplo, una mayor homogeneidad de las mezclas, acelerar el desarrollo de las reacciones químicas o mejorar la calidad de los colores de los pigmentos, por mencionar solo algunos ejemplos.

Los requisitos reales de un procedimiento adecuado de molienda son muy diversos y dependen del material de la muestra. Los aparatos que se emplean en el marco de la preparación de las muestras por molienda, de ninguna manera deben falsear los resultados del análisis. Al elegir los aparatos hay que tener en cuenta además, en la reproducibilidad de los resultados al usar material, tamaño de carga y cantidad idénticos; se deben conseguir, en el mismo tiempo, resultados idénticos al usar los mismos equipos de molienda.

Antes de elegir un equipo de molienda para una aplicación determinada, se han de constatar las siguientes preguntas:

- Material.
 - a. propiedades físicas.
 - b. propiedades químicas.

- Dimensiones de la muestra.
 - a. dimensiones máximas de entrada y salida.

- Carga de alimentación.
 - a. suficiente y representativa.

- Numero de muestras por día/semana.

- Tiempo de molienda.

- La abrasión de los elementos de molienda.

- Posibilidades universales de aplicación.

- La limpieza.

Una vez contestadas estas preguntas, se puede proceder a elegir el equipo adecuado. Sin embargo, habría de tenerse en cuenta que el análisis de las muestras solamente es de gran calidad si la muestra a procesar realmente es representativa, cumpliéndose así las condiciones previas para el análisis.

2.3. MINERALOGIA.

La mineralogía es la ciencia que se dedica a la identificación de minerales y el estudio de sus propiedades, origen y clasificación. Las propiedades de los minerales se estudian bajo las correspondientes subdivisiones: mineralogía química, mineralogía física y cristalografía. Las propiedades y clasificación de los

minerales individuales, su localización, sus formas de aparición y sus usos corresponden a la mineralogía descriptiva. La identificación en función de sus propiedades químicas, físicas y cristalográficas recibe el nombre de mineralogía determinativa. Los mineralogistas clasifican los minerales según su composición química, clase cristalina, dureza y aspecto.

La composición química es la propiedad más importante para identificar los minerales y para distinguirlos entre sí. El análisis de los minerales se realiza con arreglo a unos métodos normalizados de análisis químico cuantitativo y cualitativo. Los minerales se clasifican sobre la base de su composición química y la simetría de sus cristales. Sus componentes químicos pueden determinarse también por medio de análisis realizados con haces de electrones. Por otra parte, las propiedades físicas de los minerales constituyen una importante ayuda a la hora de identificarlos y caracterizarlos. La mayor parte de las propiedades físicas pueden reconocerse a simple vista o determinarse por medio de pruebas sencillas. Las propiedades más importantes incluyen el rayado, el color, la fractura, el clivaje, la dureza, el lustre, la densidad relativa y la fluorescencia o fosforescencia.

2.3.1. Minerales Cuarzíticos.

Los minerales cuarzíticos son minerales con gran porcentaje en peso de cuarcita o cuarzo.

La **cuarcita** por ejemplo, es una roca metamórfica formada por la consolidación de areniscas cuarzosas. Es de gran dureza, frecuente en terrenos primarios. También existe cuarcita como roca sedimentaria, que es una arenisca con un altísimo contenido en cuarzo, muy dura y de color claro, casi blanco. El **cuarzo** es un mineral compuesto de sílice (SiO_2). Sin exfoliación, cristaliza en el sistema trigonal (romboédrico) y es incoloro en estado puro, aunque puede adoptar numerosas

tonalidades si lleva impurezas. De gran dureza, es capaz de rayar el acero. Muy apreciado en la fabricación de relojes. A continuación se aprecia un cristal de cuarzo. Fig. 5.

Figura 5 Cristales De Cuarzo.



Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/cristales de cuarzo.](http://es.wikipedia.org/wiki/cristales_de_cuarzo)

2.3.2. Minerales Metamórficos.

Se llama minerales metamórficas a las rocas formadas por la presión y las altas temperaturas. Proceden indistintamente de la transformación de rocas ígneas y de rocas sedimentarias. El proceso para que se conviertan en metamórficas se denomina metamorfismo. Se trata de un proceso lento. A medida que estas rocas son sometidas a altas presiones y temperaturas, de los elementos químicos existentes surgen gradualmente nuevos minerales que cristalizan para formar la nueva roca.

Las rocas metamórficas se clasifican según sus propiedades físicas. Los factores que definen o clasifican las rocas metamórficas son dos: los minerales que las forman y las texturas que presentan dichas rocas.

En la figura # 6 se muestra un tipo de roca metamórfica.

Figura 6 Roca Metamórfica.



Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/ Roca Metamórfica.](http://es.wikipedia.org/wiki/Roca_Metamórfica)

2.4. TAMIZADO Y DIVISION DE MUESTRAS.

Las propiedades físicas y químicas de los sólidos varían en función de su distribución granulométrica. Por esta razón, para poder efectuar controles de calidad en polvos y granulados, es imprescindible conocer la distribución por tamaño de las partículas en los mismos. Sólo si la distribución granulométrica se mantiene igual, puede garantizarse una calidad constante del producto, como lo demuestran los siguientes ejemplos:

- La resistencia del hormigón depende del tamaño de grano del cemento.
- El sabor del chocolate cambia según la finura de grano del cacao.
- En los detergentes en polvo, la finura y la forma de las partículas de la materia prima determinan las propiedades de disolución y el comportamiento de aglomeración de los mismos.

Los tamices analíticos son definidos por 4 parámetros:

- Abertura nominal del tamiz para la tela metálica, también conocida como Tamaño de la malla
- Diámetro
- Altura
- Material en que está construido

La abertura nominal del tamiz está definido por las normas ASTM E-11 e ISO 3310-1.

- Norma ASTM E-11 (American Society for Testing Materials)

Esta es la norma que más se utiliza en Norteamérica. La abertura está definida por un número (del número 635 (20 μm) hasta el número 3-1/2 (5,6 mm)) o en pulgadas (de 1/4 de pulgada (6,3 mm) hasta 5 pulgadas (125 mm)).

Nota: Tyler ya había estandarizado sus tamices antes que la ASTM, y en algunos casos, el número de Tyler podría ser diferente al número de la ASTM.

- Norma ISO 3310-1 (International Standards Organization)

Esta es la norma utilizada en Canadá en el campo de materiales de construcción. La abertura está definida en micrómetros (de 20 μm a 37.500 μm).

Diámetro: Los tamices que cumplen con las normas ASTM E-11 actuales tienen un diámetro de 8", 12" o 3". También están disponibles en diámetros de 6",10"y18". Los tamices que cumplen con las normas ISO 3310-1 vienen en diámetros de 200 mm, 300 mm y ocasionalmente de 400 mm.

Altura: Los tamices analíticos están disponibles en 3 alturas:

- Altura completa (FH, del inglés, Full Height)
- Media altura (HH, del inglés, Half Height)
- Altura intermedia (IH, del inglés, Intermediate Height)
- Material: Los tamices están disponibles en 3 estilos:
- Marco de bronce y tela
- Marco de bronce y tela de acero inoxidable
- Marco de acero inoxidable y tela

Para el tamizado húmedo se debe usar el de marco de acero inoxidable y tela.

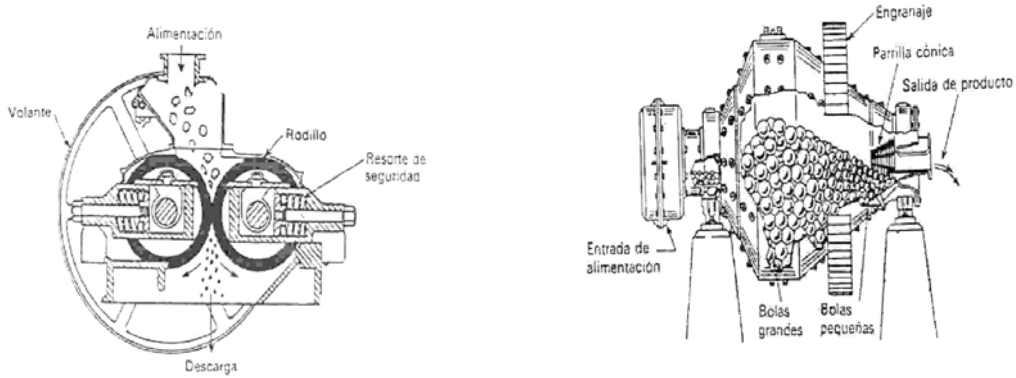
2.4.1. Tipos de molino y tamaño promedio de partícula obtenida.

Los equipos utilizados para la reducción de tamaño se divide en quebrantadoras, molinos, molinos de ultra finos y maquinas de corte. Un listado de algunos tipos de estos molinos y su clasificación por tamaño de partícula obtenido después de la reducción se muestra a continuación:

- Quebrantadoras: Reducen desde 6 ft hasta un máximo de 10 in.
 - Mandíbula
 - Giratoria
- Molinos Intermedios: Reducen desde 3 in hasta un tamaño de malla 20.
 - Molinos de martillos
 - Molinos de frotación
 - Molinos de barras
- Molinos de Ultrafinos: Reducen hasta tamaños de malla 200.
 - Molinos de martillos
 - Molinos de anillos
- Molinos de Corte:
 - Cortadoras de cuchilla, cubos o tiras.

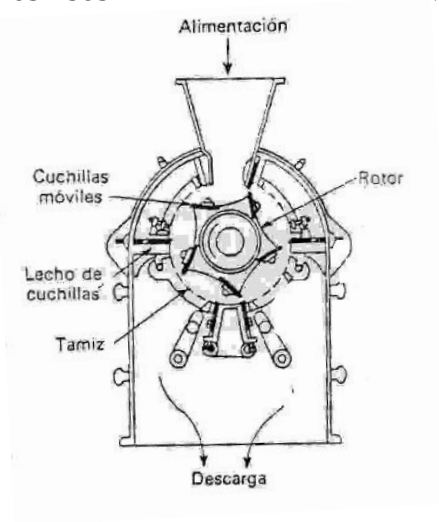
En la siguiente figura se muestran algunos de los molinos que se usan en la disminución de tamaño de los minerales.

Figura 7 Tipos De Molinos.



Molino de Rodillos lisos

Molino de Bolas



Molino de Cuchillas

Fuente: Mineralogía de Dana.

2.4.2. Escala estándar de Tamices Analíticos TYLER.

En la siguiente tabla se especifica la clasificación de las clases de mallas TYLER y sus respectivos diámetros para la separación de partículas.

Tabla 6. Mallas TYLER.

Mesh (malla)	Micrones (μ)	Milímetro (mm)	Pulgadas (inch)
400	33	0.033	0.0012992
325	43	0.043	0.0016929
250	61	0.061	0.0024016
200	74	0.074	0.0029134
170	88	0.088	0.0034646
150	104	0.104	0.0040945
115	121	0.121	0.0047638
100	147	0.147	0.0057874
80	173	0.173	0.0068110
65	208	0.208	0.0081890
48	295	0.295	0.0116142
42	351	0.351	0.0138189
35	417	0.417	0.0164173
32	495	0.495	0.0194882
28	589	0.589	0.0231890
24	701	0.701	0.0275984
20	833	0.833	0.0327953
16	991	0.991	0.0390160
14	1168	1.168	0.0459843
12	1397	1.397	0.0550000
10	1651	1.651	0.0650000
9	1981	1.981	0.0779921
8	2362	2.362	0.0929921
7	2794	2.794	0.1100000
6	3327	3.327	0.1309843
5	3962	3.962	0.1559843
4	4699	4.699	0.1838543
3.5	5613	5.613	0.2209843
3	6680	6.680	0.2629921
2.5	7925	7.925	0.3120079

Fuente: <http://www.test-sieve.com>

CAPITULO 3

3 TIPOS DE MOLINOS DE ANILLOS

Diferentes tipos de molinos de anillos para la reducción de tamaño son usados para producir el tamaño del particulado necesario para su posterior análisis. Ellos difieren en su capacidad, eficiencia de molienda y forma como realizan el trabajo, etc. Este tipo de molinos permiten conseguir particulados de tamaño de 74 μm (200 Mesh), a partir de muestras con tamaño promedio de 12mm de diámetro. Una descripción de algunos de estos equipos en el mercado se presenta a continuación:

3.1. Molino NAEF HNZ-1769C.

Es un molino de anillos de baja carga, tienen la capacidad de pulverizar hasta 250 gr de mineral con una gran eficiencia, trabajan bajo los principios de impacto y fricción y son comúnmente utilizados en pequeños laboratorios de análisis químico.

La variedad mas común de este molino consta de un recipiente, que contiene la muestra y los elementos de molienda, que asegurados por unas abrazaderas, oscilan y chocan entre si por un movimiento oscilatorio que lo genera un motor dotado con un eje descentrado que se acopla al sistema de molienda por medio de un acople flexible que lo protege de las vibraciones.

Figura 8 Molino Blewler Mill.



Fuente: www.blewlermill.com

Una variedad de materiales son utilizados para la fabricación del recipiente y los elementos de molienda, dependiendo del tipo de mineral (Dureza) que se quiera pulverizar, por ejemplo: piedra ágata, acero al cromo, carburo de tungsteno, etc.

3.2. Pulverizador FRITSCH 9.

Este molino es empleado en los laboratorios para moler por vía húmeda o seca, de una manera rápida e intermitente muestras de material duro o quebradizo, provenientes de minas como carbón, minerales o de empresas metalúrgicas como escoria, muestras de fundición, de la industria cerámica, cementeras, agricultura y fabricas de materiales para la construcción. El tamaño promedio inicial de la muestra de alimentación oscila entre unos 7 y 12mm.

Existen varios modelos los cuales difieren en la capacidad de alimentación y cada uno de ellos se puede fabricar en distintos materiales, por ejemplo acero endurecido.

Figura 9 Molino FRITSCH 9.



Fuente: www.fritsch.com

EL molino FRITSCH 9 actúa bajo la acción de una fuerza centrífuga generada por unas excéntricas acopladas al eje del motor, impartiendo una gran energía a los anillos dentro del contenedor que hacen que se fracture el mineral debido a los

choques simultáneos con estos. EL molino esta provisto de un temporizador y un variador de velocidad, que según el mineral a moler y la finura final de las partículas se pueden graduar para obtener así un mayor rendimiento en la operación de pulverizado.

3.3. MOLINO DE ANILLOS ROCKLABS.

Este molino es muy parecido al FRITSCH 9, con las diferencias que tiene un sistema neumático de fijación del conjunto de molienda; además, el conjunto de molienda también es fabricado en Zirconio con un manejo de mayores capacidades.

Figura 10 Molino Rocklabs.



Fuente: www.rocklabs.com

Tiene un sistema de acople por junta universal, que le permite al conjunto de molienda moverse en todas las direcciones sin transmitir vibración al eje del motor por tener una conexión extra por banda entre el motor y el cardan. Usado para pulverizar cemento, vidrio, calizas, ladrillos, madera, material de planta, etc. para el análisis subsecuente ya sea por métodos instrumentales o por la química de vía húmeda.

3.4. NUEVOS DISEÑOS

Muchos nuevos diseños se han desarrollado en años recientes para propósitos especiales. Esto incluye molinos de trabajo continuo que constan con un sistema de alimentación dinámica y un sistema de cribado acoplado a la descarga que categoriza el mineral saliente de acuerdo a su diámetro. Esto con el fin de llevar a cabo un análisis más exhaustivo o cuando se requieren grandes cantidades de la muestra para la producción de algún producto en particular.

