

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

“Diseño de una Trituradora de Martillos para Reciclar Botellas”

**TESIS DE GRADO**

**Previo a la obtención del Título de:**

**INGENIERO MECÁNICO**

**Presentada por:**

**Luis Andrés Abarca Carriel**

**GUAYAQUIL-ECUADOR.**

**AÑO: 2009**

## **AGRADECIMIENTO**

A mi familia, por su apoyo constante.

A la empresa O.I. por permitirme conocer sus procesos.

Al Ing. Ernesto Martínez, director de tesis, por su dirección en este trabajo.

Al Sr. Gustavo Aveiga por las facilidades prestadas.

A las personas que con su preocupación me ayudaron a salir adelante en este trabajo.

# DEDICATORIA

A los lectores.

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



---

Ing. Francisco Andrade S.  
DECANO DE LA FIMCP  
PRESIDENTE



---

Ing. Ernesto Martínez L.  
DIRECTOR DE TESIS



CIB-ESPOL



---

Ing. Jorge Duque R.  
VOCAL

## DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).



---

Luis Andrés Abarca Carriel

## **RESUMEN.**

En los actuales momentos en todo el planeta se buscan formas de cómo proteger el medio ambiente que está siendo seriamente afectado por la contaminación excesiva y el uso indiscriminado de materiales no renovables. Una de las maneras de protegerlo y consumir menos insumos es por medio del reciclaje. Reciclando materiales se consume menos energía, menos combustibles, menores cantidades de agua y, se evita las poluciones en el aire.

Es de conocimiento general que el proceso de reciclaje en cualquier material en el Ecuador no se lo realiza completamente, aquí se busca dentro de la basura los objetos que son reciclables para venderlos y que sean fundidos, o en otros casos exportarlos, ejemplo metales como el cobre, aluminio, son exportados y el hierro y cierta clase de aceros, son vendidos a las empresas fundidoras, para que ellas fabriquen acero de construcción.

En nuestra ciudad, la actividad del reciclaje ha venido creciendo en los últimos años. En Guayaquil, el consumo de vidrio para la fabricación de botellas es muy elevado, en zonas de diversión se encuentran contenedores para depositar envases de cualquier material para que sean reciclados. Muchos materiales pueden ser reciclados, pero solo uno puede serlo infinidad de veces sin llegar a perder sus cualidades y ese es el vidrio.

Para desarrollar el tema de esta tesis, fue necesario acudir a la empresa líder en el mercado de la fabricación de envases en el país, que es O.I.; en dicha empresa el problema fundamental que se posee es la adquisición de las botellas trituradas, ya que en el proceso de fundición se utiliza el vidrio triturado llamado "casco" con la finalidad de mezclarlo con los demás compuestos y ahorrar materiales, agua y energía. Es por esto que se ha decidido diseñar una máquina trituradora de botellas cuyo producto final este listo para ser reciclado, con una ventaja adicional, que esta máquina sea construida en el Ecuador, y que sea más accesible con respecto a una máquina importada, siendo nuestro mercado las empresas que proveen del servicio a O.I.

Conociendo de antemano los distintos modelos de trituradoras existentes, mostrando ventajas y desventajas de cada una, se selecciona al modelo que será base del diseño, tema fundamental de esta tesis. A continuación se presenta el triturador con una breve introducción de sus componentes y funcionamiento, luego se prosigue con el análisis estructural utilizando el programa SAP 2000. Finalmente se muestran las conclusiones de esta tesis, así como sus recomendaciones, esperando que puedan servir para futuros trabajos en el área del reciclaje, así como en el campo del vidrio que es muy extenso.

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	IV
ABREVIATURAS.....	VII
SIMBOLOGÍA.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
ÍNDICE DE PLANOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	1

### CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES SOBRE EL VIDRIO.....	4
1.1. Historia del vidrio.....	4
1.1.1. Evolución del vidrio.....	6
1.1.2. Fabricación en la antigüedad.....	9
1.1.3. El vidrio en los siglos XIX y XX.....	10
1.2. Definición del vidrio.....	13
1.3. Composición Físico-Química.....	14
1.3.1. Estructura Atómica.....	15

1.3.2. Óxidos formadores de vidrio.....	16
1.4. Propiedades Físicas.....	19
1.5. Propiedades Químicas.....	23
1.6. Propiedades Mecánicas.....	26
1.7. Propiedades Térmicas.....	30
1.8. Propiedades Ópticas.....	31
1.9. Propiedades Eléctricas.....	32

## CAPÍTULO 2

2. RECICLAJE Y FABRICACIÓN DE BOTELLAS DE VIDRIO.....	33
2.1. Definición de reciclaje.....	33
2.2. La Química de las botellas de vidrio.....	36
2.3. Beneficios del reciclaje.....	41
2.4. Proceso de reciclaje de vidrio.....	45
2.4.1. Recepción de materias primas.....	47
2.4.2. Preparación de las mezclas.....	52
2.4.3. Formación del envase.....	58
2.4.4. Proceso soplo y soplo.....	60
2.4.5. Proceso de prensa y soplo.....	61
2.4.6. Recocido del envase.....	63
2.4.7. Inspección del envase formado.....	64
2.4.8. Empaque, almacenamiento y despacho.....	65

### CAPÍTULO 3

3. EQUIPOS TRITURADORES DE VIDRIO.....	67
3.1. Molino de martillos.....	71
3.2. Molino de tambor rotatorio o de rodillos.....	78
3.3. Trituradora vertical.....	83
3.4. Trituradora de mandíbula o quijada.....	85
3.5. Disco Rotativos y barras rompedoras.....	87

### CAPÍTULO 4

4. DISEÑO DE TRITURADOR DE VIDRIO DE UNA TONELADA DE CAPACIDAD HORA.....	89
4.1. Diseño de forma.....	90
4.2. Análisis Estructural mediante uso SAP 2000.....	95

### CAPTULO 5.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	158
--	-----

### APÉNDICES

### BIBLIOGRAFÍA

## ABREVIATURAS

A.C.	Antes de Cristo
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Standard Testing of and Materials
D.C.	Después de Cristo.
I.S.	Sección Independiente
P.S.	Prensa-Soplo
pulg.	Pulgada
R <sub>2</sub> O	
RO	
rpm	Revoluciones por minuto
S.S.	Soplo-Soplo
T.E.H.	Trituradora de eje horizontal
T.E.V.	Trituradora de eje vertical

## SIMBOLOGIA

A	Area
"	Volumen
a	Ancho
Ca	Calcio
cal	Calorías
cm	centímetro
E	Energía potencial
e	espesor
F	Fuerza
g	Gravedad
gr	gramos
h	Altura
hr	Horas
lo	Inercia
J	Momento polar de inercia
Kg,	Kilogramos
l	largo
M	Momento Flector
m	Metro
m1	masa
mm	milímetro
Mo	Momentos de Inercia
Mpa	Mega Pascales
N	Newtons
r	Radio de la sección transversal Distancia desde el centro del eje principal hasta el centroide del
R	martillo
rad	Radianes

Se	
sen	Función seno
sg	Segundos
Ssy	Límite de Fluencia Elástico al cortante
Sut	Resistencia máxima a la tensión
T	Torque
t	Tiempo
Tm	Toneladas métricas
V	Cortante
v	Velocidad lineal
W	Peso
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxido de Aluminio
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxido Bórico
CaO	Oxido de Calcio
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxido Férrico
K <sub>2</sub> O	Oxido de Potasio
MgO	Oxido de Magnesio
Na <sub>2</sub> O	Oxido de Sodio
SiO <sub>4</sub>	Oxido Silicico
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de Silicio
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Carbonato de Sodio
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de Calcio
π	Pi
ω	Velocidad angular
° C	Grados Centígrados
φ	Diámetro
ρ	Densidad
μ	Coefficiente de Fricción
τ	Esfuerzo Cortante
σ	Esfuerzo de Flexión
α	Aceleración angular
θ	Angulo de inclinación

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Estructura cristalina (a) y vítrea (b) de silicato. ....	16
Figura 1.2	Gráfica de aumento y disminución de densidad de acuerdo al incremento en porcentajes de sustancias componentes.....	24
Figura 1.3	Variación de la viscosidad (en poises) a los 1000 °C de acuerdo a la composición.....	25
Figura 1.4	Gráfica de porcentajes de compresibilidad dependiente de temperaturas en los diversos tipos de vidrios.....	28
Figura 1.5	Vidrio sometido a flexión.....	29
Figura 2.1	Ciclo del reciclaje.....	42
Figura 2.2	Botellas transparentes ubicadas en la playa de almacenamiento.....	47
Figura 2.3	Botellas de color verde ubicadas en la playa de Almacenamiento.....	48
Figura 2.4	Tolva de alimentación de botellas para ser trituradas.....	49
Figura 2.5	Bodega de almacenamiento de materia prima.....	52
Figura 2.6	Pesaje de componentes.....	53
Figura 2.7	Mezclador de componentes.....	54
Figura 2.8	Horno de materiales refractarios.....	55
Figura 2.9	Horno: Entradas de aire.....	56
Figura 2.10	Máquinas de sección independiente para la formación de botellas.....	58
Figura 2.11	Vidrio para formar en botellas.....	59
Figura 2.12	Formación de las botellas.....	62
Figura 2.13	Recocido del envase.....	63
Figura 2.14	Inspección de la botella.....	64
Figura 2.15	Botellas con fallas que son retiradas.....	65
Figura 2.16	Cuadro esquemático de una fábrica de botellas de vidrio... ..	66
Figura 3.1	Esquema general de un molino de martillos.....	73
Figura 3.2	Molino de rodillos.....	81
Figura 3.3	Trituradora de eje vertical.....	85
Figura 3.4	Tritura de quijada o jaw crusher.....	86
Figura 4.1	Elementos que forman un molino de martillos.....	90
Figura 4.2	Diseño de forma de la trituradora de una tonelada de capacidad hora.....	91

Figura 4.3	Esquema de la trituración de la botella.....	97
Figura 4.4	Martillos usados en molinos, y de distintas formas de acuerdo al material a triturar.....	101
Figura 4.5	Modelo del sistema triturador: ejes secundarios, eje principal, discos de apoyo.....	117
Figura 4.6	Análisis estructural hecho por SAP 2000.....	120
Figura 4.7	Condiciones de apoyo.....	121
Figura 4.8	Cargas aplicadas en el análisis estructural.....	122
Figura 4.9	Muestra de los factores de la AISIC para diseño estructural.....	123
Figura 4.10	Diagrama de momento cortante y momento flector para eje secundario de 4 martillos.....	124
Figura 4.11	Diagrama de momento cortante y momento flector para eje secundario de 5 martillos.....	128
Figura 4.12	Esquema de distribución de los momentos flectores del eje principal de la trituradora.....	132
Figura 4.13	Diagrama de momento cortante y momento flector del eje principal de la trituradora.....	133
Figura 4.14	Gráfica de esfuerzos de Von Misses .....	137
Figura 4.15	Deformación del modelo ante la segunda combinación de cargas (deformación en mm. y rad.).....	137

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Elementos que dan coloración al vidrio.....	20
Tabla 2	Consumo de materia prima para la fabricación de vidrio en los Estados Unidos.....	38
Tabla 3	Composición química en botellas de vidrio.....	39
Tabla 4	Composición del cullet post-consumidor.....	41
Tabla 5	Lista de materiales: Propiedades de sección.....	119
Tabla 6	Tamaños de cuñas de acuerdo a los diámetros a usar, dimensiones en pulgadas.....	142
Tabla 7	Factores de servicio para bandas en V.....	149
Tabla 8	Cantidades, descripción, dimensiones y costo de los componentes del molino de martillos.....	156

## **INDICE DE PLANOS.**

Plano 1	Ensamble de molino de martillos.
Plano 2	Plano de discos porta-ejes.
Plano 3	Plano de martillos.
Plano 4	Plano del eje principal.
Plano 5	Plano de eje secundario.

## **INTRODUCCION**

En la actualidad en nuestro planeta se han presentado varios problemas, el más inmediato es la contaminación, y a largo plazo se estima que será la escasez de ciertos elementos como el agua dulce, petróleo y carbón, para enumerar los más importantes, pero también de otros materiales.

Por este motivo la industria del reciclaje se está expandiendo a pasos agigantados. Dicho proceso consiste en la refabricación de productos en base a sus compuestos originales, dos ejemplos muy importantes lo constituyen las botellas de vidrio y el papel.

El vidrio en su momento fue desplazado por el plástico. En muchos países se ha utilizado al plástico como medio de envasar productos muy diversos, desde fármacos hasta bebidas, pasando por productos químicos como

fertilizantes hasta productos dentales, pero como todos sabemos el plástico es un derivado del petróleo, y con el alto costo de éste, se han incrementado considerablemente los costos cualquier producto plástico.

Los costos son considerablemente beneficiosos a favor del vidrio. Cada botella reciclada cuesta aproximadamente 3 centavos, lo que representa cerca de la décima parte o incluso menos del precio total del producto envasado, lo que no sucede con otros envases como el plástico, en donde el costo del envase está entre 6 centavos a 1 dólar dependiendo del producto envasado.

El campo del reciclaje del vidrio abarca un amplio espectro que comprende desde la recolección de la materia prima, hasta el embalaje y posterior distribución de los envases. Debido a la complejidad de dicho proceso en toda su línea, se ha escogido el estudio de una parte esencial dentro de su producción, la cual es la trituración de la botella.

En la primera parte de este estudio se analiza concepto y generalidades del vidrio, desde la antigüedad hasta la actualidad, pasando por su rústica fabricación, propiedades físicas, químicas, metálicas y demás hasta el moderno proceso de fabricación. Luego se analiza el reciclaje con sus diversos tipos y beneficios, así como el proceso de fabricación de botellas de vidrio, lo que conduce posteriormente a seleccionar la máquina que sea la apropiada para el trabajo deseado dentro de la amplia gama de éstas.

Finalmente, se utiliza el programa SAP 2000, para analizar el comportamiento del molino y ver sus posibles falencias, con la finalidad de corregirlas. La aplicación del programa SAP 2000 en el presente trabajo, brinda un panorama muy cercano a las condiciones de funcionamiento, por lo que se garantiza los resultados de dicho análisis en el estudio del molino.

# **CAPÍTULO 1**

## **1. GENERALIDADES SOBRE EL VIDRIO.**

### **1.1. Historia del vidrio.**

Desde la antigüedad, existen muchos escritos acerca del vidrio. Plinio el Viejo (23-79 d.C.), narró en su Historia Natural que el descubrimiento de ese material tuvo lugar en Siria, cuando unos mercaderes de natrón, probablemente en ruta hacia Egipto, preparaban su comida al lado del Río Belus, en Fenicia. Al no encontrar piedras para colocar sus ollas, pusieron trozos del natrón que llevaban como carga, y a la mañana siguiente vieron cómo las piedras se habían fundido y su reacción con la arena había producido un material brillante, vítreo, similar a una piedra artificial. Tal fue, en síntesis, el origen del vidrio.

El griego Heródoto (484-410 a.C.), considerado como el “Padre de la Historia”, relata la manera en que los etíopes embalsamaban a sus muertos para colocarlos en sarcófagos de vidrio. Eliano, escritor griego del siglo III, narra las condiciones en que Jerges, el hijo de Darío, descubrió el cuerpo de un jefe asirio en un ataúd de vidrio.

Entre los acontecimientos antiguos antes mencionados, resalta por su importancia Plinio el Viejo, quien escribió la Historia Natural en el primer siglo después de Cristo.

En ella se ofrecen buenas evidencias acerca de la región geográfica en la que pudo haber sido descubierto el vidrio y sobre la manera accidental en que tal episodio ocurrió. No obstante, los detalles del descubrimiento narrado por Plinio son poco confiables, ya que para lograr el punto de fusión del natrón que dio por resultado la formación del vidrio, hubiera sido necesaria una temperatura aproximada a los 1300° C o 1500° C., mientras que una fogata al aire libre puede alcanzar, cuando mucho, los 600° C.

La mayoría de los investigadores asegura que el vidrio tuvo su origen en Mesopotamia, apoyándose para el caso en los vestigios encontrados en sitios como Tell al Rimah y Aqar Quf, que fueron elaborados, aproximadamente, 3500 años antes de Cristo.

No obstante, los primeros trabajos de vidrio se hicieron en Egipto, considerando la existencia de unas cuentas de esteatita, mineral compuesto de filosilicato, que pertenecen a la civilización predinástica Badarian, situada cronológicamente entre los 5500 y los 3500 años antes de Cristo y probablemente fueron fabricadas en el lugar en que se encontraron, ya que en zonas específicas del Vale del Nilo existía la materia prima necesaria para su elaboración.

#### **1.1.1. Evolución del vidrio.**

Para los estudios de la evolución del vidrio, tenemos que remontarnos al Medio Oriente, hacia el cuarto o quinto milenio antes de Cristo, y al área geográfica que va desde Egipto hasta la cuenca mesopotámica, donde aparecieron por primera vez las sociedades estables. Allí, a raíz del descubrimiento de las técnicas de utilización de los metales, se imitaron rápidamente en cerámica objetos similares a los elaborados en metal.

Este hecho derivó en el descubrimiento de barnices alcalinos, que junto con la frita de plomo fueron las sustancias más empleadas para volver impermeables los recipientes de arcilla. La producción más antigua de este tipo de vasos o recipientes, tuvo lugar en Egipto. [1].

Del perfeccionamiento en los trabajos de alfarería se derivó el gusto por decorar los ladrillos y confeccionar artesanías de composición vítrea (conocida como faiensa egipcia), cuya técnica fue desarrollada en Egipto. [1].

El vidrio surgió posteriormente como resultado de las experiencias adquiridas con el procesamiento de los metales, ya que se requerían, al igual que con el vidrio, la construcción de hornos capaces de alcanzar altas temperaturas y la experimentación con fórmulas minerales.

Las capas de vidrio que cubrían las joyas, amuletos de composición vítrea, vasos de cerámica y ladrillos, son las manifestaciones más antiguas que existen sobre el aprovechamiento del vidrio.

Los principales yacimientos provechosos para la elaboración del vidrio se localizan en los desiertos occidental, oriental y área meridional de la primera catarata del Nilo, al sur de Nubia y Sudán. Egipto es el que cuenta con los más grandes yacimientos geológicos de materia prima para la elaboración del vidrio, sobre todo de arena, que por su alto contenido de calcio es muy apreciada en esos procedimientos. [1].

Posteriormente se creó la técnica del mosaico, en la que se fundían los elementos en secciones transversales que, una vez fundidos, podían cortarse en láminas y las superficies resultantes de esos cortes se fundían juntas en un molde para producir vasijas o placas.

Los primeros objetos de vidrio que se fabricaron fueron cuentas de collar, las vasijas huecas no aparecieron hasta el 1500 a.C. La fabricación del vidrio se extendió por las regiones de Egipto y Mesopotamia hasta el 1200 A.C. y posteriormente cesó casi por completo durante varios siglos.

Esta evolución valió para que Egipto produzca un vidrio claro, que contenía sílice pura (**su componente principal**); lo coloreaban de azul y verde. [1].

Después en el siglo IX a.C. Siria y Mesopotamia lograron ser centros productores de vidrio, y la industria se difundió por toda la región del Mediterráneo. Durante la época helenística Egipto se convirtió, en el principal proveedor de objetos de vidrio de las cortes reales. Sin embargo, fue en las costas fenicias donde se desarrolló el importante descubrimiento del vidrio soplado en el siglo I A.C. Aunque muchos historiadores citan que Roma fue la cuna de la industria vidriera hacia el año 20

D.C. con el descubrimiento del vidrio soplado. Igual para ésta tesis, esto NO está a discusión.

### **1.1.2. Fabricación en la antigüedad.**

El vidrio, fue un producto cercado por una aureola de misterio durante muchos siglos, por el desconocimiento de quienes fueron los primeros en fabricarlo. El hombre primitivo encontraba agradables los resultados de su fundición primitiva y todos sus requerimientos se concentraban a tres nociones: **aspecto, brillo y color.** [1].

El hombre primitivo, para fabricar objetos de vidrio fundía bloques macizos, los dejaba endurecer y luego los tallaba como piedra. Posteriormente descubrió que el vidrio se trabaja más fácilmente en estado líquido, mientras aún esta caliente.

En el siglo II los romanos conocían el vidrio translúcido y fabricaban algunos objetos como, espejos de cristal sobre metal y lupas que eran ampollas de vidrio rellenas de agua, pero antes del descubrimiento del vidrio soplado se utilizaban diferentes métodos para moldear y ornamentar los objetos de vidrio coloreado, tanto translúcidos como opacos. Algunos recipientes eran tallados en bloques macizos de cristal, otros se realizaban fundiendo el vidrio con métodos parecidos a los de la cerámica y la metalurgia, en

donde se utilizaban moldes para hacer incrustaciones, estatuillas y vasijas tales como jarras y cuencos [1].

Los fabricantes de vidrio mezclaban distintos productos inorgánicos, los sometía a la acción del fuego y obtenía vidrio, siempre obtenía vidrio, cualquiera que hubiera sido la cantidad de los componentes. La industria del vidrio es una de las más antiguas creadas por el hombre, apareció hace miles de años en la zona del Mediterráneo, a la par de dos grandes industrias como las de la cerámica y el metal.

Hay ejemplos de cristal romano con una elaborada decoración de hilos de vidrio y tallado. Los temas decorativos, pintados o sobreimpresos con pan de oro entre dos láminas de cristal blanco, en donde recreaban escenas religiosas o históricas. Los antiguos artesanos vidrieros adaptaron las técnicas de corte, tallado o grabado en piedra al vidrio logrando piezas de considerable belleza.

### **1.1.3. El vidrio en los siglos XIX y XX.**

El desarrollo del vidrio durante el siglo XIX se caracteriza por los rápidos avances tecnológicos de esta industria y por el redescubrimiento y adaptación de métodos antiguos. A partir de

1845 lograron gran popularidad los pisapapeles con decoración de mil flores semejante al vidrio de mosaico antiguo, y a finales del siglo XIX el cristal de roca del renacimiento sirvió de inspiración para una técnica de grabado y pulido.

A partir de la década de 1840 se popularizaron en todo tipo de piezas los diseños más sencillos, conocidos por vidrio prensado decorado. La producción de vidrio tallado era más costosa que la del vidrio prensado, aquélla decayó, pero hacia 1880 recobró parte de su antigua popularidad con la aparición de un elaborado tallado 'brillante', resultado de un gran virtuosismo técnico que explotaba las propiedades refractarias del vidrio. Hasta 1850 las piezas se moldeaban y decoraban por prensado con esquemas de complicados encajes que enturbiaban el cristal en el momento en que éste entraba en contacto con el molde frío. [1], [2].

En la zona de Bohemia también practicó otras técnicas, como la del cristal encajado, que copiaron las fábricas europeas y estadounidenses a Dominik Biermann artesano checo. Los avances químicos facilitaron el desarrollo de nuevos vidrios coloreados opacos semejantes a piedras semipreciosas. Inspirados por el resurgimiento de los métodos antiguos de trabajo del vidrio y estimulados por los logros de la nueva tecnología

química, los artesanos vidrieros comenzaron a crear hacia 1880 nuevos estilos artesanales que se denominaron vidrio artístico. Solían ser piezas nuevas con fines decorativos, producto de la reacción contra los objetos producidos en serie sus principales exponentes fueron Louis Comfort Tiffany en los Estados Unidos y Émile Gallé y la empresa Daum Frères (fundada en 1889) en Francia. Todos ellos producían cristales con formas naturalistas, líneas sinuosas, colores exóticos y superficies de inusitados efectos, como el cristal iridiscente *favrite* inventado por Tiffany.

Posteriormente a la I Guerra Mundial surgieron nuevos intereses en las texturas y formas decorativas, como queda reflejado en los diseños de René Lalique y Maurice Marinot. En la década de 1930 comenzaron a adquirir prestigio los cristales de plomo incoloros y de exquisita transparencia, por lo general con dibujos grabados, producidos por fábricas escandinavas y estadounidenses.

Con la década de 1960 se inició una nueva época en la elaboración del vidrio liderada por los estadounidenses Harvey Littleton y Dominick Labino. Los artesanos empezaron a experimentar con el vidrio como medio artístico en pequeños hornos instalados en sus estudios, y en la actualidad se

desarrollan técnicas decorativas y formas de escultura innovadoras en talleres de artistas de todo el mundo.

En las fábricas modernas el vidrio se produce en hornos continuos mecanizados, y se utilizan maquinas especiales de inyección de aire para fabricar objetos huecos. Pasaron muchos años en este estado de ignorancia de las leyes que rigen este producto. Cuando los químicos descubrieron las leyes de la estequiometría (las que definen los estados de la materia), el vidrio se escapaba de las mismas, o al menos su rigidez cuantitativa. Era lo mismo un puñado de arena, de soda o de cal que dos: después de un tiempo suficientemente largo todo se convertía en vidrio [1], [2].

## **1.2. Definición del vidrio.**

Desde la primera fabricación, y por los avances en el proceso de elaboración a través de los años, el vidrio ha tenido diversas definiciones. Una de las primeras definiciones calificó al vidrio como "la solución recíproca de óxidos inorgánicos en estado de fundición", [1] debido a su composición química.

Otra definición puede ser descrita de la siguiente manera: “Se trata de una sustancia dura, frágil, refringente y, al mismo tiempo, mala conductora del calor y la electricidad”.

Desde que se ha comenzado a estudiar tecnológicamente el vidrio, se ha tratado de dar una definición que pudiera precisar lo más claramente posible qué es el vidrio, pero hasta el momento ninguna es enteramente satisfactoria.

Sin embargo sabemos que los vidrios son materiales cerámicos no cristalinos; se denominan como materiales *amorfos* (desordenados o poco ordenados), inorgánicos, de fusión que se ha enfriado a una condición rígida sin cristalizarse. El vidrio es una materia inerte compuesta principalmente de silicatos, es duro y resistente al desgaste, a la corrosión y a la compresión.

Es por eso que la A.S.T.M. (American Standard Testing Materials), basándose en las observaciones anteriormente mencionadas, realizó la siguiente definición del vidrio así: **“El vidrio es un producto inorgánico de fusión, enfriado hasta llegar a la condición de rigidez sin cristalización”**. [2]. Esta definición es aceptada comúnmente.

### **1.3. Composición Físico-Química.**

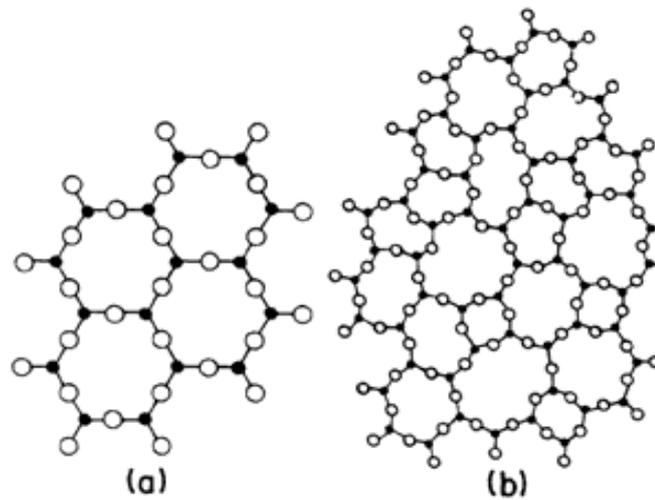
Las materias primas del vidrio se encuentran en la naturaleza en mucha proporción, pues como anteriormente se mencionó, es el resultado del desgaste con el tiempo de la tierra.

Anteriormente se sabía que el principal componente en la formación del vidrio eran solamente las arcillas, a medida que se avanzó en conocimientos y en tecnología se fueron implementando nuevos elementos a su fabricación, obteniendo así diferentes tipos.

En la actualidad muchos materiales desempeñan un papel importante, pero el **CALCIO (Ca)** es un compuesto **importantísimo** en la construcción del vidrio, porque sin el calcio el vidrio sería soluble hasta en el agua. El tono verdoso del vidrio antiguo se debe a las impurezas de hierro en la arena. Los vidrios modernos incorporan otros ingredientes para mejorar el color y algunas de sus propiedades, por ejemplo, la resistencia al calor, su textura, propiedades físico-químicas y las propiedades mecánicas.

### **1.3.1. Estructura Atómica.**

Las estructuras vítreas se producen al unirse los tetraedros de sílice u otros grupos iónicos, para producir una estructura reticular no cristalina, pero sólida.



**FIGURA 1.1 ESTRUCTURA CRISTALINA (A) Y VÍTREA (B) DE SILICATO..**

FUENTE: Química del Vidrio Werner Vogel, 2da. Edición Editorial Springer-Verlag, 1994.

### 1.3.2. Óxidos formadores de vidrio.

Los tetraedros SiO<sub>4</sub> se encuentran fusionados compartiendo vértices en una disposición regular produciendo un orden de largo alcance. En un vidrio corriente de sílice los tetraedros están unidos por vértices formando una red dispersa sin orden de largo alcance.

El óxido de boro  $B_2O_3$ , es un óxido formador de vidrio y forma sub-unidades que son triángulos planos con el átomo de boro ligeramente fuera del plano de los átomos de oxígeno. No obstante, en los vidrios de boro silicato a los que han adicionado óxidos alcalinos y alcalinotérreos, los triángulos de óxido de  $BO_3^-$  pueden pasar a tetraedros  $BO_4^-$ , en los que los cationes alcalinos y alcalinotérreos proporcionan la electro neutralidad necesaria. El óxido de boro es un aditivo importante para muchos tipos de vidrios comerciales, como vidrios de boro silicato y aluminio boro silicato. El óxido aluminico también es un óxido formador.

Entonces el vidrio es una sustancia amorfa fabricada sobre todo a partir de sílice. Además el vidrio se forma con diferentes tipos de sales. El componente más importante es el dióxido de silicio ( $SiO_2$ ) en forma de arena. Para fabricar el vidrio común se añaden carbonato sódico ( $Na_2CO_3$ ) y piedra caliza (carbonato de calcio) ( $CaCO_3$ ) más boratos y ó fosfatos.

Estos componentes son molidos y mezclados, para posteriormente calcinarlos eliminando el agua y el anhídrido carbónico. Después pasan al crisol de tierra refractaria donde se funden a temperaturas superiores de 1.500 grados. La arena se encuentra en un 70% y es denominada vitrificante; la sosa, en un

18% ayuda a fundir, recibiendo el nombre de fundente; la caliza, en un 10%, actúa como estabilizante. El 2% restante lo componen otras sustancias como pueden ser plomo, boro, óxidos metálicos, que modifican las propiedades del vidrio así como su aspecto.

### **Composición.**

El vidrio es un material duro y frágil, resultante de una mezcla compleja de tres componentes básicos:

- **Vitrificantes:** sílice, anhídrido bórico, etc.
- **Fundentes:** carbonato de sosa, álcalis en general y otros.
- **Estabilizantes:** cal.

Si bien estos componentes son sólidos de estructura cristalina, no ocurre lo mismo con la materia vítrea que se obtiene al solidificarse la mezcla, ya que ésta es desde el punto de vista físico, un líquido cuya dureza debe interpretarse como la consecuencia de una extraordinaria viscosidad.

Normalmente es transparente porque, al igual que el agua, tiene una estructura molecular que permite el paso de los rayos luminosos entre los átomos dispuestos irregularmente. Ciertos aditivos (óxidos de hierro, níquel, cobalto, etc.) permiten obtener los vidrios coloreados que se detalla mas adelante. La

composición del vidrio básicamente no ha variado desde la antigüedad, siendo los aditivos especiales los que les dan sus características específicas.

#### **1.4. Propiedades Físicas.**

Las propiedades físicas del vidrio son aquellas que pueden ser apreciadas por nuestros sentidos, tales como el color y textura, que son las principales y que no necesitan ningún tipo de prueba para demostrar su condición. Sin embargo si se necesitan pruebas para dar con el color y la textura deseada en un vidrio.

##### **Color.**

Los colores que puede adquirir el vidrio son añadidos por medio de las impurezas de metales de transición a las mezclas utilizadas. Este tipo de mezclas no afectan para nada las demás propiedades del vidrio. En la antigüedad, el vidrio era coloreado de esa forma, colocando madera natural en forma de aserrín que contienen arcillas o también por la contaminación de los crisoles en donde se fundían.

El color de los vidrios resulta de tres factores: El estado de oxidación del vidrio, de la cantidad específica de colorante utilizado, y por la presencia de iones metálicos en su formación; ésta última sucede de forma compartida [2].

La oxidación del vidrio es promovida por la adición del carbón y el grado de oxidación es medida de forma arbitraria con una escala, conocida como números de carbón. El vidrio claro tiene carbón número 0, el vidrio verde oscuro tiene número de carbón 28, y el vidrio de color ámbar o café tiene número de carbón 52.

Las investigaciones en los últimos 50 años acerca de cómo colorear el vidrio han sido muy importantes, ya que no se han perseguido sólo fines artísticos y ornamentales, sino también científicos, como por ejemplo, la elaboración de filtros y lentes de color para los sistemas de señales de transportes, que exigen un control muy riguroso de la transmisión de la luz a través del vidrio en todo el espectro, como también en el caso de vidrios de botellas de algún producto, ya que la luz es reflejada o atraída por los colores.

**TABLA 1**

**ELEMENTOS QUE DAN COLORACIÓN AL VIDRIO.**

<b>ELEMENTO</b>	<b>COLOR</b>
Óxido de cobalto	Rojo azulado
Óxido ferroso	Azul
Óxido férrico	Amarillo
Óxido de cromo	Verde grisáceo
Trióxido de cromo	Amarillo
Óxido de cobre	Verde azulado
Óxido de uranio	Verde amarillento

	fosforescente
Selenio elemental	Rosa
Sulfuro de cadmio coloidal	Amarillo

FUENTE: Química del Vidrio Werner Vogel, 2da. Edición Editorial Springer-Verlag, 1994.

