

15  
24



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN**

**MOLINOS TUBULARES EN LA INDUSTRIA  
DEL CEMENTO.**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**  
P R E S E N T A :  
**ZEFERINO BONILLA TOVAR**

ASESOR: IME. FELIPE DIAZ DEL CASTILLO RODRIGUEZ



CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1996

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES-CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE  
EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES  
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN  
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

"Molinos tubulares en la industria del cemento".

que presenta el pasante: Zeferino Bonilla Tovar  
con número de cuentas: 8161877-0 para obtener el TITULO de:  
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cuautitlan Izcalli, Edo. de Mex., a 16 de abril de 1996.

PRESIDENTE	<u>Ing. Ma. Soledad Alvarado Martínez</u>	
VOCAL	<u>Ing. Daniel Bonilla Sapién</u>	
SECRETARIO	<u>Ing. Felipe Díaz del Castillo</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>Ing. Emilio Juárez Martínez</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>Ing. Enrique Cortés González</u>	

UAE/DEP/VAP/02

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**DIRECTOR DE TESIS: I.M.E. FELIPE DIAZ DEL CASTILLO RODRIGUEZ**

**JURADO**

<b>PRESIDENTE:</b>	<b>ING. MA. SOLEDAD ALVARADO MARTINEZ</b>
<b>VOCAL:</b>	<b>ING. DANIEL BONILLA SAPIEN</b>
<b>SECRETARIO:</b>	<b>ING. FELIPE DIAZ DEL CASTILLO RODRIGUEZ</b>
<b>PRIMER SUPLENTE:</b>	<b>ING. EMILIO JUAREZ MARTINEZ</b>
<b>SEGUNDO SUPLENTE:</b>	<b>ING. ENRIQUE CORTES GONZALEZ</b>

**A MIS PADRES:  
CON AMOR Y RESPETO.**

**A CHAYO Y A WENDY:  
MI ESPOSA E HIJA RESPECTIVAMENTE  
POR SU APOYO Y COMPRENSION  
DURANTE LA ELABORACION DE  
ESTE TRABAJO.**

**A MIS HERMANOS, HERMANAS, Y  
A LA MEMORIA DE ESTEBAN (+)**

## INDICE

	Pág.
1.- INTRODUCCION	1
2.- SISTEMAS DE MOLIENDA DE CRUDO	5
2.1.- Objetivo de la molienda de crudo	5
2.2.- Propiedades de la materia prima y calidad del producto	7
2.3.- Equipo para molienda de crudo	9
2.4.- Tipos de molinos de crudo	11
2.4.1.- Molino de descarga final	11
2.4.2.- Molino de descarga central	13
2.4.3.- Molino barrido por aire	15
2.4.4.- Molino vertical	17
3.- SISTEMAS DE MOLIENDA DE CEMENTO	19
3.1.- Desarrollo de los sistemas de molienda	19
3.2.- Molino de circuito abierto (molino compuesto)	21
3.3.- Molino con elevador de cangilones	23
3.4.- Molino con descarga central	25
3.5.- Molienda en dos etapas	27
4.- DIMENSIONAMIENTO DE MOLINOS TUBULARES	29
4.1.- Fuerza motriz para molinos tubulares	31
4.2.- Peso de la carga de bola	34
4.3.- Grado de llenado	35
4.4.- Longitud de los compartimientos	37
4.5.- Velocidad del molino	37
4.6.- Relación longitud a diámetro de molinos tubulares	39
4.7.- Cálculos prácticos	41
5.- ELEMENTOS DE LOS MOLINOS TUBULARES	45
5.1.- Elementos mecánicos de molinos tubulares	45
5.2.- Elementos externos	47
5.2.1.- Dispositivos de alimentación	47

	Pág.
5.2.2.- Dispositivos de descarga	49
5.2.3.- Coraza del molino	49
5.2.4.- Cabezales del molino	51
5.2.5.- Cojinetes del molino	52
5.3.- Elementos internos	54
5.3.1.- Placas de blindaje del cabezal	56
5.3.2.- Placas de blindaje de la coraza	60
5.3.3.- Fijación e instalación de las placas	67
5.3.4.- Tiempo de vida de placas de la coraza	69
5.4.- Diafragma intermedio	70
5.4.1.- Diafragma sencillo	71
5.4.2.- Diafragma doble	72
5.4.3.- Diafragma ajustable	73
5.4.4.- Diafragmas abiertos	74
5.4.5.- Ranuras del diafragma intermedio	75
5.4.6.- Tasa de desgaste y tiempo de vida de los diafragmas	76
5.5.- Diafragma de descarga	77
5.5.1.- Diafragmas para molino con descarga central	77
5.5.2.- Ranuras para diafragma de descarga	78
5.6.- Elementos molturadores (bolas)	80
5.6.1.- Calidad del material	81
5.6.2.- Tasa de desgaste	81
5.6.3.- Mecanismos de desgaste	85
6.- TIPOS DE TRANSMISION PARA MOLINOS TUBULARES	89
6.1.- Transmisión con corona dentada y piñón	90
6.2.- Transmisión central	95
6.3.- Transmisión sin reductor	97
6.4.- Criterios de selección para transmisión de molinos tubulares	98
7.- MANTENIMIENTO DE MOLINOS TUBULARES	100
7.1.- Daños típicos en molinos tubulares	101

	Pág.
7.2.- Inspecciones de mantenimiento realizadas a los molinos tubulares.	101
CONCLUSIONES	108
TERMINOLOGIA	110
ABREVIATURAS	111
BIBLIOGRAFIA	113

## 1.- INTRODUCCION

Antes de iniciar con la introducción al tema del presente trabajo, es conveniente hacer una descripción de los diferentes pasos que intervienen en la fabricación del cemento.

El proceso inicia con la extracción de la materia prima (caliza y arcilla), la cual normalmente proviene de minas a cielo abierto y es transportada a una trituradora primaria que tiene una capacidad de 2000 t/h y es accionada con un motor eléctrico de 373 KW. En esta trituradora, la piedra caliza es reducida de su tamaño original, hasta un tamaño comprendido entre 6 y 8 pulgadas.

El material triturado es almacenado en un patio intermedio con una capacidad de 26000 toneladas de caliza y 6000 toneladas de arcilla, este material es sometido a otro proceso de reducción en su tamaño por medio de una trituradora secundaria con capacidad de 600 t/h y accionada por un motor de 933 KW, en esta trituradora la piedra caliza es reducida hasta un tamaño comprendido entre 19 y 24 mm, el cual es depositado en un patio de prehomogenización con capacidad de 40000 toneladas. En esta parte del proceso, la arcilla es desviada a un grupo de silos que contienen materiales correctivos (arcilla, mineral de fierro, arena sílica), estos componentes junto con la caliza son dosificados y alimentados a un molino de crudo de 5 metros de diámetro por 18.5 metros de longitud con una capacidad de 360 t/h y accionado por dos motores de 2500 KW cada uno.

Dentro de ese molino son molidos los componentes anteriores, obteniéndose un producto llamado comunmente crudo (resultado de la molienda de caliza con los componentes correctivos mencionados anteriormente), el cual es almacenado en un grupo de silos que tienen una capacidad total de 22000 toneladas.

De los silos de crudo, se alimenta el material a los hornos rotatorios a través de un precalentador (eleva la temperatura del crudo a 800 °C utilizando los gases calientes del horno), dentro del horno este material alcanza temperaturas próximas a los 1500 °C calcinandose y formando un producto denominado clinker (mineral artificial con propiedades cementantes). Los hornos usados para este fin en la planta Apaxco son:

Horno 1.- 4.4 metros de diámetro por 70 metros de longitud equipado con enfriador de parrilla y con una capacidad de 1300 t/día, accionado por dos motores de 145 KW cada uno.

Horno 2.- 5.2 metros de diámetro por 85 metros de longitud equipado con enfriador planetario y con una capacidad de 3000 t/día, accionado por dos motores de 373 KW cada uno.

El clinker producto de los hornos es almacenado en patios para posteriormente ser alimentado junto con otros materiales (yeso, puzolana) a los molinos de cemento, los cuales una vez dosificados y molidos dan origen al cemento. Para la molienda de cemento la planta Apaxco cuenta con cinco molinos tubulares, los cuales se enlistan a continuación.