CAPITULO 4

4. VARIABLES DEL PROCESO DE PULVERIZACION

La pulverización es un proceso complejo que involucra la optimización de un conjunto de variables para lograr la máxima eficiencia. Algunos de los parámetros más importantes que determinan el tamaño final del particulado son:

- Tipo de Molino
- Conjunto de Molienda
- Velocidad de Molienda
- Tiempo de Molienda
- Capacidad
- Tamaño de Alimentación y Descarga
- Atmósfera

Todas las variables no son totalmente independientes. Por ejemplo, el tiempo óptimo de molienda depende del tipo de molino, del tamaño de las partículas a la salida del molino, la velocidad de molienda, etc.

A continuación se exponen los efectos de las variables en el proceso de pulverización:

4.1. TIPO DE MOLINO.

Como ya se mencionó, existen diferentes tipos de molinos para lograr la reducción de tamaño de una muestra de mineral. Estos molinos difieren en su capacidad, velocidad de operación y el principio bajo el cual realizan el proceso. Dependiendo del material a moler, la constitución final del mineral y los factores antes mencionados un tipo especial de molino puede ser escogido con facilidad.

Los molinos de anillos cuentan con las características necesarias para lograr llevar a cabo el tipo de trabajo que se requiere en el proyecto.

4.2. CONJUNTO DE MOLIENDA.

El material utilizado para la construcción del conjunto de molienda (contenedor, anillos) es muy importante y debe escogerse con mucho cuidado, ya que todo esto va ligado principalmente con la dureza y abrasividad del mineral y al impacto continuo de los elementos entre sí. Si el material es muy débil, partes de material provenientes de las paredes podrían desprenderse contaminando la muestra, además de disminuir la eficiencia de la molienda. Por tal motivo, es recomendable conocer muy bien el tipo de mineral que va a ser tratado para hacer una selección adecuada del material de los elementos de molienda como del contenedor.

Los materiales más usados para este tipo de molinos son: La piedra ágata, el acero endurecido, el acero al carbono y el carburo de tungsteno cuando se va a trabajar con minerales muy duros.

4.3. VELOCIDAD DE MOLIENDA.

Es de esperarse que elevadas velocidades de rotación aporten mayor energía a los elementos de molienda durante el proceso de pulverización, logrando realizar el trabajo más eficientemente; sin embargo, dependiendo del diseño del molino existen limitaciones sobre las máximas velocidades a emplear, por ejemplo, en un molino de bolas, un incremento en la velocidad de rotación incrementaría también la velocidad a la cual se mueven las bolas. Sobre la velocidad crítica de rotación, las bolas se fijan en las paredes internas del recipiente y no caerán ejerciendo la fuerza de impacto, entorpeciendo en gran medida la operación de molienda. Por tal motivo, el molino se debe ajustar a una velocidad en la cual los elementos de molienda caigan con la mayor energía posible sobre el mineral aumentando así la fuerza de impacto.

4.4. TIEMPO DE MOLIENDA.

El tiempo de molienda es uno de los factores más importantes dentro de un proceso de pulverización. Los tiempos requeridos varían según el tipo de molino utilizado, la intensidad de molienda, las relaciones de volumen entre el mineral y los elementos de molienda. En los molinos de anillos, la alta transferencia de energía por parte de los anillos al mineral es tal que, normalmente se requieren tiempos no mayores a 15 minutos para lograr obtener el particulado deseado. Un tiempo mayor sería simplemente una pérdida de energía.

4.5. CAPACIDAD.

En cuanto a la capacidad de molienda de un molino, debe tenerse en cuenta que este presenta la mayor eficiencia cuando se llena al volumen para el cual fue diseñado, sin embargo, si este es llenado a una tasa mayor los resultados obtenidos no serán los esperados, debido a que cuando se agrega más mineral dentro del contenedor, el espacio en el cual los elementos de molienda ganan energía será cada vez menor disminuyendo la energía de impacto y no pulverizará totalmente el mineral contenido; por otra parte, si se llena a una tasa menor, el choque continuo entre los elementos de molienda y el contenedor serán muy fuertes, ocasionando deformaciones plásticas entre ellos o tal vez descascaramiento de las caras de trabajo.

Los molinos de anillos se diseñan teniendo en cuenta una relación entre el volumen libre y el volumen del mineral a pulverizar; en este caso la relación es de un 15 a un 20%.

4.6. TAMAÑO DE ALIMENTACIÓN Y DESCARGA.

A la hora de seleccionar un molino debemos tener en cuenta los tamaños de alimentación y descarga a los cuales debe este trabajar, porque no todos los

molinos admiten un mismo tamaño de partícula y más aun no son capaces debido a su diseño de generar el particulado que se desea.

Las quebrantadoras rompen piedras grandes traídas directamente de la cantera en trozos pequeños aproximadamente de 6 a 10 pulgadas, estos pasan a una quebrantadora secundaria y las reduce hasta $\frac{1}{4}$ de pulgada, los molinos reciben el producto de estas y generan un polvo, los molinos intermedios entregan un particulado que atraviesa un tamiz de 40 mallas, mientras que de uno fino el producto atraviesa un tamiz de 200 mallas. Los molinos ultrafinos son los únicos que generan un particulado tan fino que puedan atravesar un tamiz estándar de 325 mallas; cuya anchura de las aberturas es de 44 μm .

4.7. ATMÓSFERA.

En ciertos procesos de molienda se hace uso de agregados que facilitan la separación de las partículas (agua, ácido, etc). En el caso propio la atmósfera no tiene características especiales y se realizará de manera seca.

CAPITULO 5

5. RESORTES

Los resortes son elementos elásticos que admiten deformaciones apreciables, característica que se aprovecha para:

1. Almacenar energía
2. Aislar vibraciones
3. Absorber impactos
4. Aplicar una fuerza o un torque estable
5. Medir fuerzas

Por su estructura los resortes se dividen en los siguientes grupos:

1. Espirales
2. Disco
3. Anulares
4. De hoja

Tienen el uso más amplio los resortes espirales que se enrollan de alambre cuya sección en la mayoría de los casos es redonda. Según su destinación los resortes espirales se denominan de tracción, de compresión y de torsión.

En nuestro caso particular se han diseñado unos resortes de espirales para trabajar a compresión básicamente.

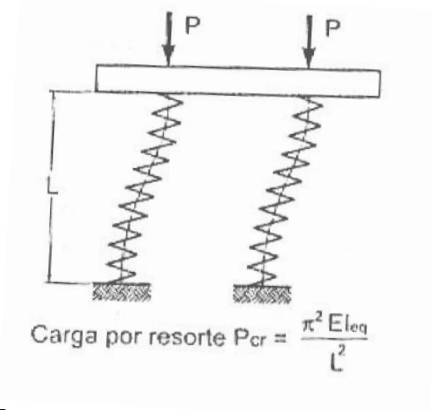
5.1. ESTABILIDAD DE LOS RESORTES

Cuando la longitud del resorte es grande surge el peligro de que este pierda su estabilidad longitudinal, es decir, sufra de pandeo lateral. Para los resortes con carga axial con elementos centradores bien orientados que aseguren el paralelismo

de los topes de los resortes durante la carrera de trabajo, la relación límite entre la altura L del resorte en estado libre y el diámetro D de este, con el cual el resorte todavía conserva su estabilidad es 5.

En la figura 15 se muestra el arreglo geométrico para calcular la estabilidad de los resortes cuando soportan cargas de compresión y su eje longitudinal no coincide con el eje de aplicación de la carga.

Figura 11 Estabilidad De Los Resortes.



Fuente: Diseño de Maquinas Norton.

5.2. VIBRACIONES DE RESONANCIA.

Los resortes que trabajan bajo cargas cíclicas están sujetos a vibraciones de resonancia que provocan el aumento de la tensión de las espiras y alteran las características elásticas del sistema. Las vibraciones de resonancia son la causa más frecuente las roturas de resortes sometidos a sollicitación cíclica de alta frecuencia.

Los resortes de esta índole es preciso calcularlos teniendo en cuenta la posible resonancia, para atribuirles tales parámetros (D , d , L , i), que excluyan la aparición de vibraciones de resonancia en los regímenes de funcionamiento. A continuación se presenta una teoría que nos permite entender más sobre estos fenómenos de esta manera generar conclusiones útiles para el posterior diseño de estos elementos.

Formas de Control de Vibración: El control o aislamiento de vibración tiene por objeto reducir o eliminar las vibraciones causadas por las fuerzas de excitación que actúan sobre los sistemas en movimiento. Para ello, existen tres modalidades de control de vibración:

- Control activo: Evita la propagación de las vibraciones inducidas en el sistema al medio.
- Control pasivo: Evita la propagación de las vibraciones inducidas en el medio al sistema.
- Control de choque: Evita que energías de impactos pasen al sistema induciendo fuerzas o aceleraciones bruscas. Absorbe la energía y luego la disipa en vibraciones libres.

Figura 12 Controles De Vibración.



Fuente: El Autor.

Entre las técnicas de control de vibración están:

- Sintonización de frecuencias,
- Introducción de amortiguación,
- Empleo de aisladores, y
- Adición de un neutralizador de masa auxiliar.

Al ser la fuente generadora de velocidad constante y la causa de la oscilación una excéntrica acoplada a este, las fuerzas de inercia rotativas son constantes y vienen dadas por la expresión:

$$Fr = m_r * e * \omega^2$$

Donde, m_r , es la masa en rotación.
 e , radio de giro o excentricidad de m_r ,
 ω , frecuencia angular en rad/seg.

El tipo de control que más adecuado para analizar el comportamiento del molino y desarrollar su diseño es el control activo. Existen tres maneras de aplicar control activo de vibraciones en sistemas utilizando la sintonización de sus frecuencias. La sintonización alta, en la cual los elementos elásticos la vibración son duros y la maquina queda prácticamente anclada, sin elementos deformables. La sintonización en resonancia, es aquella donde la amplitud de la vibración y la fuerza transmitida se amplifican y la sintonización baja que es aquella donde se logra una reducción de las fuerzas dinámicas transmitidas.

Para un tipo de excitación constante, la sintonización alta es desfavorable porque las fuerzas transmitidas son considerables. Lo mejor es operar el equipo en sintonización baja ya que las fuerzas dinámicas que se transmiten se reducen cuando $\omega/\omega_n > \sqrt{2}$. Para esto deben utilizarse materiales sin amortiguación como son los resortes de acero.

Los materiales usados en la practica para aislamiento tienen factores de amortiguación relativamente bajos (0.01 - 0.1). En la operación práctica de cualquier equipo se debe acelerar o decelerar rápidamente con el fin de minimizar el tiempo en que las amplitudes se incrementan.

Las principales ventajas del uso del sistema de control activo son:

Movilidad, adaptabilidad y la posibilidad de incluirse en la estructura después de la etapa de diseño y construcción. Esto permite que el sistema amortiguador sea montado en forma independiente sin afectar el montaje en la estructura y la cimentación del soporte.

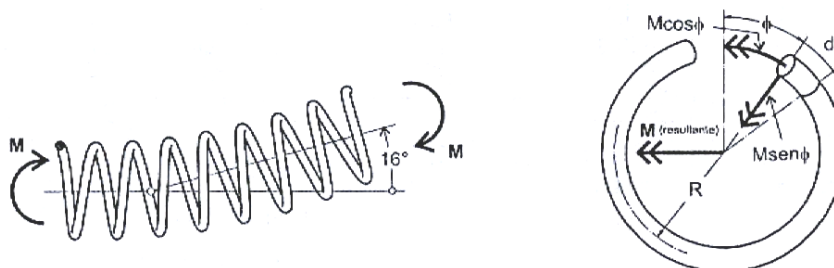
- Estabilidad.
- Bajo costo.
- Mínimo consumo de energía.
- Facilidad de implementación.

5.3. FLEXIÓN Y PANDEO EN RESORTES HELICOIDALES.

Los resortes helicoidales raras veces intencionalmente se les sujeta a flexión, pero el problema de pandeo puede examinarse considerando la resistencia a la flexión.

La figura 13 muestra el diagrama de momentos que soporta un resorte de compresión al ser sometido a flexión.

Figura 13 Pandeo Y Flexión De Resortes Helicoidales.



Fuente: Diseño de Maquinas Norton.

El diseño de un resorte esta regido por las siguientes ecuaciones, que mas adelante utilizaremos al tener el total de cargas que estos elementos soportan.

Ciclos de trabajo (n)
$$n = rpm * \frac{60 \text{ min}}{hr} * \frac{2880hr}{año} * años$$
 Ecuación 9

Fuerza Media (Fm)	$Fm = \frac{F \max + F \min}{2}$	Ecuación 10
Fuerza Alternativa (Fa)	$Fa = \frac{F \max - F \min}{2}$	Ecuación 11
Diámetro del Alambre (Φ)		
Índice del Resorte (C)		
Diámetro Medio (D)	$D = C * \varphi$	Ecuación 12
Factor Cortante Directo (Ks)	$Ks = 1 + \frac{0.5}{C}$	Ecuación 13
Esfuerzo Cortante (ζ_i)	$\tau_i = Ks * \frac{8 * F \max * D}{\pi * \varphi^3}$	Ecuación 14
Factor de Wahl (Kw)	$Kw = \frac{4 * C}{4 * C} \frac{1}{4} + \frac{0.615}{C}$	Ecuación 15
Esfuerzo Cortante Alternativo	$\tau_a = Ks * \frac{8 * Fa * D}{\pi * \varphi^3}$	Ecuación 16
Resistencia Máxima Tensión	$S_{UT} = A * \varphi^b$	Ecuación 17
Resistencia Máxima Cortante	$S_{US} = 0.67 * S_{UT}$	Ecuación 18
Limite Elástico Torsión	$S_{YS} = 0.6 * S_{UT}$	Ecuación 19
Limite Resistencia Fatiga	$S_{EW} = 45000 \text{ psi}$	Ecuación 20
Limite Resistencia Fatiga Alt.	$S_{ES} = 0.707 * \frac{S_{ES} * S_{US}}{S_{US} * 0.707 * S_{ES}}$	Ecuación 21
Factor de Seguridad	$N = \frac{S_{ES} * (S_{US} - \tau_i)}{S_{ES} * (\tau_m - \tau_i) + (S_{US} - \tau_a)}$	Ecuación 22
Constante Resorte	$K = \frac{\Delta w}{y}$	Ecuación 23

# Espiras	$Na = \frac{\varphi^4 * G}{8 * D^3 * K}$	Ecuación 24
# Total Espiras	$Nt = Na + 2$	Ecuación 25
Altura de Cierre	$Ls = \varphi * Nt$	Ecuación 26
Deflexión Inicial	$y = \frac{\Delta w}{K}$	Ecuación 27
Holgura de Golpeo	$y_G = 20\%$	Ecuación 28
Longitud Libre	$Lf = Ls + y_G + y_W + y$	Ecuación 29
Deflexión Altura de cierre	$y_C = Lf - Ls$	Ecuación 30
Verificación de Pandeo	$1) \frac{Lf}{D}$ $2) y \frac{y_{MAX}}{Lf} = \frac{y_I - y_W}{Lf}$	Ecuación 31
Peso Espiras Activas	$W_A = \frac{\pi^2 * \varphi^2 * D * Na * \gamma}{4}$	Ecuación 32
Frecuencia Natural	$f_n = \frac{1}{2} * \sqrt{\frac{K * g}{W_A}}$	Ecuación 33
Razón de Frecuencias	$Rf = \frac{f_n}{f_w}$	Ecuación 34

CAPITULO 6

6. ACEROS INOXIDABLES Y SUS TRATAMIENTOS TERMICOS

Los aceros inoxidables no son absolutamente inoxidables, pero presentan un comportamiento químico superior a cualquier otra aleación férrea a los ataques de ambientes corrosivos. Este tipo de aceros son aleaciones de hierro, cromo, níquel y otros elementos que junto a su proceso de fabricación se les proporcionan sus características especiales.