Pero no sólo la adición de carbón puede de dar color al vidrio, existe otra manera de darlo y es por medio de los **colores de solución**, donde el color se produce porque el óxido metálico presente absorbe la luz de la región visible del espectro, y deja pasar la que corresponde a algunos colores, que son los que se ven. De esta forma el cobre absorbe la luz con longitudes de onda que pertenecen a todos los colores, menos la vinculada al color rojo rubí, cuando está en estado de oxidación +1, o al verde, cuando su estado de oxidación es +2. Por eso un vidrio que contenga  $\text{Cu}^{+1}$  se verá rojo rubí, y con  $\text{Cu}^{+2}$  será verde. El cobalto siempre absorbe la luz con todas las longitudes de onda menos la que produce el color azul, y así, de la misma manera, el vanadio, el manganeso, el titanio, el cromo, el hierro y el níquel producen sus propios colores.

La segunda forma de darle color es por medio de una dispersión coloidal. Ésta consiste en partículas submicroscópicas suspendidas en el vidrio, que reflectan o dispersan selectivamente los rayos de luz de un color. Por ejemplo, el selenio combinado con sulfuro de cadmio produce

partículas en el vidrio que dispersan toda la luz, menos la de color rojo. Aquí el color depende de la concentración y el tamaño de las partículas, no tanto del elemento por el que están formadas. El color rubí se puede producir con oro y cobre en su estado elemental, o por seleniuros y sulfuros en solución.

### **Textura.**

La superficie de los vidrios puede variar en cuestiones de brillo, esto depende del proceso de fundido en el que se haya quedado. Un vidrio completamente fundido presenta un brillo, porque el vidrio se nivela y aplana cuando se funde, formando una superficie extremadamente lisa, dicha homogeneidad es una muy buena característica del material pues lo hace mas fácil de limpiar.

Cuando un vidrio no se funde completamente en el proceso de cocción o en su defecto su viscosidad es todavía alta, la superficie resulta ser rugosa y por lo tanto con tendencia a mate; el vidrio mate es a la vez opaco por el defecto en la aspereza de su superficie haciendo que no haya transparencia.

El vidrio mate puede hacerse a propósito, si se somete al vidrio a un enfriado lento. Los vidrios mate son muy atractivos para usos artesanales, con la única desventaja que son difíciles de limpiar.

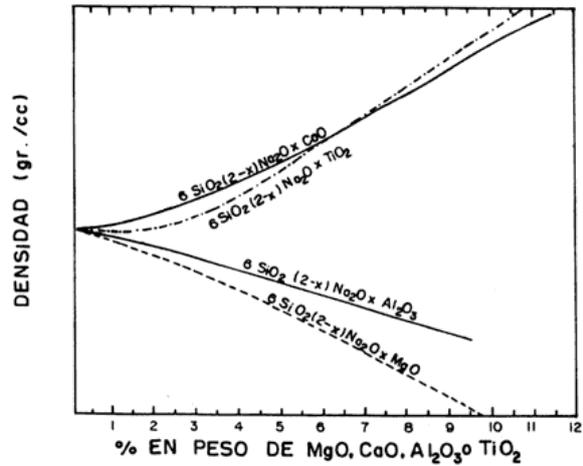
## **1.5. Propiedades Químicas.**

### **Densidad.**

Debido a los distintos tipos de vidrios que pueden ser fabricados, las densidades varían de acuerdo a la sustancia con la que sean complementados; normalmente un vidrio puede tener densidades relativas (con respecto al agua) de 2 a 8, lo cual significa que hay vidrios que pueden ser mas ligeros que el aluminio y vidrios que puedan ser mas pesados que el acero. Pero esto es en estado puro.

La densidad del vidrio a temperatura ambiente, va de 1.7 a 3.1 gr/cm<sup>3</sup> dependiendo del tipo del vidrio.

La densidad en un vidrio aumenta al incrementar la concentración de óxido de calcio y óxido de titanio. En cambio si se eleva la cantidad de alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) o de magnesia (MgO) la densidad disminuye.



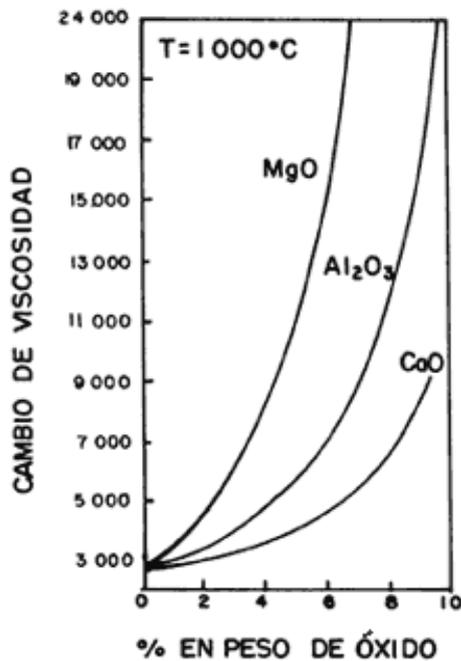
**FIGURA 1.2 GRÁFICA DE AUMENTOS Y DISMINUCIONES DE DENSIDAD DE ACUERDO AL INCREMENTO EN PORCENTAJES DE SUSTANCIAS COMPONENTES.**

FUENTE: Química del Vidrio Werner Vogel, 2da. Edición Editorial Springer-Verlag, 1994.

### Viscosidad.

La viscosidad es definida como la propiedad de los fluidos que caracteriza su resistencia a fluir, debida al rozamiento entre sus moléculas; generalmente un material viscoso es aquel que es muy denso y pegajoso.

La viscosidad en materia de vidrios es muy importante porque esta determinará la velocidad de fusión.



**FIGURA 1.3 VARIACIÓN DE LA VISCOSIDAD (EN POISES) A LOS 1000 °C, DE ACUERDO A LA COMPOSICIÓN.**

**FUENTE:** Química del Vidrio Werner Vogel, 2da. Edición Editorial Springer-Verlag, 1994.

La viscosidad es una propiedad de los líquidos, lo cual parecerá confuso para el estudio del vidrio, pero la realidad es que un vidrio es realmente un líquido sobre enfriado, lo cual significa es un líquido que llega a mayores temperaturas que la de solidificación. La viscosidad va variando dependiendo de los componentes del vidrio.

Para lograr una mayor dureza, la viscosidad debe ser invariable, que no baje ni suba, así sus moléculas tienen una atracción fija y por lo tanto dureza.

## **Corrosión.**

El vidrio tiene como característica muy importante la resistencia a la corrosión, en el medio ambiente son muy resistentes y no desisten ante el desgaste, he ahí por lo cual los vidrios son utilizados incluso para los experimentos químicos. Aunque su resistencia a la corrosión es muy buena no quiere decir que sea indestructible ante la corrosión, existen cuatro sustancias que logran esta excepción [2].

1. Ácido Hidrofluorídrico.
2. Ácido fosfórico de alta concentración.
3. Concentraciones alcalinas a altas temperaturas.
4. Agua "super calentada".

## **1.6. Propiedades Mecánicas.**

El vidrio tiene propiedades mecánicas que lo asemejan, por así decirlo, a los sólidos cristalinos. No es, por lo tanto, dúctil ni maleable. No sufre deformación permanente por acción de un esfuerzo, sino que alcanzado el límite de resistencia se produce su fractura. En líneas generales podemos decir que la resistencia intrínseca del vidrio es sumamente elevada, comparable a la del acero. Se ha determinado en finas fibras

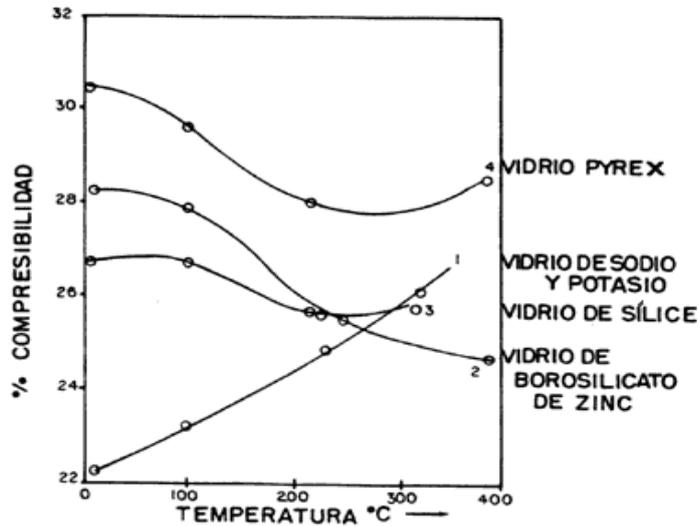
de vidrio recién fabricadas tensiones de roturas del orden de 1'000.000 de libras por pulgada cuadrada.

### **Torsión.**

La resistencia a la torsión de un material se define como su capacidad para oponerse a la aplicación de una fuerza que le provoque un giro o doblez en su sección transversal. Los vidrios en su estado sólido no tienen resistencia a la torsión, en cambio en su estado fundido son como una pasta que acepta un grado de torsión que depende de los elementos que el sean adicionados.

### **Compresión.**

El vidrio tiene una resistencia a la compresión muy alta, su resistencia promedio es de 1000 MPa; lo que quiere decir que para romper un cubo de vidrio de 1 cm. por lado es necesaria una carga de aproximadamente 10 toneladas. La figura 1.4 indica los distintos porcentajes de compresibilidad para los distintos vidrios dependiendo de las temperaturas.



**FIGURA 1.4 GRÁFICA DE PORCENTAJES DE COMPRESIBILIDAD DEPENDIENTE DE TEMPERATURAS EN LOS DIVERSOS TIPOS DE VIDRIOS.**

FUENTE: Química del Vidrio Werner Vogel, 2da. Edición Editorial Springer-Verlag, 1994.

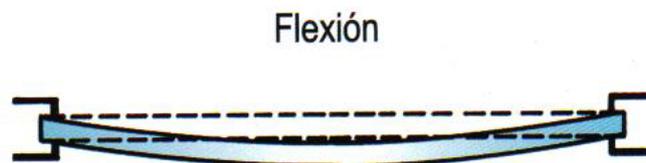
### Tensión.

Durante el proceso de fabricación del vidrio comercial, el vidrio va adquiriendo imperfecciones (grietas), no visibles, las cuales cuando se les aplica presión acumulan esfuerzo de tensión en dichos puntos, aumentando al doble la tensión aplicada. Los vidrios generalmente presentan una resistencia a la tensión entre  $3000$  y  $5500 \text{ N/cm}^2$ , aunque pueden llegar a sobrepasar los  $70000 \text{ N/cm}^2$  si el vidrio ha sido especialmente tratado [1], [2].

## **Flexión.**

La flexión de los vidrios es distinta para cada composición. Un vidrio sometido a flexión presenta en una de sus caras esfuerzos de compresión, y en la otra cara presenta esfuerzos de tensión (Ver figura 1.5).

La resistencia a la ruptura de flexión es casi de 40 Mpa (N/mm<sup>2</sup>) para un vidrio pulido y recocido de 120 a 200 Mpa (N/mm<sup>2</sup>) para un vidrio templado (según el espesor, forma de los bordes y tipos de esfuerzo aplicado). El elevado valor de la resistencia del vidrio templado se debe a que sus caras están situadas fuertemente comprimidas, gracias el tratamiento al que se le somete [1], [2].



**FIGURA 1.5 VIDRIO SOMETIDO A FLEXIÓN.**

Si quisiéramos medir la resistencia mecánica del vidrio, referida a su capacidad para soportar los impactos, podrían usarse algunos de los procedimientos empíricos conocidos, que consisten esencialmente en dejar caer un péndulo de un peso dado, desde alturas crecientes medidas, hasta que se rompa, o bien, en dejar caer el propio envase

desde alturas crecientes hasta romperlo, o recurrir al uso de sacudidores mecánicos, en condiciones determinadas, observando los efectos producidos.

### **1.7. Propiedades Térmicas.**

Ésta es una propiedad importante que se pretende en la mayoría de los vidrios, particularmente en aquellos que, como ocurre en muchos productos alimenticios y medicinales, deban soportar en su utilización cambios de temperatura relativamente bruscos, en especial, en los procesos de lavado, llenado en caliente, pasteurizado, esterilización, uso con comidas, etc.

Respecto de esta resistencia, cabe mencionar que la rotura no se produce por el cambio de temperatura en sí, sino por el esfuerzo mecánico de tracción provocado por el salto térmico. Éste no es más que un medio para producir esfuerzos de tracción debido a las contracciones desiguales producidas por el enfriamiento más o menos brusco del ensayo.

### **Calor Específico.**

Se define como el calor necesario para elevar una unidad de masa de un elemento, un grado de temperatura. En los vidrios el calor específico es de 0,150 cal/g °C aproximadamente.

### **Conductividad Térmica.**

La conductividad térmica del vidrio es de aproximadamente 0,002 cal/cm seg. °C. Cifra mucho más baja que la conductividad de los metales, no obstante el vidrio tiene una variable que no se aplica a los demás materiales, la radiación causada por el almacenamiento de luz infrarroja y ultravioleta, la cual es muy variable y puede provocar en ocasiones que el vidrio transmita el calor de manera mucho más efectiva que los metales, es por esto que esta característica es raramente tomada a consideración para el diseño.

## **1.8. Propiedades Ópticas.**

Las propiedades ópticas se pueden decir de manera concisa, que una parte de la luz es “refractada”, una parte es “absorbida”, y otra es “transmitida”.

Cada una de ellas llevará un porcentaje de la totalidad del rayo de luz que hizo contacto con el vidrio.

El prisma de color que se crea del otro lado del vidrio va del color rojo al color violeta, de los cuales los extremos dan lugar también a las luces no perceptibles por el ojo humano, infrarrojo y la ultravioleta.

Es el color de la luz que “sale” del vidrio la cual pasa a través de este, y todos los demás colores del prisma son absorbidos por el vidrio, claro que, son vidrios muy particulares los cuales logran solamente dejar pasar la luz ultravioleta o la infrarroja, pero gracias a la tecnología actual se han logrado las condiciones precisas para lograr esto.

### **1.9. Propiedades Eléctricas.**

En los vidrios se tienen dos propiedades eléctricas las cuales son: la constante dieléctrica y la resistividad eléctrica superficial.

La resistividad eléctrica superficial, es la resistencia que presenta el vidrio al paso de la corriente eléctrica, la cual es muy alta en este material,  $10^8$  veces más alta que en el cobre, lo cual hace al vidrio muy popular en el diseño de partes y máquinas eléctricas.

La constante dieléctrica es la capacidad de almacenar energía eléctrica, la *opacidad* y la constante dieléctrica están relacionadas de manera inversamente proporcional, siendo que mientras más transparente sea el vidrio, mayor será su capacidad para almacenar energía.

# **CAPÍTULO 2**

## **2. RECICLAJE Y FABRICACIÓN DE BOTELLAS DE VIDRIO.**

### **2.1. Definición de reciclaje.**

Para el público en general, reciclar es sinónimo de recolectar materiales para volverlos a usar, este proceso nos ayuda a resolver muchos de los problemas que han sido creados por la vida moderna.

Sin embargo, la recolección es sólo el principio de este proceso.

Reciclar es una serie de actividades que incluye la recolección de artículos usados, re-usados o sin usar, los cuales pueden ser considerados basura; distribuirlos y procesando estos artículos en materia prima y re-fabricarlos en nuevos artículos. En otras palabras significa usar algo nuevamente. Los periódicos pueden ser usados para hacer nuevos periódicos, latas de aluminio pueden ser usadas para

hacer nuevas latas, jarrones de vidrio pueden ser usados para hacer nuevos y así por el estilo.

La definición general nos indica que reciclar es **cualquier proceso donde materiales de desperdicio son recolectados y transformados en nuevos materiales que pueden ser utilizados o vendidos como nuevos productos o materias primas.** [3].

Pero ¿Por qué reciclar? La respuesta es sencilla, existen beneficios económicos y protección al medio ambiente. Para reciclar se necesita un 26% menos de energía que la producción original y reduce en un 20% la contaminación atmosférica, ya que se pueden salvar grandes cantidades de recursos naturales no renovables (árboles, agua, aire puro, etc.) cuando en los procesos de producción se utilizan materiales reciclados.

En el Ecuador la industria del reciclaje ha ido perdiendo campo, esto se debe a los elevados costos de las maquinarias, en energía eléctrica, en materia prima; con sólo decir que en las década 1980-1990 muchas empresas reciclaban papel de todo tipo algunas de ellas ya no existen y otras importan el papel desde Colombia o venden productos ya elaborados.

En el caso del vidrio sólo una empresa realiza el proceso completo (reciclar) botellas y es O.I., que posee una industria completa desde la adquisición de la materia prima hasta su almacenamiento en donde la inversión realizada es muy alta.

### **Tipos de reciclaje.**

El vidrio es un material que por sus características es fácilmente recuperable, o sea es 100% reciclable. Se lo puede fabricar nuevamente o se lo puede volver a utilizar una infinidad de veces. Teniendo en cuenta esto pues existen dos tipos de reciclaje: El reuso de un envase y la refabricación del envase.

El **reuso** de un envase consiste en utilizar nuevamente un envase, de cualquier tipo, para almacenar algún producto. Esta tarea se la realiza comúnmente en muchos hogares, fábricas, bares, restaurante, oficinas, etc. en cualquier parte del mundo. Es una manera muy económica y fácil de reciclar envases. Obviamente estamos indicando cualquier envase, pero se entiende que se reutiliza los más comunes como los de vidrio y los de plástico, dependiendo del compuesto que se vaya a almacenar.

La **refabricación**, como su palabra la indica, consiste en re-fabricar el envase de cualquier compuesto, para su utilización posterior en la

misma forma en que se venía utilizando o de forma distinta (en otra forma de envase) [3], [4]. La refabricación empieza desde la recolección de los envases y su posterior clasificación y limpieza, luego su destrucción o trituración para su transporte a los hornos en donde se funden en los moldes para dar forma al nuevo envase.

El vidrio de envases es el único vidrio que en la actualidad se recicla en grandes cantidades. El vidrio de ventanas, bombillos, espejos, platos de cerámica (los cuales son difíciles de separar), vasos, recipientes para hornos, vidrios de autos, el pirex y fibra de vidrio **NO** son reciclables junto con el vidrio de envases y a estos elementos se los considera altamente contaminantes en el proceso de reciclaje.

El vidrio limpio es de un valor inigualable debido a que se puede reciclar rápidamente dejando a un lado muchos pasos en el proceso. El vidrio que posea una mezcla de varios colores no posee mucho valor, y el vidrio roto es difícil de clasificar. En el desarrollo de esta tesis, nos concentraremos en el segundo tipo de reciclaje, la refabricación de las botellas.

## **2.2. La Química de las botellas de vidrio.**

Por algunos de los métodos de reuso o de reciclaje de envases de vidrio, la composición química de éste es crítica. La información

mostrada aquí es general, pero será de gran asistencia para aquellos usos en donde la composición química es muy importante.

En los Estados Unidos en el año 1995, la industria de envases de vidrio estimó tener ventas anuales por 5 billones de dólares, vendiendo envases producidos en 68 empresas manufactureras, en donde el 63% era envases transparentes, 25% ámbar, 10% verde y el 2% de color azul o de otra tonalidad.

El grupo empresarial Freedonia, estimó que las ventas de los envases de vidrio podrían mantenerse o caer ligeramente a partir del año 2000. La empresa más fuerte en Estados Unidos es la Owens-Illinois, con el 40% del mercado, seguida por Ball-Foster con el 26% del mercado seguida muy de cerca por la empresa Anchor con el 25%.

En diciembre del año 1997, en la edición de la revista Glass Industry, se publicó una conferencia llamada "Glass Problems" dictada por Paul Guttman, director de ventas de la empresa SILICA U.S. en donde muestra el consumo de los materiales para la fabricación del vidrio.

**TABLA 2**

**CONSUMO DE MATERIA PRIMA PARA LA FABRICACIÓN DE VIDRIO EN LOS ESTADOS UNIDOS.**

<b>MATERIAL</b>	<b>TONELADAS</b>
Arena	12 millones
Soda Ash	4 millones
Limestone y Dolomita	1.750 millones
Minerales de Aluminio	750 mil
Vidrio Puro	3 millones

**Reciclaje y Reuso de vidrio, John Reindl Gerente del departamento de trabajos públicos, Madison Wisconsin EE.UU., Abril 25 del 2003.**

En la revista en inglés llamada "The English Primer" en una edición del año 1972, publicada por la "Magazines for Industry Inc." se presentó un artículo hecho por el Dr. Harry Hoscher en donde presentó la composición química del vidrio transparente que se usa normalmente en botellas y en cualquier envase de vidrio.

La composición se muestra a continuación:

**TABLA 3**

**COMPOSICIÓN QUÍMICA EN BOTELLAS DE VIDRIO.**

<b>Material (Peso Básico)</b>	<b>Composición en %</b>
SiO <sub>2</sub>	71.5-73.5
Na <sub>2</sub> O	12.5-15.5
CaO	7.8-10.8
MgO	0.1-3.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.4-2.2
K <sub>2</sub> O	0.4-1.0
BaO	0.0-0.5
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0-0.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.4-0.5

**Reciclaje y Reuso de vidrio, John Reindl Gerente del departamento de trabajos públicos, Madison Wisconsin EE.UU., Abril 25 del 2003.**

Sin embargo como sucede con otros productos, la composición de envases de vidrio ha cambiado con el pasar de los años, y aún está cambiando.

En el artículo en inglés "How Composition Affects the Workability" editado en la revista Glass Industry de Julio de 1991, páginas 13-14,26 que pertenece a la firma "Anup Sircar of Evanite Fiber Corporation" indica que las empresas manufactureras están cambiando la composición química de las mezclas para ahorrar dinero en los costos de materia prima logrando beneficios en el proceso de fabricación.

Los estudios realizados por las empresas manufactureras indican que manteniendo el alto rango de  $\text{Na}_2\text{O}$  (soda ash) cerca del 14.5% los precios desde \$ 72 la tonelada a \$140 de los 10 años previos y un incremento en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  con precios desde \$ 25 a \$ 50 en el mismo período de tiempo, ellos ahorran dinero en la adquisición de la materia prima sin sacrificar la resistencia química o la durabilidad del vidrio, mientras en el mismo tiempo se incrementa el tiempo de enfriado, y también incrementa la velocidad relativa de las máquinas.

Otro cambio que está ocurriendo en la industria de vidrio es el incremento de las sales de litio. Este material mejora el proceso de fabricación de envases perfeccionando la fundición del vidrio, descendiendo la viscosidad, reduciendo la temperatura en la fundición.

La revista "The Glass Industry" tiene actualizado los suministros de materia prima en las ediciones del mes de diciembre de cada año.

Para el reciclaje del cullet (vidrio de desecho) en botellas de vidrio, los siguientes límites son puestos en la composición del cullet hecho por un fabricante "Consumers Glass Company Limited."

**TABLA 4**

**COMPOSICIÓN DEL CULLET POST-CONSUMIDOR**

<b>Material</b>	<b>Ambar</b>	<b>Verde Esmeralda</b>	<b>Cristal</b>
SiO <sub>2</sub>	71.4-73.2 %	71.5-73.1 %	71.6-74.3 %
R <sub>2</sub> O	12.5-15.1 %	13.7-14.9 %	13.0-14.7 %
RO	7.6-11.3 %	10.3-11.0 %	10.2-11.6 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.3-2.4 %	1.6-2.0 %	1.5-2.3 %
Be <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.22-0.46 %	0.12-0.20 %	0.03-0.10 %
TiO <sub>2</sub>	0.02 %	0.02 %	0.02 %

\* **Nota:** Generalmente, R<sub>2</sub>O se refiere a los compuestos Na<sub>2</sub>O o K<sub>2</sub>O; mientras RO es del grupo formado por los compuestos: CaO, MgO, SrO y BaO.

Fuente: "Resource Recycling", Marzo/Abril 1986, página 20.

### **2.3. Beneficios del reciclaje.**

Los beneficios del reciclaje son amplios, mucha gente recicla productos, mientras estos esfuerzos son parte vital del proceso, el proceso de reciclaje continúa después que los materiales han sido recolectados ya sea desde los basureros o por personas que recorren la ciudad comprando en este caso botellas o tomándolos de la basura de casas o centros de consumo como bares, restaurantes, sitios de esparcimiento público, etc.

La recolección, proceso, manufactura y venta del artículo reciclado crea un ciclo cerrado que asegura el éxito del reciclaje de productos, siendo este uno de los ejemplos.



**FIGURA 2.1 CICLO DE RECICLAJE.**

**El reciclaje ahorra espacios para los basureros.**

En muchas partes del mundo y Ecuador no es la excepción se producen muchos desperdicios de cualquier índole y con el pasar de los años, estos aumentan en su volumen, en muchas ocasiones algunos desperdicios son enterrados o quemados.

Pero, ¿Qué hay de malo en ello? Bueno en algunos países es extremadamente caro y controversial enterrar desechos o en su defecto construir incineradores para quemarlos debido a los problemas con el medio ambiente.

Se debe de realizar la debida legislación cuidando no afectar al ecosistema. En este caso el reciclaje es la única vía para reducir los montos de basura que se producen.

## **El reciclaje ahorra energía.**

Siempre se gasta menos energía para fabricar algún producto proveniente de material reciclado que si es fabricado de materiales nuevos. Por ejemplo usando desperdicios de aluminio para fabricar latas de bebidas se usa un 96% menos energía que produciendo las mismas latas desde el mineral de bauxita que es la materia prima del aluminio.

En el caso del vidrio reciclar una botella representa ahorrar la suficiente energía para mantener encendido un foco de 100 W durante 4 horas [5].

Pero como toda regla tiene su excepción el plástico es una de ellas. En algunos casos de plásticos se necesita más energía para reciclarlos que fabricándolos desde materiales nuevos.

Es muy importante para nuestro país ya que todos los años en distintas épocas se producen bajas en el caudal de la represa Paute y se nos indica en innumerables ocasiones ahorrar energía. Este es un buen ejemplo de ahorro.

## **El reciclaje ahorra los recursos naturales.**

Los recursos naturales son proporcionados por la naturaleza e incluyen tierra, plantas, minerales y agua. Usando estos materiales más de una vez, nosotros no conservamos los recursos naturales. En el caso del reciclaje de papel, se ahorra árboles y agua.

Para hacer una tonelada de papel reciclado salvamos 17 árboles y usamos un 50% menos de agua. Reciclando papel: se reduce cerca del 75% la necesidad de tratar la posible contaminación del aire derivada de este proceso.

Cuando reciclamos, además del ahorro de los recursos que se utilizan como materia prima, preservamos recursos naturales importantes para nuestra vida. Además de disminuir el riesgo de contaminación presente en los procesos industriales. Usando despojos de aluminio para fabricar nuevos productos de aluminio, las poluciones que son pequeñas partículas del material que se dispersan en el agua y en el aire se reducen en un 95%. Reciclando vidrio: se reduce en un 20% la posibilidad de contaminación, quemando menos combustible.

#### **2.4. Proceso de reciclaje de vidrio.**

El vidrio para envases es el que se recicla en grandes cantidades. Una botella de vidrio que se funde y se vuelve a formar dará lugar a otra botella igual sin ninguna pérdida de calidad ni material. El vidrio en sí mismo no ofrece amenaza al medio ambiente porque es inerte; no es biodegradable. Si se expone a las fuerzas de la erosión, se rompe formando pequeños trozos de sílice, arena de playa uno de los elementos más comunes en la tierra [4].

La utilización de envases reutilizables o de un solo uso, es una estricta decisión de mercado. El envase de vidrio, dando muestras de una extraordinaria sensibilidad y capacidad de sintonizar con los problemas de la sociedad actual, ha desarrollado de manera óptima las dos opciones: la reutilizable y la de un solo uso.

Ambas se complementan y, en todo caso, se soportan en un proceso eficaz de reciclado. Los envases de un solo uso son prácticos para aquellos productos con alto valor añadido y en los que el precio del envase no tiene una gran importancia frente al valor total, tales como productos de alta calidad, destinados a la exportación, etc.

Desde el punto de vista de su aplicación el vidrio se clasifica en doméstico e industrial. El vidrio industrial son: ventanas, cristales, focos,

recipientes de productos químicos o farmacéuticos, fibra óptica, etc. El vidrio doméstico son los que sirven para almacenar productos alimenticios, vinos, licores, conservas etc.

El vidrio se fabrica a partir de unas materias primas inertes, y abundantes en la naturaleza, que incluyen: arena silíceo blanca, sosa y caliza. El sulfato de sodio, el feldespato, la argonita y los vidrios rotos son otros ingredientes frecuentemente utilizados para fabricar envases de vidrio, siendo fáciles de obtener.

Desde el punto de vista del color los más empleados son:

- **El verde (60%):** Usado masivamente en botellas de vino, licores, cerveza aunque en menor cantidad.
- **El blanco (25%):** Usado en bebidas gaseosas, jugos de fruta.
- **El extraclaro (10%):** Empleado esencialmente en aguas minerales, tarros y botellas de decoración.
- **El opaco (5%):** Utilizados en cervezas y en algunas botellas para laboratorio [4].

Esta clasificación es muy importante porque siempre se tritura y se funden los vidrios del mismo tipo, clase, color, composición, etc. Los envases de vidrio pueden seleccionarse sistemáticamente al mismo tiempo que se recolectan de la cinta de procesamiento. Algunas bandas

transportadoras se diseñan para que sólo con la selección manual se consiga la desviación de los envases de vidrio hasta transportadoras individuales, que dirigen los envases seleccionados por colores hacia los procesos de rotura, cribado y almacenamiento a granel. Para conocer el proceso para el reciclaje de botellas de vidrio **en forma general**, se lo ha dividido en las siguientes etapas:

#### **2.4.1. Recepción de materias primas.**

El proceso se inicia en el exterior de la planta, con la recolección de los envases de vidrio que se lo puede realizar depositándolos en contenedores situados en las calles, o simplemente por la entrega del material por parte de personas encargadas de recogerlo.



**FIGURA 2.2 BOTELLAS TRANSPARENTES UBICADAS EN LA PLAYA DE ALMACENAMIENTO**



**FIGURA 2.3 BOTELLAS DE COLOR VERDE UBICADAS EN LA PLAYA DE ALMACENAMIENTO.**

El vidrio procedente del exterior es transportado en volquetas hasta la planta de reciclaje, donde es descargado en una playa de almacenamiento de materia prima.

Mediante una pala cargadora se trasvasa el vidrio, hasta una tolva de alimentación, a partir de la cual unas cintas transportadoras enlazan automáticamente las diferentes fases del proceso.



**FIGURA 2.4 TOLVA DE ALIMENTACION DE BOTELLAS PARA SER TRIRURADAS.**

La salida de la mencionada tolva es regulada por un vibrador de frecuencia variable, dispuesta en el fondo de la misma. En otras empresas recicladoras y fabricantes de botellas usan la gravedad para la alimentación de las trituradoras. La frecuencia de vibración es controlada por una báscula de pesaje continuo, instalada en la primera cinta transportadora. La combinación de ambos elementos permite ajustar el ritmo de producción de la planta hasta una capacidad máxima de 16 Tm/h.

En algunas plantas el material es sometido al campo magnético con un imán, a fin de retirar los materiales de carácter férrico, como son las tapas de botellas y esos objetos metálicos recuperados son enviados a una planta de recuperación de chatarras.

A continuación el material pasa por una cinta transportadora plana, donde de forma manual se separa el vidrio verde, del vidrio blanco, las bolsas de plástico, papeles y otros objetos de gran tamaño cuyo componente fundamental no sea vidrio. Tras la primera purga manual descrita, el material obtenido se vierte sobre una criba mecánica con tres granulometrías: vidrio de menos de 10 mm. de diámetro, objetos comprendidos entre 10 y 60 mm. y objetos de más de 60 mm. de diámetro. Una vez clasificado el vidrio en las tres granulometrías descritas, se inician tres procesos diferentes en función del tamaño.

- El producto menor de 10 mm. se da por terminado y pasa a la sección de almacenamiento.
- El producto mayor de 60 mm. es triturado en un molino de martillos y posteriormente cribado, separando los objetos de menor densidad (corchos, cápsulas, tapones, etc...) del resto. El producto obtenido se reenvía al inicio del proceso repetidas veces hasta conseguir separar el vidrio de las impurezas.

- El producto de tamaño comprendido entre 10 y 60 mm. es sometido a un proceso de selección óptica según se detalla a continuación.

El vidrio es transportado mediante vibración a través de un canal distribuidor con cuatro salidas, por las que cae en función de su tamaño. A continuación pasa por unos canales de alimentación, donde por medio de vibraciones se orientan los trozos en la posición idónea para ser procesados por las unidades de clasificación óptica.

Las unidades de clasificación óptica distinguen el vidrio roto destinado a ser reutilizado, de los trozos de cerámica, piedras, porcelana y metal no férreo. Cada unidad dispone de unas boquillas de expulsión por aire comprimido, gobernadas por un módulo electrónico capaz de diferenciar la opacidad o transparencia de las partículas que pasan por su campo de acción.

Las partículas de transparencia prefijada se toman como vidrio recuperado y se envían a la sección de almacenamiento. Las partículas rechazadas son sometidas a un segundo escalón de clasificación, dando como resultado material rechazado que se envía al silo correspondiente, o material dudoso que se reenvía al inicio del proceso para su reclasificación.

#### 2.4.2. Preparación de las mezclas.

La preparación de la mezcla se puede dividir en cuatro partes:

**Almacenamiento:** Consiste en ubicar las distintas materias primas en diferentes sitios de almacenamiento en donde permanecerán hasta su utilización.