Molino de cemento 1 y 2.- 3.4 metros de diámetro por 11 metros de longitud con capacidad de 35 t/h para cemento tipo uno normal y 30 t/h para cemento tipo uno puzolanico.

Molino de cemento 3.- 3.6 metros de diámetro por 12.70 metros de longitud con capacidad de 35 t/h para cemento tipo uno normal y 30 t/h para cemento tipo uno puzolanico.

Molino de cemento 4.- 4.6 metros de diámetro por 15.5 metros de longitud con capacidad de 125 t/h para cemento tipo uno normal y 100 t/h para cemento tipo uno puzolanico.

Molino de cemento 5.- 4.4 metros de diámetro por 13.25 metros de longitud con una capacidad de 155 t/h para cemento tipo uno normal y 125 t/h para cemento tipo uno puzolanico.

El proceso de fabricación se termina al almacenarse el cemento en silos (6 x 2000 toneladas cada uno) para de ahí extraerse e iniciar la etapa de despacho la cual puede ser a granel o en sacos de 50 Kg, para esto se cuenta con dos sistemas de carga a granel con capacidad de 2000 toneladas cada 8 horas, dos ensacadoras rotatorias de 8 boquillas cada una con capacidad de 2000 sacos por hora y una ensacadora estacionaria de 4 boquillas con capacidad de 1000 sacos por hora.

En la figura 1.1 se ilustra el proceso de fabricación del cemento utilizado en la planta de cemento Apasco, ubicada en Apasco estado de México.

Ha pasado mucho tiempo desde la época en que los romanos hacían la molienda en vasijas, hasta lograr en la actualidad modernos sistemas de molienda con capacidades de 400 a 500 toneladas por hora (t/h).

En el siglo XIX se desarrollaron los sistemas de molienda de crudo (resultado de la molienda de caliza, arcilla, sílica y mineral de hierro) y cemento a escala industrial. El molino tubular se desarrolló entre 1890 y 1900 lográndose posteriormente molinos de grandes dimensiones (5 metros de diámetro por 20 metros de longitud) como los que se utilizan actualmente en las modernas plantas de cemento.

Entre 1920 y 1940 se desarrolló el molino de rodillos para la molienda de carbón y actualmente se le utiliza con mucho éxito en la molienda de material crudo para la fabricación de cemento.

Paralelamente al desarrollo de los hornos de proceso seco también la molienda cambió del proceso húmedo al seco, la utilización del calor de escape de los hornos para propósitos de secado hizo más económica la molienda por vía seca que la húmeda.

Casi el 85% del total de la energía consumida en la producción de cemento corresponde al desmenzamiento y a la molienda de las materias primas y del cemento, aproximadamente el 75% solo a la molienda.

Únicamente una pequeña parte del requerimiento de energía de un equipo de molienda es convertida en trabajo útil de molienda, por lo que la eficiencia de molienda de un molino tubular queda situada entre el 2 y el 20%, el resto de la energía se distribuye en rozamiento de las partículas entre sí, rozamiento de las partículas con las paredes del molino, ruido, calor, vibración, rendimiento del motor y del molino, elevación del material dentro del molino, etc.

El grado de utilización de la energía suministrada, teóricamente baja, ofrece mayor interés en el proyecto de los dispositivos de molienda, que para la explotación práctica en la cual la energía aplicada a la molienda se puede considerar baja en relación con las ventajas del resultado tecnológico que con ellas se obtiene.

El propósito de este trabajo es proporcionar una información sencilla y entendible del proceso de molienda en la industria del cemento, el enfoque de esto está dirigido al proceso de molienda por vía seca, sin considerar los sistemas de vía húmeda ya que en la actualidad tienden a modificarse para adaptarse al proceso de fabricación seco.

En el capítulo 2 y 3 se hace una descripción general de todos los sistemas de molienda para crudo y cemento que existen en explotación, también se hace mención de los sistemas de molienda con molino de rodillos, que aunque no son parte del tema tratado, en la actualidad se usan con gran éxito en la producción de material crudo para la fabricación de cemento.

En el capítulo 4 se trata el tema de los molinos tubulares como parte integral de un sistema de molienda, ya que éste es la parte primordial de dicho sistema, aquí, se hace mención en forma general de las consideraciones de carácter técnico empleadas por los diferentes fabricantes de equipo para la industria del cemento en relación al dimensionamiento de los molinos tubulares.

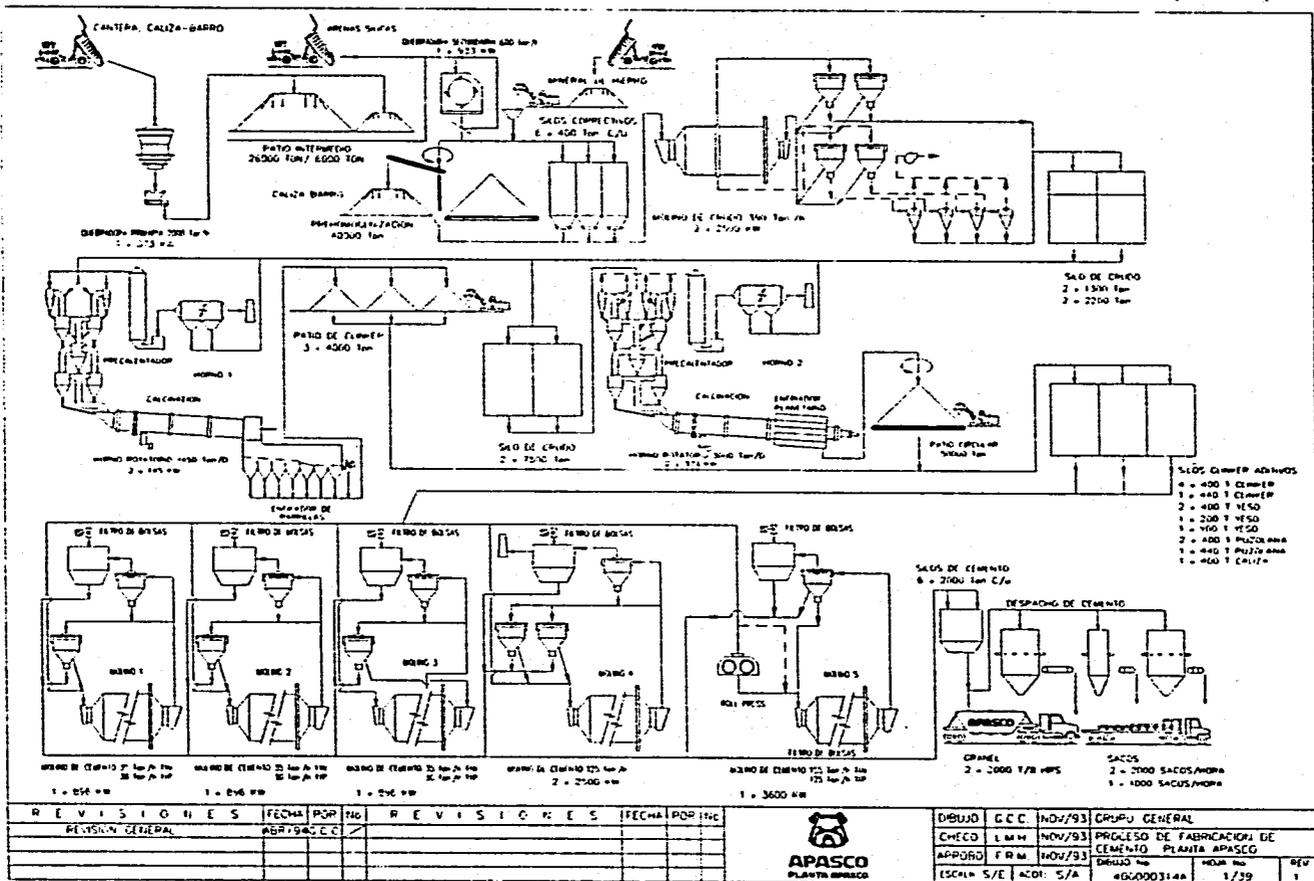


Fig. 1.1.- Proceso de fabricación del cemento.