El mecanismo que explica la resistencia a la corrosión es llamado "Estado Pasivado", el cual depende del límite crítico de 12 % Cr, a partir del cual aparece la pasividad, el efecto del carbono, a estabilización y la acción del molibdeno. La formación de una capa fina de óxido de cromo en la superficie, concede a este material su elevada resistencia a la corrosión. A pesar de ser invisible y estable esta película es altamente adherente al acero inoxidable defendiéndolo de la acción de los medios más agresivos y tornándole inerte y de gran durabilidad. Además son 100% reciclables. Los aceros inoxidables según su estructura cristalina se clasifican según norma AISI en:

6.1. CLASIFICACION

6.1.1. Ferríticos

Los aceros inoxidables ferríticos tienen un contenido de Cromo de 16% a 30%, mientras que el contenido de Carbono es por lo general muy bajo, menor al 0,1%. Puede llegar al 0,35% para contenidos de Cromo del 30%. Mejor resistencia química que los aceros inoxidables martensíticos. No se pueden templear y sus propiedades mecánicas no son las mejores.

6.1.2. Austeníticos

Los aceros inoxidable austeníticos al Cromo-Níquel tienen un contenido de Carbono entre 0,03% a 0,25%; mientras que el contenido de Cromo se encuentra entre 17% a 26% y el del Níquel entre 7% a 22%. Características mecánicas muy buenas. Elevada resiliencia a temperaturas muy bajas (-200°C). Apto para uso en procesos criogénicos. Estos aceros tampoco pueden endurecerse por temple.

6.1.3. Martensíticos

Los aceros inoxidable martensíticos tienen un contenido de Cromo entre 12% a 17% y entre 0,1% a 0,5% para el Carbono. Poseen buena resistencia a la corrosión frente a ciertos ácidos débiles. Las propiedades mecánicas son modificables por medio del tratamiento térmico. Su inoxidable aparece únicamente después del temple y entonces presentan al mismo tiempo buenas propiedades mecánicas.

6.2. TRATAMIENTO TÉRMICO DE LOS ACEROS INOXIDABLES

El tratamiento térmico de los aceros inoxidable puede tener varios propósitos, como producir cambios en su condición física, propiedades mecánicas, y el alivio de tensiones residuales; por otro lado sirve para restaurar la máxima resistencia a la corrosión cuando esta es afectada por el proceso de fabricación. Muchas veces se obtienen óptimas combinaciones de resistencia a la corrosión y propiedades mecánicas, como en otras las consecuencias son mas graves; por lo que, el tratamiento térmico de estos aceros son de mucho cuidado.

Los procedimientos a seguir son los mismos, sin embargo, el control de la atmósfera es importante, ya sea, por la descarburación de los aceros martensíticos o por la carburación que se puede presentar en los aceros austeníticos que son muy perjudiciales.

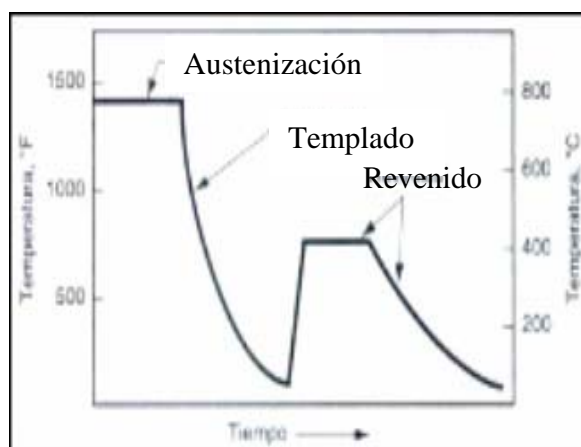
Los aceros martensíticos son importantes como materiales industriales por su habilidad de ser tratados térmicamente para lograr diferentes niveles de dureza y resistencia mecánica. Otra característica atractiva es su contenido relativamente bajo de elementos aleantes, haciéndolo el menos costoso de los aceros inoxidable. Algunos de los tratamientos térmicos a los que se puede someter el acero AISI 410 son:

- Forjado: 1150 - 750 °C
- Recocido: 850 °C, R = 55 Kg./mm²
- Templado: 975 - 1000 °C enfriar en aceite/aire
- Revenido: 600 °C, R = 85 Kg./mm² 750 °C, R = 65 Kg./mm²

Si se usan atmósferas protectoras, es fundamental una limpieza previa y debido a su baja conductividad térmica debe hacerse un precalentamiento. Para evitar la precipitación de carburos, debe ser templado en aceite siempre que sea posible. Algunos usos de este tipo de aceros son: instrumentos de cirugía, partes de bombas, válvulas, hélices marinas y bolas de rodamientos.

La siguiente es una grafica que muestra el proceso de precalentamiento, temple y revenido del acero a tratar térmicamente en función del tiempo, para obtener las propiedades mecánicas y químicas requeridas.

Figura 14 Curva De Templado Y Recocido.



Fuente: Tratamientos Térmicos, Asdrúbal Valencia.

6.3. TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL

Hay piezas que conviene endurecerlas sólo en la superficie, para que resistan el roce, pero su interior debe ser más blando para resistir impactos. Para lograr esto existen varios procedimientos de uso habitual:

- Cementación
- Carbonitruración
- Nitruración
- Nitruración iónica
- Temple por inducción

Los cuatro primeros cambian la composición química de la superficie de la pieza: la cementación mediante la adición de C, la nitruración y la nitruración iónica con la adición de N y la carbonitruración por la adición de C y de N. En cambio, la última no cambia la composición química del acero y es esencialmente un método de endurecimiento poco profundo.

6.3.1. TEMPLE POR INDUCCIÓN

Es un proceso de endurecimiento de acero en el cual las superficies de las piezas se calientan rápidamente a temperatura de austenización mediante inducción electromagnética, (con un diseño adecuado del inductor, se puede confinar el calor a áreas pequeñas). Una vez alcanzada la temperatura de austenización se aplica una ducha de agua fría que produce el temple.

El principio del calentamiento por inducción es el siguiente: una bobina que conduce una corriente de alta frecuencia rodea o se coloca sobre la pieza, se inducen así corrientes alternativas y loops de histéresis que generan rápidamente calor en la superficie.

Las corrientes inducidas de alta frecuencia tienden a viajar por la superficie del metal, por tanto, es posible calentar una capa poco profunda del acero sin necesidad de calentar el interior del material. La profundidad del calentamiento depende de la **frecuencia de la corriente**, la **densidad de potencia** y el **tiempo de aplicación** de ésta. Mientras mayor es la frecuencia, menor es la profundidad calentada, de forma que: altas potencias (100 kHz a 1 Mhz), y tiempos cortos (en segundos), calientan espesores de 0,25 mm; en cambio, potencias menores (25 kHz), y tiempos más largos calientan espesores de 10 mm.

Se utiliza en aceros al carbono, con contenido medio de C, en éstos produce superficies endurecidas delgadas. También se puede utilizar en aceros aleados; los aceros de baja aleación se endurecen fácil y superficialmente mediante este método; en cambio, los aceros altamente aleados son más lentos y pueden necesitar de un aumento de temperatura para lograr la estructura deseada, sin embargo, como el calentamiento mediante este método es muy rápido, se pueden calentar sin peligro de crecimiento excesivo de grano.

Las piezas de aceros endurecidas mediante este procedimiento sufren menor distorsión total que si se las hubiese templado luego de calentarlas en un horno. La microestructura del acero antes del templado por inducción es importante para determinar el ciclo de calentamiento que se utilizará, así por ejemplo, las estructuras que después del templado y revenido tienen carburos pequeños y uniformemente dispersos se austenizan más fácilmente, pudiéndose obtener superficies endurecidas de poca profundidad y de máxima dureza superficial mediante grandes velocidades de calentamiento.

Entre las ventajas de este proceso podemos destacar el hecho que no necesita de personal especializado para su operación debido a que es un proceso prácticamente automático. Entre las desventajas resaltan el alto costo del equipo, el

alto costo de mantenimiento y el hecho que no es económico si se desean endurecer pocas piezas.

En general, para evitar al máximo las fallas por fatiga superficial en los elementos de molienda, se debe aumentar su dureza en la superficie, ya que al incrementar esta propiedad mecánica se mejora su resistencia superficial.

Un concepto importante en el diseño moderno de muchas piezas de maquinas es la de utilizar materiales diferentes para el interior y la superficie de la pieza. Si el material más adecuado para el cuerpo no cumple con los requisitos para la superficie, con frecuencia podemos aplicar un segundo material a este, Ya sea tratamiento térmico, galvanoplastia o inmersión en caliente. Para durezas extremas se pueden aplicar revestimientos de carburos de tungsteno u otros elementos de gran dureza.

CAPITULO 7

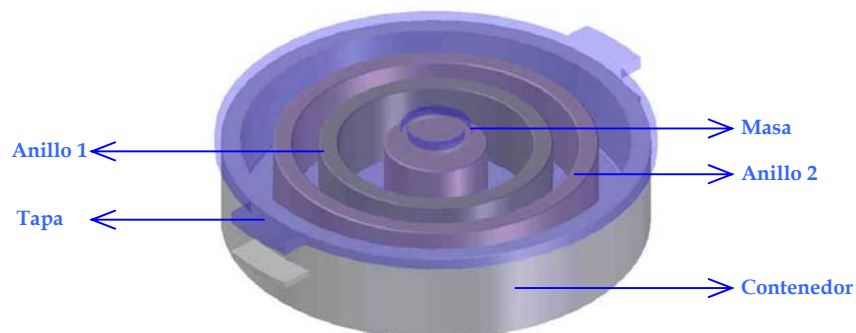
7. DISEÑO DE UN MOLINO DE ANILLOS PARA LA PULVERIZACION DE MINERALES

Las necesidades actuales de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica en cuanto al mejoramiento de los resultados obtenidos a partir de los análisis químicos realizados a las muestras de minerales, proyectan el diseño del molino de anillos hacia ciertas características especiales con las cuales se piensa lograr los objetivos deseados. Los requerimientos solicitados por la escuela son:

- Mineral de Trabajo (menas cuarcíticas)
- Capacidad de molienda 1 Kg.
- Particulado Final Mesh 200 ($74\mu\text{c}$)
- Alta Eficiencia
- Contaminación Reducida
- Fácil Limpieza

Los elementos esenciales de estos molinos son los anillos, que dentro de un recipiente contenedor pulverizan las muestras de minerales. En la figura 11 se muestra la configuración de los elementos que conforman el set de molienda.

Figura 15 Elementos Del Set De Molienda.



Fuente:El Autor.

Con base en las características mencionadas y después de un proceso de diseño y optimización utilizando herramientas de diseño asistidas por computador, se presenta a continuación su disposición final.

El molino de anillos se ha diseñado completo con su gabinete de metal, con isonorización, arrancador temporizador y corte de energía de seguridad. Cuenta con una abrazadera mecánica que asegura la estabilidad de los elementos de molienda durante la operación.

El molino de anillos esta diseñado para ser empleado como una herramienta de laboratorio en los procesos de pulverización de minerales; teniendo en cuenta que se encuentra dotado de una gama de accesorios que permiten realizar una molienda segura. Conformado por una estructura que sirve de apoyo al sistema motriz y al sistema de pulverización en si.

Para llegar al diseño definitivo del molino se realizó un estudio sobre modelos iniciales, teniendo en cuenta la forma, la fuente excitadora y los elementos de molienda en si para generar la pulverización del mineral.

El primer modelo cuenta con un sistema de transmisión de potencia por medio de un acople flexible que transmite el torque del motor a un eje secundario con cierta excentricidad, para que al rotar genere la oscilación y la posterior interacción de los anillos, evitando la transmisión de la vibración al eje del motor.

El segundo modelo tiene un sistema de acople por junta universal, que le permite al conjunto de molienda moverse en todas las direcciones sin transmitir vibración al eje del motor por tener una conexión extra por banda entre el motor y el cardan.

Estos modelos dejaron de considerarse debido a que poseían sistemas que aumentaban la complejidad de instalación de los componentes del molino tales

como las poleas, chumaceras y representaban un aumento sustancial en el presupuesto del molino.

Al final se adaptó un modelo diferente para diseñar el molino de anillos, el cual cuenta con un sistema de acople directo entre el elemento motriz, la fuerza de excitación y el set de molienda.

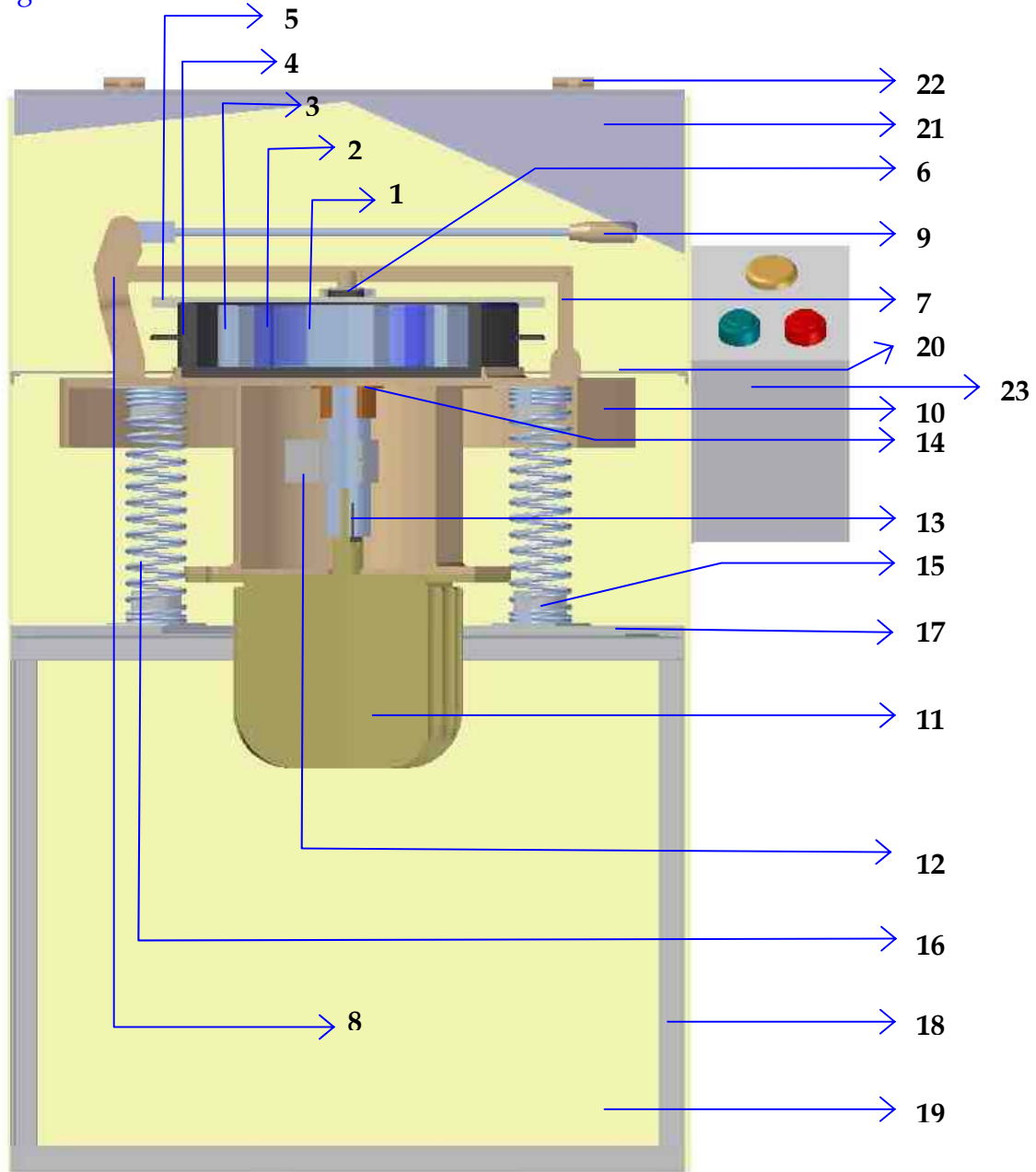
El molino de anillos opera bajo el principio de vibración, la rotación de la masa excéntrica acoplada al eje del motor eléctrico, hacen que el set de molienda sujetado a un sistema de resortes precargados vibre horizontalmente como resultado de la fuerza centrífuga generada. El movimiento oscilatorio acelerado de los elementos de molienda (masa y anillos) que constituyen el set de molienda hace que estos se desplacen dentro del contenedor y la muestra es pulverizada por efectos de impacto y fricción.