**FIGURA 2.5 BODEGA DE ALMACENAMIENTO DE MATERIA PRIMA.**

**Pesaje:** Siguiendo la formulación previamente establecida se pesa cada uno de los componentes mediante mecanismos automáticos y en las proporciones determinadas.



**FIGURA 2.6 PESAJE DE COMPONENTES.**

**Mezclado:** Luego de ser pesadas cada una de las materias primas (arena, feldespato, caliza, y soda ash) son enviadas a las tolvas de mezcla en donde, por un tiempo previamente establecido y con una adición específica de agua y sulfato de sodio y selenio en mínimas proporciones, los componentes son mezclados totalmente.



**FIGURA 2.7 MEZCLADOR DE MATERIAS PRIMAS.**

**Transporte:** Finalmente la mezcla es enviada por medio de elevadores y transportadores hasta los silos donde queda finalmente lista para ser cargada al horno.

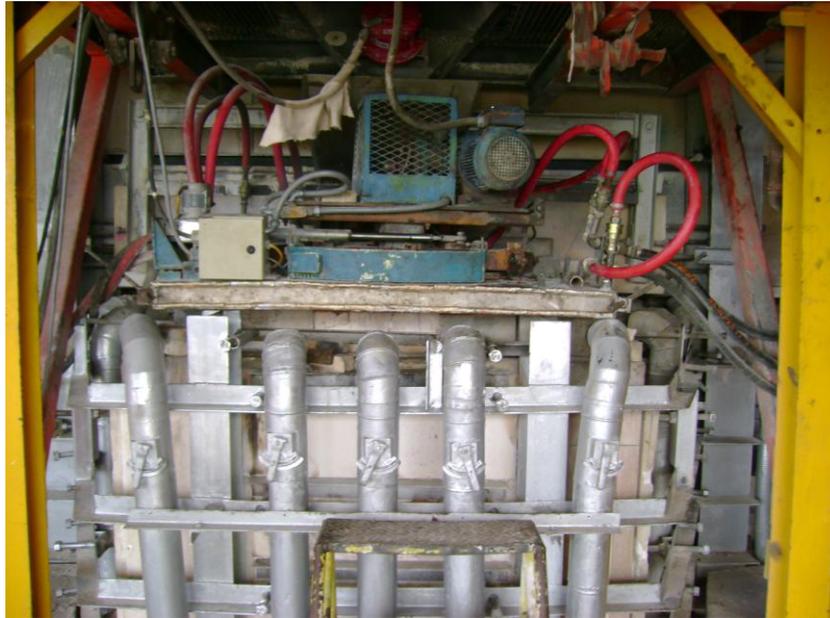
**Fusión de la mezcla y refinación del vidrio:** El horno es el sitio donde se lleva a cabo la fusión de las materias primas. Consiste en un recipiente rectangular construido con materiales refractarios resistentes al desgaste producido por el vidrio líquido y las llamas, tiene una producción de 210 toneladas diarias de vidrio. El horno utiliza como combustible Bunker C.

Para producir el calor, por medio de quemadores, los cuales funcionan alternadamente veinte veces cada uno.



**FIGURA 2.8 HORNO DE MATERIALES REFRACTARIOS.**

Por uno de sus extremos se carga la mezcla, mientras que por el otro se extrae el vidrio fundido. Posteriormente hay una entrada de aire de 1000°C, con el fin de enfriar el vidrio que se encuentra dentro del horno. Los gases producidos por el horno son expulsados por lo regeneradores (1300°C).



**FIGURA 2.9 HORNO: ENTRADAS DE AIRE.**

El primer proceso que se identifica claramente en el horno es el de fusión; aquí todas las materias primas no son propiamente fundidas, sino que al suministrarles calor primero se descomponen y después reaccionan; así pues los componentes que poseen menor punto de fusión se vuelven líquidos más rápido que los que tienen mayor punto de fusión (para la sílice es mayor de  $1600^{\circ}\text{C}$ , y para el casco entre  $1050$  y  $1100^{\circ}\text{C}$ ); a medida que va aumentando la temperatura estos últimos también se funden y desaparecen como materiales cristalinos.

A continuación se realiza el proceso de refinación, en el cual se eliminan un gran número de pequeñas burbujas que se originan a partir de las reacciones de las materias primas, este proceso empieza casi

simultáneamente con el proceso de fusión y continúa hasta que la mezcla de materias primas esté completamente líquida.

Luego el vidrio fundido pasa a un segundo tanque, llamado tanque de refinación, donde se intenta igualar la temperatura del vidrio en toda su extensión, para posteriormente repartirlo a las máquinas formadoras por medio de los canales.

### **Acondicionamiento del vidrio.**

El canal es el encargado de enviar el vidrio desde el horno hasta el lugar donde están las máquinas formadoras de envases. Durante este trayecto se disminuye la temperatura del vidrio gradualmente (con lo cual aumenta su viscosidad), de tal manera que al final del canal se obtenga el vidrio en un estado en el que se pueda modelar, correspondiendo a una cierta temperatura para fabricar una botella determinada.

Se denomina acondicionar el vidrio al hecho de controlar la temperatura en el flujo del vidrio que está dentro de la canal desde refinación hasta el orificio refractario y se forme la gota.

La homogeneidad de la mezcla del vidrio se mide revisando las temperaturas existentes desde el fondo hasta la superficie y de lado a lado a la entrada del tazón (última sección del canal antes de las

máquinas I.S.); estas temperaturas afectan directamente la distribución del vidrio en la botella, la forma de la gota, y su cargue en la máquina, por esto una falla en esta parte del proceso puede resultar en la formación de botellas deformes, con una masa mal distribuida y, por lo tanto más frágiles.

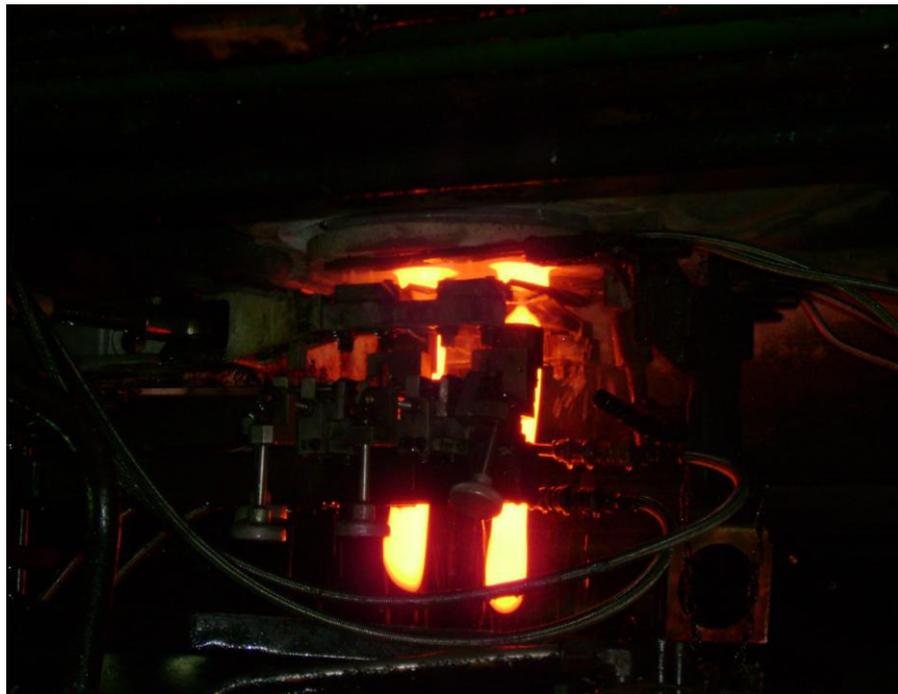
### **2.4.3. Formación del envase.**

Una vez se ha acondicionado el vidrio, en el alimentador se forma la gota de vidrio con el peso correcto y la forma deseada por medio de un sistema de partes refractarias compuesto por: un tubo que controla el flujo de vidrio hacia el orificio, una aguja que impulsa intermitentemente el vidrio hacia el orificio, que determina la cantidad de vidrio que tendrá la gota. Para formar la gota el flujo de vidrio se corta por el sistema de tijera.



**FIGURA 2.10 MÁQUINAS DE SECCIÓN INDEPENDIENTE PARA LA FORMACIÓN DE BOTELLAS.**

Posteriormente, la gota se hace llegar a la máquina I.S. mediante el equipo de entrega, que consiste en de una cuchara, encargada de recibir la gota, una canal por donde la gota resbala hacia cada sección y un deflector que la entrega al equipo de moldura.



**FIGURA 2.11 VIDRIO PARA FORMAR EN BOTELLAS.**

La sigla I.S. significa máquinas de secciones independientes, en estas una sección se puede parar sin afectar el funcionamiento de las otras o de la máquina completa. Las empresas vidrieras utilizan en la actualidad máquinas de 6, 8, 10 y 12 secciones.

Cada sección puede fabricar una botella (gota sencilla) o dos botellas (doble gota). Las botellas se pueden fabricar en dos procesos básicos: Soplo y Soplo (S.S.) y Prensa y Soplo (P.S.).

Para formar una botella se necesita de la moldura; que generalmente está hecha de fundición o en aleaciones metálicas especiales (el valor de cada molde está alrededor de los cien mil dólares). Las piezas usadas son: la camisa, la aguja y la boquillera para formar el terminado; el premolde, la tapa y el embudo para formar el palezón o preforma de la botella; y el molde, el fondo y la sopladora, para formar la botella. Las pinzas se encargan de sacar la botella del lado del molde hacia la plancha muerta en donde se traslada hacia el transportador, mediante los barredores, el cual finalmente la llevará al archa de recocido.

#### **2.4.4. Proceso soplo y soplo.**

Después de lograr el cargue de la gota (1 paso) en el premolde se utiliza aire comprimido para empujar el vidrio y formar el terminado (2 soplo inicial). Después con aire comprimido se sopla el vidrio hacia arriba, formándose así la burbuja y el palezón, de una forma limitada por el premolde y la tapa (3 Contrasoplo). Luego el palezón se transfiere al molde (4) y nuevamente con aire comprimido a través de la sopladora se infla el palezón hasta llenar la cavidad del molde (5 Soplo final).

Después de esto la botella es retirada del molde (6) y puesta sobre el transportador de línea, mediante los barredores, quién se encarga de llevarla al archa de recocido.

#### **2.4.5. Proceso de prensa y soplo.**

El proceso de prensa y soplo se ha desarrollado para obtener botellas de boca ancha (proceso tradicional) o de boca estrecha (proceso conocido como NNPB).

El sistema utilizado para el mecanismo de prensa y soplo es el mismo que se utiliza para el mecanismo de soplo y soplo, cambiando algunos aditamentos que lo hacen funcionar de manera diferente. La principal diferencia radica en que la acción que realiza el contrasoplo es efectuada por un macho, el cual se encarga de dar la preforma a la gota para formar el palezón; las demás etapas son similares.

El primer paso consiste en que la gota de vidrio cae en el premolde. Inmediatamente el vidrio entra a éste y la tapa baja. El macho empieza a subir, a una presión controlada, forzando al vidrio a llenar todos los vacíos, incluyendo la cavidad de la boquillera, formándose así el palezón. Luego, el macho baja, la tapa sube y el premolde abre. Enseguida, el palezón es

transferido al molde. El palezón continúa su recalentamiento y estiramiento en el lado del molde.

A continuación, se aplica aire comprimido para soplar el vidrio hasta llenar la cavidad del molde; también se aplica vacío para reforzar el contacto del vidrio con el molde. Este contacto con el molde más la circulación del aire del Soplo final enfrían el vidrio.

Después de abrir el molde, las pinzas trasladan el envase hasta la plancha muerta y el mecanismo barredor lo ubica sobre el transportador.

Con el aire de enfriamiento de los alrededores del envase continúa el proceso de remoción de calor hasta que el vidrio alcanza una temperatura que asegura la estabilidad de su forma.



**FIGURA 2.12 FORMACIÓN DE LAS BOTELLAS**

#### **2.4.6. Recocido del envase.**

Cuando se forma la botella, el vidrio se enfría muy rápido, creándose una gran cantidad de esfuerzos internos, que debilitan la botella. El archa de recocido es la encargada de aliviar esas tensiones.



**FIGURA 2.13 RECOCIDO DEL ENVASE.**

En el archa se calienta de nuevo la botella ya formada a una temperatura de unos 550°C, durante unos diez minutos, disminuyendo luego lenta y controladamente la temperatura, teniendo como base una curva de temperatura que garantiza

alivio de tensiones y el surgimiento de nuevos esfuerzos en la botella.

#### **2.4.7. Inspección del envase formado.**

Después las botellas son conducidas por medio de bandas transportadoras hacia una zona de revisión, compuesta por una gran cantidad de dispositivos automáticos, dotados de sistemas capaces de detectar defectos provenientes de la formación de la botella; ahí se retiran de la línea de producción todas aquellas botellas que tengan defectos de forma y/o dimensionales, grietas, arrugas, distribución irregular del vidrio en las paredes del envase y resistencia, entre otros, garantizando así que la producción que se enviará al cliente sea de excelente calidad.



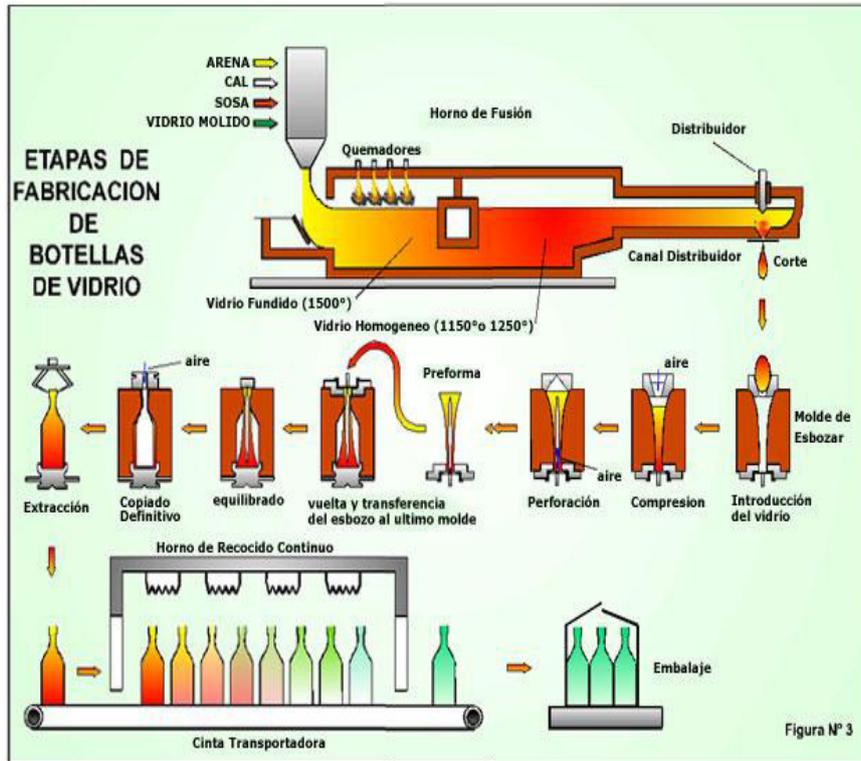
**FIGURA 2.14 INSPECCIÓN DEL PICO DE LA BOTELLA.**



**FIGURA 2.15 BOTELLAS CON FALLAS QUE SON RETIRADAS.**

#### **2.4.8. Empaque, almacenamiento y despacho.**

En esta etapa, los envases son empacados de acuerdo al requerimiento del cliente por medio de palets y el encanastado en cajas plásticas (que hacen en la misma planta). Luego de que el envase ha sido empacado, es transportado a las bodegas de almacenamiento, en donde queda listo para ser despachado al cliente respectivo.



**FIGURA 2.16 CUADRO ESQUEMÁTICO DE UNA FABRICA DE BOTELLAS DE VIDRIO.**

# CAPÍTULO 3

## **3. EQUIPOS TRITURADORES DE VIDRIO.**

Los equipos trituradores de vidrio son variados y dependen de muchos factores como la capacidad de material a triturar, el tipo de trituración ya sea por impacto, por presión, por aplastamiento continuo (rodillos); el tipo de carga y descarga, material a ser triturado, y también modelos pequeños para triturar envase por envase, y así por el estilo.

**El propósito de los equipos trituradores de vidrio es reducir todos los envases de vidrio a partículas consistentes de forma y tamaño. Estos equipos también se pueden utilizar para reducir químicos, materiales arcillosos y de otra índole; y otros productos sólidos a un tamaño deseado y para mezclar o dispersar sólidos en líquidos.**

El vidrio es más abrasivo que algunos elementos en la naturaleza. Esto significa que una aleación especial es necesaria para maximizar la vida útil del equipo, y evitar el desgaste.

La forma usual de medir el tamaño de las partículas es a través de un tamiz o cedazo, en donde el vidrio es distribuido a esos tamices y en éstos se quedan los fragmentos que son muy grandes para el cedazo.

Los envases de vidrio pueden probar ser un material de mucha dificultad para triturar en partículas consistentes con velocidad y durabilidad. Quizás el aspecto más importante en la selección de equipos de trituración es encontrar el equipo con la capacidad y el tamaño de partículas deseadas mientras se minimizan aspectos como el capital y el costo de operación.

Sin embargo, existe una amplia variedad de máquinas para triturar y hay que saber seleccionar la máquina correcta para una particular acción conociendo de antemano el volumen de vidrio a procesar, y las especificaciones técnicas requeridas.

El proceso de envases de vidrio es similar en muchas cosas a procesar otros agregados con dos excepciones críticas. Primero, el vidrio es ligero comparado a otros minerales y tiende a rebotar, entonces se rompe.

Segundo, el vidrio al romperse se convierte en finas partículas las cuales son extremadamente abrasivas y pudiendo entrar en los mecanismos y cojinetes, causando serios daños.

Por lo tanto es importante identificar maquinarias hechas para soportar los retos específicos que se vienen con el proceso del vidrio.

En resumen, el triturado de vidrio es el proceso de alimentar el vidrio en una máquina que usa martillos rotativos, discos o barras para triturar el material. En algunos equipos se puede ajustar el tamaño del vidrio terminado regulando el espacio entre los discos o barras. Otra forma de obtener el tamaño específico de reducción es por la continua circulación del vidrio hasta alcanzar el tamaño deseado.

### **Equipos de trituración de impacto.**

Las trituradoras de vidrio han evolucionado desde equipo usado para triturar rocas o de las industrias procesadoras de minerales industriales. Dos tipos de equipo de trituración son, el triturador de abrasión y el triturador de impacto. El triturador de abrasión, o triturador de desgaste, usa fricción y compresión para fracturar el material e incluye equipo como trituradores de dientes y de cono. Debido a la naturaleza abrasiva del vidrio, **trituración de impacto es preferible por ofrecer mayor**

**durabilidad del equipo y más forma uniforme de las partículas obtenidas.**

Las trituradoras de vidrio son generalmente más pequeñas que las trituradoras de rocas. Una fábrica de trituración de vidrio puede procesar unas 50000 toneladas al año, o 25 toneladas por hora. La remuneración por procesar tal cantidad sería de \$1'500.000 por año, lo cual sería adecuado para sostener la operación.

Un sin número de trituradoras han sido probadas para reducir el vidrio de botellas.

Los equipos de trituradoras de impacto utilizadas en el procesamiento del vidrio son los siguientes:

- Molino de martillos.
- Tambor rotatorio o rodillo.
- Trituradora de mandíbula o quijada.
- Eje de impacto vertical y horizontal.
- Discos rotativos y barras rompedoras.

De la lista presentada anteriormente, los molinos más utilizados y más comunes en la industria son los molinos de martillos y los molinos de rodillos, por lo que se procederá a realizar un análisis más extenso de

estos molinos, sin dejar de indicar las características de los otros equipos anteriormente seleccionados.

### **3.1. Molino de martillos.**

Este es un método efectivo para desarrollar una adecuada trituración y pulverización. Opera con una gran gama de martillos que reducen el material a un tamaño deseado. El tamaño final del producto depende del tamaño de las aberturas de las pantallas, el número, tamaño y tipo de los martillos, y la configuración de platos ajustables y la velocidad del rotor.

Los molinos de martillo usualmente consisten de una serie de barras de libre movimiento (martillos) adjuntos a pivotes los cuales están sujetos a barra rotatoria. Las botellas que son alimentadas al mecanismo son quebradas por los martillos y luego descargadas. Los pivotes ayudan a los martillos a transferir la energía de impacto hacia el material a reducir mientras se minimiza el desgaste en los martillos y se mantiene la velocidad en la barra, protegiendo los rulimanes de la barra principal.

Un molino tritura material que tiende a ser fácilmente reducido a pequeños pedazos, por medio de impactos contra un martillo rotatorio (el cual típicamente trabaja a 750 RPM y 1800 RPM). El material resultante es luego presionado contra un plato sólido y rugoso el cual reduce aún

más el tamaño de los fragmentos. Finalmente, este material es lanzado hacia una parilla que filtra los pedazos más grandes para que inicien otro proceso de trituración hasta que alcancen el tamaño deseado. Durante todo este proceso el material es impactado por los martillos y por las paredes del molino. Esta secuencia se repite entre 750 y 1800 veces por minuto.

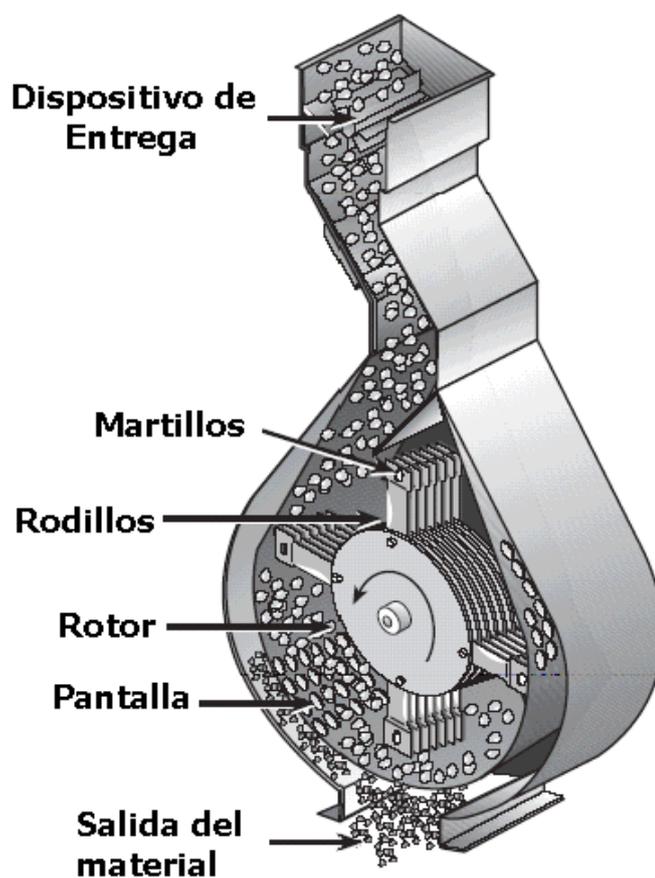
Un eje rotando a relativa velocidad con martillos movibles, impulsa el vidrio al otro lado de la cámara, y también contra el resto del vidrio. El vidrio continuamente recircula hasta obtener el tamaño apropiado para pasar a través del sistema. Se pueden obtener fibras relativamente pequeñas de vidrio, sin embargo éstas disminuyen el tiempo de vida y el uso de los martillos.

**Ventajas:**

- Produce un amplio rango de tamaño de partículas.
- Trabaja con cualquier material y fibra.
- Bajo costo de compra inicial comparado con los molinos de rodillos.
- Bajo costo de mantenimiento.
- Generalmente es de una operación descomplicada.

**Desventajas:**

- La eficiencia del uso de energía es baja en comparación con los molinos de rodillos.
- Puede generar calor.
- Puede generar ruidos y emisiones de polvo.
- Produce partículas con el tamaño grande, no hay uniformidad.



**FIGURA 3.1 ESQUEMA GENERAL DE UN MOLINO DE MARTILLOS.**

### **Diseño General.**

Los componentes de estos molinos de martillos, mostrados en la figura, incluyen lo siguiente:

- Un dispositivo de entrega para introducir el material dentro de la trayectoria de los martillos; un rotor contiene una serie de discos maquinados montados en un eje horizontal.
- Una pantalla perforada y asistencia de aire para remover el producto molido.
- Los martillos de libre oscilación que están suspendidas de barras las cuales corren paralelamente al eje horizontal del rotor.

### **Diseño del Alimentador.**

El material es introducido dentro de la guía de los martillos por una banda alimentadora de alta velocidad. Este tipo de alimentador puede tener su motor funcionando por un control programable que funciona junto al motor general del molino. La velocidad operacional del alimentador es controlada para mantener un amperaje óptimo de carga en el motor.

### **Diseño del Martillo.**

El diseño y colocación de los martillos está determinado por los parámetros de rotación como un rotor de velocidad, el caballaje del motor, y un área abierta en la pantalla. El diseño óptimo del motor y su colocación proveerá un contacto máximo con el ingrediente alimentado.

En molinos en donde la velocidad del rotor es aproximadamente 1800 r.p.m., los martillos deben ser alrededor de 25 cm (10 pulgadas) de largo, 6,35 cm de ancho (2,5 pulgadas), y 6,4 mm (0,25 pulgadas) de espesor. Para rotores de velocidades de 3600 r.p.m., los martillos deben de ser de 15 a 20 c.m. (6 a 8 pulgadas) de largo, 5 c.m. de ancho (2 pulgadas) y el mismo espesor de la anterior.

El número de martillos usados para 1800 r.p.m. debe ser 1 por cada 2,5 a 3,5 H.P. del motor, y para los 3600 r.p.m. uno por cada 1 a 2 H.P. Los martillos deben ser balanceados y arreglados en las barras de modo que no arrastren el uno al otro. La distancia entre los martillos y la pantalla debe ser entre 12 y 14 mm. (0,5 pulgadas) para el tamaño de los cereales.

La velocidad de los martillos o de la parte superior máxima o punta es crítica para el tamaño propicio de reducción. La velocidad superior es

calculada por la multiplicación de la velocidad rotacional del rotor en r.p.m. por la circunferencia que realiza el martillo.

$$\text{Formula 1: pies por minuto} = \frac{\pi \times D \times r \times \text{rpm}}{12 \text{ pulg. pie}}$$

La velocidad de la punta comúnmente esta en el rango de 16000 y 23000 pies por minuto, (5000 y 7000 m/min.) Cuando esta velocidad excede 23000 pies por minuto, hay que darle el cuidado necesario al diseño de los martillos, los materiales usados en la construcción, y la fabricación de todos los componentes. Simplemente cambiando la velocidad rotacional de los martillos no es un método recomendable de incrementar la velocidad de los mismos en exceso de 23000 pies por minuto.

### **Diseño de la pantalla.**

La cantidad de un área abierta en un molino de martillos determina el tamaño de las partículas y la eficiencia de la pulverización. La pantalla tiene que ser diseñada para mantener su integridad y proveer la mayor cantidad de área abierta. Las aberturas de la pantalla que en si son orificios o tamices por donde el pulverizado pasa, están alineados en 60 grados optimizan el área abierta, mientras se mantiene la resistencia de la pantalla. Este método resultará en un 40% de área abierta utilizando un agujero de 3.2 mm (1/8 pulgada).

El lector está urgido en prestar particular atención al radio de pantalla abierta al caballaje. El radio recomendado para cereales puede ser de 55 cm<sup>2</sup> (8-9 pulg<sup>2</sup>) por caballaje. La insuficiente relación entre área abierta por caballaje resulta en la generación de calor. Cuando el calor generado excede entre 44°C a 46°C la capacidad puede reducirse como mucho al 50%.

La remoción del material ya triturado de un molino de martillos es un aspecto crítico en el diseño. El despeje apropiado afecta no solamente la eficiencia de la operación sino también al tamaño de la partícula. Cuando el radio correcto del área de la pantalla al caballaje es usado y apropiada distancia entre los martillos y la pantalla es mantenida o controlada, la mayoría de partículas con el tamaño correcto saldrán de una manera oportuna.

Anderson (1994) estableció que las partículas que no pasen a través de los agujeros de la pantalla se convierten en cama del resto del material que es alimentado al molino. Estas partículas son continuamente reducidas en su tamaño por fricción y por el martillado. Este excesivo tamaño de reducción es contraproducente, porque la energía es desperdiciada en la producción de calor, y las partículas llegan a ser demasiado pequeñas.

La mayoría de los nuevos molinos de martillos están equipados con un sistema de aire asistido que circula dentro del molino junto con el producto a ser molido. Estos sistemas son diseñados para proporcionar una reducción de presión en el lado de la salida de la pantalla, para interrumpir el estrato fluidificado del material en la cara de la pantalla, permitiendo así que las partículas salgan a través de los orificios.

Aplicaciones típicas: carbón, madera, recipientes de aluminio, bebederos de animales, vasos pequeños, granos de trigo, cacao, leche deshidratada, restos de pescado, yeso, piedras pequeñas, residuos de carnes, granos de sal, maíz, soya, huesos pequeños, granos pequeños.

### **3.2. Molino de tambor rotatorio o de rodillos.**

Cumplen con la reducción de tamaño a través de una combinación de fuerzas y diseños visibles. Si los rodillos rotan a la misma velocidad, la compresión es la fuerza primaria usada. Si los rodillos rotan a diferentes velocidades, cortadora o cizalla y la compresión son las fuerzas primarias usadas. Si los rodillos están ranurados, un componente de pulverización es introducido.

Las ranuras gruesas proveen menos tamaño de reducción que las ranuras más finas si lo hacen. Existe un pequeño ruido o polución del

polvo asociada con el diseño propiamente y el mantenimiento de los molinos de rodillos. La velocidad lenta de operación no genera calor, y es muy pequeña pérdida húmeda.

Las partículas producidas tienden a ser de un tamaño uniforme; esto es, un pequeño material es generado. La forma de las partículas tiende a ser irregular, más cúbicas o rectangulares que esféricas. La forma irregular de las partículas significa que no se empaquetan o juntan o disponen bien. Para partículas de similar tamaño la masa de densidad de material molido en un molino de rodillos será cerca de 5 a 15 % menos que el material molido por un molino de martillos.

### **Ventajas.**

- Eficiencia de Energía.
- Distribución uniforme del tamaño de la partícula.
- Bajo ruido y generación de polvo.

### **Desventajas.**

- Bajo efecto o casi sin efecto en las fibras.
- Las partículas tienden a ser irregulares en forma y en dimensión.
- Pueden tener un costo inicial alto (dependiendo del diseño del sistema).

- Cuando es requerido el costo del mantenimiento puede ser considerablemente alto.

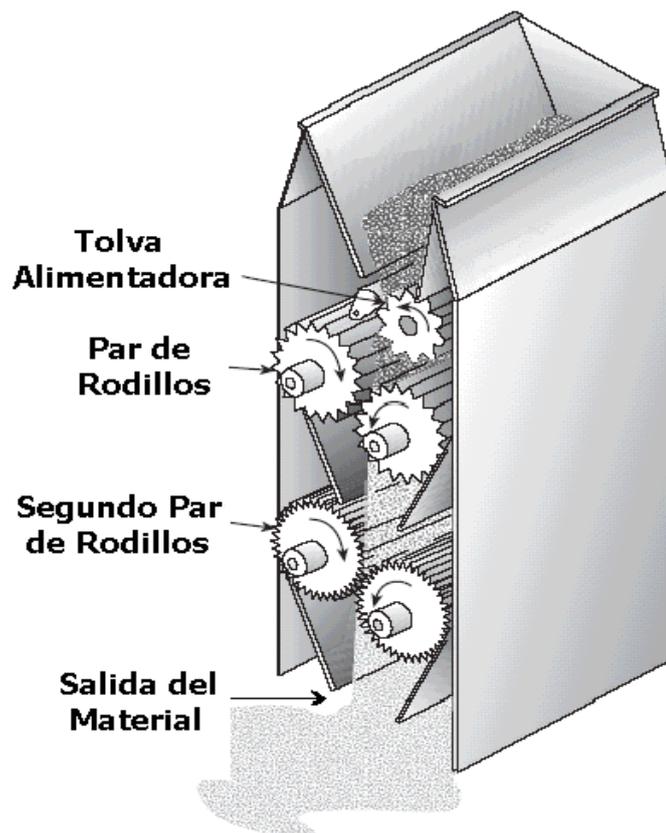
### **Diseño General.**

Existen muchos fabricantes de molinos de rodillos, pero ellos comparten todos estas características mostradas.

- Un dispositivo alimentador para proveer una cantidad apropiada y constante del material a ser molido.
- Un par de rodillos montados horizontalmente en un rígido marco o bastidor.
- Un rodillo está fijo en una posición y el otro puede moverse muy cerca o alejarse del anterior.
- Los rodillos contrarios pueden rotar a la misma velocidad o una puede rotar más rápido, la superficie del rodillo puede ser lisa o tener algunas corrugaciones.
- Algunos molinos se pueden poner uno encima de otro o juntos también.

Para asegurarse una operación óptima, el material debe ser introducido entre los rodillos y en una forma uniforme y constante. El alimentador más simple es una tolva de compartimiento con un agitador localizado dentro y con una puerta de descarga. Este tipo de alimentador es usado

mejor para procesos gruesos. Para operaciones de moler, un alimentador de rodillo es sugerido.



**FIGURA 3.2 MOLINO DE RODILLOS.**

En este tipo de alimentador, el rodillo está situado debajo de la tolva del compartimiento y tiene una puerta de descargue ajustable manualmente o automática. Si la puerta es ajustada automáticamente, será conectada al amperaje de carga del motor principal del molino de rodillos.