En el capítulo 5 se tratará lo referente a los elementos que constituyen un molino tubular, dichos elementos se han dividido en elementos externos y elementos internos, de los cuales, estos últimos tienen una gran importancia por ser las partes sujetas a desgaste dentro del molino y tienen influencia directa sobre la eficiencia de este, una deficiencia en cantidad o en calidad de los elementos internos de los molinos causan una disminución en la producción y un incremento de energía, lo cual se refleja directamente en los costos de producción (KWh/t), además de que en casos muy extremos significa el paro del equipo por varios días con la consiguiente pérdida total de la producción y la afectación a los siguientes pasos del proceso.

El capítulo 6 trata lo relacionado a los diferentes tipos de transmisión mecánica usadas en los molinos tubulares, las cuales a lo largo del tiempo han evolucionado a partir del sistema tradicional de piñón-corona hasta los tipos de transmisión con reductor planetario y reductor combiflex, pasando por las transmisiones con motor de anillo y las de motor sincrónico. Es importante mencionar que un daño grave en esta parte de los molinos origina costos muy elevados de reparación o cambio de la pieza.

El capítulo 7 se enfoca directamente a lo que es el mantenimiento de los molinos tubulares para lo cual el fabricante proporciona una serie de instrucciones las que hay que tener en cuenta para evitar fallas graves en el molino. Estas instrucciones se pueden complementar tomando como referencia casos concretos de fallas ocurridas a algunos equipos similares, y también en base a la experiencia de la gente que se encarga del mantenimiento. Algunas de las actividades requieren de personal especializado el cual normalmente es proporcionado por el fabricante del equipo, dentro de estas actividades tenemos:

- Inspección de fisuras por medio de ultrasonido.
- Alineación del molino.
- Reparación de daños en el cuerpo del molino.
- Cambio de partes de la transmisión tales como piñón y corona
- Revisión y evaluación de daños en piñón y corona.

## 2.- SISTEMAS DE MOLIENDA DE CRUDO

En el presente capítulo se tratará lo referente a los diferentes sistemas de molienda utilizados en la industria del cemento para moler material crudo para cemento.

### 2.1.- Objetivo de la Molienda de Crudo.

El proceso de la molienda de crudo es la operación de reducción en tamaño de la materia prima, la cual se realiza entre los procesos de trituración y calcinación (fig. 2.1), y debe satisfacer las siguientes condiciones:

a).- Producir un crudo cuya finura (tamaño de partículas y granulometría) sea adecuada para producir un clinker de la calidad requerida.

Clinker.- Mineral artificial con propiedades cementantes, obtenido a partir de la calcinación de caliza, arcilla, silicas y mineral de hierro, previamente mezclados y molidos.

b).- Obtener una mezcla adecuada por medio del suministro de componentes en una proporción correcta.

c).- Mezclar los componentes dentro del molino.

d).- Secar la materia prima para tener una buena manipulación del crudo.

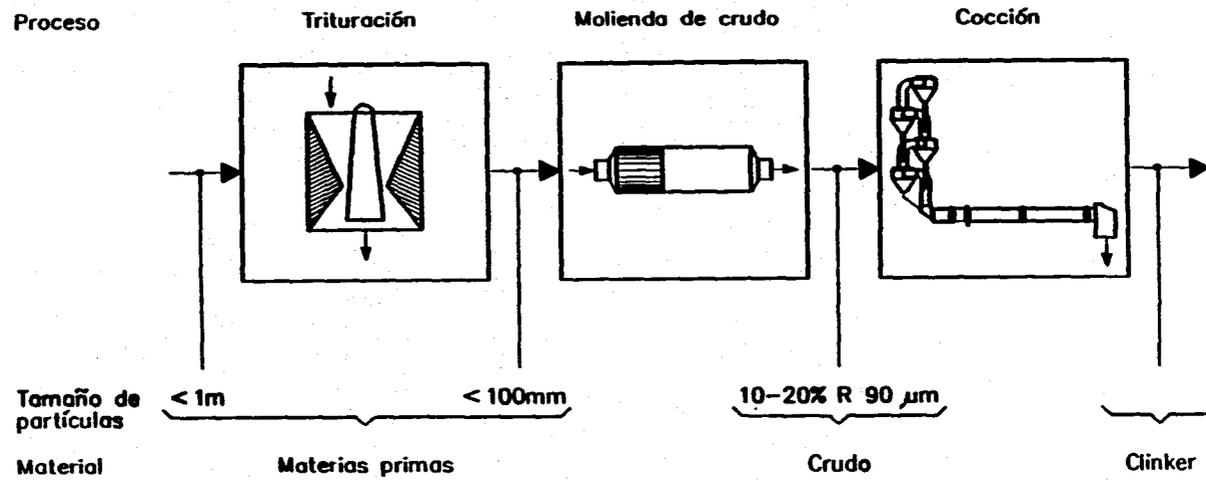
La molienda de crudo se divide en dos tipos.

Proceso de molienda en seco

Proceso de molienda en húmedo.

En la actualidad todas las instalaciones nuevas utilizan el proceso de molienda en seco, por lo cual en este trabajo no se tratará el tema de la molienda por proceso en húmedo.

Fig. 2.1 Objetivo de la molienda de crudo



## 2.2.- Propiedades de la materia prima y calidad del producto.

Las materias primas y los materiales correctivos que se emplean en la preparación de crudo son las siguientes:

Calizas  
Margas  
Arcillas  
Correctivos de hierro (minerales de hierro, escorias)  
Correctivos de sílice (arenas de cuarzo, cenizas volantes)

El tamaño máximo de los materiales de alimentación al molino de crudo, (fig. 2.2) depende del tipo y del tamaño de molino usado, y son válidos los siguientes parámetros :

Molino tubular.- De 25 a 50 mm, dependiendo del diámetro máximo de la carga de bola del molino.

Molino de rodillos.- 100 mm, y esta en función del diámetro del rodillo considerando que este tamaño de alimentación nunca sobrepase del 5 - 7% del diámetro del rodillo.

Prensa de rodillos.- 50 mm, también esta en función del diámetro del rodillo y este tamaño de alimentación nunca debe estar por arriba del 3 - 5% del diámetro de los rodillos.

La finura del crudo depende de los requisitos del proceso de calcinación y se encuentra limitada por la siguiente guía de calidad:

10 - 20 % R 90  $\mu$  m.

La finura del crudo puede determinarse tomando en consideración la siguiente regla:

**" MOLER SOLO CON LA FINURA NECESARIA "**

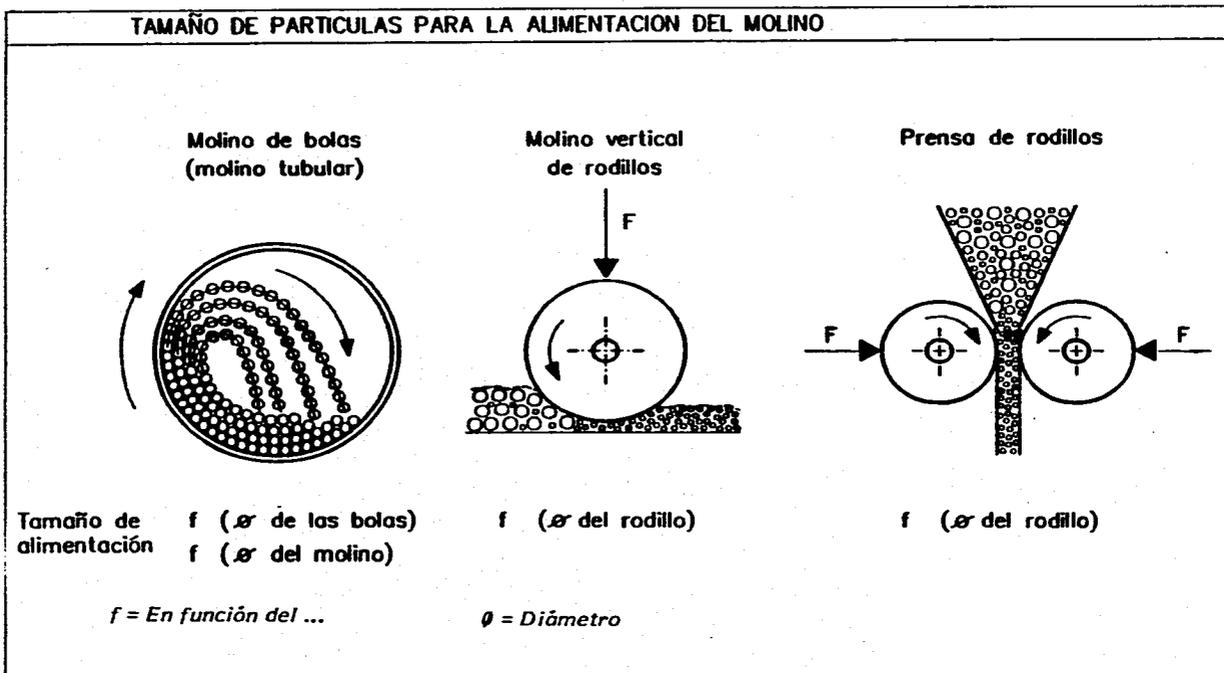
Más importantes que los residuos de 90  $\mu$  m son los residuos de 200  $\mu$  m, por que esta fracción contiene partículas de cuarzo de difícil combustión, el objetivo es disminuir los residuos de 200  $\mu$  m manteniendo los mismos residuos de 90  $\mu$  m. Para cuestión de calidad del producto es válida la siguiente guía.

0.5 % R 200  $\mu$  m.

En general la humedad contenida en el crudo se reduce a 1.0 % de agua con el fin de obtener una fluidez adecuada del producto.

TAMAÑO DE PARTICULAS PARA LA ALIMENTACIÓN DEL MOLINO

Fig. 2.2 Tamaño de partículas para alimentación del molino.



### 2.3.- Equipo para molienda de crudo

Dentro de los equipos disponibles para la molienda de crudo en proceso seco, tenemos los siguientes (fig. 2.3):

Molinos tubulares:

- a).- Molino con descarga final
- b).- Molino de descarga central
- c).- Molino corriente con barrido de aire

Molinos de rodillos.

Actualmente el equipo para molienda de crudo más utilizado es el molino tubular en cualquiera de sus tres tipos. Se considera equipo moderno para la molienda de crudo al molino vertical de rodillos.

Para una adecuada selección de los equipos para molienda de crudo, se utilizan los siguientes criterios.

- Capacidad de la instalación.
- Instalaciones nuevas o ampliaciones.
- Contenido de humedad de las materias primas.
- Dureza de la materia prima (molturabilidad de los componentes).
- Propiedades de la materia prima /adherencia, abrasividad).
- Tamaño de alimentación de la materia prima.

**Molturabilidad.-** Se define a la molturabilidad como " el comportamiento de resistencia contra la reducción de tamaño de un material (o partícula) en un proceso de molturación ", o " El requerimiento de energía (consumo de energía) necesario para triturar o moler una unidad de masa del material ", (Kwh/t).

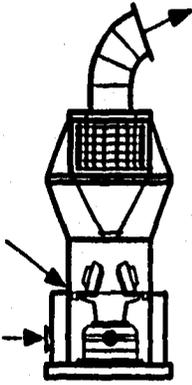
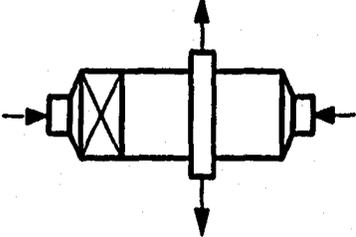
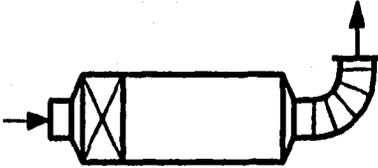
EQUIPOS DE MOLIENDA DE CRUDO	
Tipos principales	
Molino tubular	Molino vertical de rodillos
 <p>Descarga final</p>	
 <p>Descarga central</p>	
 <p>Barrido por aire</p>	

Fig.- 2.3 Equipo para molienda de crudo

#### 2.4.- Tipos de molinos de crudo (proceso seco).

En esta parte se hará una descripción general del funcionamiento de cada uno de los diferentes tipos de sistemas para molienda de crudo existentes.

##### 2.4.1.- Molino de crudo con descarga final.

Este molino se emplea para moler materias con bajo contenido de humedad o para materiales presecados. La capacidad de secado está limitada por la velocidad del gas dentro del molino, la cámara de secado normalmente está incorporada a la estructura del molino. Los gases de secado o el aire de ventilación del molino pasan a través de un separador estático (4) y se desempolvan por medio de un colector de polvo (5).

El sistema utiliza un transportador mecánico (elevador de cangilones) para subir el producto de salida desde el molino hasta un separador dinámico (3). Este tipo de transporte es muy económico, ya que requiere un consumo mínimo de energía.

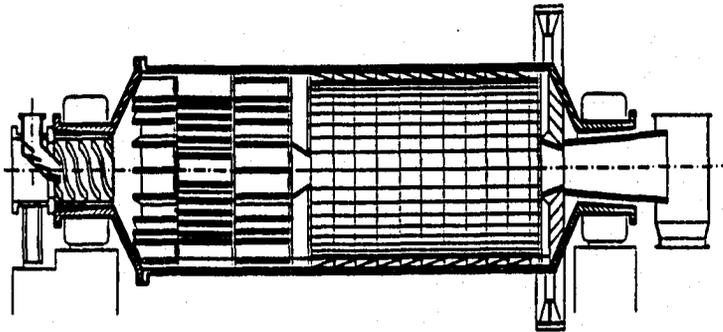
En la figura 2.4 se ilustra un sistema de molienda con molino de descarga final.

La materia prima con bajo contenido de humedad se seca dentro de la cámara de molienda, el material con contenido de humedad de 1 a 1.5 % se seca sin gas caliente y para contenidos de humedad hasta 5 % se usa gas caliente.

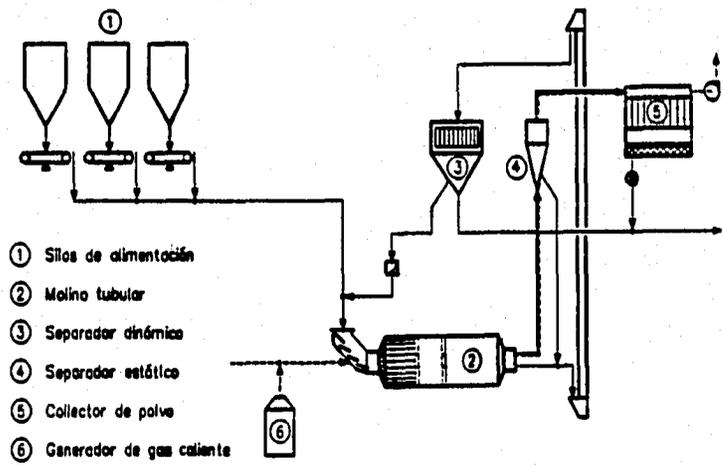
Un factor importante es evitar que un material demasiado húmedo, obstruya el diafragma intermedio. La instalación de un sistema con este tipo de molino es convencional, simple y fácilmente controlable.

El sistema de molienda de crudo con descarga final presenta las siguientes características:

- a).- Baja capacidad de secado (limitada por la velocidad del gas dentro del molino, menor a 2 m/s por encima de la carga de bolas).
- b).- Con o sin compartimiento de secado.
- c).- Con una o dos cámaras de molienda (dependiendo de la dureza del material y la consiguiente adaptación al tamaño de las bolas).
- d).- Molino simple y convencional.