En la figura 16 se aprecia una vista frontal del molino de anillos en corte con todos sus componentes, este es el modelo final desarrollado.

Al colocar la masa y los anillos dentro del contenedor y llenando el espacio con mineral se coloca la tapa. El conjunto entero se debe montar sobre el cuerpo vibratorio y asegurarse con las clavijas de seguridad. Al comenzar la agitación, la muestra es aplastada constantemente y la producción de polvo del mineral se hace efectiva.

Se necesita asegurar en una balanza que no se agregue más de un kilogramo de muestra porque esto producirá un pulverizado ineficaz. Nunca se debe colocar menos de 200 gr en el contenedor, para evitar que el choque continuo y directo entre las paredes de los anillos ocasionen daños en estos disminuyendo la eficiencia de la molienda.

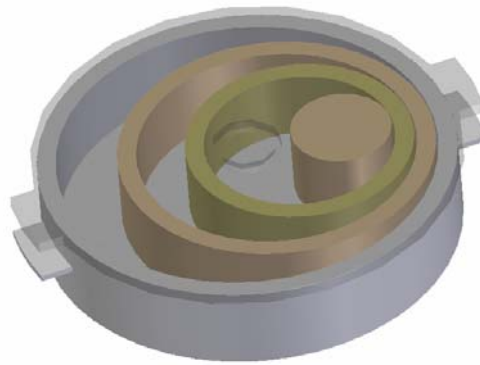
Figura 16 Vista Frontal En Corte Del Molino De Anillos.



Elemento	#	Elemento	#
Masa	1	Excéntrica	12
Anillo 1	2	Adaptación al Motor	13
Anillo 2	3	Buje	14
Contenedor	4	Guía de los Resortes	15
Tapa	5	Resortes	16
Discos de Poliuretano	6	Base	17
Palanca en L	7	Estructura	18
Brazo de Articulación	8	Cubierta	19
Palanca de Cierre	9	Separador	20
Campana del set	10	Tapa Superior	21
Motor Eléctrico	11	Bisagras	22
Caja de Control	23		

La muestra debe ser distribuida uniformemente en los espacios libres entre la masa, anillos y el contenedor. La forma como deben situarse los anillos dentro del contenedor es tal que se toquen tangencialmente sobre una línea común desde el contenedor hasta la masa como se muestra en la figura 10.

Figura 17 Forma De Colocar Los Anillos Para Agregar El Mineral.



Fuente: El Autor.

7.1. PARTES DEL MONILO DE ANILLOS.

El molino de anillos se ha distribuido en subconjuntos para su diseño y selección de partes ya constituidas. Esta es su configuración:

- Set de Molienda
- Cierre de Seguridad
- Campana del Set de Molienda
- Sistema Generatriz
- Resortes
- Estructura
- Cubierta
- Caja de control

A cada uno de estos elementos se les aplicó el proceso completo de diseño y su verificación como conjunto; permitiendo alcanzar un mayor grado de detalle en su ensamble posterior y verificación como unidad de procesamiento.

Todos los procedimientos y resultados obtenidos se muestran en tablas individuales.

7.2. DISEÑO DEL SET DE PULVERIZACION.

El sistema de pulverización, es el encargado de pulverizar el mineral en bruto acondicionado previamente en un rango de tamaños de 7 a 12 mm y que luego de ser introducidos juntos en el contenedor, mediante la agitación de sus elementos de molienda, se reducen a partículas de un tamaño de micras.

Los elementos que componen el sistema son:

- Masa
- Anillos 1, 2
- Recipiente de molienda (Tapa y Contenedor)

El primer a evaluar para comenzar el diseño de estos elementos es la capacidad de carga requerida. Tomando como base los datos obtenidos en la literatura y las recomendaciones del personal de laboratorios de minerales de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, se procedió a realizar una estimación de la geometría del set de molienda; para ello se tuvieron en cuenta los siguientes factores:

- Material a Pulverizar: Menas Cuarzíticas de densidad promedio de 2,5 gr/cm³.
- Capacidad de Molienda: 1000 gr.

Calculando el volumen que ocupará la muestra de mineral en el recipiente contenedor, procederemos a calcular su volumen libre que este debe tener, aún con los anillos y la masa dentro de el.

$$V_m = \frac{M_m}{\rho_m} = \frac{1000 \text{ gr}}{2,5 \text{ gr/cm}^3} = 400 \text{ cm}^3$$

Donde: V_m , Volumen del mineral,

M_m , Masa de mineral,

ρ_m , Densidad promedio del mineral.

El mineral ocupa aproximadamente 400 cm³, y según los datos previamente obtenidos, la relación óptima entre el volumen del mineral y el volumen libre del contenedor para que exista una pulverización eficiente debe estar entre un [10% - 15%].

Después de un proceso iterativo para calcular la mejor disposición y las dimensiones óptimas de cada uno de los elementos del set de molienda se presenta un esquema final de su configuración. Sus dimensiones y detalles para su posterior fabricación, se presentan en los planos anexos al proyecto.

7.2.1. SELECCIÓN DE MATERIAL.

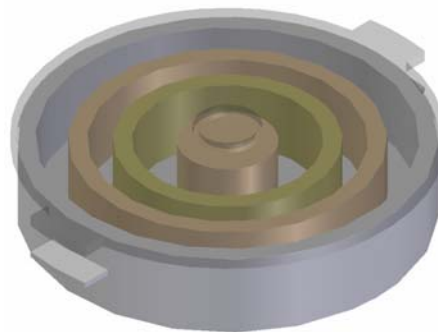
La escogencia del material de estos elementos se evaluó bajo la necesidad del proyecto de minimizar la contaminación de las muestras y su alta resistencia al desgaste cuando son sometidos a cargas de impacto y fricción. El material de diseño para el recipiente de molienda es el mismo acero de la masa y los anillos, con una configuración geométrica diferente, pero con endurecimiento solo de sus paredes internas.

Para esta aplicación los elementos de molienda masa y anillos, se diseñaron en acero inoxidable SAE - AISI 410, ya que proporciona excelentes propiedades anti-corrosión y después de ser sometido a un tratamiento térmico para aumentar su dureza superficial muestra un óptimo comportamiento al desgaste por cargas de impacto y fricción. Pero, en el caso de la masa, se ha dispuesto utilizar un corazón que es de material dúctil que absorbe mucha energía de deformación mientras que su exterior es de acero inoxidable con su respectivo tratamiento térmico para su endurecimiento superficial.

De esta forma minimizamos el riesgo de que se originen grietas que resultan de estos esfuerzos se propagan hasta que se separan en pequeñas partes del material de la superficie, produciendo picaduras y resquebrajamiento.

En la figura 18 se muestran estos elementos y en los planos anexos al proyecto se detallan sus dimensiones para su posterior construcción.

Figura 18 Elementos Constitutivos Del Set De Molienda.



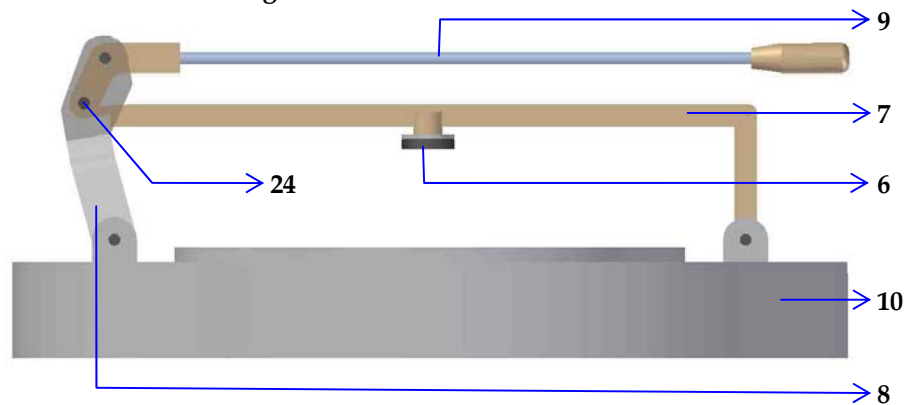
Fuente: El Autor.

7.3. DISEÑO DEL CIERRE DE SEGURIDAD.

El cierre de seguridad se ha diseñado para este molino para cumplir la

función de anclar de manera rápida y segura el set de molienda al cuerpo vibratorio. De igual forma permite retirar el vaso contenedor con el mineral pulverizado al aplicar una fuerza vertical en la palanca de anclaje. En la figura 19 se muestra un esquema de este subconjunto apoyado sobre la campana del set de molienda.

Figura 19 Cierre De Seguridad.



Fuente: El Autor

Este juego de palancas opera bajo el principio de auto-bloqueo, es decir, al aplicarle cierta fuerza a la palanca de cierre el sistema se bloquea sin necesidad de mantener la fuerza aplicada.

La barra #8 hace las veces de pivote y se conecta mediante dos pasadores a la campana del set de molienda y a la barra #9 que es la barra en la cual se aplica la fuerza para presionar y bloquear el sistema. La barra #9 cuenta con un pasador deslizante #24 que se apoya sobre una superficie curvilínea al final de la barra #7 que al colocarse en contacto, presiona el la tapa del set de molienda hacia abajo contra contenedor y al conjunto en total contra la campana del set de molienda.

Cuando el pasador deslizante de la barra #9 llega al final de la superficie deslizante de la barra #7, el sistema permanece bloqueado y de esta manera

se puede comenzar el proceso de molienda con seguridad. Para desbloquear el sistema, simplemente hay que aplicarle una fuerza vertical en el mango de la barra #9 hacia arriba y nuevamente se encuentra en libertad de ser retirado del molino para retirar el mineral pulverizado y cargarlo con mineral nuevo para procesar.

Nos enfocamos en la palanca en L (7), que es una palanca de segundo grado, en la cual la resistencia se encuentra entre el punto de apoyo y la potencia. En este caso, la resistencia es la fuerza necesaria para mantener presionada la tapa del recipiente contenedor y evitar que se abra al momento de comenzar la pulverización, que según recomendaciones de operadores experimentados es de 20 libras. Esta fuerza la generan unos discos de poliuretano (6), anclados en la parte central de la palanca y que hacen contacto con la parte superior de la tapa del contenedor. El montaje de estos discos elásticos de poliuretano se muestra en la figura 20.

Figura 20 Discos De Poliuretano Para Autobloqueo.

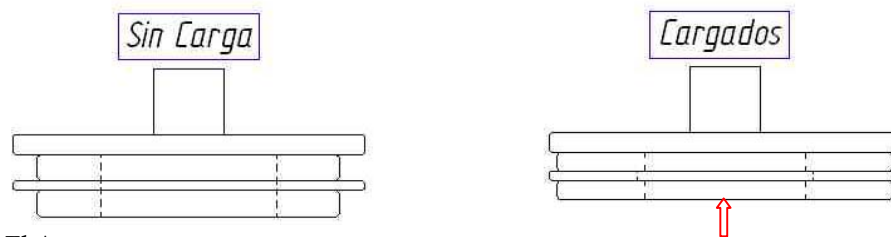


Fuente: El Autor

Estos discos son usados en lugar de resortes de discos o pequeños resortes para no complicar el diseño. Tienen un rango de deflexión de 0 - 10 % en aplicaciones estáticas y de 0 - 25 % en aplicaciones dinámicas con una capacidad de fuerza de 7 kg por milímetro deformado. Su rango de temperaturas es de -40 F° a 160 F°.

Al someterse a presión la palanca en L(7), estos se deforman y generan una fuerza tal que mantienen presionada la tapa contra el contenedor y a este contra la campana del set de molienda. Un esquema de estos discos cargados y su estado deformado por carga se muestra en la figura 21.

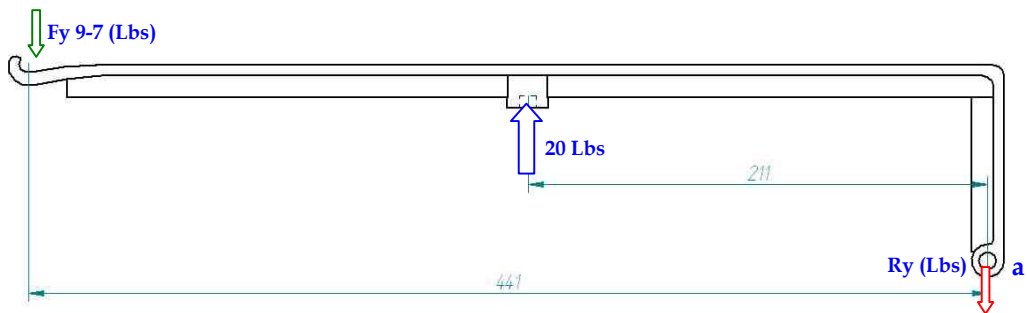
Figura 21 Discos De Poliuretano En Sus Estados Libre Y Cargados.



Fuente: El Autor.

Conociendo la fuerza generada sobre la tapa, se calculan las demás cargas que soporta este elemento y proceder con su diseño.

Figura 22 Diagrama De Cuerpo Libre De La Palanca En L (7).



Fuente: el Autor

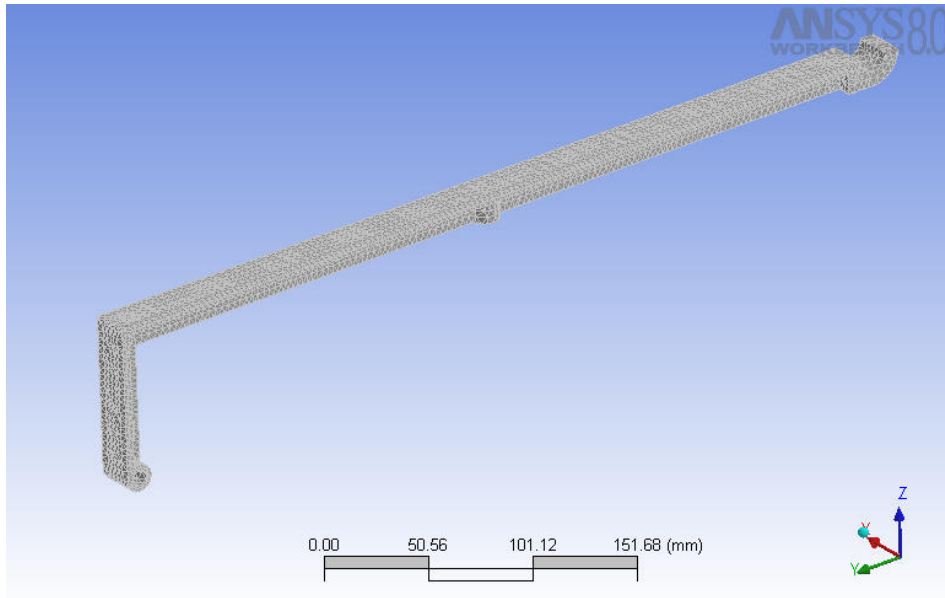
$$\Sigma Ma = 0$$

$$Fy = \frac{20\text{lbs} * 211\text{mm}}{441\text{mm}} = 9.6\text{lbs}$$

$$Ry = 10.4\text{Lbs}$$

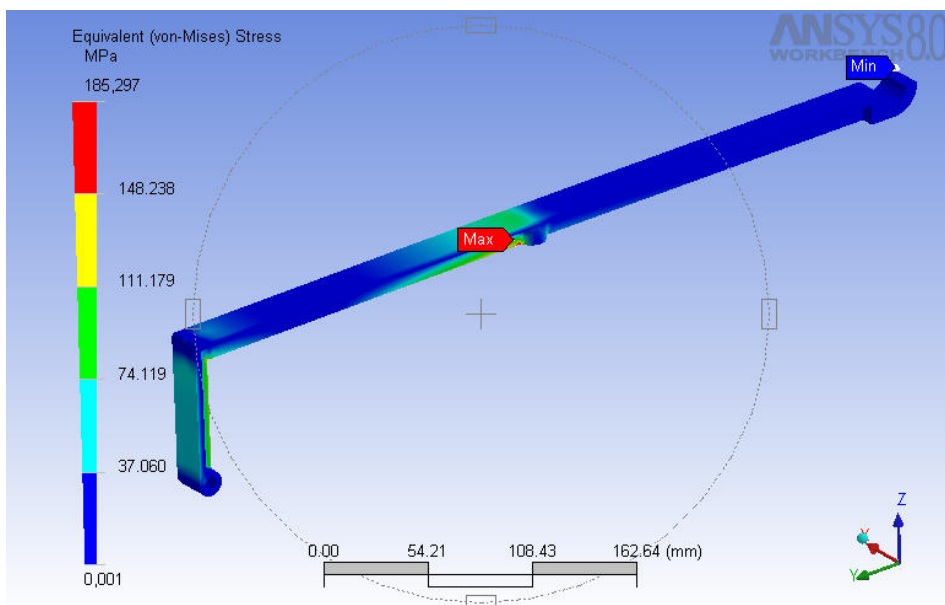
Se procede ahora a realizar el enmallado previo para realizar la simulación de esfuerzos en elementos finitos. La figura 23 muestra este enmallado.