Los rodillos que forman el par serán de 23-25 cm. de diámetro (9-12 pulg.), y el radio de longitud puede ser de 4 a 1. Es muy importante mantener la alineación entre la pareja de rodillos. El tamaño del material es dependiente de la ranura/angostura/entrehierro entre los molinos a lo largo de su longitud. Si esta ranura/angostura/entre hierro no es uniforme, el rendimiento rodillo sufrirá, incrementando los costos de mantenimiento, reduciendo el rendimiento, y en general aumento en los costos de operación. La ranura/angostura/entrehierro puede ser ajustada manualmente a través del uso de cilindros neumáticos o hidráulicos operados a través de una computadora o un controlador programable.

Cada par de rodillos es un contador rotador. Para mejorar el tamaño de reducción uno de los rodillos debe rotar rápido. Esto resulta en una diferencia de velocidad entre las parejas de rodillos. El rango de diferenciales típicos es desde 1.2 a 1 hasta 2 a 1 (rápido a lento).

Típicamente la velocidad del rodillo puede ser entre 395 m/min (1300 pies/min.) a 23 cm de rodillo a 957 m/min. (3140 pies/min.) para 30.5 cm (12 pulgadas) de rodillo.

Un sólo motor es utilizado para accionar dos parejas de rodillos grandes, con la cadena o bandas para proveer el diferencial de velocidad. En tres pares de rodillos grandes, el par inferior tendrá un motor impulsor

separado. Además las caras de los rodillos se pueden acanalar para mejorar la reducción de tamaño.

### **3.3. Trituradora vertical.**

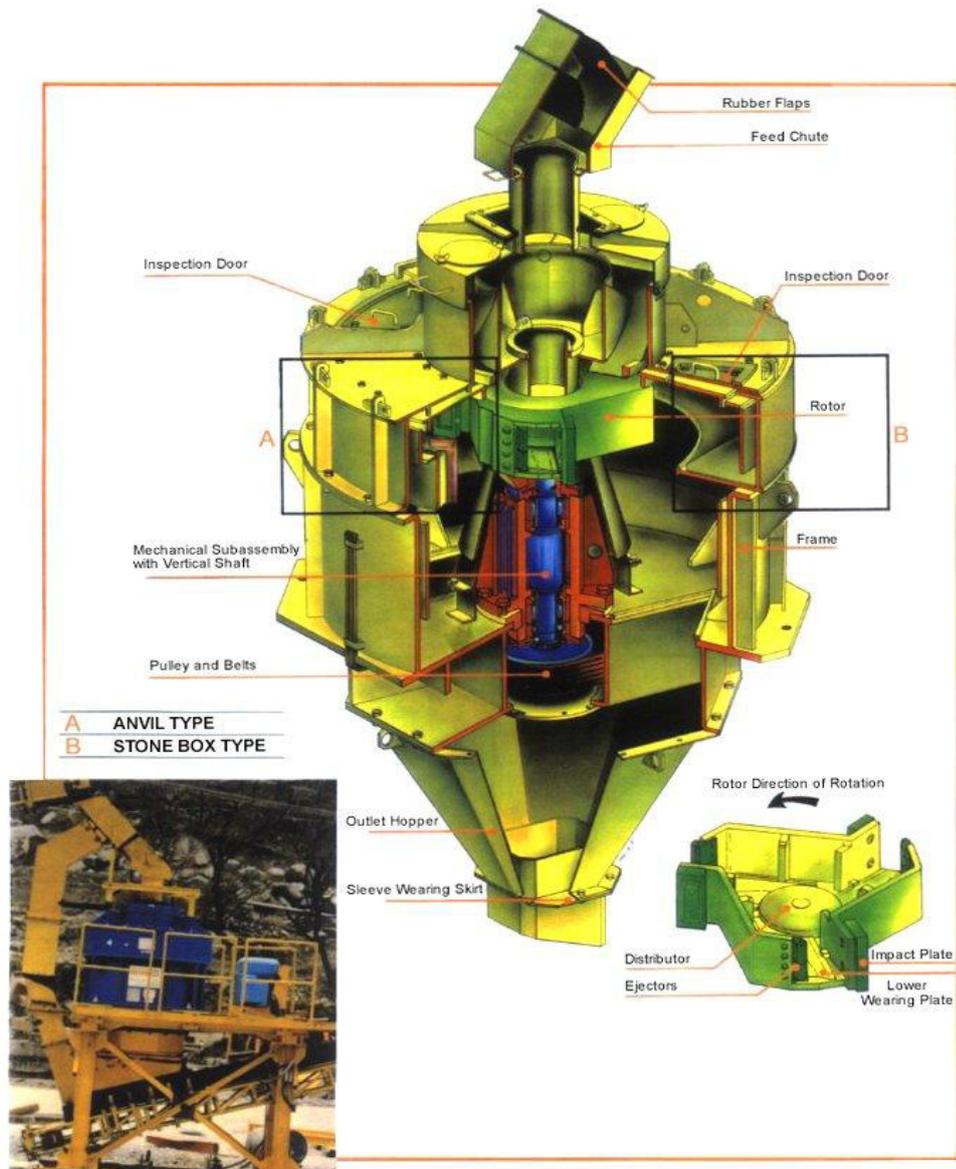
Usa un dispositivo de rotación el cual impulsa las botellas hacia la placa de impacto alrededor de una caja vertical. El vidrio es quebrado por los continuos choques contra otros fragmentos de vidrio lo que da como resultado un menor desgaste de los elementos del sistema, en donde se aprovecha la alta velocidad, y se lo hace recircular una y otra vez.

Con la ayuda de una T.E.V. se puede producir material fino y vasto, desde un rango de 0 a 4.75 mm. O de 0 a 10 mm de una forma muy sencilla, comparado con otro tipo de equipo de trituración como las T.E.H. La velocidad del material y la geometría del dispositivo y las superficies de impacto gobiernan en el tamaño del vidrio de desecho.

Las ventajas importantes de una T.E.V son:

- Menor consumo de energía por tonelada de producción.
- Al menos de 5 a 10 veces menos tiempo de mantenimiento y costo de producción comparado con cualquier otro equipo similar; debido a la ausencia de uso y de arrancar partes de metal con la piedra.
- Mecanismos muy simples en operación y uso.

- Forma granular perfecta de producción. Esto es debido a la alta velocidad de las piedras que chocan con el expulsor, y son golpeados en las esquinas como resultado.
- Control perfecto de tamaño y capacidad de producción con la ayuda de una variación de velocidad.
- Baja carga de reciclaje desde 60-70% de producción. Puede ser mantenida con rangos de material fino y grueso.
- Control de partículas finas en producción con solamente control de velocidades.
- Sin necesidad de grado de alimentación.
- Adecuado para materiales con altos contenidos de abrasión y contenidos de sílice, mientras existe un pequeño desgaste por el uso y los golpes comparados con cualquier otro equipo. Debido a esta ventaja, los T.E.V. tienen unas aplicaciones como las siguientes áreas: Para producción de arena triturada para reemplazar arena natural en trabajos de concreto.
- Para producir perfectamente agregados de forma cúbica, previa especificación; la mayoría de las cuales deben ser usados en concreto.
- Para pre-molienda de materia prima en plantas de cemento.

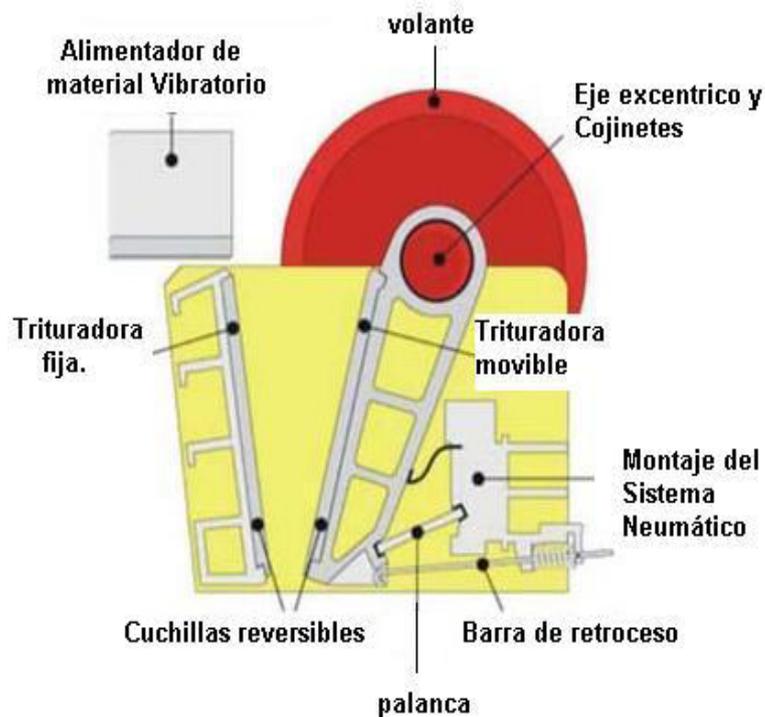


**FIGURA 3.3 TRITURADORA DE EJE VERTICAL.**

#### **3.4. Trituradora de mandíbula o quijada.**

Este tipo de trituradoras conocidas como Jaw Crusher, son otro tipo de máquina muy utilizada para moler diferentes tipos de materiales.

Consisten en dos mandíbulas una fija y una móvil. El material es alimentado por una tolva y ésta cae dentro del triturador. Cuando trabaja, el motor conduce el eje excéntrico que gira por banda, haciendo que la mandíbula móvil se acerque y separe a la mandíbula fija. También se complementa el movimiento por medio de sistemas neumáticos que ayudan a su desplazamiento de forma horizontal hacia la mandíbula fija.



**FIGURA 3.4 TRITURADORA DE QUIJADA O JAW CRUSHER.**

Antes de usar, tienen que examinar las piezas, especialmente las partes de lubricante y pernos. En las partes de lubricante se asegura de llenar suficiente aceite. Y fijan los pernos. Luego limpian las purgas en cavidad

de trituradora. En la operación no alimenten demasiado materiales. Son fáciles de dañarse las placas de quijada móvil y fija, placas de protección de ambos lados y placas de arriba. Las mantienen cuidadosamente. El material triturado es desalojado por gravedad.

#### **Características principales:**

1. La estructura es simple y es fácil mantener.
2. El tamaño de grano de producto es regular.

Este tipo de trituradora fue uno de los primeros diseños elaborados por los fabricantes, y a través del tiempo se ha mantenido. El sistema no es triturado al 100%, su eficiencia no es tan alta, ya que hay restos relativamente grandes (10 mm.) de material cuando este es cae.

#### **3.5. Discos Rotativos y barras rompedoras.**

Un diseño de disco rotatorio consiste de una serie de discos de forma irregular espaciados a intervalos regulares a lo largo de una barra rotatoria. A medida que la barra gira, los discos Trituran la botella al presionarla contra barras de trituración estáticas. El espacio entre los discos y las barras de trituración establece el tamaño de las partículas que se obtendrán.

Las botellas alimentadas al mecanismo son trituradas por barras montadas sobre un tambor rotatorio. Estas barras también impulsan el vidrio hacia una placa trituradora estática. El espacio entre las barras del tambor y la placa controlan el tamaño de las partículas. El tambor de este triturador típicamente rota a una velocidad más baja que la de los ejes de los anteriores trituradores.

La barra de trituración rotatoria consiste de numerosas barras longitudinales sujetas a una barra rotatoria. Este triturador es similar a un triturador de martillo, pero las barras de trituración no cumplen ninguna labor de pivote para la barra.

# **CAPÍTULO 4**

## **4. DISEÑO DE TRITURADORA DE VIDRIO DE UNA TONELADA DE CAPACIDAD HORA.**

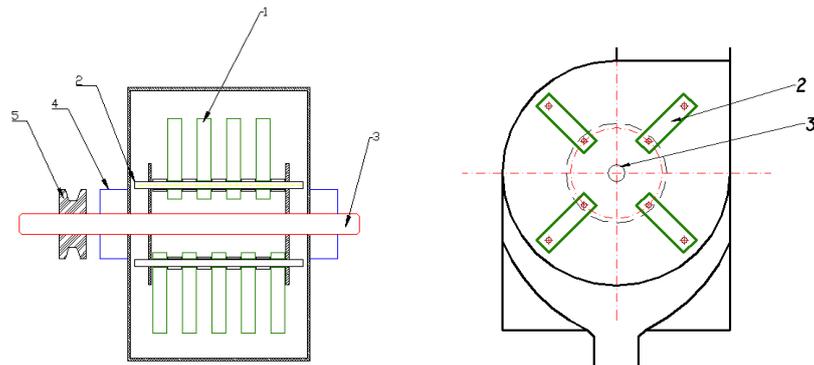
Para empezar el diseño de la trituradora con la capacidad indicada, hay que señalar que la máquina seleccionada es un molino de martillos, que en el capítulo anterior hemos comprobado que es el mejor tipo de triturador para cualquier material.

Estas consideraciones vistas anteriormente permiten tener un amplio espectro del molino, saber de que manera va a trabajar, la disposición en los martillos, capacidad de entrada y descarga, la cantidad de energía a utilizar, el montaje y desmontaje del molino que facilitará el mantenimiento, asegurando las condiciones iniciales del equipo, así como el costo que tendrá su construcción que será realizada íntegramente en el país.

#### 4.1. Diseño de forma.

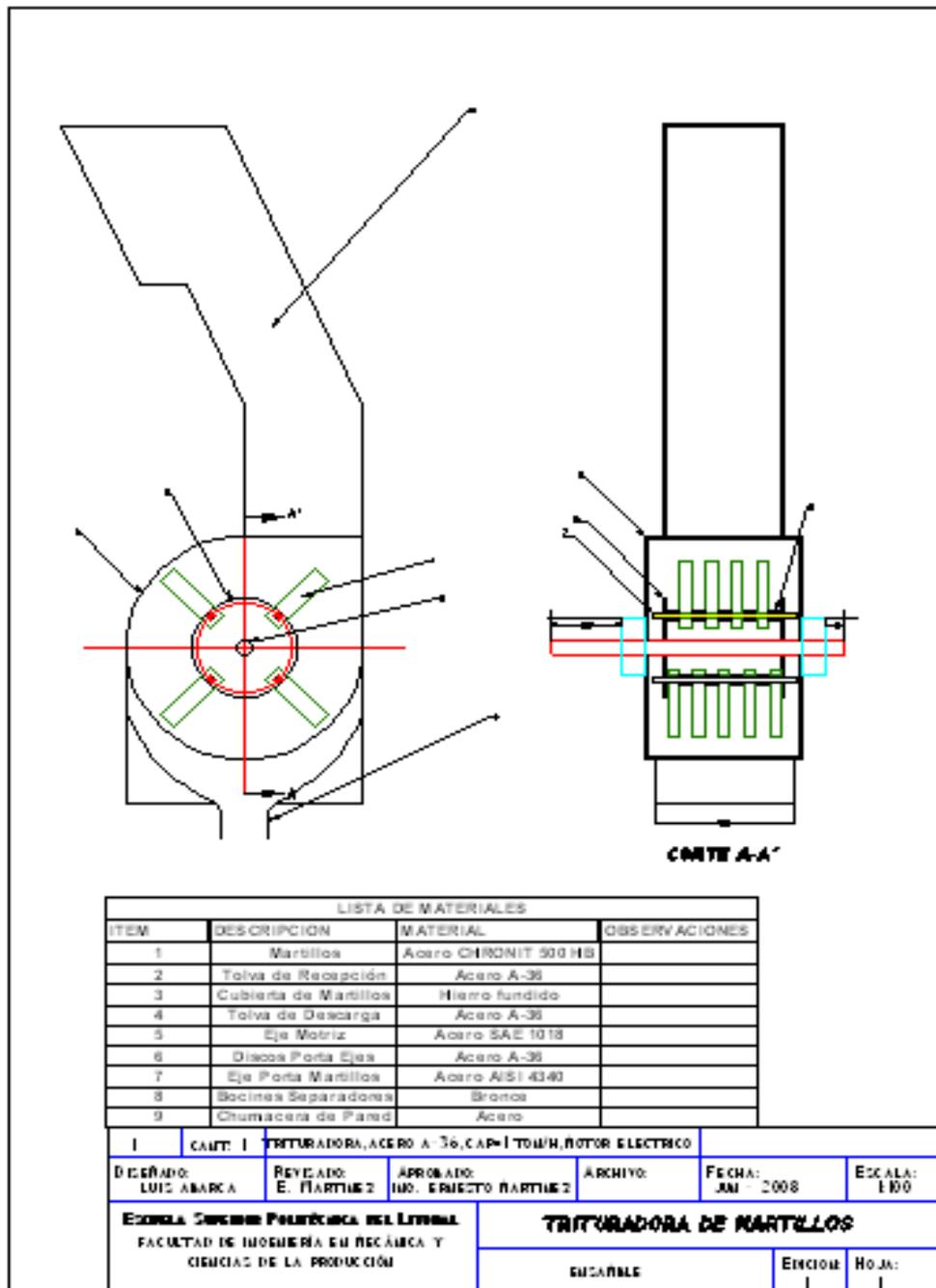
En las máquinas trituradoras tipo martillo, están formadas de manera general por los elementos siguientes:

1. Martillos.
2. Ejes porta martillos.
3. Eje principal de potencia.
4. Elementos de sujeción.
5. Elementos de transmisión de potencia.



**FIGURA 4.1 ELEMENTOS QUE FORMAN UN MOLINO DE MARTILLOS.**

Cada uno de estos elementos varía de acuerdo a las consideraciones del fabricante y del material a triturar. En algunos casos existen juegos de martillos, en otros casos existe solo un martillo grande que realiza la misma función del juego. Es importante mencionar estos aspectos para comprender los elementos aquí presentes, que serán detallados más adelante. La trituradora posee una tolva de alimentación.



**FIGURA 4.2 DISEÑO DE FORMA DE LA TRITURADORA DE UNA TONELADA DE CAPACIDAD HORA**

Dicha tolva fue analizada de acuerdo a las consideraciones del material a triturar. Para el caso del vidrio se tuvo en cuenta el factor de rozamiento entre las paredes de la tolva y la botella. Para cada material existen diversos factores de rozamiento lo cual permite que el vidrio se desplace sin ningún obstáculo por la superficie.

El ángulo de inclinación de la tolva se lo ha calculado de la manera convencional, utilizando la geometría y la fórmula que describe el ángulo de inclinación utilizando el coeficiente de rozamiento.

$$\theta = \tan^{-1} \mu_s \quad \text{ecuación 1.}$$

De acuerdo a varias pruebas realizadas para verificar dicho ángulo, se obtuvo como resultado el valor de 44.4°. En el diseño de forma se observa un ángulo mayor, lo cual garantiza que la botella se desplazará sin ningún problema por la superficie de la tolva.

Más adelante, la trituradora está formada por dos pares de ejes porta martillos, que en esta tesis serán denominados **ejes secundarios**. En un par de éstos ejes existen 4 martillos, y el otro par contiene 5 martillos. Cada martillo ha sido distribuido de tal forma que no se golpeen entre ellos lo que se logra con bocines; en el mismo eje, y con los martillos de ejes contrarios. Los martillos trabajan de forma basculante, esto beneficia a la trituración y permite que cualquier parte

del martillo golpee a la botella al momento de la trituración trasladando la fuerza directamente a la misma.

Un componente adicional de los martillos, se debe a que muchos fabricantes de molinos utilizan tamaños estándares, es por esta razón que han sido seleccionados, y en base a eso se ha procedido al cálculo de los ejes secundarios.

Los ejes secundarios son 4 y están alternados, siguiendo la dirección de las manecillas del reloj. En un eje 4 martillos en otro 5, hasta completarlos. Ambos extremos de los ejes se roscan para fijarlos al sistema de trituración, por medio de dos discos de separación que sujetan a los ejes secundarios. Los ejes secundarios han sido calculados de acuerdo a la carga viva que es la fuerza de impacto, la carga muerta que es el peso del martillo, y de los momentos que soportan.

Como se mencionó anteriormente los ejes secundarios están unidos a discos separadores, en cantidad de 2, uno a cada extremo.

Los discos porta ejes se llaman así porque realizan la labor de soportar a los ejes secundarios y al eje principal. Aseguran, balancean y transmiten la velocidad al sistema.

El aseguramiento del eje principal a los discos, se da por medio de chumaceras de pared. Ahorran espacio para poder montar y desmontar, así como para la colocación de la polea de transmisión.

La descarga del vidrio triturado ocurre de dos formas: por medio de la gravedad y por medio de la fuerza centrífuga que empuja a los pedazos hacia el interior del molino.

El sistema de transmisión de potencia está conectado por medio de bandas, que están conectadas al eje de motor y al eje de la máquina por las poleas. Esto también se lo hace por seguridad, ya que se estima que las bandas sean la parte fusible en caso de que algún pedazo de material se trabe en algún mecanismo interno.

El sistema funciona por un motor de cuya capacidad será determinada. Pero debemos de tener en consideración que el motor debe ser de un voltaje de 220 voltios y trifásico, con frecuencia de 60 Hz, por ser un equipo industrial y que el costo de esa electricidad es más económico.

La máquina será construida con plancha de 6 milímetros o  $\frac{1}{4}$  de pulgada, por condiciones de trabajo y facilidad de construcción la cual será validada con los resultados al realizar el análisis estructural.

Para esto es necesario conocer los materiales con sus respectivas dimensiones y saber si se encuentran en el mercado, ya que eso permite estimar el costo de fabricación, y de no encontrar algún elemento, ver de qué manera es reemplazado, por otro que cumpla con las características de diseño.

Por ejemplo en el mercado el tipo de aceros para máquinas está limitado a ciertas clases como el SAE 1018 generalmente y también en el diámetro, las medidas más frecuentes son de 1 pulgada en adelante. Lo mismo sucede con el material para los martillos, ya que se encuentran en ciertos espesores y, en ambos casos, estos son los materiales importantes del diseño.

Todas esas consideraciones se las ha tomado en cuenta al momento de realizar el diseño estructural en el programa SAP 2000.

#### **4.2. Análisis Estructural mediante uso SAP 2000.**

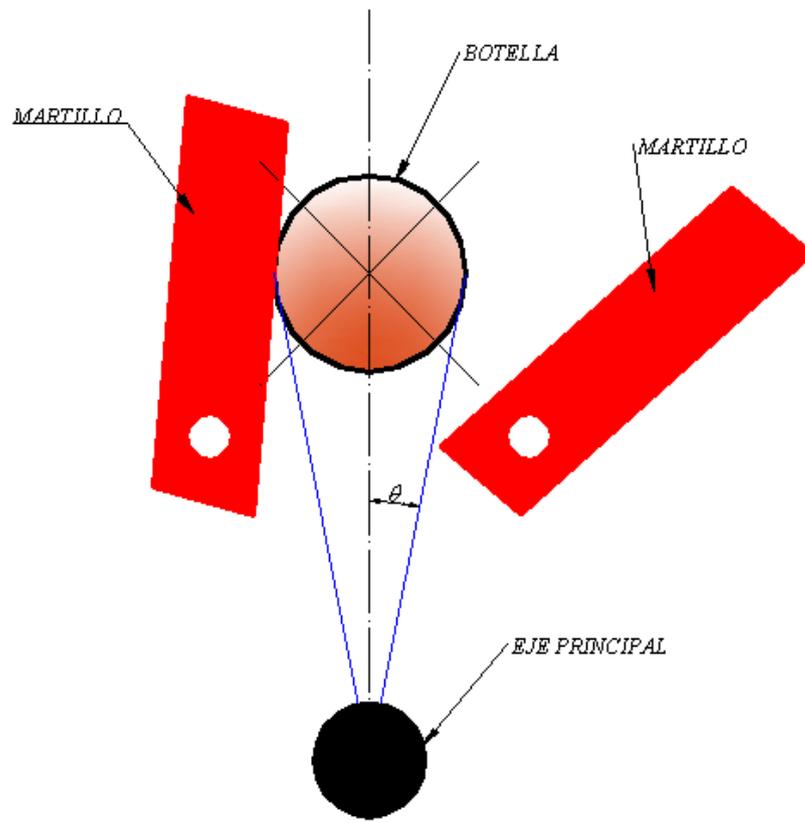
El análisis usando el programa Structure Analysis Program 2000, (SAP 2000) versión 9, es muy utilizado en diversos tipos de diseños, desde estructuras hasta máquinas.

El programa utiliza en los cálculos la combinación de carga, entre las cargas vivas y muertas, de acuerdo al método LRFD, por sus siglas en inglés (Load Resistente Factory Design).

El programa trabaja con los parámetros que se le indica, tales como apoyos, materiales, longitudes, pesos, cargas, torques, forma de construcción, etc.

Los resultados del programa de SAP 2000 son un refinamiento del trabajo realizado en base a los métodos tradicionales de diseño, en donde se aplica los conocimientos adquiridos y aplicarlos de manera efectiva.

Para hacerlo hay que analizar el sistema de trituración, desde el interior hasta el exterior, empezando a analizar la forma en como la botella es triturada.



**FIGURA 4.3 ESQUEMA DE LA TRITURACION DE BOTELLA.**

La botella un momento antes de la trituración se apoya en los discos y hace contacto con un par de martillos, en ese preciso instante se procede a analizar que ocurrirá con la botella al ser triturada. Esto permite calcular la fuerza de trituración, el tiempo de impacto de los martillos contra la botella, la aceleración del sistema, la velocidad angular, etc.

De acuerdo al gráfico mostrado puedo tomar el triángulo equilátero formado por el diámetro de la botella hasta el centro del eje principal,

y calcular el ángulo de rotación, mediante la función trigonométrica seno.

$$\text{Sen } \theta = \frac{\text{ladoopuesto}}{\text{hipotenusa}} \quad \text{ecuación 2.}$$

$$\text{Sen } \theta = \frac{3.75}{15} = 0.25 \rightarrow \theta = \text{sen}^{-1} \left( \frac{3.75}{15} \right) = 14.477^\circ$$

$$\theta_T = 2\theta = 28.955^\circ$$

Como la rotación se la calcula en radianes, procedo a hacer la conversión:

$$1 \text{ rad} \rightarrow 57.2958^\circ$$

$$x \text{ rad} \rightarrow 28.955^\circ \rightarrow x = 0.50536 \text{ radianes.}$$

Este valor es el desplazamiento angular en ese instante.

La velocidad angular  $\omega$  está dada por la relación entre el desplazamiento angular versus tiempo, lo que se muestra en la ecuación:

$$\omega = \frac{\theta}{t}; \quad \text{ecuación 3.}$$

El valor de la velocidad angular  $\omega$  es de 1800 r.p.m. y para motivos de cálculo, transformamos las unidades a rad/seg.

$$1800 \frac{\text{revoluciones}}{\text{min } \omega} \times \frac{2\pi \text{rad.}}{1 \text{revolucion}} \times \frac{1 \text{ min } \omega}{60 \text{segundos}} = 188.5 \text{ rad/seg.}$$

Debido a que la velocidad se transmite por bandas se calcula que por fricción se pierde cerca del 30% de ésta velocidad. Por lo tanto la velocidad angular  $\omega$  es igual a 132 rad./seg. Y éste valor se mantendrá de aquí en adelante para los cálculos posteriores.

Ahora para encontrar el valor del tiempo de impacto, despejo de la ecuación 2, el valor de t y reemplazo los valores del desplazamiento angular ( $\theta$ ) y de la velocidad angular ( $\omega$ ) en la expresión.

$$t = \frac{\theta}{\omega} = \frac{0.50536}{132} = 3.8284 \times 10^{-3} \text{ seg.}$$

De las ecuaciones de cinemática rotacional puedo calcular la aceleración rotacional ( $\alpha$ ) que me permitirá calcular aplicando el principio de D´Lambert el valor de la Fuerza de impacto requerida para lograr la trituración de la botella.

La ecuación de cinemática a usar es la siguiente:

$$\theta - \theta_0 = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad \text{ecuación 4.}$$

Despejando la aceleración angular  $\alpha$  de la ecuación 4 reemplazo los valores.

$$\alpha = \frac{2(\theta - \theta_0 - \omega_0 t)}{t^2} = \frac{2(0.50536 - 0 - (132)(3.824 \times 10^{-3})}{(3.824 \times 10^{-3})^2} = 153.5 \text{ rad./seg.}^2$$

Luego aplico el principio de D'Lambert en donde indica la sumatoria de los momentos es igual a la sumatoria de las inercias multiplicado por las aceleraciones angulares.

$$\Sigma M_o = \Sigma I_o \alpha \quad \text{ecuación 5.}$$

$$\Sigma F \cdot d = \Sigma I_o \alpha \quad \text{ecuación 6.}$$

Despejando la fuerza F de la ecuación 6, obtengo:

$$F = \frac{I_o \alpha}{d} = \frac{(0.045855296)(153.5)}{0.15} = 46.93 \text{ Newtons.}$$

Esta es la fuerza de impacto que se necesita para triturar a la botella, y que es transmitida al martillo en el momento del contacto. Para motivo de cálculo redondeo al valor de 47 Newtons.

La fuerza total, carga viva y muerta, es la sumatoria del peso más la fuerza requerida, en total 58.5 Newtons, descrita anteriormente.

### **Selección de los martillos.**

Los martillos, que han sido seleccionados de acuerdo a las recomendaciones de fabricantes de molinos. Algunas normas, como la citada en la sección 3.1, hacen referencias acerca de las medidas de los martillos, los cuales trituran el material.



**FIGURA 4.4 MARTILLOS USADOS EN MOLINOS, Y DE DISTINTAS FORMAS DE ACUERDO AL MATERIAL A TRITURAR.**

FUENTE: Streeinstorser Máquinas-Herramientas.

Los fabricantes de molinos estipulan la condición de volumen para una mejor trituración, entonces el volumen de los martillos es mayor del recomendado, en donde su inercia será mayor, su peso también y su trituración más óptima.

Según la norma de la sección 3.1, el volumen será de  $101.6 \text{ cm}^3$ , y es calculado de acuerdo a las medidas de  $(25 \times 6,35 \times 0,64) \text{ cm}$ . Cambiando

las dimensiones por las utilizadas por los fabricantes, se obtiene que el volumen es mayor.

Las dimensiones utilizadas generalmente son (15x4x2.5) cm, y se obtiene como volumen 150 cm<sup>3</sup>. Para el cálculo del volumen se ha tenido en consideración que existen dos orificios del tamaño del diámetro del eje secundario, esto se hace para que una vez desgastado un lado del martillo, se pueda utilizar el otro lado. Pero sólo se ha considerado hacer un orificio en el martillo debido a que muchos operadores de éstas máquinas utilizan los martillos hasta que estén a punto de terminar y cuando deciden cambiar de posición los martillos, los orificios están prácticamente desechos y no son útiles.

Esto llevará a que sean construidos, se lo hará en acero al carbono CHRONIT 500 (HB), que es utilizado para construcción mecánica y estructural, de gran resistencia a la abrasión, impacto y deslizamiento; y que también tiene una resistencia superior a la corrosión atmosférica que otros aceros al carbono.

También se lo selecciona debido a que es muy empleado en maquinarias como palas retroexcavadoras, volquetes, maquinaria pesada, trituradoras, etc.

Conjuntamente se debe de hacer un proceso endurecimiento superficial, para alargar la vida útil del martillo, y este proceso se denomina cementación.

Se procede a calcular el peso de los martillos, utilizando acero al Carbono CHRONIT 500 (HB). Como es acero al Carbono la densidad es la misma de los aceros.

La densidad ( $\rho$ ) está dada por la relación:  $\rho = \frac{m_1}{v}$  **ecuación 7.**

De la ecuación 6 despejo la masa  $m_1$ :

$$m_1 = \rho \cdot v = (7.8 \text{ gr/cm}^3)(101.6 \text{ cm}^3) = 792.48 \text{ gr.} \times \frac{1 \text{ kg.}}{1000 \text{ gr.}} = 0.79248 \text{ kg}$$

$$\rho = \frac{m_1}{v} \rightarrow m_1 = \rho \cdot v = (7.8 \text{ gr/cm}^3)(150 \text{ cm}^3) = 1170 \text{ gr.} \times \frac{1 \text{ kg.}}{1000 \text{ gr.}} = 1.17 \text{ kg.}$$

Como se observa, con las segundas dimensiones se obtiene mayor volumen, por lo tanto elijo la segunda opción y calculo el peso de los martillos.

$$W = m_1 \cdot g = 1.17 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 = 11.4777 \text{ Newtons.}$$

Al momento de calcular la energía requerida para realizar la trituración deseada, mediante pruebas con tres masas de 0.5 Kg., de 1 Kg., y de 5

Kg., se logró observar que para la trituración deseada de grado 1 o trituración basta, es suficiente una masa de 0.5 Kg., y a una altura de 1.5 m.

Las pruebas se realizaron en INTRAMET.

La energía potencial está dada por la ecuación:

$$E = m_1gh \quad \text{ecuación 8.}$$

Se reemplaza los valores correspondientes en la ecuación 8.

$$E = mgh = (0.5 \text{ Kg.})(9.81 \text{ m/s}^2)(1.5 \text{ m}) = 7.3575 \text{ N.m}$$

En donde:

E = Energía potencial.

$m_1$  = Masa.

g = Gravedad.

h = altura.

Esta energía está concentrada en un solo punto al ser golpeada por la masa antes indicada. En el martillo, por definición existirían 3 puntos de contacto entre la botella y el martillo, entonces esa energía la multiplico por 3.

$$E_1 = 7.3575 \text{ N.m} \times 3 = 22.0725 \text{ N.m}$$

Sabemos que la energía cinética esta definida por:

$$E = \frac{1}{2} m_1 v^2 \quad \text{ecuación 9.}$$

$E_2 = \frac{1}{2} m_1 v^2$  ; reemplazamos en la ecuación 9 la expresión:

$$v = \omega R \quad \text{ecuación 10.}$$

$$1800 \frac{\text{rev.}}{\text{min.}} \times \frac{1 \text{ min.}}{60 \text{ seg.}} \times \frac{2\pi \text{ rad.}}{1 \text{ rev.}} = 188.5 \text{ rad/seg.}$$

Por pérdidas alrededor del 30% la velocidad angular  $\omega = 132 \text{ rad/seg.}$

$$V = \omega R = (132 \text{ rad/seg})(0.1875 \text{ m}) = 24.75 \text{ m/seg.}$$

En donde:

$\omega$  = velocidad angular (rad/seg.)