MOLIENDA DE CRUDO CON MOLINO TUBULAR CON DESCARGA FINAL



- ① Silos de alimentación
- ② Molino tubular
- ③ Separador dinámico
- ④ Separador estático
- ⑤ Colector de polvo
- ⑥ Generador de gas caliente

Fig.- 2.4 Molienda de crudo con molino de descarga final

#### 2.4.2.- Molino de crudo con descarga central.

En este tipo de molino la materia prima húmeda (1) entra junto con la corriente de gases calientes a la cámara de secado a través del muñón de apoyo del molino. En esta cámara se cuenta con placas levantadoras las cuales ponen el material de alimentación en contacto con los gases calientes, lográndose con ello un secado intensivo.

De la cámara de secado, el material pasa a la cámara de molienda gruesa a través de un diafragma abierto equipado con cucharones elevadores. De la cámara de molienda gruesa, sale el material molido a través de la descarga central y por medio de un elevador de cangilones es transportado a un separador dinámico (3), donde se clasifica el material y los finos son enviados a silos de almacenamiento, los residuos gruesos se envían al segundo compartimiento de molienda para su molienda fina.

Sin embargo una parte de los residuos, aproximadamente el 30 % , son enviados a la entrada del material que entra al molino, esto se hace para mejorar su flujo a lo largo de la cámara de secado.

Los gases para el secado generalmente proceden del horno rotatorio o de una estufa auxiliar (6), una vez que pasan por la cámara de secado y el primer compartimiento de molienda abandonan el molino por la descarga central pasando por un separador estático (4) en el cual los residuos son alimentados al separador dinámico por medio del elevador de cangilones. El despolvamiento final de los gases se realiza en un colector de polvo o un filtro electrostático (5) del molino/horno.

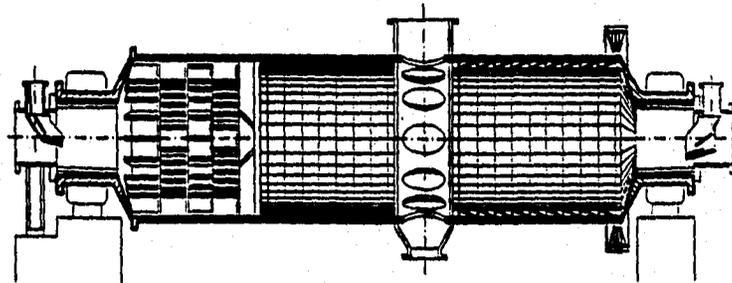
La entrada de aire falso normalmente se encuentra arriba del 30 % en el molino y en el ventilador.

Este molino se utiliza para moler materiales duros o cuyos componentes tienen grados muy distintos de moliabilidad, su ventaja es que cuando las partículas son suficientemente molidas en la primera cámara son seleccionadas por el separador dinámico y solo las más duras pasan a la segunda cámara. La figura 2.5 ilustra un sistema de molienda de crudo con molino de descarga central.

El consumo específico de energía es más elevado en comparación a otros sistemas con molino tubular debido al uso que se le da a este molino. La experiencia ha demostrado que este sistema resulta difícil de operar debido a su complejidad, a pesar de lo anterior el molino con descarga central de la firma Polysius se ha aplicado en alrededor de 400 unidades con capacidades de hasta 350 t/h.

El molino con descarga central presenta las siguientes características:

- a).- Capacidad media de secado, hasta el 15 % de humedad empleando una fuente de calor adicional o los gases de salida del horno.
- b).- Apto para materiales de gran dureza y para materiales con componentes duros y blandos.
- c).- Sensible a la entrada de aire falso (juntas alrededor de la estructura del molino).
- d).- Proceso complejo (difícil distribución de gases y de gruesos al separador).



MOLIENDA DE CRUDO CON MOLINO TUBULAR CON DESCARGA CENTRAL

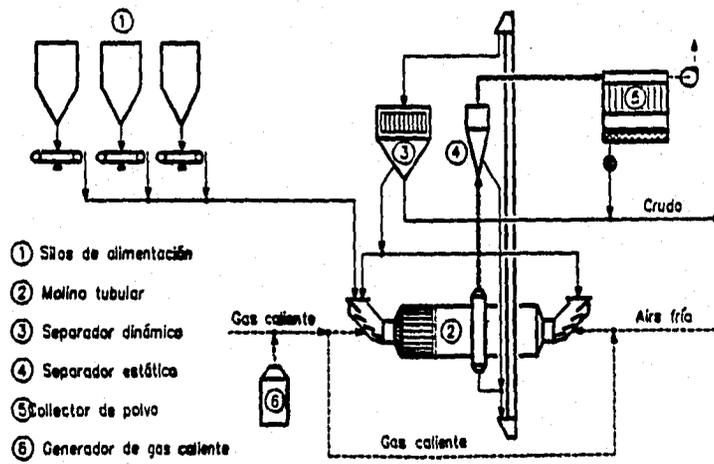


Fig.- 2.5 Molienda de crudo con molino de descarga central

### 2.4.3.- Molino de crudo corriente con barrido de aire.

En este sistema el secado, la molienda y el transporte están directamente relacionados. El secado se realiza en un compartimiento incorporado y la molienda en un compartimiento anexo individual de molienda.

La cámara de molienda esta provista de placas de revestimiento, ya que los materiales deben molerse en ella desde el tamaño inicial hasta la finura final. A menudo se usan revestimientos elevadores o combinados en los primeros metros de la cámara y revestimientos clasificadores o combinados en la parte restante.

Los gases de secado descargan los materiales molidos de la cámara de molienda y los transportan a través del separador estático o dinámico (3) hasta una instalación colectora de polvo compuesta por un ciclón y un colector de polvo (5). Los rechazos del separador son retornados a la entrada del molino.

Parte de los gases de evacuación del molino se recirculan desde la salida del ventilador hasta el punto de descarga, a fin de garantizar la suficiente velocidad del gas para el transporte del material, otra parte de los gases circula hasta la entrada del molino para mantener la adecuada velocidad del gas y condiciones constantes dentro del molino.

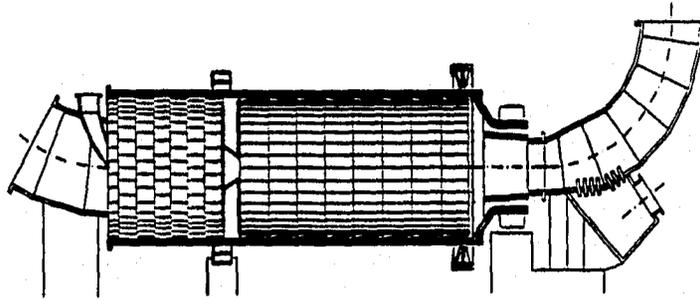
Un exceso de aire falso presenta problemas de capacidad en la ventilación y dificulta un adecuado control. Para este sistema es habitual una entrada de aire falso menor al 25 % en el molino y en el ventilador.

La relación tan estrecha que existe entre el secado del material y el transporte por gas caliente dificulta el ajuste correcto y la optimización del sistema.

El transporte neumático eleva el consumo específico de energía en el área de transporte. Este sistema de molienda presenta las siguientes características:

- a).- Capacidad de secado media (limitada por la velocidad máxima del gas dentro del molino menor a 6 m/s).
- b).- Dureza del material de baja a media (cámara individual de molienda).
- c).- Reducido tamaño de la alimentación (menor a 30 mm).
- d).- Dificultad en el ajuste de la distribución de la carga de boia.
- e).- El índice elevado del caudal de gas origina grandes cargas circulantes en el sistema.

La figura 2.6 ilustra un sistema de molienda de crudo con molino corriente con barrido de aire.



MOLINO DE CRUDO CORRIENTE CON BARRIDO DE AIRE

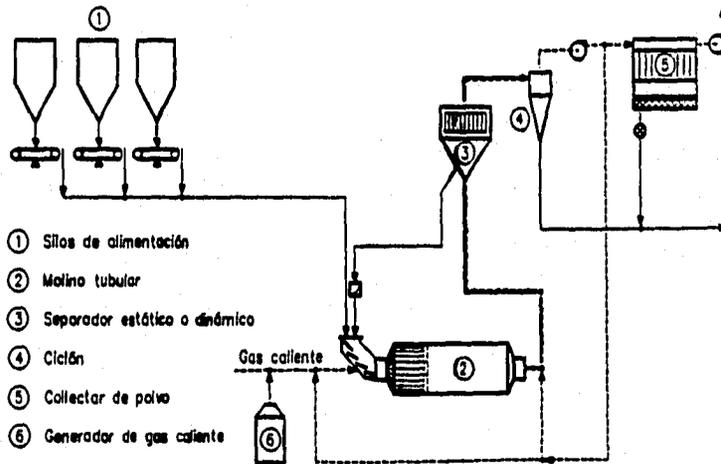


Fig.- 2.6 Molino de crudo comente con barrido de aire

#### 2.4.4.- Molino vertical de rodillos.

El molino vertical de rodillos representa el equipo adecuado para moler y secar materiales húmedos. La molienda, secado, separación y transporte pueden realizarse eficazmente en una sola máquina.