Figura 23 Enmallado de la Palanca en L.



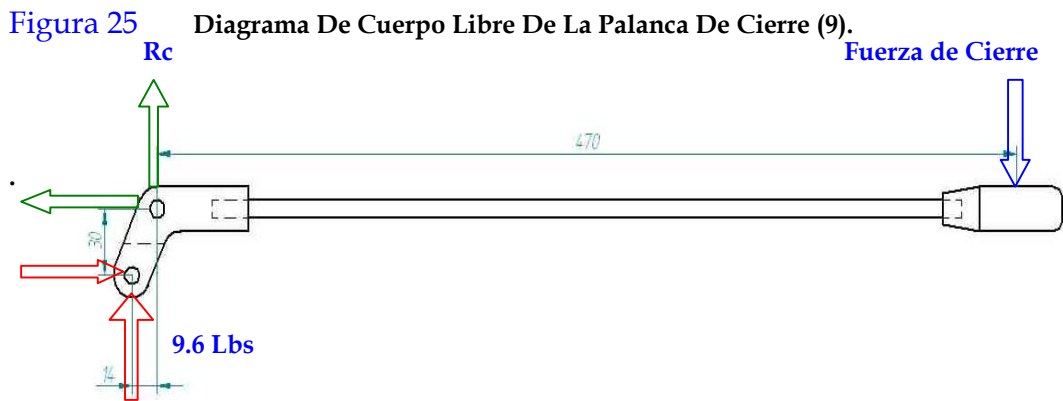
Fuente: el Autor

Figura 24 Análisis de esfuerzos en la Palanca en L.



Fuente: el Autor

Como resultado de la simulación realizada, figura 24, se avala la geometría presentada para este elemento y se procede a evaluar la estática en la palanca de cierre. Habiendo calculado esta reacción, se procede a evaluar ahora la fuerza que debe hacer el operador en la palanca de cierre, que es una palanca de primer grado, para que sea efectivo el bloqueo en el cierre de seguridad. Esta fuerza debe estar dentro de los parámetros permisibles en el estándar sobre frecuencias de aplicación de cargas, miembro que la ejecuta y valor de la carga a aplicar.



Fuente: El Autor.

Resolviendo la estática obtenemos:

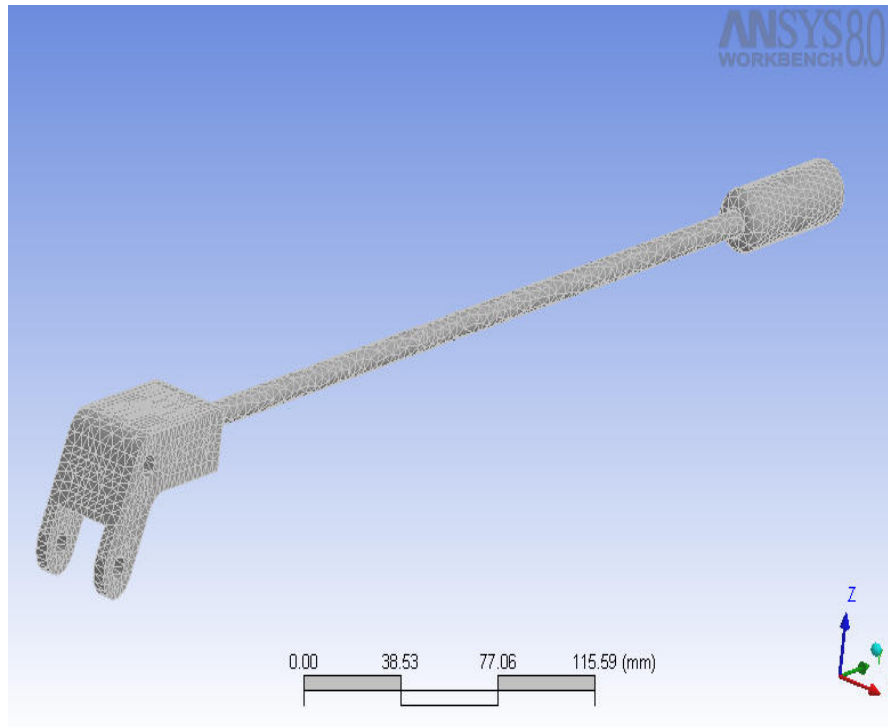
$$\Sigma Mc = 0$$

$$F_{CIERRE} = \frac{9.6lbs * 14mm}{470mm} = 0.4lbs$$

$$Rc = 9.2Lbs$$

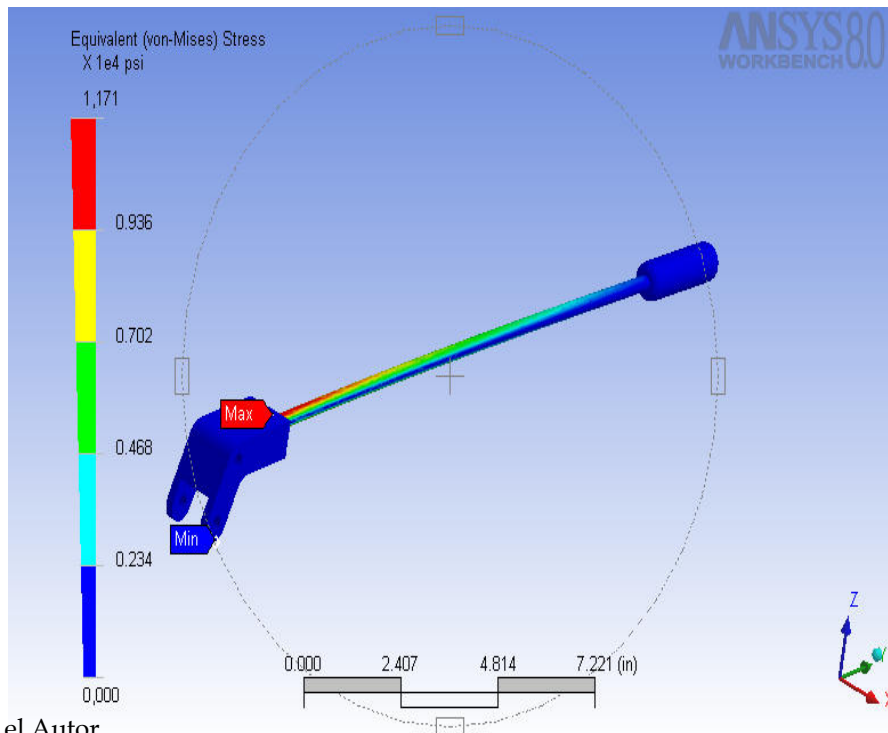
Conociendo estas fuerzas, se prepara el entorno en ANSYS para su enmallado y la superposición de las cargas a las cuales esta sometida esta barra. La figura 26 muestra el enmallado y la figura 27 muestra el resultado de la simulación de esfuerzos.

Figura 26 Enmallado de la Palanca de cierre.



Fuente: el Autor

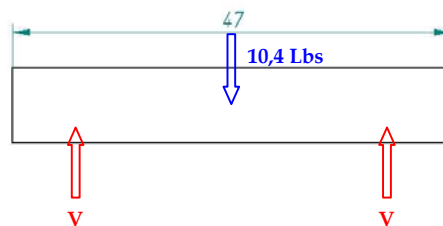
Figura 27 Análisis de esfuerzos en la Barra de Cierre.



Fuente: el Autor

Los pasadores que conectan las palancas sufren cortante doble y se calcularon para el valor de cortante más alto, que es el generado como reacción en la palanca 7 correspondiente a 10,4 lbs. A continuación se presenta su estática para determinar en base a esta el diámetro mínimo de sección para estos elementos.

Figura 28 Diagrama De Cuerpo Libre Del Pasador



Fuente: El Autor

Calculo del esfuerzo cortante.
$$\tau_c = \frac{V}{\frac{\pi * \phi^2}{4}}$$

Esfuerzo cortante permisible.
$$\tau_{perm} = 11 \text{ Klbs}/\text{in}^2$$

Diámetro del pasador.
$$\phi_p = \sqrt{\frac{4 * V}{\pi * \tau_{perm}}} = \sqrt{\frac{4 * 11}{\pi * 11000}} = 0.035 \text{ in}$$

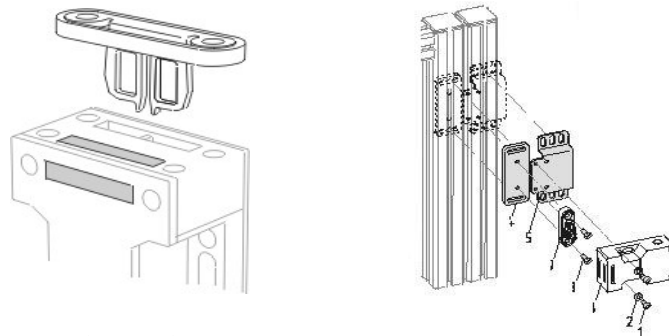
El diámetro de pasador adoptado para este diseño es de 5mm. Estas piezas se han diseñado en platina soldada y sus detalles de construcción se encuentran en los planos anexos al trabajo de grado.

7.4. SELECCIÓN DE UN INTERRUPTOR DE SEGURIDAD.

Este dispositivo electrónico se adaptó al molino para operarlo bajo el principio de seguridad. Consta de un pin macho y uno hembra que al unirse nos permiten energizarlo para comenzar la operación. Los interruptores de seguridad con actuador separado son adecuados para resguardos deslizantes,

de bisagra y especialmente para los extraíbles que deben permanecer cerrados durante la función de la máquina. El pin macho se instala en la tapa superior del molino en su parte interna y el toma hembra se coloca al costado interno de la cubierta; de tal forma, que al estar la tapa levantada anula toda posibilidad de que el molino se arranque accidentalmente ocasionando lesiones tanto materiales como a los operadores. Un tipo de estos accionamientos electrónicos se aprecia en la figura 29.

Figura 29 Interruptor De Seguridad.



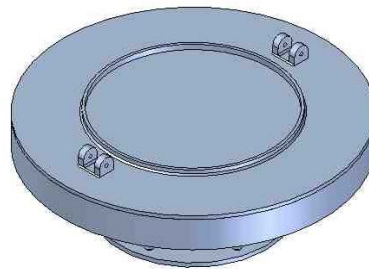
Fuente: www.schmersal.com

En los interruptores de seguridad, el interruptor y el actuador, son 2 elementos que se separan a la apertura de la puerta o cubierta de protección, con lo que los contactos NC se abren de forma forzada y los NA se cierran. Para poder colocar el molino en servicio la tapa debe estar cerrada y de esta manera completar el circuito de arranque con los dos pines haciendo contacto y bajo esta premisa ya puede ser arrancado el molino presionando el botón de marcha en la caja de control. Los interruptores de seguridad se pueden montar en cualquier posición deseada.

7.5. DISEÑO DE LA CAMPANA DEL SET DE MOLIENDA.

La campana del set de molienda cumple la función de unir el set de molienda al sistema generatriz y a la estructura, pero las cargas que este soporta son muy pequeñas. Sin embargo, será diseñado en lámina de acero HR, bajo la premisa de mínima deformación con sus cargas reales, por ello, se ha preparado una geometría de acuerdo a las necesidades y en base a ella se realizara un análisis posterior en programas que simulen elementos finitos para verificar la confiabilidad de la pieza. Un esquema de este componente se muestra en la figura 30.

Figura 30 Campana del Set de Molienda.

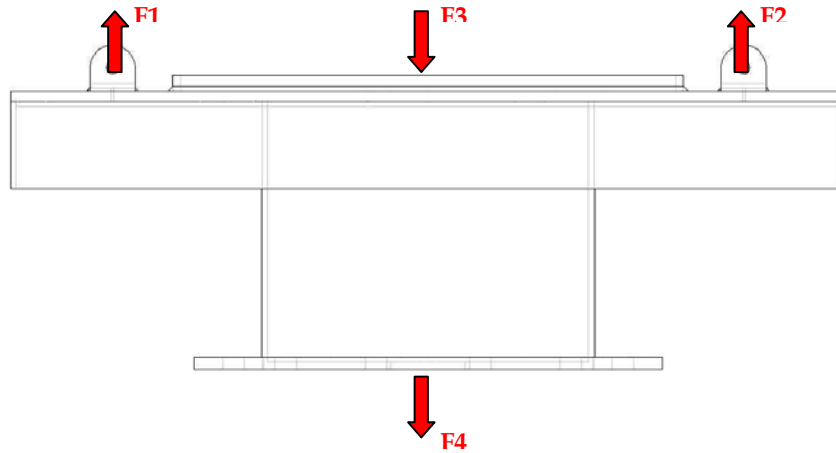


Fuente: El Autor

Las cargas que soporta la campana y sus posiciones de apoyo y sus dimensiones se muestran en el siguiente diagrama de cuerpo libre.

En las figuras 32 y 33 se muestran respectivamente el enmallado de este elemento y su simulación de esfuerzos, generados al ser solicitados por las cargas que se muestran en la figura 31.

Figura 31 DCL De La Campana Del Set De Molienda.