R = Distancia desde el centro del eje principal hasta el centroide del martillo.

Por lo tanto si igualamos las ecuaciones 8 y 9 podmos obtener el valor de la masa teorica de los martillos.

$$\text{Por lo tanto; } E_1 = E_2 ; 22.0725 = \frac{1}{2} m (24.75)^2$$

$$22.0725 = 306.28 m$$

$$m = 0.072 \text{ Kg.}$$

Como la masa del martillo es muy pequeña, y al dimensionarlo con las medidas anteriores que dan un masa mucho mayor a la obtenida, concluyo que los martillos seleccionados funcionarán como **volantes**.

Utilizando el programa computacional SAP 2000 se entrega los valores y gráficos del momento cortante y de los momentos flectores máximos, además de los esfuerzos de Von Misses, pero esos datos se los analizará más adelante.

### **Diseño de ejes secundarios.**

El diseño de los ejes secundarios, viene dado por la consideración de que los martillos han sido diseñados por lo que se procede a efectuar el mismo proceso para dichos ejes.

En el análisis se toma en cuenta que los ejes soportan, en primera instancia, la carga muerta del martillo, es decir su propio peso. Además, se considera el momento flector y torsor a que está sometido cuando está completamente instalado y, al realizar su movimiento al trabajar.

La fuerza que realiza la trituración, es decir de 47 Newtons o 10,58 libras, se transmite directamente a la botella, y por lo tanto es absorbida de forma total por la misma, con lo cual el eje transmitirá poca carga de esa fuerza, pero se debe diseñar al eje como si absorbe la fuerza, o una gran parte de ella.

Para calcular, tenemos la viga con las cargas aplicadas a la distancias requeridas.

Para el caso de **4 martillos**, se obtiene un **Momento Flector Máximo**

$$\text{de } 8.888\text{N-m} \times \frac{8.7873\text{lb-in}}{1\text{N-m}} = 78.105 \text{ Lb-in.}$$

Asumiendo un factor de seguridad  $\eta = 6$

$$\eta = \frac{S_{sy}}{\sigma} \quad \text{ecuación 11.}$$

$$\text{Despejando: } \sigma = \frac{S_{sy}}{\eta} \Rightarrow \frac{32M}{\pi d^3} = \frac{S_{sy}}{\eta} \Rightarrow d = \sqrt[3]{\frac{32M\eta}{S_{sy}\pi}}$$

$$\sqrt[3]{\frac{(32)(78.105)(6)}{(0.577)(124 \times 10^3)(\pi)}} \Rightarrow \mathbf{d = 0.405 \text{ plg.} = 10.30 \text{ mm.}}$$

**Para Momento Torsor:**

$$\eta = \frac{S_{sy}}{\tau} \quad \text{ecuación 12.}$$

$$\text{Despejando: } \tau = \frac{S_{sy}}{\eta} \Rightarrow 16Fd\eta = \pi\phi^3 S_{sy} \Rightarrow \phi = \sqrt[3]{\frac{16Fd\eta}{\pi S_{sy}}}$$

$$\sqrt[3]{\frac{(16)(13.146)(10.33)(6)}{(\pi)(0.577)(124 \times 10^3)}} \Rightarrow \mathbf{d = 0.387 \text{ plg.} = 9.83 \text{ mm.} = 10 \text{ mm.}}$$

En donde la nomenclatura es la siguiente:

$S_{sy}$  = Límite de fluencia elástico al cortante, en este caso para el acero AISI 4340.

$\sigma$  = Esfuerzo de flexión.

$\tau$  = Esfuerzo de torsión.

$\eta$  = Factor de seguridad.

M = Momento Flector máximo.

d = Diámetro del eje secundario a calcular.

$\pi$  = Constante pi.

Ahora se procede a calcular los valores para el Círculo de Mohr y los esfuerzos dinámicos o de Goodman.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad \text{ecuación 13.}$$

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{(78.105)(0.20)}{\frac{\pi(0.4)^4}{64}} = \frac{15.621}{1.256 \times 10^{-3}} = 12430.8 \text{ psi.}$$

$$\tau \text{ flexión} = \frac{4v}{3A} \quad \text{ecuación 14.}$$

$$\tau \text{ flexión} = \frac{4V}{3 \frac{\pi d^2}{4}} = \frac{16V}{3\pi d^2}, \text{ donde:}$$

V = Valor del esfuerzo cortante.

A = Area de la sección transversal.

$\pi$  = Constante pi.

d = Diámetro.

$$\tau \text{ torsión} = \frac{Tr}{J} \quad \text{ecuación 15.}$$

$$\tau \text{ torsión} = \frac{Tr}{J} = \frac{Fdr}{\frac{\pi d^4}{32}} = \frac{16Fd}{\pi d^3}, \text{ en donde:}$$

T = Torque.

r = Radio de la sección transversal.

J = Momento polar de inercia.

F = Fuerza aplicada.

d = distancia desde el eje principal hasta el martillo.

$$\tau \text{ flexión} = \frac{4V}{3A} = \frac{16V}{3\pi d^2} = \frac{(16)(26.29)}{(3)(\pi)(0.40)^2} = 278.95 \text{ psi.}$$

$$\tau \text{ torsión} = \frac{Tr}{J} = \frac{16Fd}{\pi d^3} = \frac{(16)(13.146)(10.33)}{\pi(0.4)^3} = 4322.59 \text{ psi.}$$

$$\tau \text{ máx} = \tau \text{ flexión} + \tau \text{ torsión} = 278.95 + 4322.59 = 4601.54 \text{ psi.}$$

### **Esfuerzos dinámicos Goodman.**

$$\frac{1}{\eta} = \frac{\sigma_m}{S_{ut}} + \frac{\sigma_a}{S_e} \quad \text{ecuación 16.}$$

En donde:

$\sigma_a = \sigma_{\text{máx}}$  = Esfuerzos máximos en la onda cíclica.

$\sigma_m$  = Esfuerzo medio en la onda cíclica.

$$\sigma_a = \sigma_{\text{máx}} = 12430.8 \text{ psi.}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_a}{2} = 6215.4 \text{ psi.}$$

$S_e = C_{\text{carga}} C_{\text{conf.}} C_{\text{tamaño}} C_{\text{sup.}} C_{\text{temp.}} S_e'$ . **ecuación 17.**

$$C_{\text{carga}} = 1.$$

$$C_{\text{conf.}} (90\%) = 0.897.$$

$$C_{\text{tamaño}} = 0.869 d^{-0.097} = 0.869 (0.4)^{-0.097} = 0.9497.$$

$$C_{\text{sup.}} = A (S_{ut})^b = (14.4)(140)^{-0.718} = 0.414421$$

$$C_{\text{temp.}} = 1.$$

$$S_e' = 0.5 S_{ut} = (0.5)(140 \times 10^3) = 70000 \text{ psi.}$$

$$S_e = (1) (0.897) (0.9497) (0.414421) (1) (70000) = 1729795.28 \text{ psi.}$$

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

$$\frac{1}{\eta} = \frac{6215.4}{140 \times 10^3} + \frac{12430.8}{1729795.28}$$

$$\frac{1}{\eta} = 0.04439 + 7.18 \times 10^{-3}$$

$$\eta = 19.4$$

Para el caso de **5 martillos**, se obtiene un Momento Flector Máximo

$$\text{de } 9.502 \text{ N-m} \times \frac{8.7873 \text{ lb-in}}{1 \text{ N-m}} = 83.502 \text{ Lb-in.}$$

Asumo un factor de seguridad  $\eta = 6$ , utilizo ecuación 11.

$$\eta = \frac{S_{sy}}{\sigma} \Rightarrow \sigma = \frac{S_{sy}}{\eta} \Rightarrow \frac{32M}{\pi d^3} = \frac{S_{sy}}{\eta} \Rightarrow d = \sqrt[3]{\frac{32M\eta}{S_{sy}\pi}} =$$
$$\sqrt[3]{\frac{(32)(83.502)(6)}{(0.577)(124 \times 10^3)(\pi)}} \Rightarrow \mathbf{d = 0.414 \text{ plg.} = 10.53 \text{ mm.}}$$

**Para Momento Torsor.** Utilizo ecuación 12.

$$\eta = \frac{S_{sy}}{\tau} \Rightarrow \tau = \frac{S_{sy}}{\eta} \Rightarrow 16Fd\eta = \pi\phi^3 S_{sy} \Rightarrow \phi = \sqrt[3]{\frac{16Fd\eta}{\pi S_{sy}}} =$$
$$\sqrt[3]{\frac{(16)(13.146)(10.33)(6)}{(\pi)(0.577)(124 \times 10^3)}} \Rightarrow \mathbf{d = 0.387 \text{ plg.} = 9.83 \text{ mm.} = 10 \text{ mm.}}$$

En donde para ambos casos la nomenclatura es la siguiente:

$S_{sy}$  = Límite de fluencia elástico al cortante, en este caso para el acero AISI 4340.

$\sigma$  = Esfuerzo de flexión.

$\tau$  = Esfuerzo de torsión.

$\eta$  = Factor de seguridad.

$M$  = Momento Flector máximo.

$d$  = Diámetro del eje secundario a calcular.

$\pi$  = Constante pi.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{(83.502)(0.2)}{\frac{\pi(0.4)^4}{64}} = \frac{16.7004}{1.256 \times 10^{-3}} = 13289.76 \text{ psi.}$$

$$\tau \text{ flexión} = \frac{4v}{3A} = \frac{16V}{3\pi d^2},$$

$$\tau \text{ torsión} = \frac{Tr}{J} = \frac{Fdr}{\frac{\pi d^4}{32}} = \frac{16Fd}{\pi \phi^3}$$

$$\tau \text{ flexión} = \frac{4V}{3A} = \frac{16V}{3\pi d^2} = \frac{(16)(32.87)}{(3)(\pi)(0.4)^2} = 384.76 \text{ psi.}$$

$$\tau \text{ torsión} = \frac{Tr}{J} = \frac{16Fd}{\pi \phi^3} = \frac{(16)(13.146)(10.33)}{\pi(0.4)^3} = 4322.59 \text{ psi.}$$

$$\tau \text{ máx} = \tau \text{ flexión} + \tau \text{ torsión} = 384.76 + 4322.59 = 4707.35 \text{ psi.}$$

### **Esfuerzos de Goodman.**

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

En donde:

$\sigma_a = \sigma_{\text{máx}}$  = Esfuerzos máximos en la onda cíclica.

$\sigma_m$  = Esfuerzo medio en la onda cíclica.

$\sigma_a = \sigma_{\text{máx}} = 13289.766 \text{ psi.}$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_a}{2} = 6644.88 \text{ psi.}$$

$$S_e = C_{\text{carga}} C_{\text{conf.}} C_{\text{tamaño}} C_{\text{sup.}} C_{\text{temp.}} S_e'$$

$$C_{\text{carga}} = 1.$$

$$C_{\text{conf.}} (90\%) = 0.897.$$

$$C_{\text{tamaño}} = 0.869 d^{-0.097} = 0.869 (0.4)^{-0.097} = 0.9497.$$

$$C_{\text{sup.}} = A (S_{ut})^b = (14.4)(140)^{-0.718} = 0.414421$$

$$C_{\text{temp.}} = 1.$$

$$S_e' = 0.5 S_{ut} = (0.5)(140 \times 10^3) = 70000 \text{ psi.}$$

$$S_e = (1) (0.897) (0.9497) (0.414421) (1) (70000) = 1729795.28 \text{ psi.}$$

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

$$\frac{1}{\eta} = \frac{6644.88}{140 \times 10^3} + \frac{13289.76}{1729795.28}$$

$$\frac{1}{\eta} = 0.047463 + 7.68 \times 10^{-3}$$

$$\eta = 18.1$$

### **Cálculo del eje principal.**

En el cálculo del eje principal se procede de manera similar al diseño de los ejes secundarios, teniendo en cuenta que este eje soporta cargas

adicionales como el peso de los discos que sujetan al sistema, la carga dinámica que implica la trituración de las botellas, el momento torsor dado por el motor, etc.

Toda la sumatoria de estas fuerzas para ambos ejes secundarios da como resultado el valor de 134.84 lbs.

El **Momento Flector** es de 447.3336 Lb-in y asumo un factor de seguridad  $\eta = 6$ .

$$\eta = \frac{S_{sy}}{\sigma} \Rightarrow \sigma = \frac{S_{sy}}{\eta} \Rightarrow \frac{32M}{\pi d^3} = \frac{S_{sy}}{\eta} \Rightarrow d = \sqrt[3]{\frac{32M\eta}{S_{sy}\pi}} =$$

$$\sqrt[3]{\frac{(32)(447.3336)(6)}{(0.577)(40 \times 10^3)(\pi)}} = 1.08 \text{ plg.}$$

**Para la Torsión:**

$$\eta = \frac{S_{sy}}{\tau_{torsion}} \Rightarrow \eta = \frac{S_{sy}}{\frac{16Fd}{\pi\phi^3}} = \frac{\pi\phi^3 S_{sy}}{16Fd} \Rightarrow \phi = \sqrt[3]{\frac{16F\eta d}{\pi S_{sy}}} =$$

$$\sqrt[3]{\frac{(16)(134.84)(6)(19.685)}{(\pi)(0.577)(40 \times 10^3)}} = \phi = 1.52 \text{ plg.}$$

Se procede al cálculo de los esfuerzos de flexión y de torsión.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{(477.3336)(0.76)}{\frac{\pi(1.52)^4}{64}} = 1384.494 \text{ psi.}$$

$$\tau_{\text{flexión}} = \frac{4V}{3A} = \frac{16V}{3\pi d^2} = \frac{(16)(134.84)}{3\pi(1.52)^2} = 99.078 \text{ psi.}$$

$$\tau_{\text{torsión}} = \frac{Tr}{J} = \frac{16Fd}{\pi\phi^3} = \frac{(16)(134.84)(19.685)}{\pi(1.52)^3} = 3849.404 \text{ psi.}$$

$$\tau_{\text{máx}} = \tau_{\text{flexión}} + \tau_{\text{torsión}} = 99.078 + 3849.404 = 3948.48 \text{ psi.}$$

### **Esfuerzos de Goodman.**

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

$$\sigma_a = \sigma_{\text{máx}} = 1384.494 \text{ psi.}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_a}{2} = 692.247 \text{ psi.}$$

$$S_e = C_{\text{carga}} C_{\text{conf.}} C_{\text{tamaño}} C_{\text{sup.}} C_{\text{temp.}} S_e'$$

$$C_{\text{carga}} = 1.$$

$$C_{\text{conf.}} (90\%) = 0.897.$$

$$C_{\text{tamaño}} = 0.869 d^{-0.097} = 0.869 (1.52)^{-0.097} = 0.834412.$$

$$C_{\text{sup.}} = A (S_{ut})^b = (14.4)(69)^{-0.718} = 0.68876.$$

$$C_{\text{temp.}} = 1.$$

$$S_e' = 0.5 S_{ut} = (0.5)(69 \times 10^3) = 34500 \text{ psi.}$$

$$S_e = (1) (0.897) (0.8344) (0.68876) (1) (34500) = 17785 \text{ psi.}$$

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

$$\frac{1}{\eta} = \frac{692.247}{69 \times 10^3} + \frac{1384.494}{17785}$$

$$\frac{1}{\eta} = 0.010032571 + 0.077846$$

$$\eta = 11.3$$

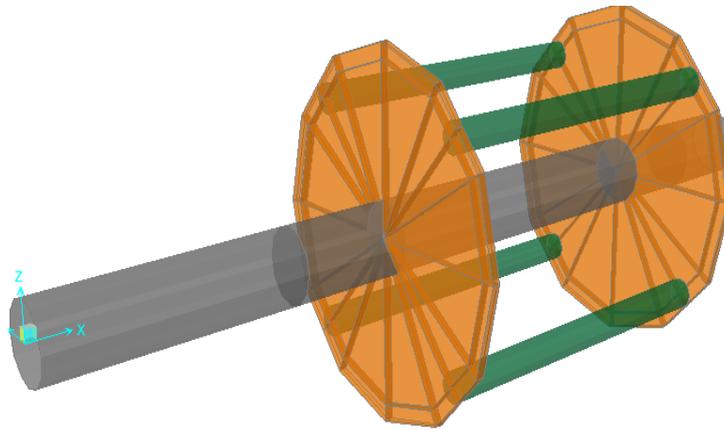
A partir de estos cálculos se empieza a desarrollar el análisis del programa computacional S.A.P. 2000 debido a que anteriormente se colocó un precálculo de acuerdo a los métodos tradicionales de diseño.

El uso del programa es para refinar el diseño del molino, y esto nos permite conocer como se va a comportar la estructura de forma estática.

Hay que considerar si dentro del mercado se encuentra los diámetros requeridos para los ejes secundarios y para el eje principal, como se anotó anteriormente el eje principal no recibe el impacto al momento de la trituración de la botella, y su función es la de transmitir el movimiento del motor.

Entonces se observa las consideraciones que hace el programa para realizar el análisis.

**Modelo Simplificado en 3D del Sistema Eje Principal-Disco Porta Ejes- Ejes Porta Martillos.**



**FIGURA 4.5 MODELO DEL SISTEMA TRIRURADOR: EJES SECUNDARIOS, EJE PRINCIPAL, DISCOS DE APOYO.**

Este es el modelo simplificado del sistema que va a ser introducido en el programa SAP 2000. Consta del eje principal, los dos discos porta ejes, y los ejes secundarios. Es simplificado debido a que no consta en el gráfico los martillos, las chumaceras, poleas, bandas, ni el torque aplicado en el eje principal debido al motor.

Los resultados del análisis se muestran a continuación, van desde las deformaciones, hasta los valores de momentos y cortantes.

Una vez más se indica que a partir de este modelo, SAP 2000 utiliza para todo el análisis, los factores para cargas y combinaciones de cargas, que se encuentran en el método de LRFD (Load and

Resistance Factor Design), en inglés; Factor de Diseño y Resistencia de Cargas.

Este método se encuentra en el manual de acero de construcción, editado por la AISI. En él aparecen todas las combinaciones de cargas establecidas para diversos tipos de casos, tales como carga muerta, carga viva, de sismo, de viento, así como para condiciones de impacto, y de maquinaria, que serán mostrados en los apéndices de esta tesis.

El programa trabaja con los parámetros que se le indica, tales como apoyos, materiales, longitudes, pesos, cargas, torques, forma de construcción, etc.

Por ejemplo, los ejes secundarios y el eje principal se los puede seleccionar de acuerdo a la sección transversal que es una circunferencia. Los discos de apoyo al sistema no se los puede dibujar sólidamente y se lo hace por secciones. Es por esta razón que el programa lo toma como una plancha y en los análisis consta de esa manera, pero no afecta a los cálculos.

**TABLA 5.**

**LISTA DE MATERIALES: PROPIEDADES DE SECCIÓN**

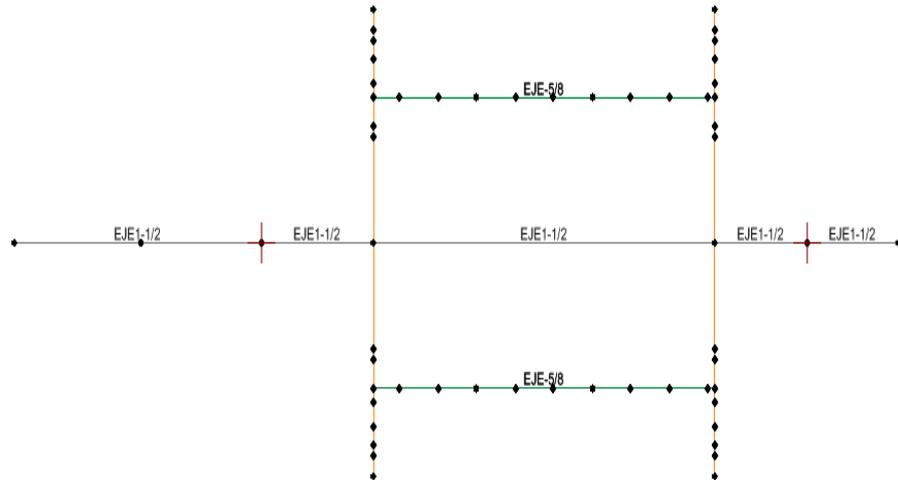
Sección	Tipo de Objeto	Número de Piezas	Longitud Total.	Peso Total.
Text	Text	Unitless	mm	Kgf
EJE PRINC.	Frame	5	630	5,64
EJE SEC.	Frame	4	972	1,51
PLANCHA_6	Area			3,58

Los puntos marcados como unitless, se refieren a los puntos en donde están aplicados puntos de cargas, o de condición de frontera.

En el caso del eje principal hay 5 puntos que corresponden a las siguientes condiciones: El punto de aplicación del torque, el primer apoyo (chumacera), el punto de contacto del primer disco, el punto de contacto con el segundo disco, y el último punto, el segundo apoyo (chumacera).

En el eje secundario, corresponden 4 puntos que en este caso se refieren a la ubicación de los martillos.

## Modelo de la trituradora en SAP 2000 para el análisis estructural.

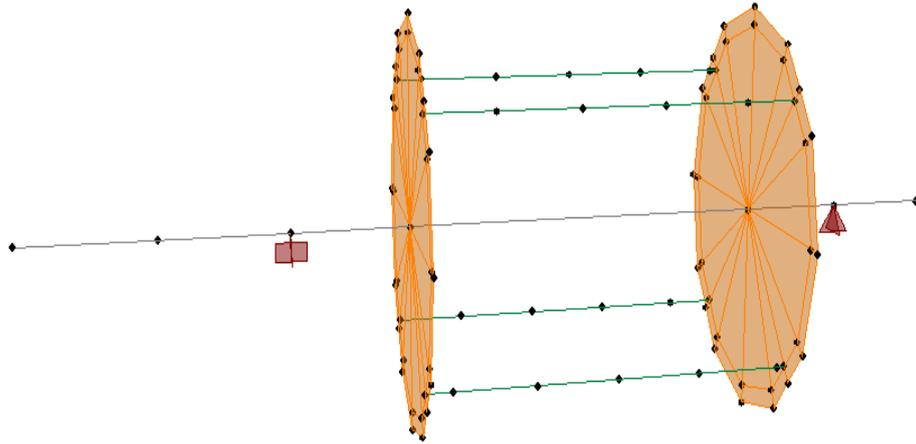


**FIGURA 4.6 ANALISIS ESTRUCTURAL HECHO POR SAP 2000.**

En el eje principal (línea central), se pueden apreciar 5 puntos, que se llaman nodos. En dichos nodos se representan los puntos en donde están aplicadas cargas o en algún caso especial son puntos de referencia. El primer punto es la posición del motor, el segundo punto es la colocación de la chumacera, los puntos tercero y cuarto son los discos porta ejes, y finalmente el quinto punto representa al segundo apoyo de la chumacera.

En los demás segmentos del gráfico son nodos que son analizados por el programa internamente.

### Condiciones de Apoyo.



**FIGURA 4.7 CONDICIONES DE APOYO.**

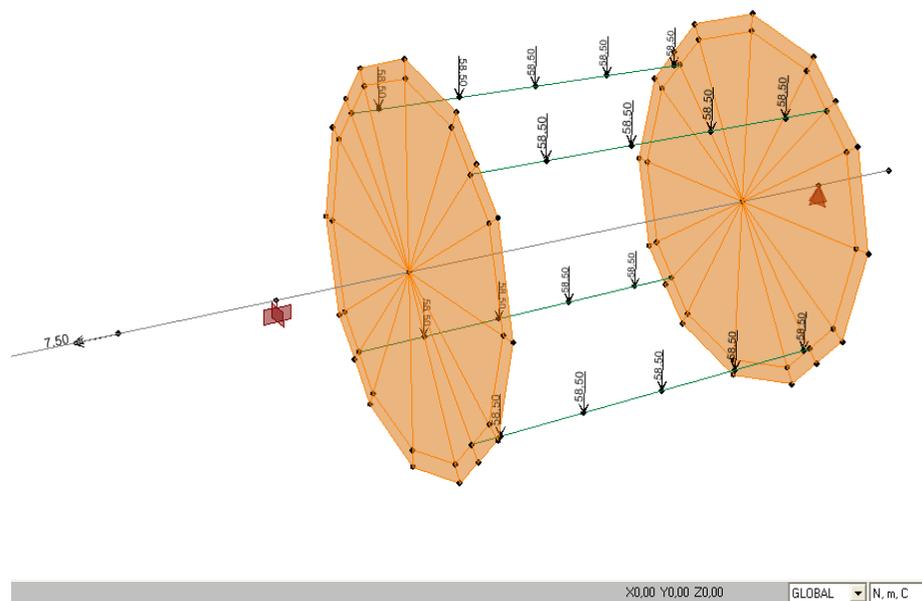
Se observa los apoyos en el eje principal, que sirven de condiciones de frontera para el análisis estructural del sistema. El primer apoyo es fijo debido a la acción del par torsor, y el segundo apoyo es axial.

### Reacciones en los apoyos.

Aquí se muestra las reacciones en los apoyos. Los valores mostrados como  $U_1, U_2$  y  $U_3$  indican los desplazamientos en los ejes  $X, Y, Z$  respectivamente. Los valores mostrados como  $R_1, R_2$  y  $R_3$  son las rotaciones en los ejes  $X, Y, Z$  respectivamente.

## Cargas aplicadas al Modelo. Carga Viva (Momentos y fuerzas Puntuales).

Aquí se puede observar la distribución realizada SAP 2000, para el modelo de la trituradora. Las cargas aplicadas en ambos juegos de ejes secundarios, corresponden a la fuerza con la que cada martillo tritura a la botella. En un eje hay 4 cargas y en el otro 5 cargas. Los ejes secundarios están colocados de acuerdo al sentido de las manecillas del reloj. El sentido del par torsor es antihorario, y lo da el sentido del motor.

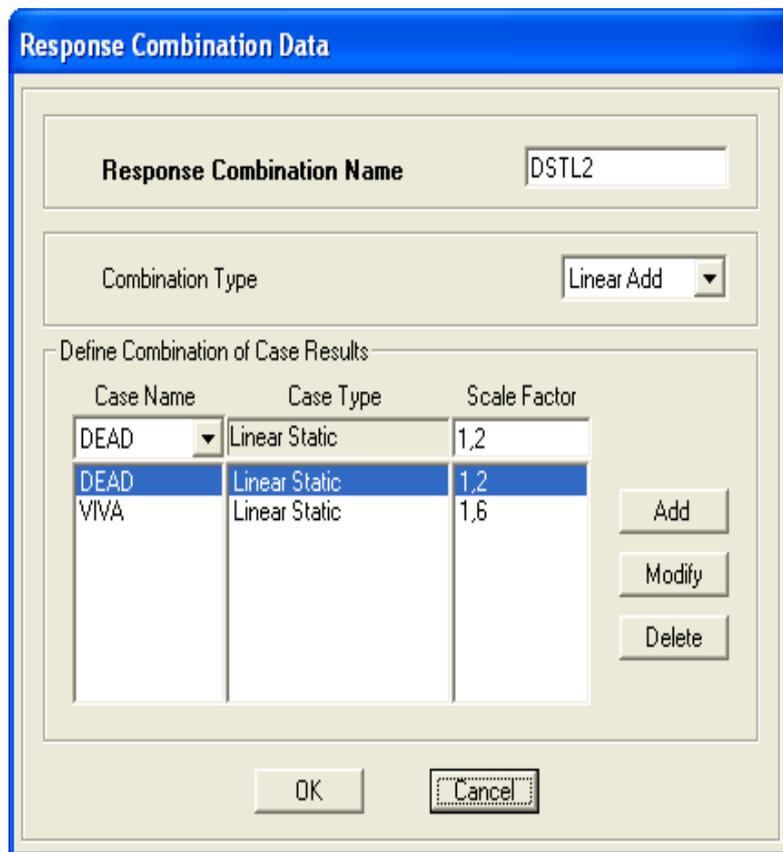


**FIGURA 4.8 CARGAS APLICADAS EN EL ANALISIS ESTRUCTURAL.**

Cada martillo tiene una fuerza de 58.5 Newtons, que corresponden a 11.477 Newtons el peso de cada martillo, más la fuerza de 47 Newtons

que ha sido calculada y es la necesaria para triturar. En el momento del impacto la fuerza se traslada directamente a la botella, y como funciona de forma basculante muy poca fuerza es transmitida al eje.

### **Análisis de las cargas efectuadas por SAP.**



**FIGURA 4.9 MUESTRA DE LOS FACTORES DE LA AISIC PARA DISEÑO ESTRUCTURAL.**

En este caso vemos que se aplica el factor de 1.2 para la carga muerta, que es llamada así al peso de cada componente (eje principal y ejes secundarios, discos, etc.) y el factor de 1.6 para cada carga viva que en

este caso la fuerza requerida para triturar y el torque aplicado por el motor.

Estos factores están presentes en todos los diseños y se encuentran en el Manual of Steel Construction de la AISIC, y se los utiliza para tener un diseño más conservador del sistema que se esta analizando.

Se procede a colocar los resultados de los análisis realizados por SAP 2000.

#### Para 4 martillos

#### Resultados de Momento Cortante y Momento Flector.

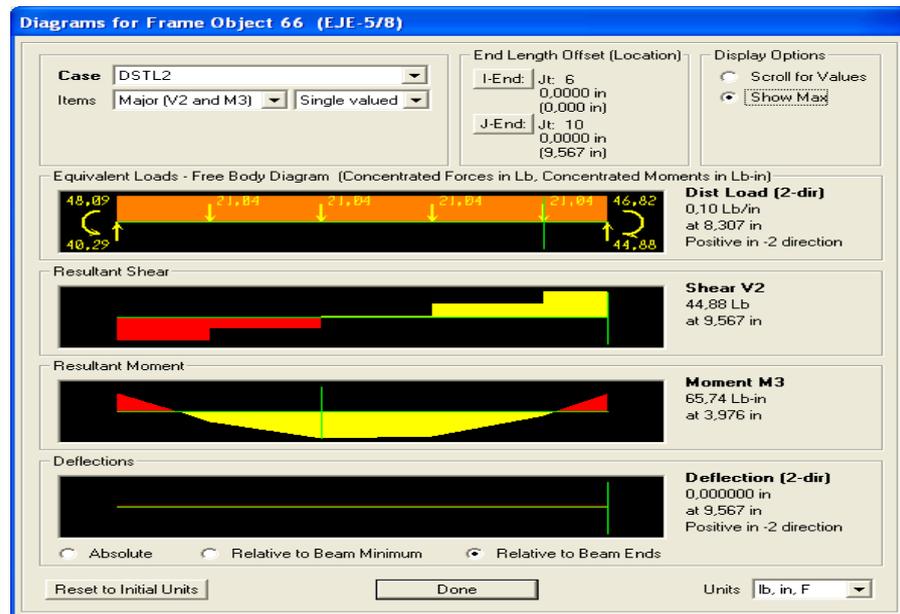


FIGURA 4.10 DIAGRAMA DE MOMENTO CORTANTE Y MOMENTO FLECTOR PARA EJE SECUNDARIO DE 4 MARTILLOS.

Con estos valores realizo los cálculos para encontrar el mínimo diámetro de los ejes, utilizo los momentos flector y torsor.

**M máx = 65.74 lb-in.**

**Para Momento Flector:**

$$\eta = \frac{S_{sy}}{\sigma} \Rightarrow \sigma = \frac{S_{sy}}{\eta} \Rightarrow \frac{32M}{\pi d^3} = \frac{S_{sy}}{\eta} \Rightarrow d = \sqrt[3]{\frac{32M\eta}{S_{sy}\pi}} =$$

$$\sqrt[3]{\frac{(32)(65.74)(6)}{(0.577)(124 \times 10^3)(\pi)}} \Rightarrow \mathbf{d = 0.38 \text{ plg.} = 9.72 \text{ mm.} = 10 \text{ mm.}$$

**Para Momento Torsor:**

$$\eta = \frac{S_{sy}}{\tau} \Rightarrow \tau = \frac{S_{sy}}{\eta} \Rightarrow 16Fd\eta = \pi\phi^3 S_{sy} \Rightarrow \phi = \sqrt[3]{\frac{16Fd\eta}{\pi S_{sy}}} =$$

$$\sqrt[3]{\frac{(16)(13.146)(10.33)(6)}{(\pi)(0.577)(124 \times 10^3)}} \Rightarrow \mathbf{d = 0.387 \text{ plg.} = 9.83 \text{ mm.} = 10 \text{ mm.}$$

**S<sub>sy</sub>** = Límite de fluencia elástico al cortante, en este caso para el acero AISI 4340.

**σ** = Esfuerzo de flexión.

**τ** = Esfuerzo de torsión.

**η** = Factor de seguridad.

**M** = Momento Flector máximo.

**d** = Diámetro del eje secundario a calcular.

**π** = Constante pi.

Como ese diámetro no es comercial, y no está disponible en el mercado, utilizo el diámetro de 5/8 de pulgada, que se encuentra en el mercado.

Calculo los valores de esfuerzos con el valor de diámetro seleccionado, es decir 5/8 de pulgada.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{(65.74)(0.3125)}{\frac{\pi(0.625)^4}{64}} = \frac{20.543}{7.49 \times 10^{-3}} = 2742.823 \text{ psi.}$$

$$\tau \text{ flexión} = \frac{4v}{3A} = \frac{4V}{3 \frac{\pi d^2}{4}} = \frac{16V}{3\pi d^2}, \text{ donde:}$$

V = Valor del esfuerzo cortante.