Los molinos verticales cumplen con cuatro funciones dentro de un solo elemento compacto.

- a).- Molienda
- b).- Secado
- c).- Separación
- d).- Transporte del material

Al molino de rodillos se alimenta el material a través de un dispositivo de clasificación y una resbaladilla de alimentación, de modo que llegue al centro del plato de molienda. Debido a la rotación del plato, el material alimentado va a parar debajo de los rodillos de molienda para su fragmentación.

El material comprimido por los rodillos es desplazado, debido a la fuerza centrífuga, más allá del borde de el plato de molienda. La corriente de gas que entra al molino recoge el material y lo transporta en su totalidad o en parte hacia el separador dinámico o estático colocado encima del compartimiento de molienda. Una parte del material es alimentado a través de un elevador de cangilones (4) a la resbaladilla de alimentación.

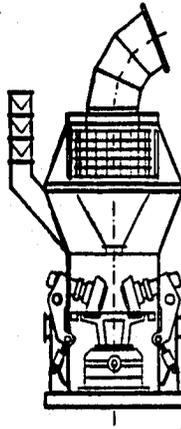
El separador clasifica el material arrastrado por la corriente de gas y los finos son precipitados en un colector de polvo (3). Los gruesos rechazados por el separador regresan al centro del plato para volver a molerse.

El sistema de molino de rodillos opera con elevadas presiones negativas de gas por lo que se debe tener un sellado adecuado a fin de evitar un exceso de aire falso, en este sistema es del orden de 20 % o mayor.

La figura 2.7 ilustra un sistema de molienda de crudo con molino vertical de rodillos.

La molienda de crudo con molino de rodillos presenta las siguientes características:

- a).- Alta capacidad de secado, hasta un 20 % con generador de gases calientes (5).
- b).- La temperatura máxima permitida a la entrada del molino es de 450 °C.
- c).- Proceso de molienda eficiente en máquina compacta.
- d).- Requiere personal de mantenimiento especializado.
- e).- Funcionamiento con carga parcial al 70 - 100 %
- f).- Permite alimentación de material grueso, menor a 100 mm.
- g).- Capacidades altas de producción, hasta 550 t/h.



MOLIENDA DE CRUDO CON MOLINO VERTICAL DE RODILLOS

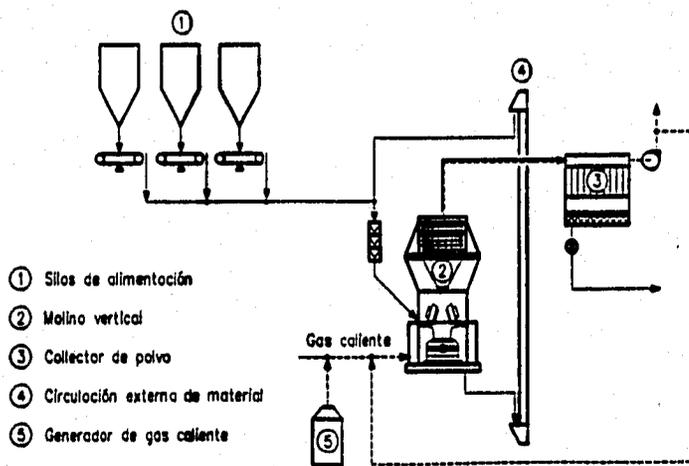


Fig.- 2.7 Molienda de crudo con molino vertical de rodillos

### 3.- SISTEMAS DE MOLIENDA DE CEMENTO

Durante el proceso de producción del cemento, la molienda de clinker requiere el mayor consumo de energía eléctrica. Este consumo de energía depende directamente de la finura del producto terminado.

La selección de un sistema de molienda depende básicamente de la calidad del cemento requerido y del respectivo consumo de energía eléctrica. Varios sistemas de molienda de cemento han sido desarrollados a fin de cumplir con los requerimientos arriba mencionados, entre ellos:

- a).- Molinos compuestos
- b).- Molino de elevador de cangilones
- c).- Molino de descarga central
- d).- Sistemas de molienda en dos etapas

#### 3.1.- Desarrollo de los sistemas de molienda.

Ya en el siglo XIX, el clinker de hornos verticales o rotatorios era molido en molinos tubulares de un compartimiento (fig. 3.1). Se observó que en estos molinos la reducción de tamaño de las partículas se realizaba principalmente en el 20 a 30 % de la longitud total, mientras que la subsiguiente reducción de partículas en el resto del molino era sólo marginal, por lo cual se desarrolló un sistema de molienda en dos etapas con el fin de combinar la premolienda y la molienda en dos molinos separados.

El molino de premolienda con frecuencia estaba equipado con un tamiz en circuito cerrado con el molino. El producto premolido era alimentado directamente al molino de finos o almacenado en silos intermedios.

Para evitar usar dos transmisiones para los molinos separados, tal y como es necesario en la molienda de dos etapas, se desarrolló el llamado molino compuesto, o sea, la molienda de gruesos y de finos se combinó en compartimientos individuales de un mismo molino. A fin de satisfacer las exigencias de finura del producto fueron equipados con tres y hasta cuatro compartimientos individuales de molienda.

El molino compuesto, también llamado molino de circuito abierto fue y es aplicado con éxito para la producción de cemento portland normal, con una finura de 2800 - 3500  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

El desarrollo posterior de separadores de aire permitió aumentar la finura de la molienda, el material parcialmente molido es retirado del molino y clasificado en el separador. La porción de gruesos (rechazo) es realimentada a la entrada del molino para ser molida otra vez. Con la introducción de los molinos en circuito cerrado a sido posible alcanzar finuras de hasta 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

Los molinos de circuito cerrado usados en la actualidad consisten generalmente de dos compartimientos de molienda y pueden ser de descarga final o con descarga central.