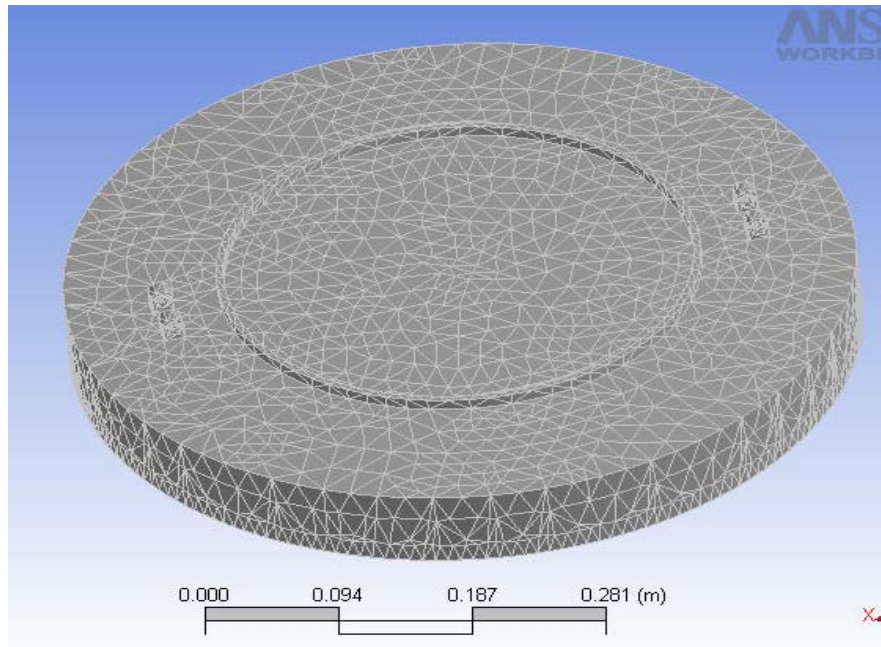
Fuente: El Autor

Las fuerzas F1 y F2 son las reacciones generadas en los apoyos de las palancas del cierre de seguridad y la fuerza F3 es la fuerza de cierre generada por los discos de poliuretano. La fuerza F4 es la suma de los pesos del motor eléctrico, la excéntrica y la adaptación al eje que se encuentran acoplados a la campana por medio de una brida. Los valores de cada fuerza son:

$$F1 = 9,2 \text{ Lbs.} \quad F2 = 10,4 \text{ Lbs.} \quad F3 = 20 \text{ Lbs.} \quad F4 = 24 \text{ Lbs.}$$

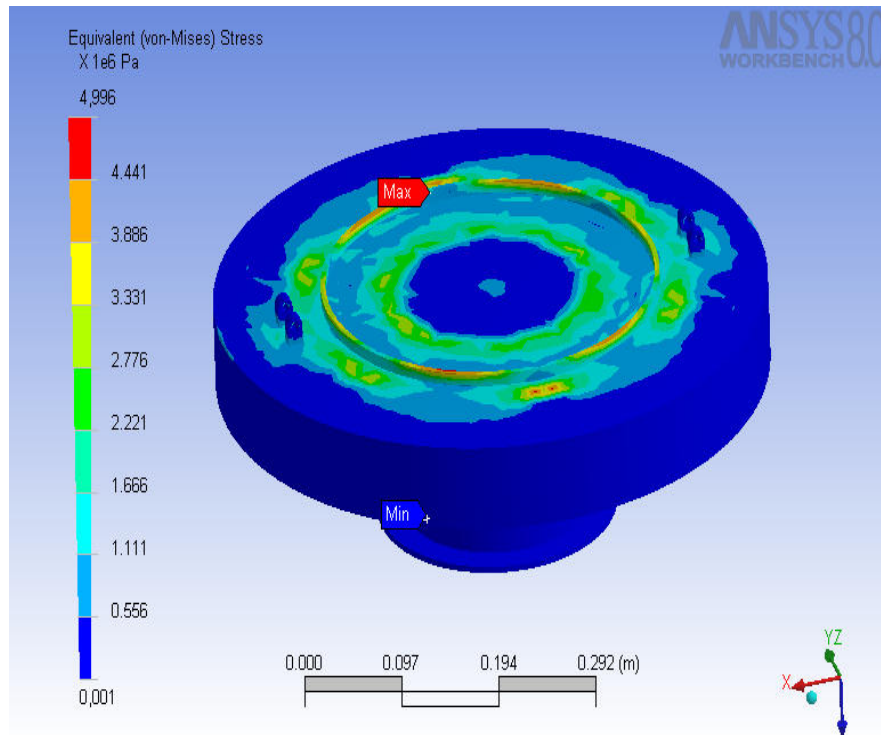
Los resultados gráficos de la simulación se muestran en la figura ** y las conclusiones son:

Figura 32 Enmallado de la Campana del Set de Molienda.



Fuente: El Autor

Figura 33 Análisis de esfuerzos de la Campana del Set de Molienda.



Fuente: El Autor

Evidentemente, la geometría propuesta para estos elementos se comporta muy bien para las cargas que soportan; por tal motivo, se adoptaran estas geometrías y los materiales asignados durante la simulación de esfuerzos. Los detalles de construcción y su ensamble como conjunto se muestran en los planos anexos al final del libro.

7.6. DISEÑO DEL SISTEMA GENERATRIZ.

Este sistema es el encargado de conferirle el movimiento oscilatorio al molino de anillos a partir de una unidad motriz que en este caso es un motor eléctrico acoplado de manera directa a la campana del set de molienda por medio de una brida, para que se mueva junto a este y lo mantenga en sincronía con las oscilaciones y así reducir grandemente las cargas en los rodamientos debido al desbalanceo en el eje generado por la excéntrica. El sistema motriz esta compuesto por el motor y una adaptación al eje diseñada en acero, que conecta con un buje de bronce en la parte baja de la campana donde rota libremente y ofrece estabilidad al motor para una mejor transmisión de la fuerza de oscilación. A este se acopla la excéntrica que es de fundición gris por medio de un pasador y tornillos prisioneros, generando una rotación fuera de su eje centroidal, genera las oscilaciones para lograr la pulverización. Los detalles de su diseño y geometría se presentan en los planos de armado adjuntos al libro.

La función del motor es la de suministrar la potencia necesaria para hacer rotar la excéntrica y por causa efecto, el set de pulverización entre en oscilación continua y se lleve a cabo la operación de molienda satisfactoriamente. El motor esta calculado para ser de $\frac{1}{2}$ HP, con protección térmica incorporada. Los datos de placa del motor se muestran como anexos en la parte final del libro.

La acción generadora de la oscilación de los elementos de molienda es la fuerza centrífuga. Esta fuerza radial se produce por la rotación de un cuerpo sobre un eje diferente del eje que coincide con su centro de gravedad. La magnitud de esta fuerza viene definida por la siguiente ecuación:

Ecuación 35
$$F = \frac{Wv^2}{gR} = \frac{Wv^2}{32,16R} = \frac{4WR\pi^2n^2}{60 * 60g} = \frac{WRn^2}{2933} = 0.000341WRn^2$$

F = Fuerza centrífuga en libras.

W = Peso del cuerpo que revoluciona en libras.

v = velocidad a la distancia R sobre el cuerpo en ft/sec.

n = Numero de revoluciones por minuto.

g = Aceleración de la gravedad 32,16 ft/sec².

R = Distancia perpendicular desde el eje de rotación al eje del centro de masas del cuerpo revolucionado.

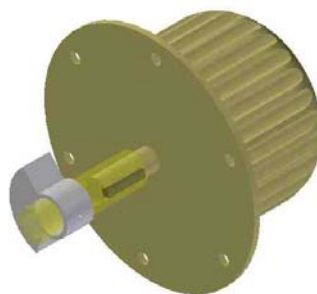
Calculo de la Fuerza Centrífuga:

W = 0.5 Libras. n = 1150 rpm. R = 1.5 in.

$F = 0.000341 * 0,5 * 1.5 * 1150^2$ F = 338 lbs.

Un esquema del arreglo entre la adaptación, la excéntrica y el motor eléctrico se muestra en la figura 12.

Figura 34 **Ensamble Entre La Adaptación, La Excéntrica Y El Motor Eléctrico.**



Fuente El Autor.

La selección del motor eléctrico se realizó después de calcular la potencia que consume el proceso de pulverización, teniendo en cuenta los siguientes factores.

- Tamaño de la Alimentación
- Tamaño del Producto
- Velocidad de Alimentación
- Índice de Trabajo

Debido a la complejidad del proceso, se utilizaron las técnicas ya patentadas y establecidos en la literatura sobre la pulverización, para tener un valor preliminar y seguro de esta.

Para determinar la potencia del motor se tuvo en cuenta la Ley de Bond.

Ecuación 36

$$\frac{P}{m} = 0.3162 * W_i * \frac{1}{\sqrt{D_{pa}}} * \frac{1}{\sqrt{D_{pb}}}$$

Donde:

P = Potencia Bruta en KW

W_i = Índice de Trabajo

m = Velocidad de Alimentación

D_{pa} = Diámetro de Salida

D_{pb} = Diámetro de Alimentación

Para el caso particular del diseño del molino, los valores a introducir en la formula son los siguientes:

$$W_i = 19.32$$

$$m = 0.05$$

$$D_{pa} = 0.74$$

$$D_{pb} = 10$$

$$P = 0.3162 * 19.32 * 0.05 * \frac{1}{\sqrt{0.74}} * \frac{1}{\sqrt{10}}$$

$$P = 0.3162 * 19.32 * 0.05 * (1.16247 - 0.31623)$$

$$P = 0.26 Kw$$

Por ser molienda seca, el resultado debe multiplicarse por $\frac{3}{4}$.

$$P = 0.26 Kw * \frac{3}{4} = 0.35 Kw$$

El motor a seleccionar debe tener una potencia de $\frac{1}{2}$ HP.

Para estipular la confiabilidad de los cálculos, se realizó una prueba que consistió en medir el amperaje consumido por un motor de $\frac{1}{2}$ HP durante la excitación del sistema moviendo una excéntrica de 2 Kg con un voltaje de 220 Voltios. Una vez realizadas varias mediciones de corriente en intervalos de tiempos iguales y durante el arranque, se procedió a calcular la potencia eléctrica consumida. A partir de esta se pudo determinar la potencia mecánica teniendo en cuenta la eficiencia del motor.

A continuación se expone una tabla con los resultados obtenidos durante la prueba.

Tabla 8 Prueba de consumo de potencia eléctrica

Datos tomados en el arranque			RPM	Datos tomados en Régimen			RPM
Prueba	Voltaje (V)	Corriente(A)		Tiempo	Voltaje (V)	Corriente(A)	
1	220 V	2 - 1,8 -2		5 min.	220 V	1,6 - 1,6 -1,8	1148
2	220 V	2,2 - 2,2 -2,2		10 min.	220 V	1,6 - 1,6 -1,6	1149
3	220 V	2 - 1,8 -2		15 min.	220 V	1,6 - 1,6 -1,6	1149
4	220 V	2,2 - 2,2 -2,2		20 min.	220 V	1,6 - 1,6 -1,6	1147
5	220 V	2,2 - 2,2 -2,2		25 min.	220 V	1,6 - 1,6 -1,6	1148
6	220 V	2 - 1,8 -2		30 min.	220 V	1,6 - 1,6 -1,6	1147
7	220 V	2,2 - 2,2 -2,2		35 min.	220 V	1,6 - 1,6 -1,6	1148

Los valores se promediaron y dio como resultado lo siguiente:

Voltaje: 220 V Corriente: 1,6 Amp 2,2 Amp (Al arranque)

Velocidad: 1150 R PM

Para determinar la potencia eléctrica se procedió así, Donde:

P = Potencia **I** = Corriente **V** = Voltaje

Al Arranque

En Marcha

$$P = I * V$$

$$P = I * V$$

$$P = (2,2 A)*(220 V)$$

$$P = (1,6A)(220 V)$$

$$P = 484 W = 0,65 HP$$

$$P = 352 W = 0,47 HP$$

7.6.1. SELECCIÓN DEL MOTOR.

Utilizando los datos anteriormente obtenidos y teniendo en cuenta las consideraciones sobre los materiales a alear mecánicamente se seleccionó un motor con las siguientes características:

Motor Trifásico marca: **SIEMENS**

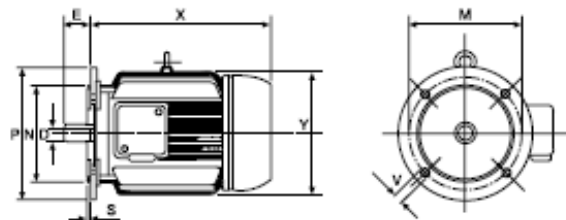
Potencia: 1/2 HP

Velocidad: 1150 RPM

Eficiencia: 69,2%

Voltaje: 220 V

Corriente: 3,5 Amp



El motor cuenta con características físicas como su robustez y funcionalidad con alto desempeño ante exigencias mecánicas extremas.

Este motor tiene una caja de terminales ubicada en la parte superior; entrada de cables de la acometida por dos lados; tiene bornera de conexión lo que facilita su manejo; posibilidad de conexión de puesta a tierra; la caja de terminales por ser amplia y cómoda permite cambios de conexión

técnicamente seguros. Cuenta también con una brida con la cual se sujeta el motor a la parte inferior del cuerpo vibratorio.

Este tipo de motor es libre de mantenimiento, con una vida útil hasta de 20.000 horas de servicio continuo. El motor se encuentra protegido contra chorros de agua en cualquier dirección y contra depósitos de polvo, además su ventilador se encuentra cubierto con una caperuza para evitar contactos involuntarios.

7.7. DISEÑO DE LOS RESORTES.

Teniendo en cuenta que el molino de anillos basa su principio de operación en oscilaciones constantes generadas por un desbalanceo mecánico forzado en su unidad motora, veremos ahora conceptualizar su montaje y se procede para diseñar los resortes.

Para realizar el diseño de los resortes, fue necesario estudiar su comportamiento frente a dos parámetros distintos de operación, su resistencia a la fatiga a cargas de flexión y su estabilidad ante frecuencias de resonancia para evitar que fallen por fatiga o ruptura debido a las frecuencias naturales con las que se comporta el sistema. Puesto que son los encargados de soportar el conjunto de elementos que participan directamente en la pulverización del mineral son diseñados para trabajar bajo cargas de compresión, complementando se diseño para cargas de flexión y pandeo, generadas por las oscilaciones forzadas que el sistema generatriz genera para lograr la pulverización del mineral contenido en el envase de molienda.

El diseño de los resortes se basará en una configuración preliminar con la cual se determinaran las cargas que soportan y la manera como están conectados con los demás elementos del molino.

Las cargas de compresión a las que se someten los resortes es la suma de las cargas de cuerpo de los elementos que apoyan sobre estos, en la tabla 9 se numeran estos elementos y su pesos respectivos.

Tabla 9. Carga Total de Compresión en los Resortes.

ELEMENTO	MASA
Elementos de molienda	28 Kg.
Cierre Rápido	2 Kg.
Campana del Set	23 Kg.
Guías Resortes	1.1 Kg.
Excéntricas	2 Kg.
Motor + brida	10 Kg.
Mineral	1 Kg.
Total	67.1 Kg.

Para el molino de anillos se presenta una disposición simétrica de los resortes separados uno del otro por un ángulo de 60° , con el objetivo de disminuir las cargas de flexión y dejarlo trabajar en mayor proporción bajo cargas de compresión. Esto lo podemos apreciar en la figura 35.

Ahora bien, para evitar la falla de los resortes por resonancia, el conjunto de molienda se considera como un sistema en estado libre al estar soportado sobre resortes, y las frecuencias naturales de oscilación del sistema en los seis (6) posibles grados de libertad, debería ser menor que un cuarto ($\frac{1}{4}$) de la frecuencia correspondiente a la velocidad de rotación de la maquina motriz. La masa efectiva del soporte elástico no debería ser mayor que 0.1 de la masa

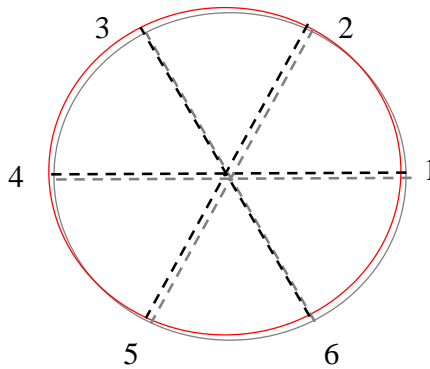
del motor, para reducir la influencia de las masas y los momentos de inercia de las partes sobre el nivel vibratorio.

La carga por cada resorte es 1/6 de la carga total soportada por todo el conjunto de resortes.

Parámetros de Diseño

Carga Total: 67.1 Kg. \longrightarrow 657.5 N
 # Resortes: 6
 Carga de Diseño: 110 N
 Material del Resorte: Acero SAE-AISI 1070
 Configuración: Escuadrados y Amolados

Figura 35 Arreglo Geométrico De Los Resortes.