A = Area de la sección transversal.

$\pi$  = Constante pi.

d = Diámetro.

$$\tau \text{ torsión} = \frac{Tr}{J} = \frac{Fdr}{\frac{\pi d^4}{32}} = \frac{16Fd}{\pi d^3}, \text{ en donde}$$

T = Torque.

r = Radio de la sección transversal.

J = Momento polar de inercia.

F = Fuerza aplicada.

d = distancia desde el eje principal hasta el martillo.

$$\tau \text{ flexión} = \frac{4V}{3A} = \frac{16V}{3\pi d^2} = \frac{(16)(44.88)}{(3)(\pi)(0.625)^2} = 195.048 \text{ psi.}$$

$$\tau \text{ torsión} = \frac{Tr}{J} = \frac{16Fd}{\pi\phi^3} = \frac{(16)(13.146)(10.33)}{\pi(0.625)^3} = 2832.852 \text{ psi.}$$

$$\tau \text{ máx} = \tau \text{ flexión} + \tau \text{ torsión} = 195.048 + 2832.852 = 3027.9 \text{ psi.}$$

### **Esfuerzos de Goodman.**

$$\frac{1}{\eta} = \frac{\sigma_m}{Sut} + \frac{\sigma_a}{Se}$$

En donde:

$\sigma_a = \sigma_{\text{máx}}$  = Esfuerzos máximos en la onda cíclica.

$\sigma_m$  = Esfuerzo medio en la onda cíclica.

$$\sigma_a = \sigma_{\text{máx}} = 2742.823 \text{ psi.}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_a}{2} = 1371.411 \text{ psi.}$$

$Se = C_{\text{carga}} C_{\text{conf.}} C_{\text{tamaño}} C_{\text{sup.}} C_{\text{temp.}} S_e'$ .

$$C_{\text{carga}} = 1.$$

$$C_{\text{conf.}} (90\%) = 0.897.$$

$$C_{\text{tamaño}} = 0.869 d^{-0.097} = 0.869 (0.625)^{-0.097} = 0.9095.$$

$$C_{\text{sup.}} = A (Sut)^b = (14.4)(49.5)^{-0.718} = 0.87425064.$$

$$C_{\text{temp.}} = 1.$$

$$S_e' = 0.5 Sut = (0.5)(49.5 \times 10^3) = 24750 \text{ psi.}$$



Para la pareja de 5 martillos realizo los mismos cálculos para determinar que diámetro debo de seleccionar.

$$\mathbf{M \text{ máx} = 68.43 \text{ lb-in.}}$$

**Para Momento Flector:**

$$\eta = \frac{S_{sy}}{\sigma} \Rightarrow \sigma = \frac{S_{sy}}{\eta} \Rightarrow \frac{32M}{\pi d^3} = \frac{S_{sy}}{\eta} \Rightarrow d = \sqrt[3]{\frac{32M\eta}{S_{sy}\pi}} =$$

$$\sqrt[3]{\frac{(32)(68.43)(6)}{(0.577)(124 \times 10^3)(\pi)}} \Rightarrow \mathbf{d = 0.388 \text{ plg.} = 9.85 \text{ mm.} = 10 \text{ mm.}}$$

**Para Momento Torsor:**

$$\eta = \frac{S_{sy}}{\tau} \Rightarrow \tau = \frac{S_{sy}}{\eta} \Rightarrow 16Fd\eta = \pi\phi^3 S_{sy} \Rightarrow \phi = \sqrt[3]{\frac{16Fd\eta}{\pi S_{sy}}} =$$

$$\sqrt[3]{\frac{(16)(13.146)(10.33)(6)}{(\pi)(0.577)(124 \times 10^3)}} \Rightarrow \mathbf{d = 0.387 \text{ plg.} = 9.83 \text{ mm.} = 10 \text{ mm.}}$$

Como el diámetro no es comercial, selecciono de la misma manera el diámetro de valor de 5/8 de pulgada.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{(68.43)(0.3125)}{\frac{\pi(0.625)^4}{64}} = \frac{21.384}{7.49 \times 10^{-3}} = 2855.006 \text{ psi.}$$

$$\tau \text{ flexión} = \frac{4v}{3A} = \frac{16V}{3\pi d^2},$$

$$\tau \text{ torsión} = \frac{Tr}{J} = \frac{Fdr}{\frac{\pi d^4}{32}} = \frac{16Fd}{\pi \phi^3}$$

$$\tau \text{ flexión} = \frac{4V}{3A} = \frac{16V}{3\pi d^2} = \frac{(16)(55.59)}{(3)(\pi)(0.625)^2} = 241.593 \text{ psi.}$$

$$\tau \text{ torsión} = \frac{Tr}{J} = \frac{16Fd}{\pi \phi^3} = \frac{(16)(13.146)(10.33)}{\pi(0.625)^3} = 2832.852 \text{ psi.}$$

$$\tau \text{ máx} = \tau \text{ flexión} + \tau \text{ torsión} = 241.593 + 2832.852 = 3074.445 \text{ psi.}$$

### **Esfuerzos de Goodman.**

$$\frac{1}{\eta} = \frac{\sigma_m}{Sut} + \frac{\sigma_a}{Se}$$

En donde:

$\sigma_a = \sigma_{\text{máx}}$  = Esfuerzos máximos en la onda cíclica.

$\sigma_m$  = Esfuerzo medio en la onda cíclica.

$\sigma_a = \sigma_{\text{máx}} = 2855.006 \text{ psi.}$

$\sigma_m = \frac{\sigma_a}{2} = 1427.503 \text{ psi.}$

$Se = C_{\text{carga}} C_{\text{conf.}} C_{\text{tamaño}} C_{\text{sup.}} C_{\text{temp.}} S_e'$ .

$C_{\text{carga}} = 1.$

$C_{\text{conf.}} (90\%) = 0.897.$

$C_{\text{tamaño}} = 0.869 d^{-0.097} = 0.869 (0.625)^{-0.097} = 0.909.$

$C_{\text{sup.}} = A (Sut)^b = (14.4)(49.5)^{-0.718} = 0.87425064.$

$C_{\text{temp.}} = 1.$

$$S_e' = 0.5 S_{ut} = (0.5)(49.5 \times 10^3) = 24750 \text{ psi.}$$

$$S_e = (1) (0.897) (0.9294) (0.874) (1) (24750) = 17637.741 \text{ psi.}$$

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

$$\frac{1}{\eta} = \frac{1427.503}{49.5 \times 10^3} + \frac{2855.006}{17637.741}$$

$$\frac{1}{\eta} = 0.028838 + 0.1618691$$

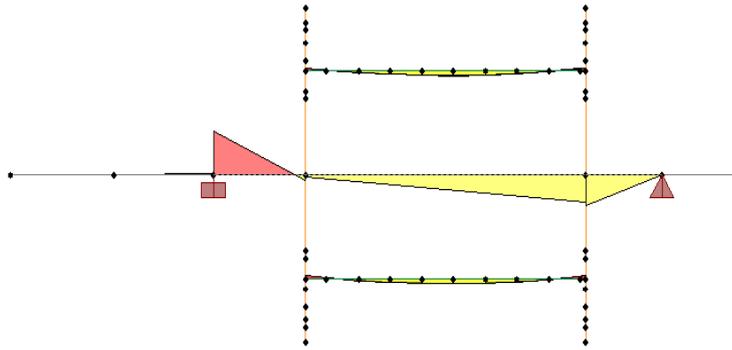
$$\eta = 5.24$$

Como los valores se reducen sustancialmente, pero se mantiene un valor de factor de seguridad aceptable se selecciona para los ejes secundarios un acero **AISI 4340** con un diámetro de 5/8 de pulgada, teniendo en cuenta que la razón principal es que en el mercado no se encuentra un acero de esas características en un diámetro requerido inicialmente.

### **Eje Principal.**

Para el cálculo del eje principal se procede de forma similar. En el eje principal como se mencionó anteriormente se concentran todas las fuerzas que son transmitidas por medio de los discos. Estas fuerzas son la sumatoria de todas las demás que actúan; en los martillos, en los

ejes secundarios, el peso de cada uno de los martillos, más el peso de ambos discos, el torque aplicado al eje, por medio del motor, etc.



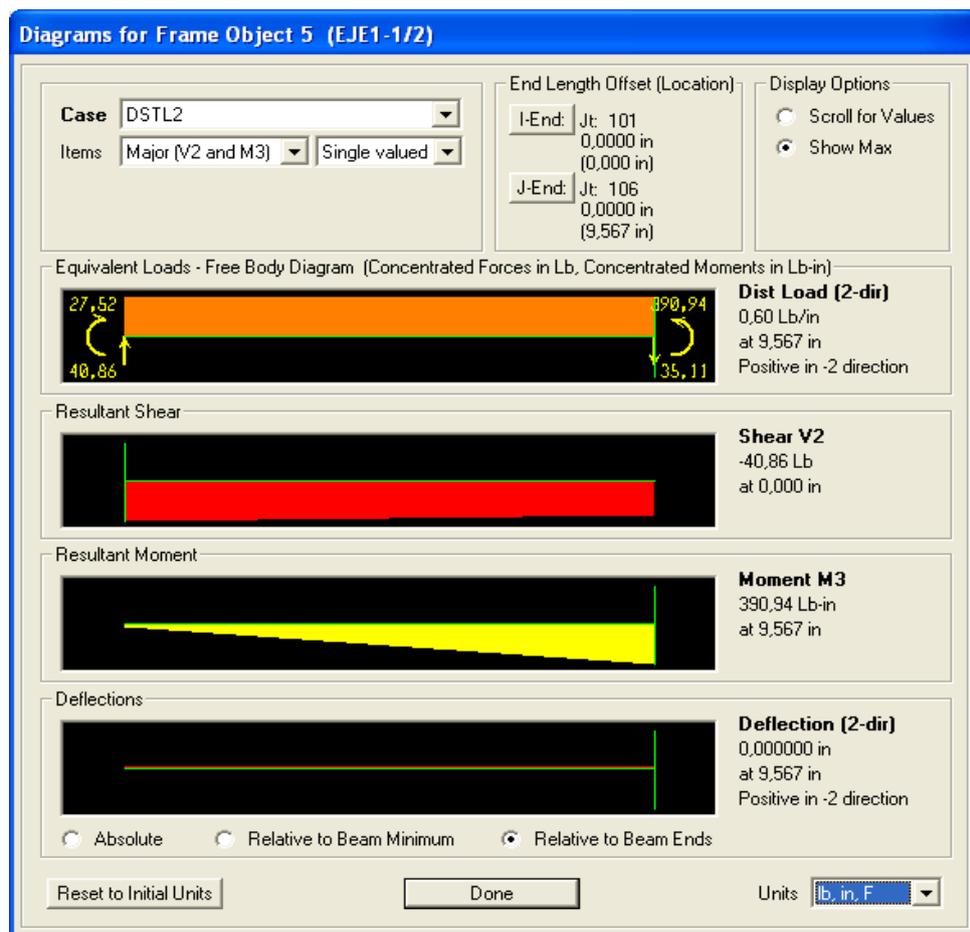
**FIGURA 4.12 ESQUEMA DE DISTRIBUCION DE LOS MOMENTOS FLECTORES DEL EJE PRINCIPAL DE LA TRITURADORA.**

Aquí se muestra el comportamiento del eje principal, se puede apreciar que no sólo aparece la forma del momento flector en el eje principal, sino también en los ejes secundarios, y torque aplicado. Para seleccionar un eje adecuado se debe de tener en cuenta que el eje principal no recibe los impactos que causan la trituración, se lo utiliza para transmitir la velocidad necesaria para que el sistema funcione. Es por esta razón que no se ha seleccionado un acero como en el caso de los ejes secundarios, que si tienen esas consideraciones adicionales.

El material a seleccionar es el acero **SAE 1018**, que está disponible en el mercado y en diámetros comerciales, esto es desde 1 a 5 pulgadas. En la mayoría de los molinos para cualquier tipo de material los diámetros utilizados están en esos rangos, con excepción de

maquinarias mucho más grandes y con capacidades de triturar 25, 50 o más toneladas por hora.

Con estos antecedentes se muestran los valores del momento cortante y del momento flector a continuación:



**FIGURA 4.13 DIAGRAMA DE MOMENTO CORTANTE Y MOMENTO FLECTOR DEL EJE PRINCIPAL DE LA TRITURADORA.**

Con los valores mostrados en la figura, procedo a calcular los diversos momentos y el diámetro del eje.

**M máx. = 390.94 lb-in.**

Se calcula para la flexión. Asumiendo  $\eta = 8$ .

$$\eta = \frac{S_{sy}}{\sigma} \Rightarrow \sigma = \frac{S_{sy}}{\eta} \Rightarrow \frac{32M}{\pi d^3} = \frac{S_{sy}}{\eta} \Rightarrow d = \sqrt[3]{\frac{32M\eta}{S_{sy}\pi}} =$$

$$\sqrt[3]{\frac{(32)(390.94)(8)}{(0.577)(32 \times 10^3)(\pi)}} = 1.20 \text{ plg.}$$

**Para la Torsión:**

$$\eta = \frac{S_{sy}}{\tau_{torsion}} \Rightarrow \eta = \frac{S_{sy}}{\frac{16Fd}{\pi\phi^3}} = \frac{\pi\phi^3 S_{sy}}{16Fd} \Rightarrow \phi = \sqrt[3]{\frac{16F\eta d}{\pi S_{sy}}} =$$

$$\sqrt[3]{\frac{(16)(54.52)(8)(19.685)}{(\pi)(0.577)(32 \times 10^3)}} = \phi = 1.33 \text{ pulgadas.}$$

En ambos casos, para flexión y torsión utilizamos el factor de seguridad de 8, es debido a que en el eje principal se transmiten todas las cargas del sistema. En el caso del momento torsor, el valor de la fuerza F, viene dado por la transmisión de dicha fuerza al eje principal, esto es la sumatoria del peso del disco en ambos puntos de contacto, más la reacciones de los ejes secundarios, más el peso de cada eje secundario, y este valor da por total 54.52 lbs.

Como el diámetro mayor viene dado por la torsión selecciono un eje de 1.33 pulgadas, pero en el mercado no se encuentra de esa medida, por lo tanto se elige un eje de **1.5** pulgadas de diámetro.

Procedo al cálculo de los esfuerzos de flexión y de torsión.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{(390.94)(0.75)}{\frac{\pi(1.5)^4}{64}} = 1179.876 \text{ psi.}$$

$$\tau_{\text{flexión}} = \frac{4V}{3A} = \frac{16V}{3\pi d^2} = \frac{(16)(40.86)}{\pi(1.5)^2} = 92.488 \text{ psi.}$$

$$\tau_{\text{torsión}} = \frac{Tr}{J} = \frac{16Fd}{\pi\phi^3} = \frac{(16)(54.52)(19.685)}{\pi(1.5)^3} = 1619.52 \text{ psi.}$$

$$\tau_{\text{máx}} = \tau_{\text{flexión}} + \tau_{\text{torsión}} = 92.488 + 1619.52 = 1712.012 \text{ psi.}$$

### **Esfuerzos de Goodman.**

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

$$\sigma_a = \sigma_{\text{máx}} = 1179.876 \text{ psi.}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_a}{2} = 589.94 \text{ psi.}$$

$$S_e = C_{\text{carga}} C_{\text{conf.}} C_{\text{tamaño}} C_{\text{sup.}} C_{\text{temp.}} S_e'$$

$$C_{\text{carga}} = 1.$$

$$C_{\text{conf.}} (90\%) = 0.897.$$

$$C_{\text{tamaño}} = 0.869 d^{-0.097} = 0.869 (1.5)^{-0.097} = 0.8354855.$$

$$C_{\text{sup.}} = A (S_{ut})^b = (14.4)(49.5)^{-0.718} = 0.874250.$$

$$C_{temp.} = 1.$$

$$S_e' = 0.5 S_{ut} = (0.5)(49.5 \times 10^3) = 24750 \text{ psi.}$$

$$S_e = (1) (0.897) (0.835) (0.874) (1) (24750) = 16201.8853 \text{ psi.}$$

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

$$\frac{1}{\eta} = \frac{589.94}{49.5 \times 10^3} + \frac{1179.876}{16201.8853}$$

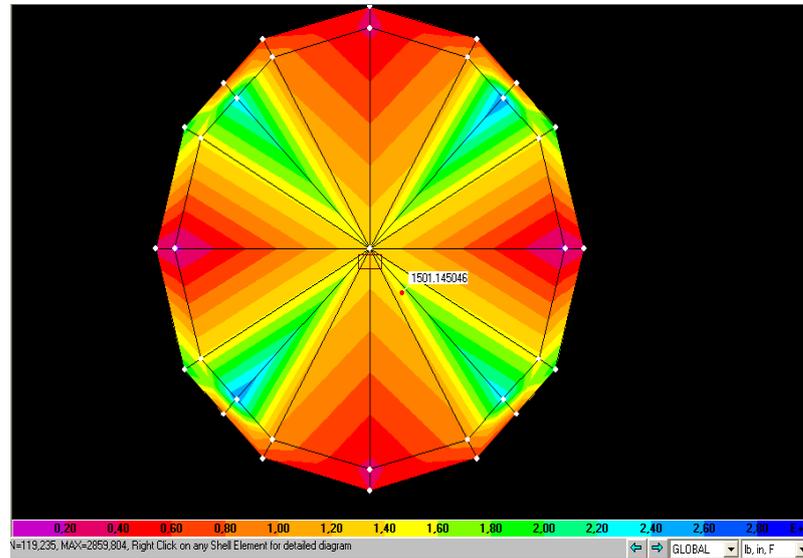
$$\frac{1}{\eta} = 0.011917979 + 0.0728233$$

$$\eta = 11.8$$

Los valores mostrados indican que el eje es confiable tanto en estática como en carga dinámica.

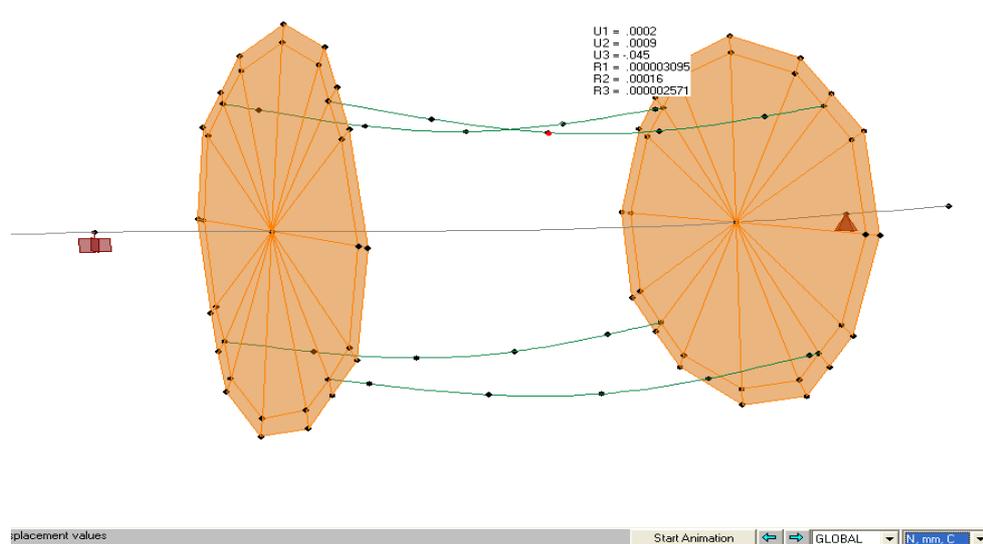
Por lo tanto el eje principal a usar tiene un diámetro de 1.5 pulgadas en acero SAE 1018.

## Esfuerzos de Von Mises.



**FIGURA 4.14 GRAFICA DE ESFUERZOS DE VON MISSES.**

En esta gráfica se puede apreciar el comportamiento de los discos soporta ejes.



**FIGURA 4.15 DEFORMACIÓN DEL MODELO ANTE LA SEGUNDA COMBINACIÓN DE CARGAS (VALORES EN MM Y RAD)**

En este gráfico se observa la deformación que experimenta el la trituradora al realizar el rompimiento de la botella. Como se muestra la deflexión es muy pequeña para los ejes secundarios y para el eje principal es muy mínima.

El programa determina de acuerdo a los valores de carga colocados, que la deformación máxima es de 0.0002 mm con una rotación de 0.000003095 radianes. Esto se debe a que los materiales seleccionados resisten el impacto entre los martillos y la botella, siendo estos valores satisfactorios, lo que implica que el molino no tendrá ningún problema por ese concepto.

### **Sistema de fijación.**

Una vez finalizado los cálculos de diseño, hay que seleccionar la forma de apoyo del sistema.

Los ejes secundarios están fijos al sistema por medio de los discos porta ejes. Esto se lo hace cuando a los ejes secundarios se los rosca en ambos extremos y son sujetados a los discos por medio de tuerca más los anillos de presión. Esto hay que hacerlo para los 4 ejes en ambos extremos. Obviamente los discos están perforados para que permitan el paso de los ejes. Esto se lo ve en los planos.

En el caso del eje principal, éste va apoyado a chumaceras de pared. Se selecciona las chumaceras de pared porque no ocupan mucho espacio, están disponibles en el mercado, son rápidas de montar y desmontar. Ambas chumaceras están empernadas en la carcasa de la máquina. Las chumaceras tienen el mismo diámetro del eje principal, esto es de 1.5 pulgadas; y poseen 4 orificios que son los que permiten que se las coloque en la carcasa mencionada.

### **Selección del motor.**

Después de obtener los resultados arriba mostrados en los diversos cálculos, se procede a calcular la potencia requerida del motor.

La potencia del sistema está definida por la potencia de la máquina y la potencia del motor. La potencia de la máquina es la potencia mínima que se requiere para que el sistema funcione. La potencia del motor es la potencia que necesita el motor para vencer la inercia de la máquina y entregar movimiento.

Se calcula la potencia utilizando el rendimiento que es un dato proporcionado por el fabricante de la máquina que indica el porcentaje de rendimiento de la máquina, en este caso se asume en un 80%.

Potencia = Torque x Velocidad Angular x Rendimiento.

$$P = T \times \omega \times r \quad \text{ecuación 18.}$$

La definición del torque es fuerza por distancia; pero recordando la ecuación 5, se sabe que la sumatoria de momentos es igual a la sumatoria del producto de inercias y aceleraciones angulares, entonces podemos reemplazarlo por torque.

$$P = T \times \omega \times r = I_o \times \alpha \times r = (7.03) \times (132) \times (1/0.8) = 1159.95 \text{ Watts.}$$

$$P = \frac{1159.95 \text{ Watts}}{746 \text{ Watts}} = 1.55 \text{ HP} \quad \text{Potencia al eje de la máquina.}$$

$$\text{Potencia del motor} = \frac{\text{PotenciaMáquina}}{\eta_{\text{acople}}} = \frac{1.55}{0.7} = 2.21 \text{ HP}$$

Se debe de seleccionar un motor de 2.5 HP; pero esa potencia no existe en ninguna marca de motor, por lo que se selecciona un motor trifásico de una potencia de 3 H.P.

Con esta potencia se garantiza que la inercia del sistema se puede mover y a la vez realizar la trituración de las botellas. Dentro de las gamas de marcas de motores, se puede seleccionar un motor de marca Baldor, cuyo número de identificación es **H3M9122T** que son de excelente fabricación y de óptimo funcionamiento. Las características del motor seleccionado se las encuentra en los anexos a esta tesis de grado.

## **Diseño y selección de cuñas y chaveteros.**

La forma de fijación de ejes con los elementos que ayudan a transmitir potencia, son las cuñas. Estos elementos van en la interfase entre el eje y la maza (poleas, engranes, piñones, etc.), siendo su objetivo de transmitir torque.

Las cuñas son removibles y eso ayuda al montaje y desmontaje del sistema del eje. Las cuñas tienen un lugar de colocación que se llaman chaveteros que son un espacio en donde se asienta la cuña, otros denominan a ese espacio cuñero.

Estas cuñas son diseñadas de acuerdo a los esfuerzos que van a soportar, y poseen dos formas de sección transversal, cuadrada y rectangular. La sección cuadrada indica que el ancho y el alto tienen las mismas dimensiones. El ancho se lo denomina con la letra  $W$  y el alto con la letra  $H$ . Por lo tanto en la sección cuadrada  $W = H$ .

En las cuñas rectangulares una de las dimensiones es más grande que la otra. Por lo general el alto se reduce y tiene una denominación de  $H/2$ , mientras que el ancho se mantiene  $W$ . Entonces en cuñas rectangulares el ancho es igual a  $W$  y el alto es  $H/2$ .

**TABLA 6.**

**TAMAÑO DE CUÑAS DE ACUERDO A LOS DIAMETROS A USAR  
(Dimensiones Pulgadas)**

		Altura, H		
Más de	Hasta (incluso)	Espesor, W	Cuadrada	Rectangular
5/16	7/16	3/32	3/32	
7/16	9/16	1/8	1/8	3/32
9/16	7/8	3/16	3/16	1/8
7/8	1 ¼	¼	¼	3/16
1 ¼	1 3/8	5/16	5/16	¼
<b>1 3/8</b>	<b>1 ¾</b>	<b>3/8</b>	<b>3/8</b>	¼
1 ¾	2 ¼	½	½	3/8
2 ¼	2 ¾	5/8	5/8	7/16
2 ¾	3 ¼	¾	¾	½
3 ¼	3 ¾	7/8	7/8	5/8
3 ¾	4 ½	1	1	¾
4 ½	5 ½	1 ¼	1 ¼	7/8
5 ½	6 ½	1 ½	1 ½	1
6 ½	7 ½	1 ¾	1 ¾	1 ½
7 ½	9	2	2	1 ½
9	11	2 ½	2 ½	1 ¾
11	13	3	3	2
13	15	3 ½	3 ½	2 ½
15	18	4		3
18	22	5		3 ½
22	26	6		4
26	30	7		5

FUENTE: ANSI Standard B17.1-1967, (Keys and Keyseats ASME).

Las cuñas cuadradas se utilizan con mayor frecuencia en ejes hasta la medida de 6 ½ pulgadas o 165 mm. de diámetro. La cuña rectangular

se lo utiliza en ejes muy largos de longitud, a veces es utilizado en ejes pequeños en donde se lo puede tolerar una altura menor.

De acuerdo a la tabla mencionada anteriormente se selecciona un tipo de cuña para el eje de la máquina. Como el eje de la máquina es de 1.5 pulgadas, está entre el rango marcado en negrillas, y le corresponde una cuña de ancho  $W=3/8$  y de alto  $H=3/8$ . Se aprecia que se selecciona una cuña cuadrada.

Cabe mencionar que la cuña tiene 3 dimensiones, ancho, alto y largo. El proceso del diseño consiste en determinar el largo de la cuña, que es lo que permite mantener fijo al eje con la maza. Entonces debemos de calcular la longitud de la cuña.

En las cuñas que transmiten potencia existen dos modos potenciales donde suelen presentarse fallas: **Corte a lo largo de la interfase entre el eje y la maza, y falla por compresión debido a la acción de apoyo entre los lados de la cuña y el material del eje o de la maza (polea, engrane, etc.).**

Las cuñas se fabrican siempre de acero extraído en frío al bajo carbón. Los aceros seleccionados van desde el AISI 1006 hasta el AISI 1050 o hasta el AISI 1095, con una elongación del 15%.

Si el acero al bajo carbón no es lo suficientemente resistente, puede emplearse acero con un contenido mayor de carbón como los mencionados antes, y también del tipo extraído en frío.

En el mercado nacional, sólo se venden acero AISI 1018, y éste es el acero utilizado para la cuña.

La falla por corte origina un esfuerzo cortante, dado por la expresión:

$$\tau = \frac{F}{tl} \quad \text{ecuación 19.}$$

En donde:

$\tau$  = Esfuerzo cortante.

F = Fuerza cortante.

t = ancho de la cuña.

l = longitud de la cuña.

Y también se conoce que el esfuerzo cortante se expresa así:

$$\tau = \frac{S_{sy}}{\eta} \quad \text{ecuación 20.}$$

En donde:

$S_{sy}$  = Límite de fluencia elástico al cortante.

$\eta$  = Factor de seguridad.

Igualando ambas expresiones, se puede proceder a realizar los cálculos. Para esto se utiliza el valor del **momento máximo de torsión** (break-down torque), que viene en los datos del motor seleccionado, que llevará a encontrar la longitud de la cuña. **El valor del momento máximo de torsión es de 44.7 lb-pie.** Para efectos de cálculo hay que convertir las unidades a libras-pulgada, debido a que esa es la unidad de las cuñas.

$$44.7 \text{ libras-pie} \times \frac{12 \text{ pulg adas}}{1 \text{ pie}} = 536.4 \text{ libras} - \text{pulg ada}$$

Para encontrar la fuerza tangencial F que actúa en la superficie del eje está dada por la relación:

$$F = \frac{T}{r}; \text{ ecuación 21.}$$

En donde:

T =Torque y r es el radio del eje principal.

$$\text{Por lo tanto } F = \frac{T}{r} = \frac{536.4 \text{ lb} - \text{plg.}}{0.75 \text{ plg.}} = 715.2 \text{ lb.}$$

Igualando las ecuaciones 19 y 20, tendremos:

$$\frac{S_{sy}}{\eta} = \frac{F}{tl}; S_{sy} = (32 \times 10^3)(0.557) = 18464 \text{ lb-plg. Asumiendo un } \eta = 3.$$

$$\frac{18464}{3} = \frac{715.2}{0.375l} \rightarrow 6924l = 2145.6 \rightarrow l = 0.309 \text{ plg.} = 7.87 \text{ mm.}$$

Esta es la longitud de la cuña a cortante puro. Pero por aplastamiento a lo largo de la sección transversal se encuentra el esfuerzo por aplastamiento, ya que está actuando en la mitad de la cuña.

Tendremos aplicando la siguiente ecuación:

$$\frac{S_{sy}}{\eta} = \frac{F}{tl/2} \quad \text{ecuación 22.}$$

$$\frac{18464}{3} = \frac{715.2}{0.375l/2}$$

$$\frac{18464}{3} = \frac{715.2}{0.1875l} \rightarrow 3462l = 2145.6 \rightarrow l = 0.62 \text{ plg.} = 15.74 \text{ mm}$$

La longitud de la cuña de 5/8 " es la longitud **mínima** de la cuña. Hay que considerar el largo del chavetero de la maza, que es en donde la cuña se va a colocar. Como se va a utilizar poleas, éstas deben de tener de medida de chaveta 3/8" que representa a la cuña diseñada. Hay que considerar la situación de espacio de la polea ya que esto es de consideración en la longitud de las cuñas, ya que no se puede colocar cuñas demasiado grandes. Por fabricación las poleas tiene una longitud transversal de 3 pulgadas, por lo tanto la cuña a utilizar debe

ser menor a esta distancia, porque que se decide utilizar una cuña de 2 pulgadas de longitud.

Por lo tanto hasta ahora la cuña seleccionada para el eje principal de la máquina es una cuña cuadrada de las siguientes dimensiones: **3/8x3/8x2** pulgadas.

Para la cuña del motor, en la tabla puesta por el fabricante y del manual de Martin se estipula las dimensiones para la cuña, las cuales son: **1/4x1/4x1 3/4** pulgadas.

### **Sistema de transmisión de potencia.**

Todo ha sido diseñado y seleccionado para que el sistema de transmisión de potencia sea por bandas. Para esto hay considerar algunos aspectos como el tipo de bandas a utilizar, tipo de poleas, cálculos de cuñas y chaveteros correspondientes. El motivo para utilizar el sistema de bandas se debe a que es el mejor fusible en caso un daño en el momento de triturar las botellas, si algo se traba, las bandas son las que sufren el daño mayor y si se rompen pueden ser reemplazadas sin ningún problema ya que su costo no es elevado.

Para el tipo de bandas a utilizar hay que explicar que existen muchos tipos de estas. Las bandas con menor porcentaje de pérdidas en la transmisión de potencia son las bandas planas, en donde el porcentaje

de eficiencia del 98%. Este tipo de bandas se utiliza con poleas más redondeadas en la parte superior. Un problema existe con estas bandas y es su costo elevado.

El otro tipo de bandas y que se usa comúnmente es la banda trapezoidal o en V, y se denomina así por la forma de su sección transversal. El grado de eficiencia en la transmisión varía entre el 70% al 96%. Estas bandas se utilizan en distancias entre centros más cortas, y son utilizadas en poleas ranuradas, que por lo general tienen 2 hasta 3 ranuras lo que conlleva a que se utilicen el mismo número de bandas y que exista una transmisión múltiple.

La selección de las bandas y de poleas es realizada de acuerdo a varios parámetros, como es la potencia de la máquina, potencia de diseño, velocidades, tipo de máquina, material a trabajar, etc. Todo se encuentra tabulado, y se realizan pocos cálculos que serán mostrados. Estos cálculos muestran la longitud de la banda, la sección transversal, el número de canales que van a tener las poleas, y por consecuencia es el mismo número de bandas a utilizar.

El primer paso es determinar la potencia de diseño, se obtiene por medio del producto entre la potencia teórica y un factor de servicio para máquinas de acuerdo al trabajo que realizan, como servicio intermitente, servicio normal y servicio continuo.