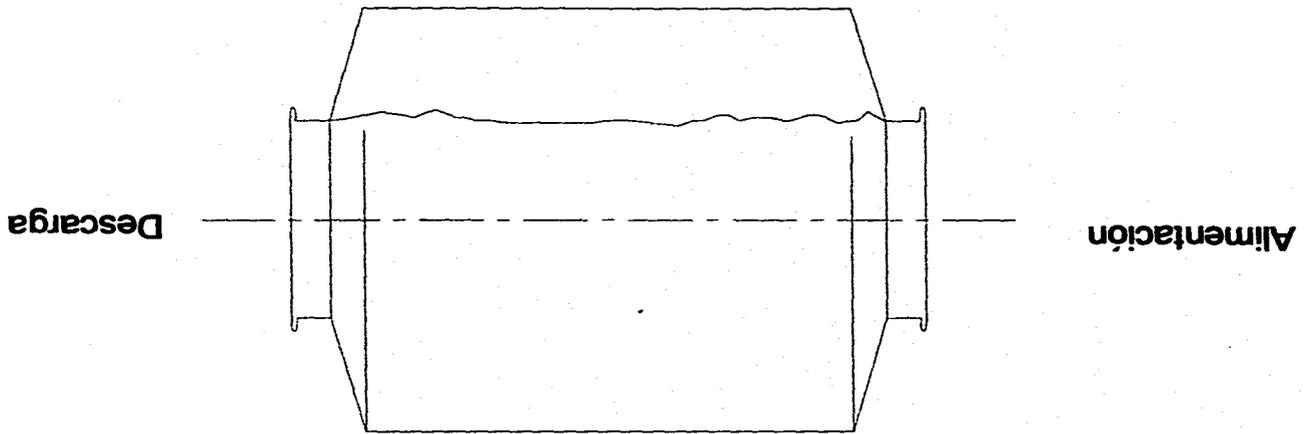
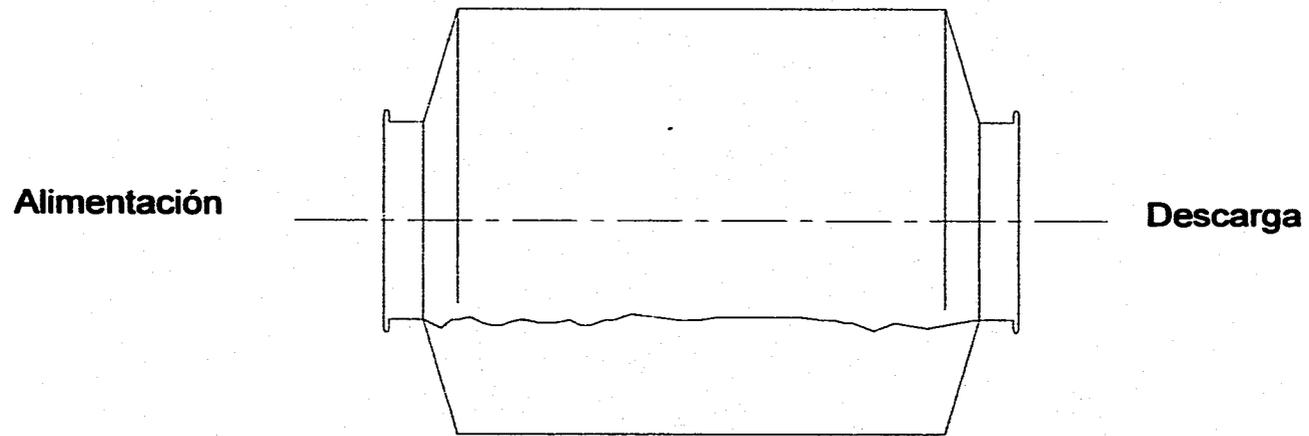


Fig. 3.1 Molino tubular de un compartimento.



**Fig. 3.1 Molino tubular de un compartimiento.**

### 3.2.- Molino de circuito abierto (Molino compuesto).

El molino de circuito abierto esta formado por varios compartimientos de molienda separados por diafragmas intermedios. El material alimentado es premolido en el primer compartimiento y se termina de moler en los compartimientos siguientes hasta lograr la finura requerida por el producto final. El calor generado dentro del molino es retirado por aire, la corriente del flujo de aire es limitada por la velocidad máxima dentro del molino, o sea, las partículas gruesas no deben ser extraídas del molino por la corriente de gas. Con el fin de evitar un exceso de calor se inyecta aire dentro del primero y/o segundo compartimento.

Algunos molinos viejos fueron equipados con tres o cuatro compartimientos de molienda, en cambio los molinos modernos tienen solo dos compartimientos y el segundo de ellos está equipado con blindaje clasificador y anillos de retención.

Los molinos modernos en circuito abierto funcionan satisfactoriamente en varias plantas, alcanzando tasas de producción de hasta 150 t/h. Los molinos de dimensiones grandes poseen a veces motores de anillo, lo que permite un ajuste óptimo de la velocidad del molino.

Los molinos de circuito abierto (molino compuesto) presentan las siguientes ventajas y desventajas:

#### a).- Ventajas

- Costo de inversión y requerimiento de espacio reducido.
- Sistema sin complicaciones para moler cemento con una finura de 2100 - 3500  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

#### b).- Desventajas

- Tendencia a la formación de adherencias y aglomeraciones.
- Presencia de partículas gruesas en el producto final.
- Consumo específico de energía muy elevado para finuras mayores de 3500  $\text{cm}^2/\text{g}$ .
- Temperatura del cemento elevada debido al limitado flujo de aire dentro del molino.
- Más sensible a variaciones de molidabilidad del material.
- Sólo es posible la molienda a una finura de producto determinada.

La figura 3.2 ilustra un sistema de molienda de cemento con molino en circuito abierto (molino compuesto).

- 1 Silos de alimentación
- 2 Molino tubular
- 3 Colector de polvo

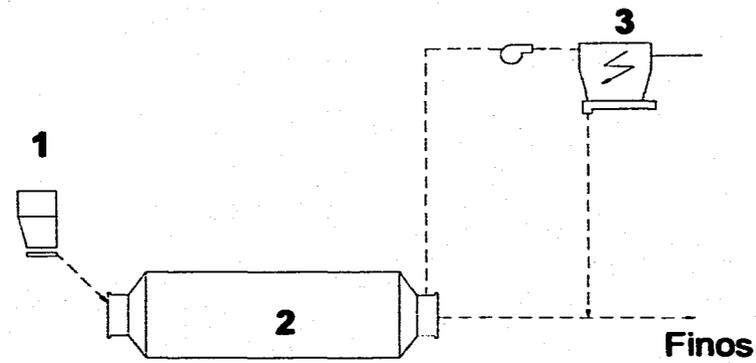


Fig. 3.2 Molino de circuito abierto (Molino compuesto)

### 3.3.- Molino con elevador de cangilones.

El molino con elevador de cangilones generalmente esta equipado con dos compartimientos de molienda. El segundo compartimiento, en los molinos modernos esta provisto de blindaje clasificador.

El material que sale del molino es alimentado al elevador de cangilones y dirigido a un separador dinámico, el cual clasifica el material y los finos los envia a los silos de producto terminado y el material rechazado es reallimentado al molino para volver a molerse hasta alcanzar la finura deseada.

El aire de ventilación que circula dentro del molino es dirigido a un separador estático, en el cual las partículas grandes son precipitadas desde la corriente de aire para ser alimentadas al circuito del separador dinámico. El separador de gruesos (estático) está ajustado para que las partículas finas que lleva el aire tengan ya la finura requerida por el producto. Finalmente la corriente de aire es desempoivada por medio de un filtro de bolsas o con un precipitador electrostático.

El calor generado dentro del molino puede ser reducido ya sea inyectando agua dentro del molino o por enfriamiento del producto final utilizando enfriadores de cemento. Cuando se muele a una finura superior a los 3500  $\text{cm}^2/\text{g}$ , se usan aditivos de molienda líquidos con el fin de evitar la formación de adherencias.

En la actualidad los molinos con elevador de cangilones son construidos con capacidades de hasta 200 - 250 t/h. La figura 3.3 ilustra un sistema de molienda de cemento con elevador de cangilones.

Este sistema de molienda de cemento presenta las siguientes ventajas y desventajas:

#### a).- Ventajas

- Formación reducida de adherencias debido al grado mediano de molienda y al tiempo de retención reducido.
- Presencia de gruesos baja en el producto final.
- Consumo de energía razonable, también para superficies específicas altas.
- Molienda a temperaturas medias, lo que evita el riesgo de falso fraguado.
- Adaptación rápida a condiciones de operación variables.
- Posibilidades para un mejor control.
- Posibilidad de producir cemento con finuras de hasta 6000  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

#### b).- Desventajas

- Costo de inversión alto y requerimiento de espacio elevado.
- Sistema complejo.

- 1 Silos de alimentación
- 2 Molino tubular
- 3 Separador dinámico
- 4 Separador estático
- 5 Colector de polvo

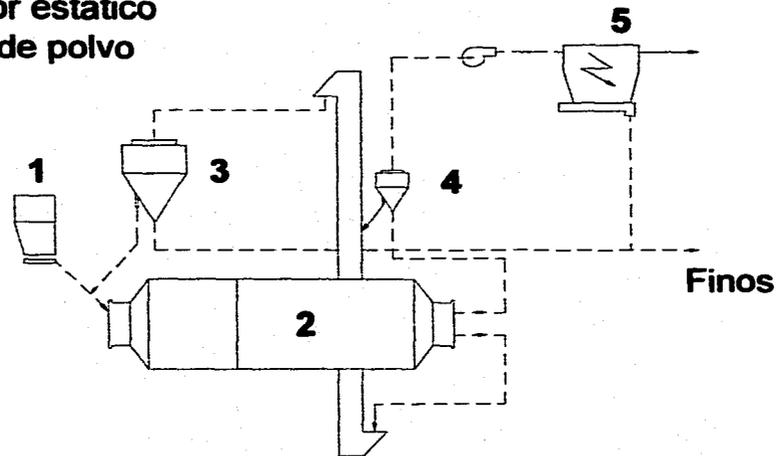


Fig. 3.3 Molino de elevador de cangilones.