Fuente: El Autor.

Los resultados del proceso de cálculo se presentan en la siguiente tabla.

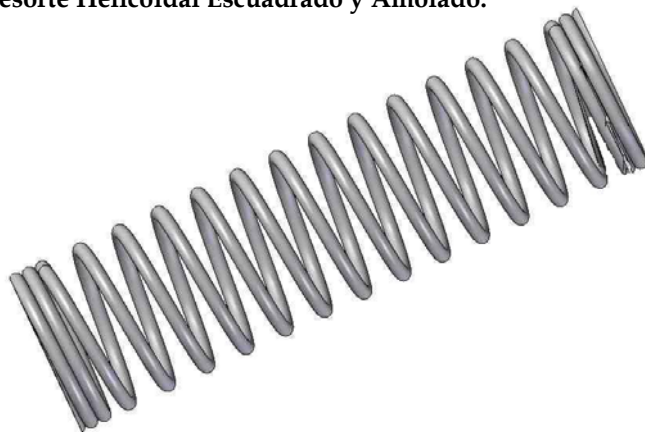
Tabla 10. Cálculo de Resortes

Item	Valor	Unidad	Item	Valor	Unidad
# Ciclos	1,08 e9	Ciclos	N	1,9	
Fm	49,5	Lb	K	55	Lb/In
Fa	16,5	Lb	Na	15	Espiras
Ø	0,207	In	Nt	17	Espiras
C	10		Ls	1,5525	In

D	2,07	In	Hg	20	%
Ks	1,05		Yi	0,273	In
Zi	20592,2	Psi	Yg	0,055	In
Zm	44184,4	Psi	Lf	8,4805	In
Kw	1,145		Yc	0,928	In
Za	12227,7	Psi	Lf/D	1,2	
Sut	235	Ksi	Ymax/Lf	0,352	
Sus	157,45	Ksi	Wa	0,343	Lb
Sys	141	Ksi	Fn	124,4	Hz
Sew	45	Ksi	Rf	6	
Ses	39,87	Ksi			

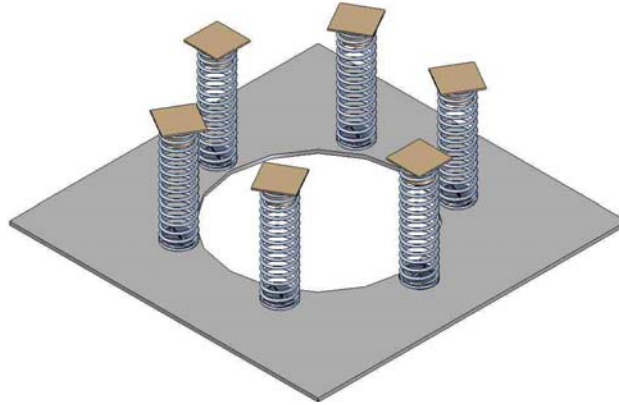
Estos son los resultados de calcular los resortes para los parámetros de carga de cuerpo y su relación de frecuencias, pero al observar el comportamiento del sistema no se obtuvieron los resultados esperados. Para mejorar el comportamiento del molino se trabajó bajo el concepto de movilidad, el cual permite estimar que rigidez debe tener el resorte para que el set de molienda se comporte acuerdo a lo esperado, por tal motivo el resorte final es diferente el calculado. En la figura 36 y 37 se muestra la geometría final del resorte individual, como del sistema de seis resortes sobre el cual descansa el set de molienda.

Figura 36 **Resorte Helicoidal Escuadrado y Amolado.**



Fuente: El Autor.

Figura 37 Sistema de Resortes.

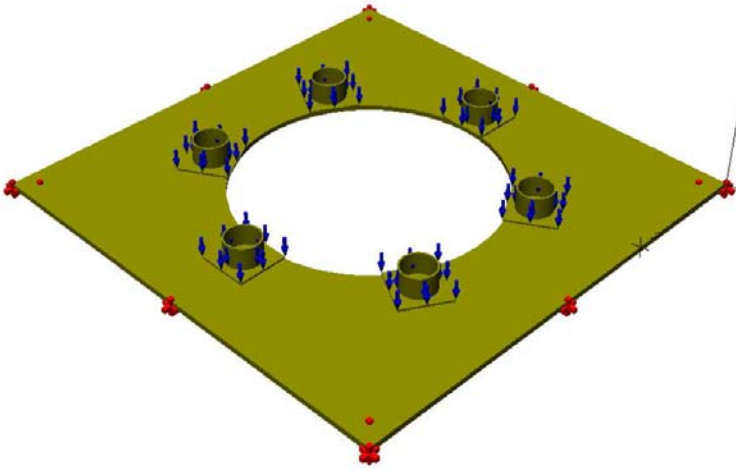


Fuente: El Autor.

7.8. DISEÑO DE LA BASE PARA LOS RESORTES

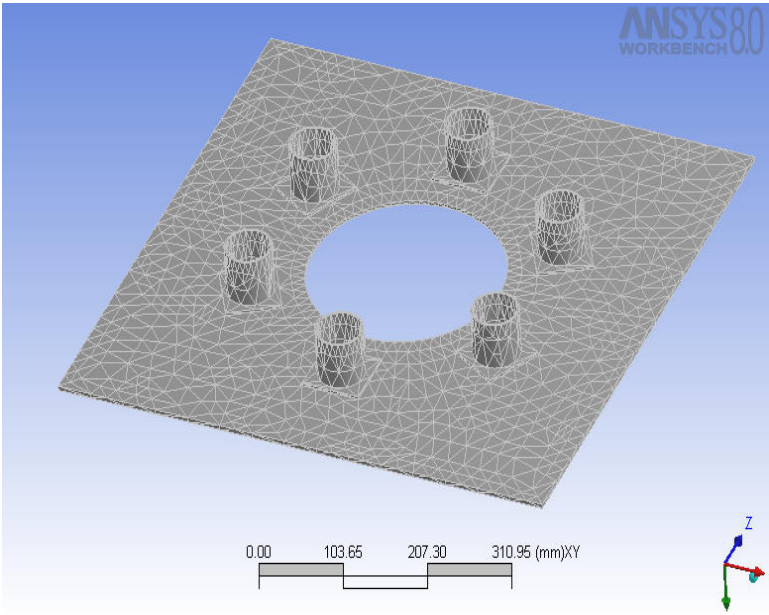
Sobre este elemento descansan los resortes y la carga total sobre el, es la suma de la carga soportada por los resortes mas los pesos de cada uno de ellos y de las guías de los resortes. Sin embargo, las cargas que este soporta son muy pequeñas y será diseñado con una geometría preliminar en lámina de acero HR, y evaluada bajo la premisa de mínima deformación con sus cargas reales. Un esquema de este elemento se muestra a continuación.

Figura 38 Base para los Resortes con cargas y restricciones



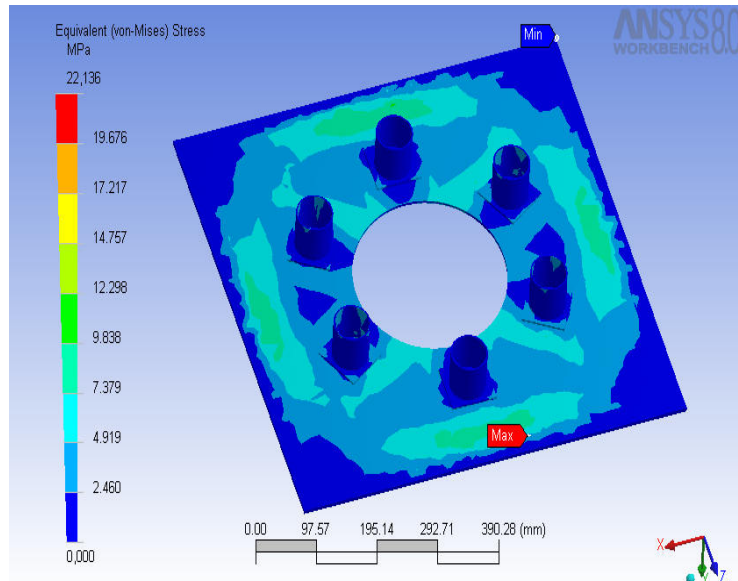
Fuente: El Autor

Figura 39 Enmallado de la Base para los Resortes



Fuente: El Autor

Figura 40 Análisis de Esfuerzos en la Base para los Resortes



Fuente: El Autor

Al ver los resultados del análisis por medio de la simulación, notamos que el espesor de placa seleccionado se comporta de manera suficiente y por esta razón, la configuración seleccionada será definitivamente adoptada para la consecución del diseño final del molino de anillos. Los detalles geométricos y de construcción se muestran al final en los planos anexos al libro.

7.9. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

El diseño de la estructura se realiza con el fin de estudiar las relaciones que existen entre las cargas externas aplicadas y la intensidad de los esfuerzos internos que actúan dentro del cuerpo. Mediante el estudio de las cargas a que esta sometida la estructura, se pueden determinar las deformaciones que esta sufre y la estabilidad de la misma.

Es necesario, en el estudio de la estructura usar los principios de la estática para determinar la estabilidad de sus elementos constitutivos, teniendo en cuenta las fuerzas que actúan en cada uno de ellos. Esto permite determinar el tamaño ideal de cada uno de los miembros, la disposición de cada uno de ellos y entre si y el tipo de material del que debe construirse la estructura.

Para el diseño previo de la estructura se realizo un análisis escalonado de la siguiente manera:

- Análisis Estático
- Análisis de Esfuerzos
- Análisis de Deformaciones

Mediante el análisis estático se determinan las fuerzas reactivas que actúan sobre la estructura debido a las fuerzas externas. Para determinar las fuerzas reactivas se tuvo en cuenta las cargas muertas debido al peso de los siguientes elementos:

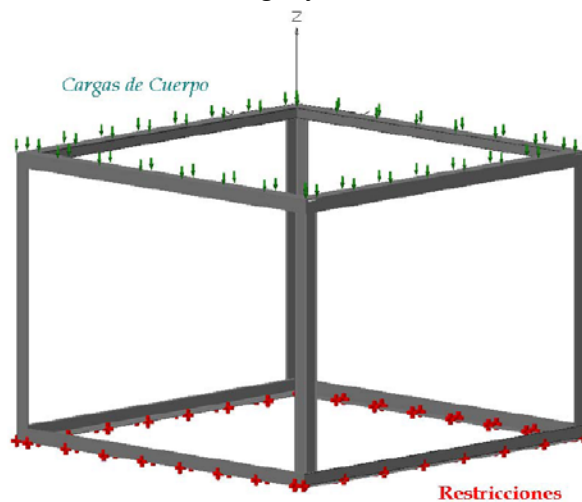
- Motor
- Conjunto de Molienda
- Resortes
- Excéntrica
- Campana del Set de Molienda

- Carga de Molienda
- Cierre de Seguridad
- Base para los Resortes

En la figura 41 se muestra un DCL de la estructura con las cargas a las cuales esta sometida al hacer parte del molino de anillos.

El análisis de esfuerzos y deformaciones de la estructura se realizo bajo los procedimientos normales de resistencia de materiales, apoyado en herramientas CAD-CAE, como software de verificación. Para esto se utilizó el software de diseño en 3-D Solid-Edge V12 y el software de elementos finitos Ansys.

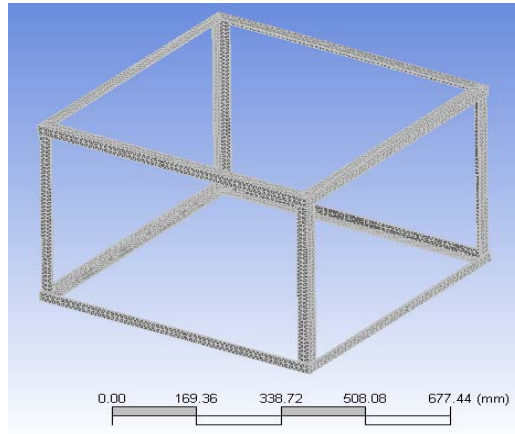
Figura 41 Estructura del Molino, Cargas y Restricciones.



Fuente: El Autor.

Teniendo ya el diagrama de cuerpo libre de la estructura del molino se procede al analisis por medio de elementos finitos, previo a un enmallado necesario para la correcta aplicación del software. El enmallado de la estructura se muestra en la siguiente figura.

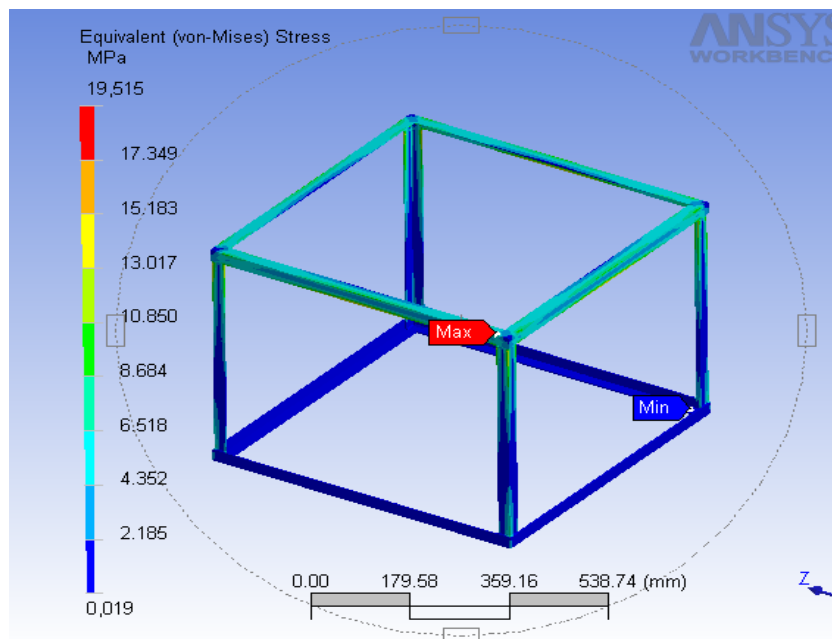
Figura 42 Enmallado de la Estructura del Molino



Fuente: El Autor.

A partir de estos datos se puede analizar mediante el programa de elementos finitos el comportamiento de la estructura correspondiente a esfuerzos y deformaciones para compararlos con los esfuerzos permisibles por el material.

Figura 43 Análisis de Esfuerzos en la Estructura del Molino.



Fuente: El Autor.

Los resultados obtenidos del análisis de esfuerzos de la estructura permiten seleccionar adecuadamente la geometría del perfil que se utilizará para su construcción con un elevado margen de seguridad; de tal manera, la estructura se ha diseñado como una caja hueca, permitiendo la fácil interacción del motor, dándole libertad de moverse libremente dentro de ella sin chocar contra sus columnas de soporte y sostener todo su conjunto en si, además de darle la estabilidad al conjunto mientras este soporta las oscilaciones forzadas generadas por la unidad motriz.

Finalmente, fundamentados en criterios de rigidez, mínima deformación y armonía de conjunto, además de cumplir con todos los requerimientos de esfuerzos y resistencia mecánica, la estructura del marco de carga esta diseñada en perfil de acero, a la cual se implantan unas láminas que son cortadas y soldadas a ella para fijar el resto del molino en un solo conjunto. Cada una de las láminas soldadas a la estructura tiene una abertura circular roscada en su centro, en el cual se sujeta la base sobre la cual descansan los resortes por medio de tornillos que quedaran embebidos y permitiendo así de manera segura operar el molino y pulverizar los minerales.