**TABLA 7.**  
**FACTORES DE SERVICIO PARA BANDAS EN V.**

<b>FACTORES DE SERVICIOS TÍPICOS.</b>						
	Motores C.A.: Torque normal Motores CD: bobinado en derivación. Motores: de cilindro múltiple			Motores CA: Torque alto. Motores CD: bobinado en serie, bobinado compuesto Motores: de 4 o menos cilindros.		
<b>Tipo de máquinas que es impulsada</b>	<b>&lt;6 H. por día</b>	<b>6-15 H por día</b>	<b>&gt;15 H. por día</b>	<b>&lt;6 H. por día</b>	<b>6-15 H por día</b>	<b>&gt;15 H. por día</b>
Agitadores, ventiladores, ventiladores con tolva, bombas centrífugas.	1.0	1.1	1.2	1.1	1.2	1.3
Generadores, herramientas para máquinas, mezcladoras, transportes.	1.1	1.2	1.3	1.2	1.3	1.4
Elevadores de baldes, máquinas textiles, molinos de martillos, transportadores, pesados.	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6
Trituradores, molinos de bola, malacates, extrusoras de hule.	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6	1.8
Cualquier máquina que se pueda ahogar	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

Fuente: DISEÑO DE MAQUINAS MOTT.

En el caso de molinos de martillos para el servicio continuo el factor de diseño es de 1.4; los demás factores para diversos tipos de máquinas se los observa en la tabla 7.

$$\text{Potencia Diseño} = P \times f.s. \quad \text{ecuación 23.}$$

$$\text{Potencia de Diseño} = (3 \text{ H.P.}) \times (1.4) = 4.2 \text{ H.P.}$$

En el apéndice K, se muestra una gráfica en donde aparecen los rangos de tipo de bandas a utilizar. Aquí se puede seleccionar el tipo de banda de acuerdo a la potencia de diseño y la velocidad del eje.

La potencia de diseño es de 4.2 HP; y la velocidad del eje de la máquina es de 1750 RPM, cuando se intersectan ambos puntos se puede apreciar que tipo de banda es la seleccionada. El tipo escogido es 3V o banda tipo A.

Como es una banda tipo A o 3v; la sección transversal tiene como ancho  $a = \frac{1}{2}$  pulgada, y de espesor  $b = \frac{11}{32}$  pulgada.

Este tipo de banda se puede utilizar en una polea con mínimo diámetro de 3 pulgadas. Para mantener una relación entre la polea mayor y menor, por cuestión de selección se elige una polea de 8 pulgadas de diámetro y se calcula la polea menor.

Para el cálculo de dicha polea se utiliza la siguiente ecuación:

$$d = D \frac{n_1}{n_2} \quad \text{ecuación 24.}$$

En donde:

D = Diámetro de polea mayor.

$\eta_1$  = Velocidad máquina.

$\eta_2$  = Velocidad de motor.

$$d = (8) \frac{1260}{1750} = 5.76 \text{ pulgadas}$$

Se calcula la longitud de paso de la polea, que a su vez es la longitud interior de la banda, para eso se utiliza la siguiente ecuación:

$$L_p = 2C + 1.57 (D+d)^2 + \frac{(D+d)}{4C} \quad \text{ecuación 25.}$$

En donde:

$L_p$  = Longitud de paso de la banda.

C = Distancia entre centros.

D = Diámetro de polea mayor.

d = Diámetro de polea menor.

Reemplazando los valores se obtiene:

$$L_p = (2)(19) + 1.57 (8+5.76) + \frac{(8+5.76)^2}{4(19)} = 38+21.603+\frac{5.0176}{76} = 59.66$$

pulgadas.

El tamaño estándar o normal más próximo, el B60, se toma del apéndice N.

La velocidad de desplazamiento de la banda se la calcula por medio de la ecuación:

$$V = \frac{\pi dn}{12} \quad \text{ecuación 26}$$

En donde:

d = Diámetro polea menor.

n = velocidad de polea menor.

$\pi$  = constante pi.

$$V = \frac{\pi dn}{12} = \frac{\pi(5.76)(1750)}{12} = 2638.94 \text{ ft / min}$$

Con este dato se consulta la tabla que se encuentra en el apéndice O, e interpolar los valores que se encuentran tabulados, con el fin de encontrar un valor de potencia nominal para la banda. Este valor es de 2.42 H.P.

El ángulo de contacto de la banda con la polea se lo calcula usando la ecuación siguiente:

$$\theta_d = \pi - 2 \operatorname{sen}^{-1} \left( \frac{D-d}{2C} \right) \quad \text{ecuación 27.}$$

$$\theta_d = \pi - 2 \operatorname{sen}^{-1} \left( \frac{8-5.76}{2(19)} \right) = 3.023 \text{ radianes} = 173.24^\circ.$$

Utilizando los factores de correlación mostrado en los apéndices L y M, se obtiene los factores de correlación por longitud de banda igual a 1; y el factor de correlación para el ángulo de contacto entre la polea y la banda, que es igual a 0.99. Por lo tanto la potencia corregida por banda es:

$$P_{\text{corregida}} = (0.99)(1)(2.42) = 2.4 \text{ H.P.}$$

Para calcular el número de bandas que se necesita, se calcula entre la potencia de diseño y la corregida, de la siguiente manera:

$$\# \text{ bandas} = \frac{4.2}{2.4} = 1.75; \text{ por lo tanto se utilizan } \mathbf{2 \text{ bandas tipo A.}}$$

Hay que considerar nuestro mercado, las poleas industriales con un diámetro interior de 1.5 pulgadas no tiene como diámetro exterior 3 pulgadas, sino que empiezan a partir de 5 pulgadas. Como nuestro cálculo es mayor se elige una polea de 6 pulgadas.

## **Costos del Equipo**

Luego de los cálculos presentados, se procede a elaborar una tabla con los elementos que forman al molino, la cual nos servirá para realizar un presupuesto que permita conocer la rentabilidad del proceso de fabricación del molino, objeto de este trabajo.

Al realizar este presupuesto se lo compara con los costos de otros fabricantes de molinos y se procede a elegir la mejor opción entre la diversa gama presentada.

Estos elementos mostrados en la tabla 8, se encuentran sin mayor dificultad en el mercado, existe la posibilidad de que alguno de estos componentes se los pueda encontrar de manera convencional. Sin embargo se cotizará todo de manera comercial para tener un valor real.

El costo de la máquina tiene que ser detallado con el respectivo valor de cada una de las piezas, y acabado que incluye presentación de la máquina.

Dentro de la gama amplia de los fabricantes de molinos de martillos, los precios fluctúan de acuerdo a los requerimientos del fabricante, en la mayoría de los casos los precios de estas máquinas no incluyen el costo del motor, o sea son vendidos sin el motor, lo que implica un

gasto adicional en la compra de este, su conexión y posterior prueba de funcionamiento, estos costos son absorbidos por el cliente que compra la máquina, y a esto hay que agregar el costo de importación, permisos de salida, declaraciones y demás pagos de ley.

En consideración de esta situación el valor del molino de martillos diseñado está en **\$2594,72 DOS MIL QUINIENTOS NOVENTA Y CUATRO 72/100 DOLARES AMERICANOS**, que se ha desglosado en la Tabla 8.

**TABLA 8**

**CUADRO DE MATERIALES, CANTIDADES Y PRECIOS DE LOS COMPONENTES DEL MOLINO DE MARTILLOS.**

Item	Cant.	Pieza	Material	Dimensión	Precio
1	1	Motor trifásico 3 H.P.			\$ 532,80
2	8	Pernos de sujeción del motor.	Acero	$\phi = 10$ mm.	\$ 2,00
3	1	Eje de 1 ½ " diámetro.	AISI 1018	L = 632 mm.	\$ 15,62
4	4	Ejes de 5/8 " diámetro.	AISI 4340	L = 313 mm.	\$ 8,00
5	2	Discos porta ejes.	Acero A 36	$\phi = 225$ mm. e = 6 mm.	\$ 42,55
6	1	Polea.	Hierro	$\phi = 6$ pulg. 2 canales; $\phi$ int. 1.125 pulg.	\$ 35,43
7	1	Polea.	Hierro	$\phi = 8$ pulg. 2 canales; $\phi$ int. 1.5 pulg.	\$ 45,10
8	2	Chumaceras de pared 4 orificios.	Acero	$\phi = 1.5$ pulg.	\$ 31,40
9	4	Graseras.	Hierro	$\phi = ¼$ pulg.	\$ 1,00
10	1	Cuña del eje principal.	Acero 1018	3/8 x 3/8 x 2 pulg.	\$ 5,00
11	1	Cuña del eje del motor	Acero 1018	¼ x ¼ x 1 ¾ pulg.	\$ 5,00
12	8	Pernos de fijación de máquina.	Acero	$\phi = 17$ mm.	\$ 4,00
13	2	Bandas en V tipo A .	Caucho y nylon	L = 60 pulg.	\$ 33,6
14	18	Bocines Separadores.	Bronce	L = 26 mm. $\phi = 5/8$ pulg.	\$ 54,00
15	18	Martillos.	CHRONIT 500 (HB)	150x40x25 mm.	\$ 122,65
16	18	Martillos cementación.	CHRONIT 500 (HB)	150x40x25 mm.	\$ 136,80

17		Pintura anticorrosiva.		2 litros.	\$ 6,00
18		Sistema eléctrico.			\$ 70,00
19		Carcaza	Acero A36		\$ 252,00
				COSTO	\$ 1447,95
				Mano de obra (60%)	\$ 868,77
				SUBTOTAL	\$ 2316,72
				I.V.A. (12%)	\$ 278,00
				TOTAL	\$ 2594,72

# **CAPÍTULO 5**

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **CONCLUSIONES:**

1. El sistema seleccionado para trituración por medio de martillos, es el mejor, sin duda, luego de los análisis previos de factibilidad, debido a su rápida velocidad de trituración, lo que posibilita una mejora notable al diseñar la máquina trituradora con bajo consumo energético, de fácil montaje y desmontaje, así como mantenimiento sencillo.
2. Esta máquina es concebida con elementos netamente existentes en el mercado nacional, situación que abarató los costos de producción de los molinos que en el caso de realizarse en serie, disminuyen aún más; lo cual

posibilita emplear mano de obra local, tanto para su producción como para los interesados en adquirir este tipo de maquinaria para la industria del reciclaje, generando un doble beneficio plenamente palpable.

3. Luego de realizar comparaciones entre los principales fabricantes de trituradoras, se pudo constatar que los precios fluctúan entre \$ 2000 y \$ 3400. En este caso específico cabe resaltar que se habla de maquinaria importada, este factor añade costos extras a la producción como es la adición de aranceles, seguro de mercadería, bodegas, otro factor involucrado es el largo tiempo que toma la desaduanización que en ocasiones involucra pagos a tramitadores de aduana, circunstancias de índole política, nuevas regulaciones arancelarias, entre otros imponderables y desaduanización. El lapso que toma la llegada de la máquina al país y su salida de aduana, se lo ha tomado para la construcción de la trituradora diseñada. Teniendo en cuenta esta situación, el costo de la trituradora diseñada es de \$ 2594,72. Elaborada íntegramente en el país, en un tiempo de 30 días.

## **RECOMENDACIONES:**

1. Cuando un martillo sufre desgaste es recomendable restituirlo por uno nuevo, y no soldarlo para rellenar el desgaste. Se ha colocado un solo orificio en el martillo especialmente para evitar usar el extremo superior ya que con el uso continuo el orificio sufre deformaciones.

2. En los discos porta ejes también se puede colocar un solo martillo, en forma de viga apoyada en los extremos con juntas que le permitan rotar, esto permite triturar vidrio.
  
3. En el diseño de esta máquina hay que considerar que no se ha colocado algún tipo de tamiz que permita que los pedazos vidrio triturado grandes no sean expulsados, esto se debe fundamentalmente a que el casco (vidrio triturado), se lo mezcla con los compuestos que sirven para la fabricación del vidrio durante el proceso de fabricación de una nueva botella, esto es, con arenas, sílice, óxidos de aluminio, agua, etc. Sin embargo se ha dejado espacio para que un tamiz sea colocado de acuerdo a los requerimientos de algún cliente.

# APÉNDICES

**APÉNDICE A.**

**TIPOS DE IMPERFECCIONES OBTENIDAS EN EL PROCESO DE  
FABRICACIÓN DE VIDRIO.**

Las Imperfecciones que presentan los vidrios, originadas en su proceso de obtención son causados por el hombre y estos defectos son de afinación, homogeneidad, vitrificación y recocido. Están clasificados en dos tipos: **masa y superficiales**.

## **1.- DEFECTOS POR MASA.**

**ESCORIAS:** Son los granos de cualquier sustancia contenida en el vidrio y que no se han fundido en el curso de la fabricación. Pueden ser granos de materias primas que por un defecto de fusión no han salido del estado sólido o pueden ser cuerpos extraños.

**VETAS:** Son causadas por la falta de homogeneidad del vidrio, debida a diferencias de composición o de enfriamiento. Se clasifican según la forma de presentarse (ondas, hilos y estrías).

**BURBUJAS:** Son espacios gaseosos en el interior del vidrio y tienen forma esférica, ovoidal o *lenticular* según el procedimiento de fabricación.

## **2.- DEFECTOS SUPERFICIALES.**

**PICADURAS:** Es causado cuando un grano del *abrasivo* grueso utilizado ha hecho una erosión profunda que no se elimina ni con el pulido.

**RAYADO:** Defecto producido por deficiencias en el pulido o como causa de roces con cuerpos duros durante el almacenado o en el transporte.

**AGUAS:** Se encuentra en los vidrios planos no pulidos, a causa de la imperfección en lo plano de las superficies.

**MERMAS O CRECES:** Defectos o excesos de dimensiones en los vidrios moldeados.

**REBABAS:** Imperfecciones causadas por el mal encaje en las juntas de los moldes en el momento de la fabricación.

**GRIETAS:** Fisuras de diferentes longitudes y profundidades, causadas principalmente por el enfriamiento radical bruto a partir de una temperatura inferior al punto de reblandecimiento o bien por la presión excesiva del *émbolo* en productos moldeados.

**APÉNDICE B.**

**TABLA CON EL PORCENTAJE DE COMPOSICIÓN QUÍMICA DE  
CIERTOS TIPOS DE VIDRIOS COMERCIALES.**

**Composición de los vidrios comerciales (los números indican el porcentaje)**

<b>Elementos</b>	<b>Sódico-cálcico</b>	<b>Plomo</b>	<b>Borosilicato</b>	<b>Sílice</b>
Sílice	70-75	53-68	73-82	96
Sodio	12-18	5-10	3-10	
Potasio	0-1	1-10	0.4-1	
Calcio	5-14	0-6	0-1	
Plomo		15-40	0-10	
Boro			5-20	3-4
Aluminio	0.5-3	0-2	2-3	
Magnesio	0-4			

**APÉNDICE C.**

**CARACTERÍSTICAS DE ALGUNOS VIDRIOS COMERCIALES.**

### **Vidrio soluble y vidrio sodocálcico.**

El vidrio de elevado contenido en sodio que puede disolverse en agua para formar un líquido viscoso se denomina vidrio soluble y se emplea como barniz ignífugo en ciertos objetos y como sellador. La mayor parte del vidrio producido presenta una elevada concentración de sodio y calcio en su composición; se conoce como vidrio sodocálcico y se utiliza para fabricar botellas, cristalerías de mesa, bombillas (focos), vidrios de ventana y vidrios laminados.

### **Vidrio al plomo.**

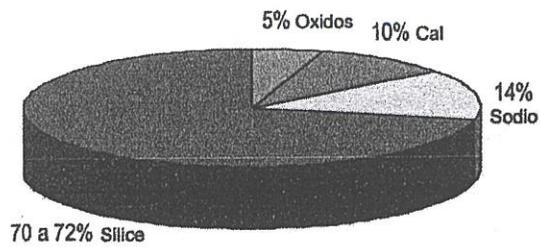
El vidrio fino empleado para cristalerías de mesa y conocido como cristal es el resultado de fórmulas que combinan silicato de potasio con óxido de plomo. El vidrio al plomo es pesado y refracta más la luz, por lo que resulta apropiado para lentes o prismas y para bisutería. Como el plomo absorbe la radiación de alta energía, el vidrio al plomo se utiliza en pantallas para proteger al personal de las instalaciones nucleares.

### **Vidrio de borosilicato.**

Este vidrio contiene bórax entre sus ingredientes fundamentales, junto con sílice y álcali. Cuando entra el óxido de boro  $B_2O_3$  entra en la red de la sílice, debilita su estructura y reduce considerablemente el punto de reblandecimiento de los vidrios de sílice. A estos vidrios se los denomina pirex. Destaca por su durabilidad y resistencia a los ataques químicos y las altas temperaturas, por lo que se utiliza mucho en utensilios de cocina, aparatos de laboratorio y equipos para procesos químicos.

### **Vidrios Sílico-Sódico-Cálcicos.**

Los vidrios silico-sódico-cálcicos utilizados en la construcción recibe este nombre porque tienen en su composición los siguientes elementos.



### Porcentajes de composición.

- a) Sílice, un cuerpo vitrificante introducido en forma de arena (70 a 72%).
- b) Sodio, un fundente en forma de carbonato y sulfato (aprox. 14%).
- c) Cal, un estabilizante en forma de caliza (alrededor 10%).

Diversos óxidos, como los de aluminio y los de magnesio, que mejoran las propiedades físicas del vidrio sobre todo su resistencia a la acción de los agentes atmosféricos (alrededor 5%).

**APÉNDICE D.**

**ALGUNAS APLICACIONES DE LOS VIDRIOS ROTOS Y QUE NO SE  
UTILIZAN EN EL RECICLAJE DE BOTELLAS.**

Mediante una continua investigación, se han identificado otros mercados para los vidrios rotos. El vidrio se utiliza, o puede ser utilizado, en la fabricación de:

- **Glasphalt**, un asfalto con un porcentaje de vidrio triturado que se utiliza en las carreteras.
- **Materiales de edificación y construcción**, tales como ladrillos y tejas de arcilla, bloques, etc.; árido ligero para el hormigón y los plásticos; compuestos de polímeros de vidrio; foamglas para tablas de construcción y aislamiento.
- **Pintura reflectante** para señales viales (elaborada con pequeñas esferas de vidrio).
- **Aislamiento** de lana de vidrio.
- Postes para cables telefónicos y para vallas (mezclando vidrios rotos con polímerosplásticos).
- **Enmiendas** de suelo para mejorar el drenaje y la distribución de la humedad.
- **Arena artificial** para la restauración de playas.
- **Fibra de vidrio**.
- **Abrasivos**.
- Muchos otros materiales asociados con la industria de la construcción y la industria textil.



**CIB-ESPOL**

**APÉNDICE E.**  
**ESPECIFICACIONES DEL ACERO AISI 1018.**

**Eje de transmisión - Tolerancia h10-h11**

**GENERALIDADES:** Acero de bajo contenido de carbono.

**ANÁLISIS TÍPICO %**

	C	Mn	P	S
SAE 1018	0.15-0.20	0.60-0.90	0.040	0.050

**PROPIEDADES MECÁNICAS:**

Suministrado laminado en frío (medidas pequeñas hasta 2 1/2") o torneado (medidas hasta 6"). Las medidas 7", 8", 9" y 10" son suministradas laminadas en caliente o torneado de desbaste.

Propiedades laminado en frío	
Esfuerzo de cedencia, kg/mm <sup>2</sup>	mín. 31
Resistencia a la tracción, kg/mm <sup>2</sup>	51-71
Elongación, A5	20%
Reducción de área, Z	57%
Dureza	163HB

**APLICACIONES**

Donde se requiere aplicaciones con cargas mecánicas no muy severas, pero con ciertos grados de tenacidad importantes, como por ej.: pernos y tuercas, piezas de maquinas pequeñas, ejes, bujes, pasadores, grapas, etc. Factible de cementación con buena profundidad de penetración debido a su alto contenido de manganeso. Excelente soldabilidad.

**MEDIDAS EN STOCK**

**REDONDO**

POLGADAS	PESO APROX. (LIBRAS)
1/4	0.28
5/16	0.4
3/8	0.6
1/2	1.0
3/4	1.6
5/8	2.2
7/8	3.0
1	4.0
1 1/4	5.0
1 1/8	6.2
1 3/8	7.5
1 1/2	8.9
1 3/4	12.2
2	15.9
2 1/4	20.1
2 1/2	24.8
2 3/4	30.0
3 1/4	35.8
3 1/2	42.0
3 3/4	48.7
4 1/2	55.9
5 1/2	63.6
3	80.5
4	99.4
5	120.2
6	143.1
7	197.0
8	255.0
9	397.0
10	328.5

**APÉNDICE F.**

**ESPECIFICACIONES DEL ACERO AISI 4340.**

**Acero bonificado para maquinaria**

**GENERALIDADES:** 705 es un acero al molibdeno más cromo y níquel. El molibdeno tiene una solubilidad limitada y es un buen formador de carburos. Ejerce un fuerte efecto sobre la templabilidad y de manera semejante al cromo, aumenta la dureza y resistencia a alta temperatura de los aceros. Menos susceptibles al fragilizado debido al revenido que los demás aceros aleados para maquinaria. Al combinarse con níquel y cromo soporta altas exigencias de resistencia y tenacidad en secciones grandes. Su contenido de níquel le da más templabilidad, lo mismo que la resistencia en caliente.

705 combina alta resistencia mecánica (la mayor del mercado) con buena tenacidad. Este acero en forma standard es suministrado bonificado, por lo que no se requeriría luego un tratamiento térmico, sin embargo, si se desea mejores propiedades, puede ser templado al aceite. Susceptible de temple por inducción y también puedes someterte a tratamiento de nitrurado.

**ANÁLISIS TÍPICO %**

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
705	0.36	0.25	0.70	--	--	1.40	1.40	0.20
AISI 4340	0.35-0.40	0.20-0.35	0.60-0.80	0.04		1.65-2.00	0.70-0.90	0.20-0.30

**EQUIVALENCIAS**

<b>AISI/SAE</b>	4340
<b>DIN</b>	34CrNiMo6
<b>W.Nr</b>	1.6582
<b>JIS</b>	SNCM1
<b>AFNOR</b>	35NCD6

**PROPIEDADES MECÁNICAS EN CONDICIÓN DE SUMINISTRO**

Resistencia a la tracción	90-110kg/mm <sup>2</sup>
Esfuerzo de cedencia	70kg/mm <sup>2</sup>
Resistencia al impacto, KU	aprox. 20 J
Elongación, A5	min 12%
Reducción de área, Z	min 45%
Dureza	270-330HB

De acuerdo a DIN 17200 resp. SEW 550. Tolerancia  
 DIN 1013 resp. DIN 7527 / 6

**Nota:** Estas propiedades se garantizan hasta Ø250 mm. Medidas mayores, favor consultarnos.

**APLICACIONES:**

**1. Partes de gran resistencia para la industria automotriz, como:**

- ejes
- cardanes
- cigüeñales
- ejes de leva
- tornillería de alta resistencia

**2. Partes para la construcción de maquinaria de trabajo pesado como:**

- árboles para trituradoras
- ejes de transmisión de grandes dimensiones
- engranajes de temple por llama, inducción o nitruración
- barras de torsión
- portaherramientas

**1. Aplicaciones donde se requiere resistencia a la fatiga, como:**

- En la construcción de equipo pesado para camiones, aviones, equipos militar, etc.

**TRATAMIENTO TÉRMICO:**

**Recocido blando:** (650-700°C): Mantener a la temperatura por 2 horas. Enfriar en el horno con una velocidad de 15°C/h hasta 600°C y luego libremente al aire.

**Alivio de tensiones:** (450-650°C): El acero templado tenaz deberá ser calentado hasta aproximadamente 50°C por debajo de la temperatura usada para el revenido (como standard el 705 es suministro revenido a 600°C).

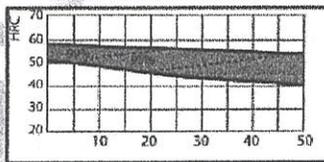
Mantenerlo a esta temperatura durante 1/2 a 2 horas. Enfriar en el horno hasta los 450°C y luego libremente al aire.

**Temple:** (830-850°C). Con enfriamiento en aceite: El mantenimiento del tiempo en minutos cuando la superficie ha alcanzado la temperatura de temple es 0.7x espesor o diámetro en milímetros. Interrumpir el enfriamiento a los 125°C y luego revenir inmediatamente.

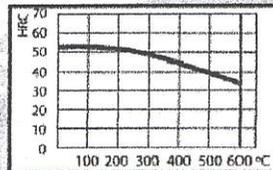
**Revenido:** (500-700°C): El tiempo de mantenimiento a la temperatura de revenido podría ser 1-2 horas o una hora por pulgada de grueso. Partes de máquinas que requieran una resistencia alta, como por ej. engranajes, deberán ser revenidos a temperatura más bajas, es decir a 200 a 250 °C, lo que dará una dureza de aproximadamente 500HB.

**Nitruración:** Se puede lograr durezas de alrededor de 53-55HRC. El proceso durará entre 48 y 72 horas por lo cual la palneación del tratamiento debe hacerse con el tiempo necesario.

**CURVAS PARA TEMPLE Y REVENIDO**



DISTANCIA DESDE EL EXTREMO TEMPLADO, mm



TEMPERATURA DE REVENIDO °C

**MEDIDAS EN STOCK**

**REDONDO**

mm	APROX. PULGADAS	PESO APROX. (kg/m)
16	5/8	3.0
20	25/32	2.5
22	7/8	3.0
25	1	3.9
28	13/32	4.8
32	1 1/4	6.3
35	1 3/8	7.5
38	1 1/2	8.9
40	1 9/16	9.9
45	1 3/4	12.5
50	1 31/32	15.4
55	2 5/32	18.6
60	2 3/8	22.2
65	2 9/16	26.0
70	2 3/4	30.2
75	2 15/16	34.5
80	3 5/31	39.4
85	3 11/32	44.5
90	3 17/32	49.9
95	3 3/4	55.6

**REDONDO**

mm	APROX. PULGADAS	PESO APROX. (kg/m)
100	3 15/8	61.0
105	4 1/8	67.9
110	4 5/16	74.5
115	4 1/2	81.5
120	4 3/4	88.7
125	4 15/16	96.3
130	5 1/8	104.1
135	5 5/16	112.3
140	5 1/2	120.7
145	5 11/16	129.5
150	5 7/8	138.6
160	6 1/4	178.0
170	6 11/16	199.6
180	7 1/8	246.4
200	7 7/8	271.7
210	8 1/4	34.5
250	9 7/8	385.0
300	11 7/8	555
350	13 7/8	755

**APÉNDICE G.**

**ESPECIFICACIONES DE ACERO CHRONIT 500 HB.**

**ACEROS BOHELER.  
ACERO CHRONIT 500 HB.**

**Normas:**  
DIN:1.8721  
ASTM:



**Tipo Aleación (%):**

C	Cr	Mn	V	Si	Nb	Be	Ni
0.3	1.5	1.6	0.08	0.5	0.05	0.005	0.5

**Propiedades:**

Plancha aleada de gran resistencia al desgaste por abrasión, impacto y deslizamiento.

**Aplicaciones:**

Para elementos de movimiento de tierra, minerales y materiales abrasivos tales como tolvas de volquetes, cucharas de máquinas cargadoras, tornamesa para tracto camiones, etc. Para blindaje contra balas de armas de mano comerciales, elementos de máquinas trituradoras, chancadoras y prensas de chatarra, base para matrices de alto rendimiento. Además en todas las construcciones soldadas que requieren alta resistencia y una buena tenacidad a bajas temperaturas, tales como tanques de presión.

**Dureza Promedio:** 400 o 500 HB.

**Resistencia a la tracción:** 1650 N/mm<sup>2</sup>.

**Límite de Fluencia:** 1300 N/mm<sup>2</sup>.

**Elongación:** 8% transversal.

**Tenacidad:** ISO - V Longitudinal 30/25 JOULE.

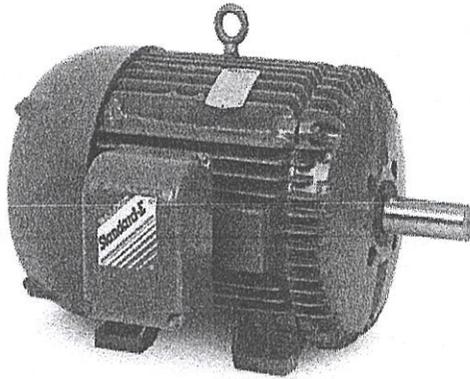
**Corte por oxiacetileno:** No presenta dificultades; hasta de 25 mm. precalentar a 60°C y mayores a los 150°C.

**\*Soldar:** Use procedimientos bajos en hidrogeno, los electrodos deben estar completamente secos. La plancha debe estar seca y libre de aceites o grasas. Precalentar a 150 - 250°C, remover la escoria entre cada pase (Martillando), electrodos recomendables BÖHLER - UTP 6020, UTP 65.

**\*Conformación en caliente:** Temperatura: máx.:300°C por corto tiempo.  
Radio de doblado mínimo: espesor x 3.

**APÉNDICE H.**

**TABLAS DE ESPECIFICACIONES DEL MOTOR H3M9122T.**



Catalog Number:	H3M9122T
Specification Number:	35S378T098H1
Horsepower:	3
Voltage:	208-230/460
Hertz:	60
Phase:	3
Full Load Amps:	8.3-8.2/4.1
Usable at 208 Volts:	8.3
RPM:	1750
Frame Size:	182T
Service Factor:	1.15
Rating:	40C AMB-CONT
Locked Rotor Code:	M
NEMA Design Code:	B
Insulation Class:	B
Full Load Efficiency:	87.5
Power Factor:	78
Enclosure:	TEFC
Baldor Type:	3546M
DE Bearing:	6206
ODE Bearing:	6203
Electrical Specification Number:	35WGT098
Mechanical Specification Number:	35S378
Base:	RG
Mounting:	F3

Product Nameplate Data :					
Rated Output	3 HP	Hertz	60	NEMA Nom. Eff.	87.5
Volts	208-230/460	Phase	3	Power Factor	78
Full Load Amps	8.3-8.2/4.1	NEMA Design Code	B	Service Factor	1.15
Speed	1750	LR KVA Code	M	Rating - Duty	40C AMB-CONT

General Characteristics at 460 V, 60 Hz, 3 HP			
Full Load Torque	9 LB-FT	Starting Current	38.6 Amps
Start Configuration	DOL	No-Load Current	2.3 Amps
Break Down Torque	44.7 LB-FT	Line-line Resistance @ 25° C	3.91 Ohms
Pull-Up Torque	40.4 LB-FT	Temperature Rise, C @ FL (in deg)	57
Locked-Roter Torque	42.5 LB-FT	Temp. Rise @ S.F. Load (in deg)	77

Load Characteristics at 460 V, 60 Hz , 3 HP							
% of Rated Load	25	50	75	100	125	150	S.F.
Power Factor	36	56	71	78	83	85	83
Efficiency	80.3	86.8	88.1	87.9	87	85.5	87
Speed (rpm)	1785	1771	1756	1741	1724	1706	1724
Line Amperes	2.5	2.9	3.4	4.1	4.9	5.8	4.9



**CIB-ESPOL**

**APÉNDICE I.**

**TABLA DE VALORES DE ESFUERZOS Y RELACIONES  
SSY/RESISTENCIA PARA CADA ELEMENTO.**

TABLE: Steel Design 2 - PMM Details - AISC-LRFD93

Frame	DesignSect	DesignType	Combo	Pu	MuMajor	MuMinor	VuMajor	VuMinor	Tu	TotalRatio
Text	Text	Text	Text	Kgf	Kgf-mm	Kgf-mm	Kgf	Kgf	Kgf-mm	Unitless
2	EJE1-1/2	Beam	DSTL1	0	-314,46	0	3,61	0	0	0,001695
4	EJE1-1/2	Beam	DSTL1	0	-26,47	2,44E-14	-0,81	6,08E-16	-1,08E-14	0,000143
1	EJE1-1/2	Beam	DSTL2	-1,71E-12	-7469,25	1,21	-104,01	0,003114	5,91E-10	0,040259
5	EJE1-1/2	Beam	DSTL2	-1,85E-12	4504,11	-5,7	-15,93	0,0337	3,67E-10	0,024277
6	EJE1-1/2	Beam	DSTL2	-2,27E-12	5106,5	0,21	77,36	0,003114	2,00E-13	0,027524
63	EJE-5/8	Beam	DSTL2	-9,74	788,39	-15,39	5,91	-0,03994	-0,06341	0,060149
64	EJE-5/8	Beam	DSTL2	9,74	788,39	-15,39	5,91	-0,03994	0,06341	0,059836
65	EJE-5/8	Beam	DSTL2	9,75	757,38	16,4	-8,54	0,02465	-0,06217	0,057529
66	EJE-5/8	Beam	DSTL2	-9,75	757,38	16,4	-8,54	0,02465	0,06217	0,057842

PRatio	MMajRatio	MMinRatio	SRLimit	PuDsgn	Fy	E	Length
Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Kgf	Kgf/mm2	Kgf/mm2	mm
0	0,001695	0	0,95	0	25,311	20389,02	176
0	0,000143	0	0,95	0	25,311	20389,02	65
0	0,040259	0	0,95	-1,71E-12	25,311	20389,02	80
0	0,024277	0	0,95	-1,85E-12	25,311	20389,02	243
0	0,027524	0	0,95	-2,27E-12	25,311	20389,02	66
0,001393	0,058744	0,001147	0,95	-9,74	25,311	20389,02	243
0,00108	0,058744	0,001147	0,95	9,74	25,311	20389,02	243
0,001082	0,056434	0,001222	0,95	9,75	25,311	20389,02	243
0,001395	0,056434	0,001222	0,95	-9,75	25,311	20389,02	243

**APÉNDICE J.**

**CARGAS Y CARGAS COMBINADAS SEGÚN EL MÉTODO LRFD (LOAD  
RESISTENCE FACTORY DESIGN).**

## INTRODUCTION TO LRFD

The intent of this part of the LRFD Manual is to provide a general introduction to the subject. It was written primarily for:

- (1) engineers experienced in allowable stress design (ASD) who are unfamiliar with LRFD and
- (2) students and novice engineers.