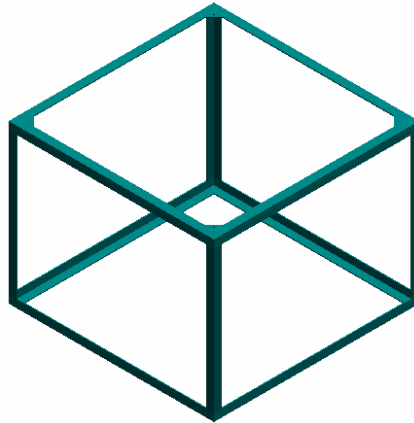
En el diseño de la estructura todas las uniones fueron realizadas por medio de soldadura con electrodo revestido, la gran mayoría de estas soldaduras son de filete con electrodos E6010 de 1/8" a 3/8".

El código de soldaduras por fusión de la Sociedad Americana de la Soldadura (A.W.S), determina las resistencias de trabajo siguientes para las soldaduras de estructuras (traducidas a unidades métricas):

Tensión cortante	790 Kg. / cm ²
Tensión de tracción	910 Kg. / cm ²
Tensión de compresión	1260 Kg. / cm ²

Un esquema del estado final de la estructura se muestra en la figura 14.

Figura 44 Estructura del Molino de Anillos

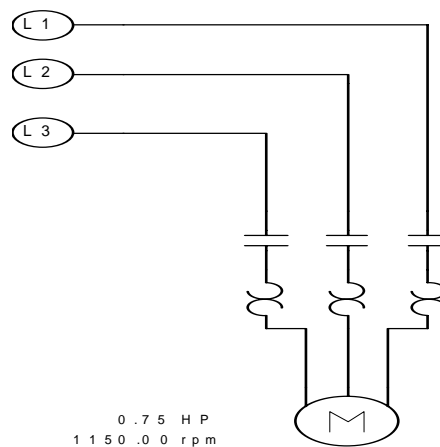


Fuente El Autor.

7.10. CONTROL DE POTENCIA

El control de potencia corresponde al sistema de conexión eléctrica que bajo una correcta instalación de sus elementos componentes permite la operación del molino de manera segura.

Figura 45 Circuito de Potencia.

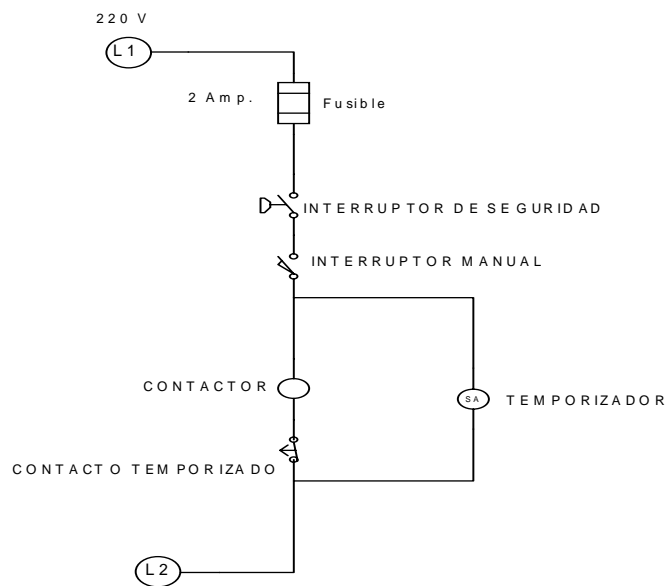


Fuente: El Autor.

7.11. SELECCIÓN DEL CIRCUITO DE CONTROL

Para el diseño del circuito de control se plantearon varias alternativas de las cuales quedó la más versátil, sencilla y económica.

Figura 46 Circuito de Control.



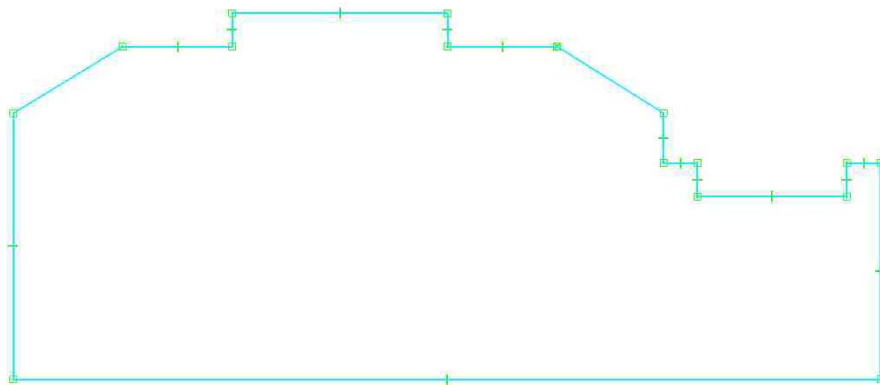
Fuente: El Autor.

Este motor se ha seleccionado teniendo en cuenta que es para servicio temporal, es decir, con carga constante y duración insuficiente para estabilizar la temperatura del motor, va seguido de un tiempo de reposo, de duración suficiente para que la temperatura del motor descienda a la de su medio ambiente.

7.12. DISEÑO DE LA CUBIERTA

La cubierta ha sido diseñada en lamina HR de 3,17 mm, doblada de tal forma que cubre las cuatro caras de la estructura con el conjunto de molienda ya acoplado, al igual que sus tapas superior y frontal. Se le ha adherido una espuma a sus paredes interiores cuya función es opacar el ruido producido por el set de molienda al entrar en operación. El desarrollo de cada una de las piezas se muestra a continuación.

Figura 47 Desarrollo de la Cubierta.



Fuente: El Autor.

Figura 48 Desarrollo de la Tapa Frontal.



Fuente: El Autor.

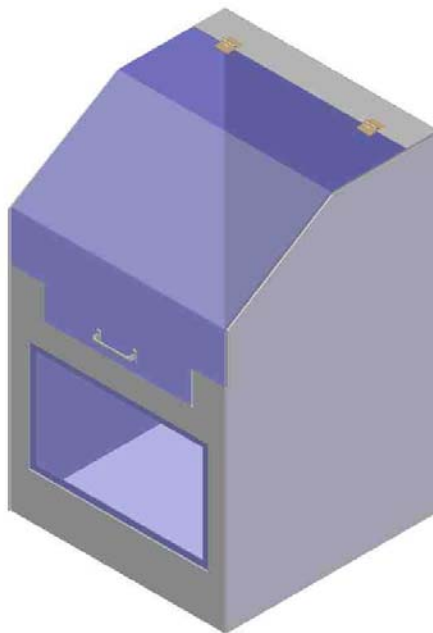
Figura 49 Desarrollo de la Tapa Superior.



Fuente: El Autor.

En su parte superior cuenta con una tapa que se ancla a esta por un par de bisagras permitiendo el abrir y cerrar fácilmente el molino y poder así sin mas complicaciones retirar el set de molienda para cambiar el mineral pulverizado por mineral sin tratar y entrar nuevamente en operación. En su parte frontal cuenta con otra tapa que se atornilla a la cubierta y que al retirarse facilita el montaje y desmontaje de la unidad motriz para cuando necesite mantenimiento o se encuentre dañado. Esta se aprecia en la figura 50.

Figura 50 Cubierta.



Fuente: El Autor.

Entre la tapa superior y la cubierta se encuentra un interruptor de operación segura, de tal manera que solo si la tapa esta no cerrada el equipo no puede colocarse en operación al presionar el botón de arranque.

7.13. UNIDAD DE CONTROL

En la unidad de control se encuentran los dispositivos electrónicos que permiten operar el molino, planificado para un circuito de tres fases con un contacto temporizador que permita graduar el tiempo de operación del molino y otros elementos que permitan operarlo de forma fácil y segura, por lo cual consta de los siguientes elementos:

- Contactor
- Temporizador
- Guarda Motor
- Botón de encendido y apagado
- Botón de parada de emergencia

Cada uno de estos elementos es seleccionado para operar en concordancia con los demás; por lo tanto, si se quiere utilizar otro en reemplazo de alguno se debe comprobar primero que sean compatibles. Las características de cada uno de estos elementos se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 11. Elementos del Sistema de Control.

ELEMENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL
Contactador AC NC1 1210 12 Amp
Relé Térmico NR2 - 25 7-10 Amp
Timer TH3A - YA 30 min 110/220 Volt
Botonera Pulsador Doble NA/NC

Todos estos elementos se encuentran contenidos en una caja de paso de 20"×20", adherida al costado derecho de la cubierta del molino.

Las figuras 51-52-53, 54, 55 y 56, muestran estos elementos individualmente y como deben quedar en conjunto.

Figura 51 **Contactor AC NC1 1210 12 Amp**



Figura 52 **Relé Térmico NR2 - 25 7-10 Amp**



Figura 53 Timer TH3A - YA 30 min 110/220 Volt



Figura 54 Botonera Pulsador Doble NA/NC



Figura 55 Caja de Paso de 20"×20"



Figura 56 Caja de Paso con los elementos de control.



Fuente: ELECTROCABLES LTDA.

CONCLUSIONES

- Se logró diseñar, para el Departamento de Minerales de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, además de dotar al mismo con los planos para su construcción.
- El diseño del Molino de anillos, demuestra la disposición y la colaboración sustentada en acuerdos interdisciplinarios de las Escuelas de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Metalúrgica contribuyendo a incrementar el prestigio de la institución gracias a la implementación de tecnología de vanguardia en la investigación de la ciencia de materiales.
- El Molino de anillos se diseñó para que tuviese un recipiente de molienda de 1000 CC. El recipiente que posee el pulverizador es en acero inoxidable 304, cumpliendo así con las características de evitar corrosión y bajos niveles de contaminación de muestras.
- El Molino se ha diseñado completo con su gabinete de metal, con isonorización, arrancador temporizador y llave de corte de energía de seguridad. Cuenta con una abrazadera mecánica que asegura la estabilidad de los elementos de molienda durante la operación.
- El montaje permite un fácil mantenimiento por los pocos componentes desmontables, de fácil consecución y por la poca herramienta a utilizar.
- El Molino de anillos da garantías y confiabilidad en los resultados, además de ofrecer una gran seguridad a los operarios que lo manejen.

- Se tiene la satisfacción de ofrecer a la comunidad científica, una máquina pionera en el análisis de los minerales extraídos para la identificación de su composición y que su ejecución implicó a su autor un gran trabajo de diseño, para obtener un proyecto que cumplió con todos sus objetivos propuestos.

BIBLIOGRAFÍA

CAPUZ, Salvador. Introducción al Proceso de Producción, Ingeniería Concurrente para el Diseño de Productos. Editorial Alfa-Omega. Impreso en México 2001.

DIETER, George E. Mechanical Metallurgy, 2' edition, McGraw-Hill, (1976), 395p.

FAIRES, Virgil Moring. Diseño de Elementos de Máquina. Editorial Montaner y Simón S.A. Impreso en España 1970.

GROZA J. R., GIBELING, J.C. "Principles of Particle Selection for Dispersion-Strengthened Copper". Materials Science and Engineering, Vol A 171, 1993, 115-127p.

HIBBELER, R.C. Mecánica de Materiales. Editorial Prentice may. Tercera Edición. Impreso en México 1997.

McGILL, David J, KING, Wilton W. Estática, Mecánica para Ingeniería y sus Aplicaciones. Grupo Editorial Iberoamérica. Impreso en México 1995.

PARADA, Alfredo. El Proceso de Diseño en Ingeniería. Publicaciones la Factoria, B/manga.

ROLDÁN, José. Formulas y Datos Prácticos para Mecánicos. Editorial Paraninfo. España 1984.

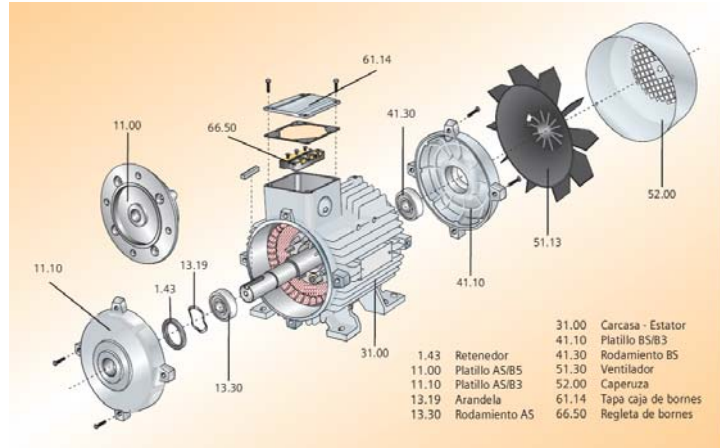
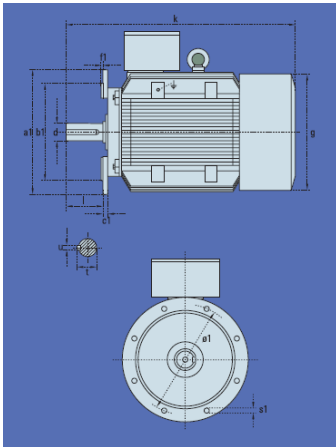
TROJAN, Flinn. Materiales de Ingeniería y sus aplicaciones. 3ª edición, McGraw-Hill. 1989, 83p.

VILA PASTOR, Carlos. Diseño para Fabricación y Ensamblaje. Memorias Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica. Barranquilla 4-7 de Junio de 2002

ANEXO 1

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL MOTOR ELÉCTRICO

Tipo	HP	F.S.	I - 220 Amp	I - 440 Amp	rpm	η	Torque N*m	Momento de inercia Kg * m2	Peso Kg
IM B5	3/4	1.15	3.3	1.65	1075	62	4.97	0.0015	8.5



ANEXO 2

PROPIEDADES DEL ACERO INOXIDABLE - AISI 410 FE/CR12.5

Análisis Químico				Denominación		
C	Cr	Mn	S	AISI	DIN	W.Nr.
0.10	13.00	1.00	1.00	410	X12 Cr 13	1.4006

Propiedades Eléctricas	Resistividad Eléctrica (μOhmcm)	56-72
Propiedades Físicas	Densidad (g cm^{-3})	7,73
	Punto de Fusión (C)	1480-1530
Propiedades Mecánicas	Alargamiento (%)	<38
	Dureza Brinell	140-175
	Impacto Izod (J m^{-1})	10-136
	Módulo de Elasticidad (GPa)	190-210
	Resistencia a la Tracción (MPa)	480-1500
Propiedades Térmicas		
	Coeficiente de Expansión Térmica @20-100C ($\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$)	10-12
	Conductividad Térmica a 23 °C ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	18-24
	Temperatura Máxima de Utilización al Aire (°C)	750

ANEXO 3

PROPIEDADES DE LA LAMINA HOT ROLLED

APLICACIONES	ASTM	DIN 17100
Estructuras en General	A-36	ST 33-1.2

PROPIEDADES MECANICAS			
Resistencia a la Tracción	Límite Elástico	Alargamiento % 200mm 50mm	
41-56kg/mm ²	23-25kg/mm ²	20	23

COMPOSICION QUIMICA				
C	Mn	Si	Sm'ax	Pm'ax
0.29 máx	0.8-1.2	0,2	0,05	0,05

Espesor (mm)	N° Calibre	Kg. x m ²
3.17	1/8	25.00
4.76	3/16	37.88
6.35	1/4	50.00
7.94	5/16	64.80

ANEXO 4

PROPIEDADES QUIMICAS DEL ACERO SAE - AISI 1070

COMPOSICIÓN QUIMICA			
C	Mn	P	S
0.65 - 0.75	0.60 - 0.90	0.04 max	0.05 max

PROPIEDADES MECANICAS	
Densidad *1000 Kg/m ³	7.7 - 8.03
Relación de Poisson	0.27 - 0.30
Modulo de Elasticidad GPa	190 - 210
Esfuerzo de Tensión Mpa	640
Esfuerzo de Fluencia Mpa	495
% Reducción de Área	45
Dureza HB	192
Coefficiente de Expansión Térmica 10 ⁻⁶ /°C	11.8