The emphasis is on understanding the most common cases, rather than on completeness and efficiency in design. Regular users of LRFD may also find it helpful to refer to the information provided herein. It should be noted, however, that the governing document is the LRFD Specification (in Part 6 of this volume of the Manual). For optimum design the use of the design aids elsewhere in this Manual is recommended. Among the topics not covered herein are:

- (1) connections, the subject of Volume II, and
- (2) noncompact beams and plate girders, for which the reader is referred to Appendices F and G of the LRFD Specification and Part 4 of this volume of the Manual.

## LRFD Versus ASD

The primary objective of the LRFD Specification is to provide a uniform reliability for steel structures under various loading conditions. This uniformity cannot be obtained with the allowable stress design (ASD) format.

The ASD method can be represented by the inequality

$$\Sigma Q_i \leq R_n / F.S. \quad (2-1)$$

The left side is the summation of the load effects,  $Q_i$  (i.e., forces or moments). The right side is the nominal strength or resistance  $R_n$ , divided by a factor of safety. When divided by the appropriate section property (e.g., area or section modulus), the two sides of the inequality become the calculated stress and allowable stress, respectively. The left side can be expanded as follows:

$\Sigma Q_i$  = the maximum (absolute value) of the combinations

$$\begin{aligned} & D + L' \\ & (D + L' + W) \times 0.75^* \\ & (D + L' + E) \times 0.75^* \\ & D - W \\ & D - E \end{aligned}$$

where  $D$ ,  $L'$ ,  $W$ , and  $E$  are, respectively, the effects of the dead, live, wind, and earthquake loads; total live load  $L' = L + (L_r \text{ or } S \text{ or } R)$

- $L$  = Live load due to occupancy
- $L_r$  = Roof live load
- $S$  = Snow load
- $R$  = Nominal load due to initial rainwater or ice exclusive of the ponding contribution

\*0.75 is the reciprocal of 1.33, which represents the  $1/3$  increase in allowable stress permitted when wind or earthquake is taken simultaneously with live load.

ASD, then, is characterized by the use of unfactored service loads in conjunction with a single factor of safety applied to the resistance. Because of the greater variability and, hence, unpredictability of the live load and other loads in comparison with the dead load, a uniform reliability is not possible.

LRFD, as its name implies, uses separate factors for each load and for the resistance. Considerable research and experience were needed to establish the appropriate factors. Because the different factors reflect the degree of uncertainty of different loads and combinations of loads and the accuracy of predicted strength, a more uniform reliability is possible.

The LRFD method may be summarized by the formula

$$\sum \gamma_i Q_i \leq \phi R_n \quad (2-2)$$

On the left side of the inequality, the required strength is the summation of the various load effects  $Q_i$ , multiplied by their respective load factors  $\gamma_i$ . The design strength, on the right side, is the nominal strength or resistance  $R_n$ , multiplied by a resistance factor  $\phi$ . Values of  $\phi$  and  $R_n$  for columns, beams, etc. are provided throughout the LRFD Specification and will be covered here, as well.

According to the LRFD Specification (Section A4.1),  $\sum \gamma_i Q_i$  = the maximum absolute value of the following combinations

1.4D	(A4-1)
1.2D + 1.6L + 0.5(L, or S or R)	(A4-2)
1.2D + 1.6(L, or S or R) + (0.5L or 0.8W)	(A4-3)
1.2D + 1.3W + 0.5L + 0.5(L, or S or R)	(A4-4)
1.2D ± 1.0E + 0.5L + 0.2S	(A4-5)
0.9D ± (1.3W or 1.0E)	(A4-6)

(Exception: The load factor on L in combinations A4-3, A4-4, A4-5 shall equal 1.0 for garages, areas occupied as places of public assembly, and all areas where the live load is greater than 100 psf).

The load effects D, L, L<sub>r</sub>, S, R, W, and E are as defined above. The loads should be taken from the governing building code or from ASCE 7, *Minimum Design Loads in Buildings and Other Structures* (American Society of Civil Engineers, 1988). Where applicable, L should be determined from the reduced live load specified for the given member in the governing code. Earthquake loads should be from the AISC *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, which appears in Part 6 of this Manual.

#### LRFD Fundamentals

The following is a brief discussion of the basic concepts of LRFD. A more complete treatment of the subject is available in the Commentary on the LRFD Specification (Section A4 and A5) and in the references cited therein.

LRFD is a method for proportioning structures so that no applicable limit state is exceeded when the structure is subjected to all appropriate factored load combinations. Strength limit states are related to safety and load carrying capacity (e.g., the limit states of plastic moment and buckling). Serviceability limit states (e.g., deflections) relate to performance under normal service conditions. In general, a structural member will have several limit states. For a beam, for example, they are flexural strength, shear strength, vertical deflection, etc. Each limit state has associated with it a value of  $R_n$ , which defines the boundary of structural usefulness.

Because the AISC Specification is concerned primarily with safety, strength limit states are emphasized. The load combinations for determining the required strength were given in expressions A4-1 through A4-6. (Other load combinations, with different values of  $\gamma_s$ , are appropriate for serviceability; see Chapter L in the LRFD Specification and Commentary.)

The AISC load factors (A4-1 through A4-6) are based on ASCE 7. They were originally developed by the A58 Load Factor Subcommittee of the American National Standards Institute, ANSI, (U.S. Department of Commerce, 1980) and are based strictly on load statistics. Being material-independent, they are applicable to all structural materials. Although others have written design codes similar in format to the LRFD Specification, the AISC was the first specification group to adopt the ANSI probability-based load factors.

The AISC load factors recognize that when several loads act in combination, only one assumes its maximum lifetime value at a time, while the others are at their "arbitrary-point-in-time" (APT) values. Each combination models the total design loading condition when a different load is at its maximum:

<u>Load Combination</u>	<u>Load at its Lifetime (50-year) Maximum</u>
A4-1	$D$ (during construction; other loads not present)
A4-2	$L$
A4-3	$L_r$ or $S$ or $R$ (a roof load)
A4-4	$W$ (acting in direction of $D$ )
A4-5	$E$ (acting in direction of $D$ )
A4-6	$W$ or $E$ (opposing $D$ )

The other loads, which are APT loads, have mean values considerably lower than the lifetime maximums. To achieve a uniform reliability, every factored load (lifetime maximum or APT) is larger than its mean value by an amount depending on its variability.

The AISC resistance factors are based on research recommendations published by Washington University in St. Louis (Galambos et al., 1978) and reviewed by the AISC Specification Advisory Committee. Test data were analyzed to determine the variability of each resistance. In general, the resistance factors are less than one ( $\phi < 1$ ). For uniform reliability, the greater the scatter in the data for a given resistance, the lower its  $\phi$  factor.

Several representative LRFD  $\phi$  factors for steel members (referenced to the corresponding chapters in the LRFD Specification) are:

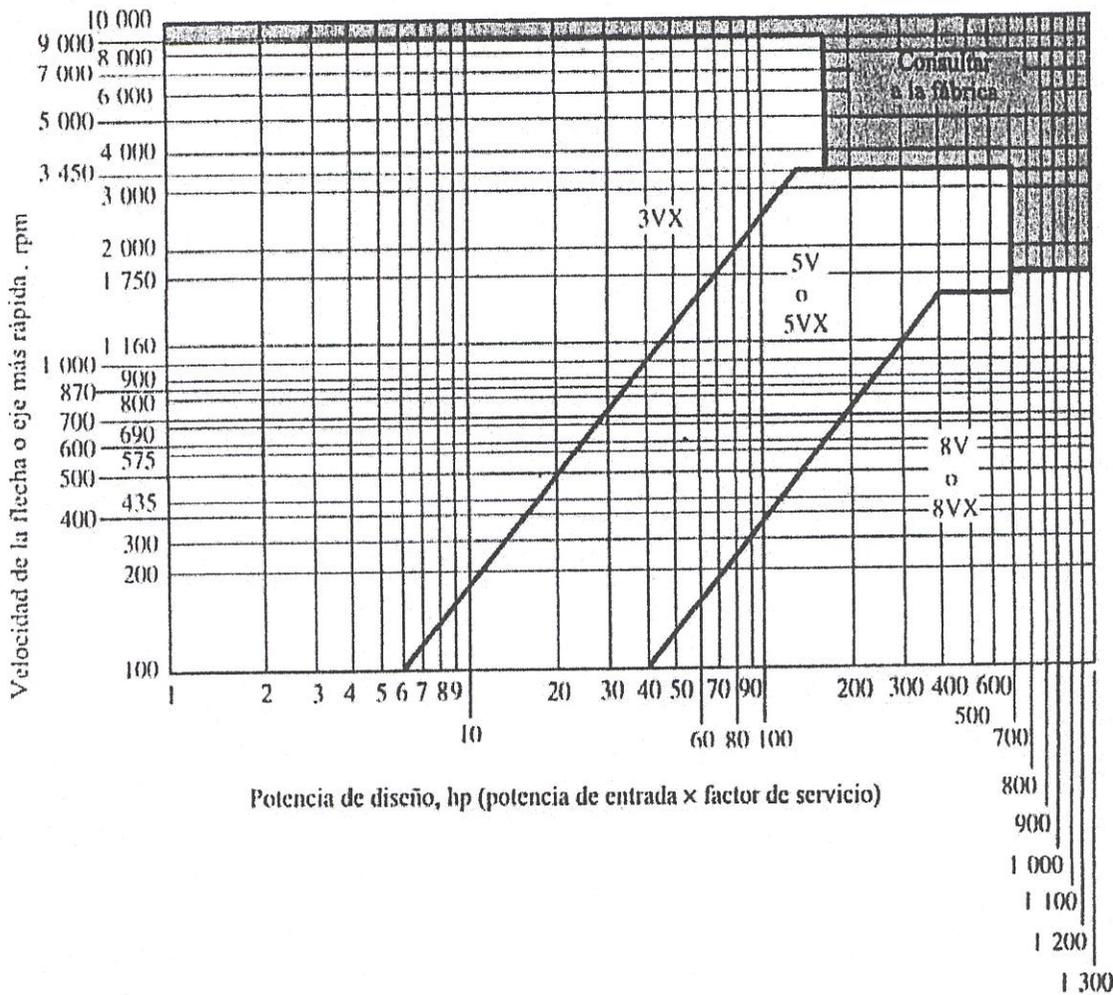
- $\phi_t = 0.90$  for tensile yielding (Chapter D)
- $\phi_t = 0.75$  for tensile fracture (Chapter D)
- $\phi_c = 0.85$  for compression (Chapter E)
- $\phi_b = 0.90$  for flexure (Chapter F)
- $\phi_v = 0.90$  for shear yielding (Chapter F)

Resistance factors for other member and connection limit states are given in the LRFD Specification.

The following sections (A through D) summarize and explain the corresponding chapters of the LRFD Specification.

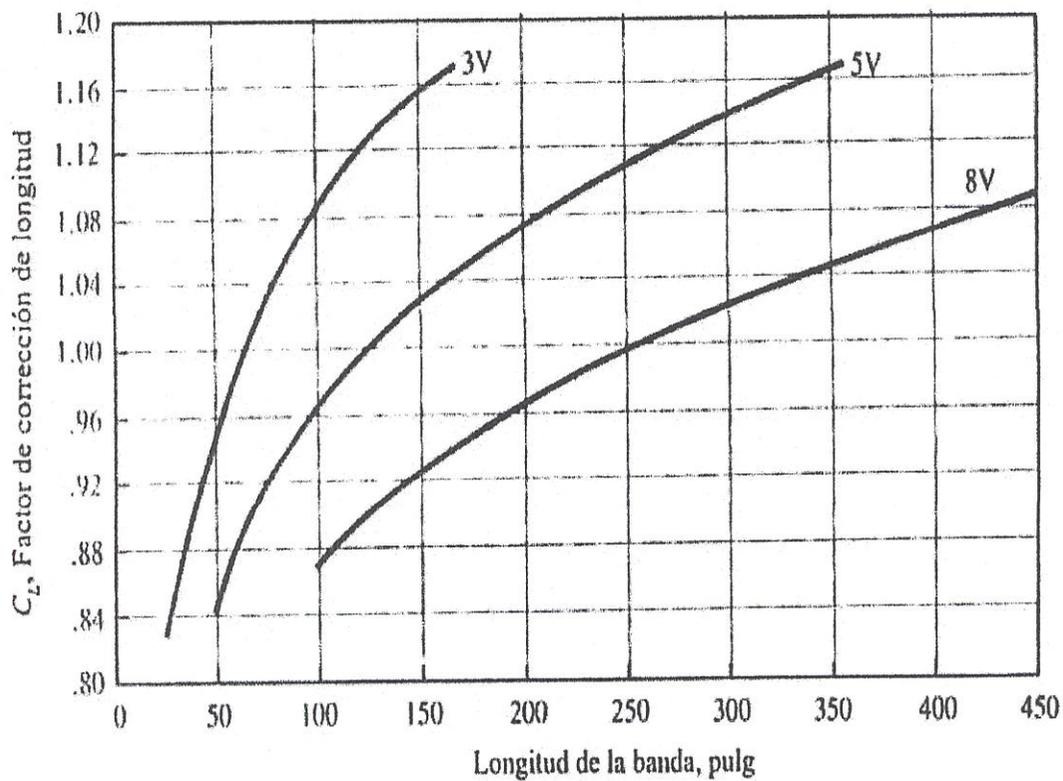
**APÉNDICE K.**

**GRÁFICA DE SELECCIÓN DE BANDAS: RELACIÓN ENTRE VELOCIDAD DE EJE VERSUS POTENCIA DE DISEÑO.**



**APÉNDICE L.**

**TABLA DE FACTOR DE CORRECCIÓN PARA LONGITUD DE BANDA.**

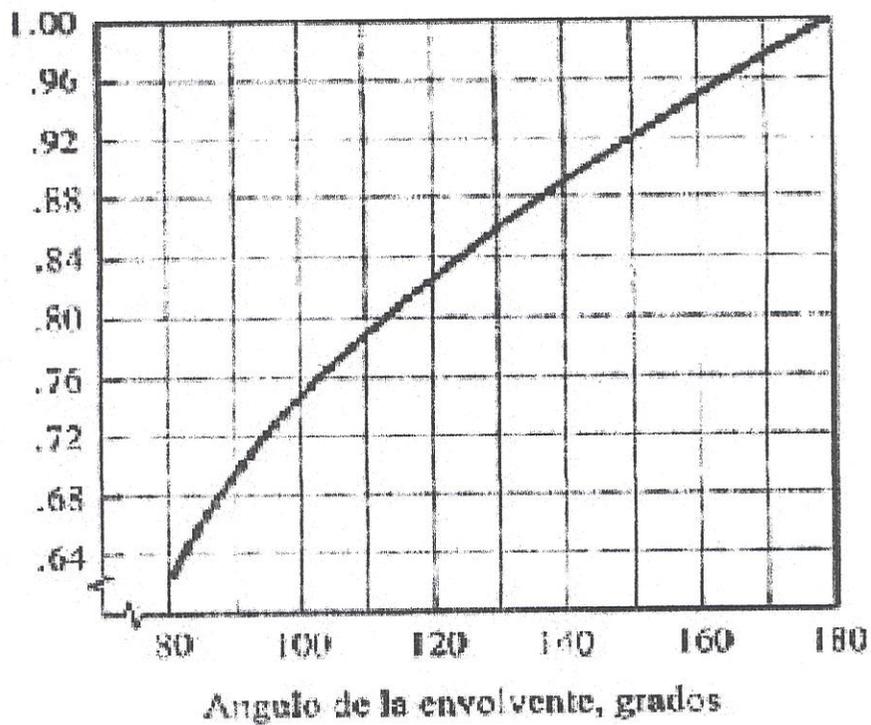


Factor de corrección para longitud de la banda,  $C_l$

**APÉNDICE M.**

**FACTOR DE CORRELACIÓN DEL ÁNGULO DE LA ENVOLVENTE  $C_{\theta}$ .**

$C_a$  Factor de corrección del ángulo de la envolvente



Factor de corrección del ángulo de la envolvente,  $C_a$

**APÉNDICE N.**

**LONGITUDES DE BANDA ESTANDAR PARA BANDAS 3V, 5V, 8V.**

**Longitudes de banda estándar para bandas  
3V, 5V y 8V (pulg)**

<i>Sólo 3V</i>	<i>3V y 5V</i>	<i>3V, 5V y 8V</i>	<i>5V y 8V</i>	<i>Sólo 8V</i>
25	50	100	150	375
26.5	53	106	160	400
28	56	112	170	425
30	60	118	180	450
31.5	63	125	190	475
33.5	67	132	200	500
35.5	71	140	212	
37.5	75		224	
40	80		236	
42.5	85		250	
45	90		265	
47.5	95		280	
			300	
			315	
165			335	
			355	



**CIB -ESPOL**

**APÉNDICE O.**

**POTENCIAS NOMINALES (HP) PARA BANDAS TRAPECIALES EN V.**

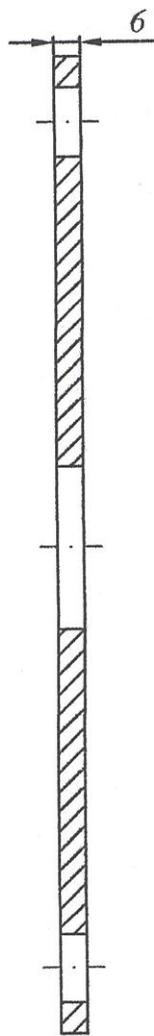
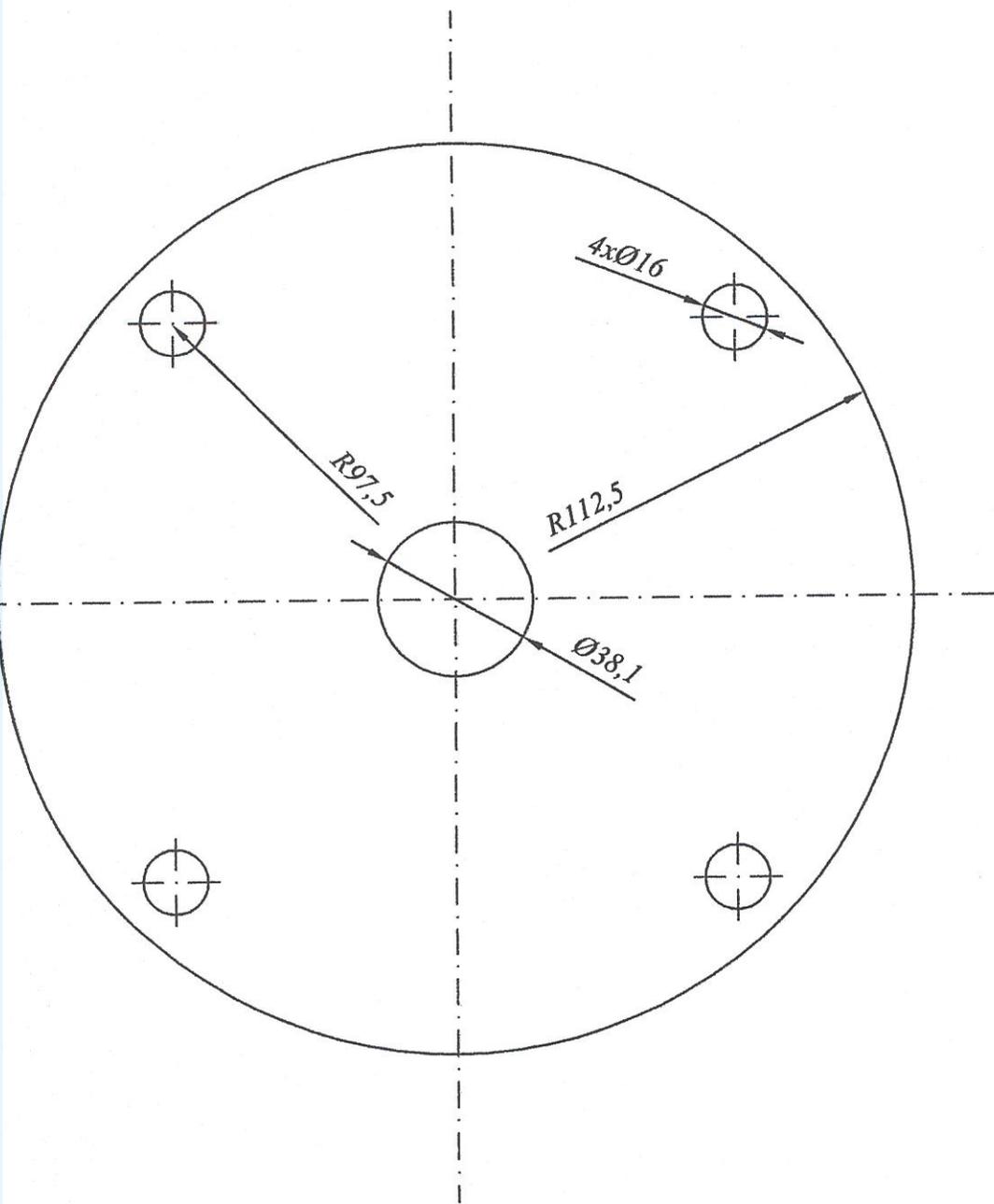
Potencias nominales en hp de bandas trapeciales (o en V) estándares

SECCIÓN DE BANDA	DIÁMETRO DE PASO DE POLEA, in	VELOCIDAD DE LA BANDA, ft/min				
		1000	2000	3000	4000	5000
A	2.6	0.47	0.62	0.53	0.15	
	3.0	0.66	1.01	1.12	0.93	0.38
	3.4	0.81	1.31	1.57	1.53	1.12
	3.8	0.93	1.55	1.92	2.00	1.71
	4.2	1.03	1.74	2.20	2.38	2.19
	4.6	1.11	1.89	2.44	2.69	2.58
	5.0 o más	1.17	2.03	2.64	2.96	2.89
B	4.2	1.07	1.58	1.68	1.26	0.22
	4.6	1.27	1.99	2.29	2.08	1.24
	5.0	1.44	2.33	2.80	2.76	2.10
	5.4	1.59	2.62	3.24	3.34	2.82
	5.8	1.72	2.87	3.61	3.85	3.45
	6.2	1.82	3.09	3.94	4.28	4.00
	6.6	1.92	3.29	4.23	4.67	4.48
	7.0 o más	2.01	3.46	4.49	5.01	4.90
C	6.0	1.84	2.66	2.72	1.87	
	7.0	2.48	3.94	4.64	4.44	3.12
	8.0	2.96*	4.90	6.09	6.36	5.52
	9.0	3.34	5.65	7.21	7.86	7.39
	10.0	3.64	6.25	8.11	9.06	8.89
	11.0	3.88	6.74	8.84	10.0	10.1
	12.0 o más	4.09	7.15	9.46	10.9	11.1
D	10.0	4.14	6.13	6.55	5.09	1.35
	11.0	5.00	7.83	9.11	8.50	5.62
	12.0	5.71	9.26	11.2	11.4	9.18
	13.0	6.31	10.5	13.0	13.8	12.2
	14.0	6.82	11.5	14.6	15.8	14.8
	15.0	7.27	12.4	15.9	17.6	17.0
	16.0	7.66	13.2	17.1	19.2	19.0
	17.0 o más	8.01	13.9	18.1	20.6	20.7
E	16.0	8.68	14.0	17.5	18.1	15.3
	18.0	9.92	16.7	21.2	23.0	21.5
	20.0	10.9	18.7	24.2	26.9	26.4
	22.0	11.7	20.3	26.6	30.2	30.5
	24.0	12.4	21.6	28.6	32.9	33.8
	26.0	13.0	22.8	30.3	35.1	36.7
	28.0 o más	13.4	23.7	31.8	37.1	39.1

**APÉNDICE P.**

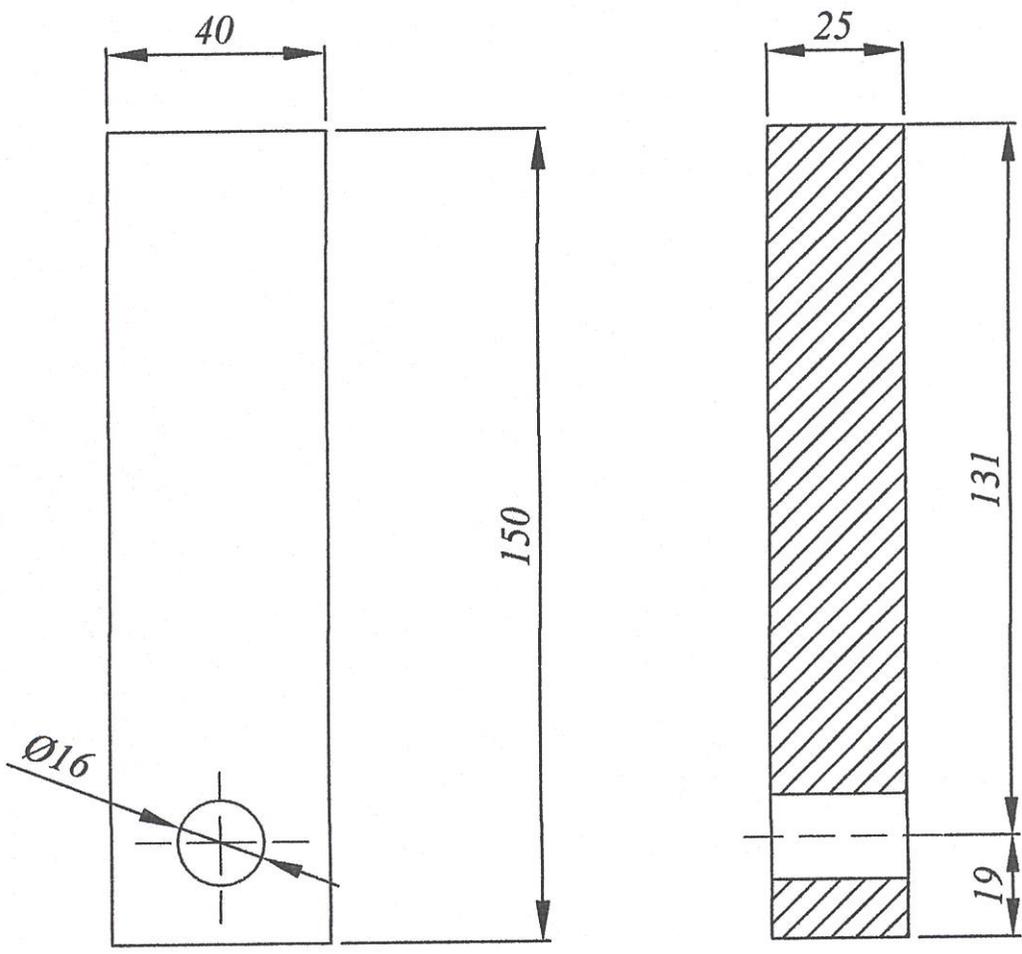
**PLANO DE ENSAMBLE DEL MOLINO DE MARTILLOS.**

**APÉNDICE Q.**  
**PLANO DE DISCOS PORTA-EJES.**



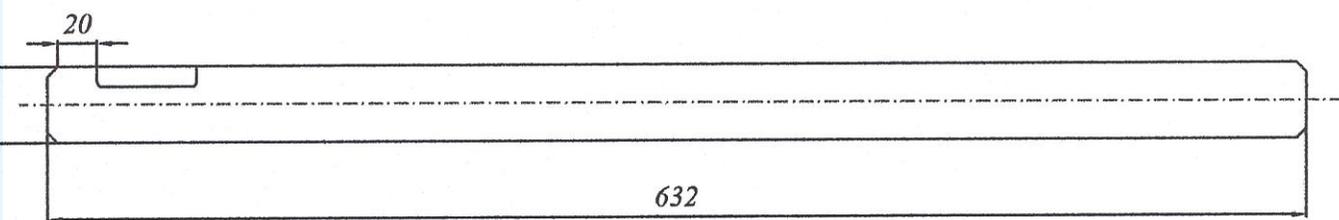
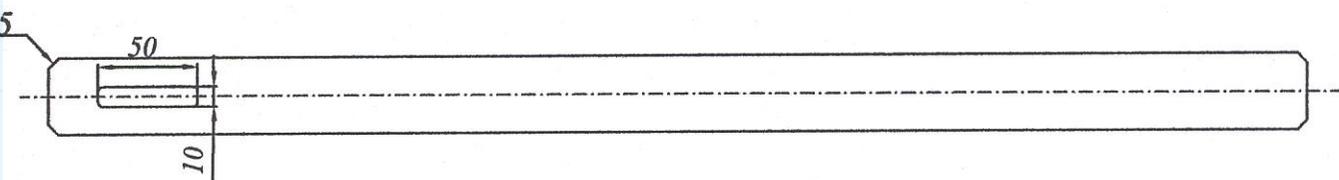
1	CANT: 2	DISCO PORTA EJES, ACERO A-36, 1.17 Kg.			
DISEÑADO: LUIS ABARCA		REVISADO: E. MARTINEZ	APROBADO: ING. ERNESTO MARTINEZ	ARCHIVO:	FECHA: FEB - 2008
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			<b>TRITURADORA DE MARTILLOS</b>		
			DESPIECE	EDICION: 1	HOJA: 2

**APÉNDICE R.**  
**PLANO DE MARTILLOS.**



1	CANT: 18	MARTILLO, ACERO CHRONIT 400 HB, 1.17 Kg.			
DISEÑADO: LUIS ABARCA	REVISADO: E. MARTINEZ	APROBADO: ING. ERNESTO MARTINEZ	ARCHIVO: FLANOS.FINALES/MARTILLO.DWG	FECHA: FEB - 2009	ESCALA: 1:1
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			<b>TRITURADORA DE MARTILLOS</b>		
			DESPIECE	EDICION: 1	HOJA: 2

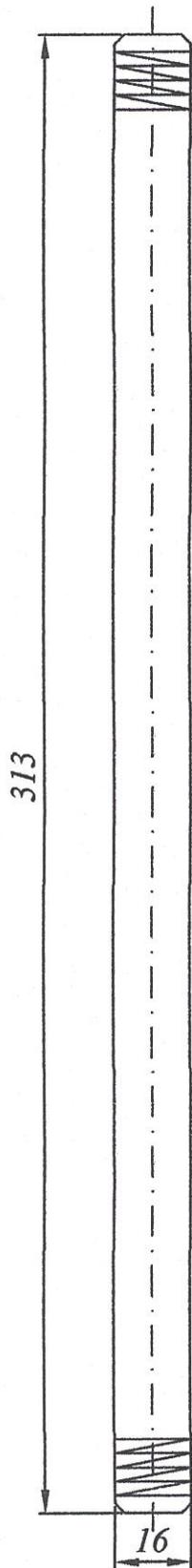
**APÉNDICE S**  
**PLANO DE EJE PRINCIPAL.**



**CIB-ESPOL**

1	CANT: 1	EJE PRINCIPAL, ACERO AISI 1018, 5.40 KG.			
DISEÑADO: LUIS ABARCA	REVISADO: E. MARTINEZ	APROBADO: ING. ERNESTO MARTINEZ	ARCHIVO:	FECHA: FEB - 2009	ESCALA: 1:1
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			<b>TRITURADORA DE MARTILLOS</b>		
			DESPIECE	EDICION: 1	HOJA: 3

**APÉNDICE T**  
**PLANO DE EJE SECUNDARIO.**



I	CANT: 4	EJE SECUNDARIO, ACERO AISI 4340, 0.56 Kg.			
DISEÑADO: LUIS ABARCA	REVISADO: E. MARTINEZ	APROBADO: ING. ERNESTO MARTINEZ	ARCHIVO:	FECHA: FEBRERO - 2009	ESCALA: 1:1
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FACULTAD DE INGENIERÍA EN MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN			<b>TRITURADORA DE MARTILLOS</b>		
			DESPIECE	EDICION: 1	HOJA: 4

# BIBLIOGRAFIA.

1. MANUAL DEL VIDRIO, SAINT-GOBAIN GLASS, 1ra. Edición 2002.  
Plazota Editores.
2. VOGEL WERNER, Glass Chemistry, Editorial SPRINGER-VERLAG  
1994 2da. Edición.
3. REINDL JOHN, Reuse and Recycling of glass cullet for containers and  
non containers uses, Abril 25 2003.
4. REMADE SCOTLAND, Glass Reciclyng Handbook, 1ra Edición Julio  
2004. Glasgow Caledonian University, Drummond House (3<sup>rd</sup> floor)  
1Hill street.
5. SHIGLEY JOSEPH EDWARD; MISCHKE CHARLES, Diseño en  
Ingeniería Mecánica. Quinta edición 1999. McGraw Hill Interamericana  
de México, S.A. de C.V. CAPÍTULO 17 páginas 750-766.

6. NORTON ROBERT L., Diseño de máquinas. Primera Edición 1999. Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. Páginas 998, 999.
7. MOTT ROBERT L., Diseño de elementos de máquinas 2da. Edición 1995. Prentice Hall Hispanoamerica, S.A.. México. CAPITULO 10 páginas 332-343; CAPITULO 13 páginas 532-547.
8. AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, INC. (AISC). Manual of Steel Construction, Load & Resistance Factor Design, Volume I. segunda edición Estados Unidos 1994. Páginas 2-5,2-6,2-7.
9. CANTOS MARIA ELISA: "Rediseño de un molino para plásticos de construcción nacional" (TESIS, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Año 2005.)
10. DIARIO EL TELEGRAFO, Lunes 17 de abril del 2006, Primera Parte pagina 2A, Sección de Economía.
11. OI Planta de Guayaquil-Ecuador.
12. [www.acerosbohlerecuador.com](http://www.acerosbohlerecuador.com)

13. [www.baldor.com](http://www.baldor.com)

14. [www.ivanbohman.com.ec](http://www.ivanbohman.com.ec)



**CIB - ESPOL**