### 3.4.- Molino con descarga central.

El molino con descarga central se caracteriza por la descarga del material, la cual se efectúa en el centro del tubo del molino.

El material de alimentación entra al compartimiento de molienda de gruesos, después de la premolienda el material es descargado del molino por medio de un elevador de cangilones y dirigido a un separador dinámico. Las partículas gruesas son alimentadas al compartimiento de molienda de finos para ser molidas nuevamente. La carga de bola de cada compartimiento puede ser ajustada a las respectivas etapas de la molienda. Dependiendo del tamaño del material de alimentación, la molienda de gruesos puede ser realizada en uno o en dos compartimientos.

El aire de ventilación es introducido al centro de descarga del molino y previamente desempolvado en un separador de gruesos. El desempolvamiento final se lleva a cabo en un filtro de bolsas o en un precipitador electrostático.

El molino con descarga central se usa en casos especiales de molienda problemática, como puede ser la molienda-secado de cemento de escoria o, para materiales muy abrasivos. El secado se puede efectuar en forma simultánea a la molienda, ya que el yeso que debe ser molido con el clinker puede ser introducido en el compartimiento de molienda de finos.

La figura 3.4 ilustra un sistema de molienda con molino de descarga central.

El sistema de molienda de cemento utilizando un molino de descarga central presenta las siguientes ventajas y desventajas:

#### a).- Ventajas

- No se producen partículas excesivas gracias a la separación intermedia del material.
- Distribución granulométrica del material angosta.
- Posibilidad de secar aditivos dentro del molino.
- Baja temperatura del producto final (cemento).

#### b).- Desventajas

- Costos de inversión más elevados que para el molino de elevador de cangilones.

- 1 Silos de alimentación
- 2 Molino tubular
- 3 Separador dinámico
- 4 Separador estático
- 5 Colector de polvo

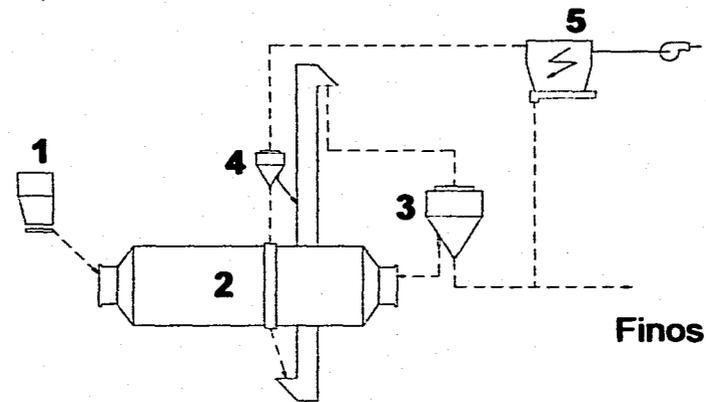


Fig. 3.4 Molino con descarga central

### 3.5.- Molienda en dos etapas.

Los sistemas de molienda en dos etapas han sido desarrollados, por un lado, para aumentar la capacidad de los molinos existentes y, por otra, para mejorar la eficiencia de la molienda por medio de la división del proceso en dos molinos individuales, uno para la molienda de gruesos y otro para la molienda de finos.

El molino de premolienda (molienda de gruesos) consiste en la mayoría de los casos, de un molino muy corto con un solo compartimiento, en circuito cerrado con un tamiz de separación. El material premolido (60 - 70 % R 90  $\mu\text{m}$ ) es almacenado en silos intermedios y después alimentado a un molino largo. Dependiendo de la finura de producto requerida, el segundo molino cuenta con uno o dos compartimientos, en circuito cerrado con un separador.

Alrededor de 30 % del total de la energía es utilizada por el molino de premolienda. El 70 % restante de esta energía se requiere para la molienda posterior (5 - 10 % R 90  $\mu\text{m}$ ). Los sistemas de molienda en dos etapas pueden estar formados por dos o tres molinos de acabado y pueden ser operados independientemente o en forma conjunta sin almacenaje intermedio.

La aplicación de un sistema de molienda en dos etapas para molinos nuevos resulta menos practicable que el uso del molino de elevador de cangilones común, cuyo sistema es menos complejo y más ampliamente usado.

La figura 3.5 ilustra un sistema de molienda en dos etapas.

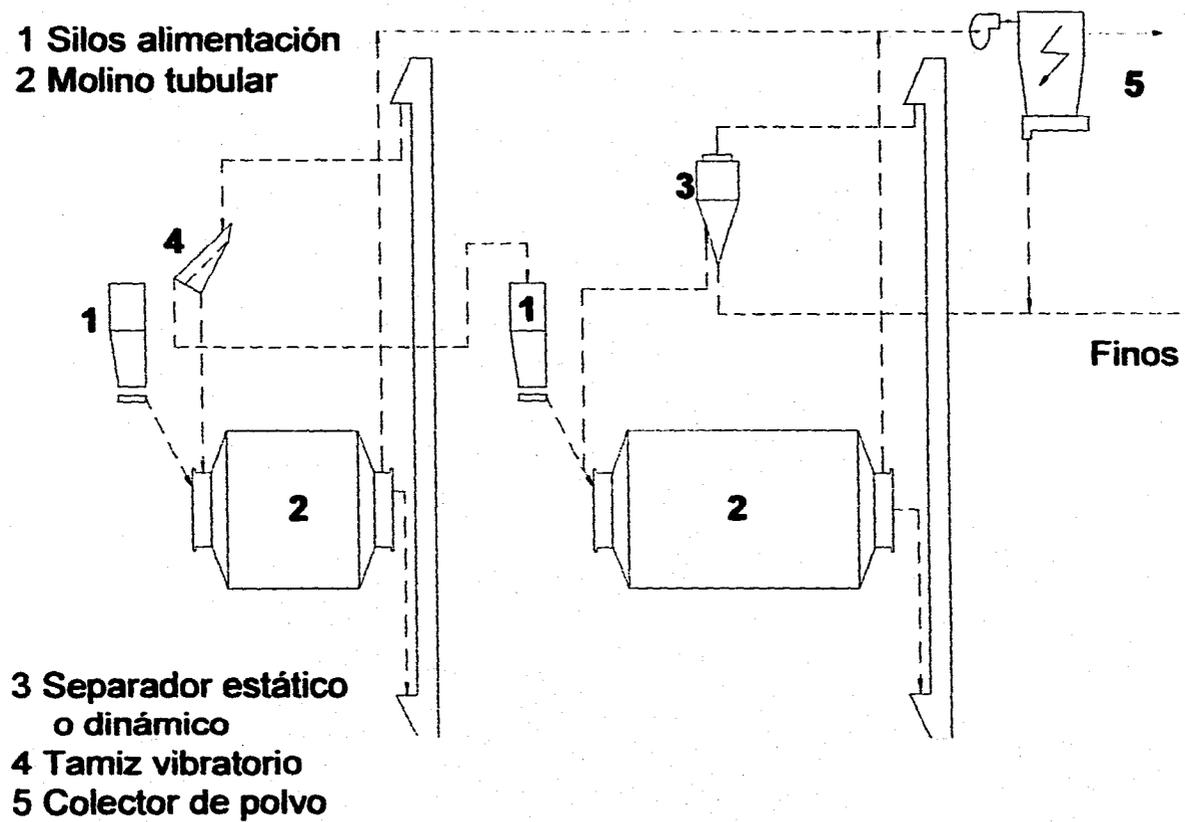


Fig. 3.5 Sistema de molienda en dos etapas.

#### 4.- DIMENSIONAMIENTO DE MOLINOS TUBULARES.

Los molinos tubulares son los tipos más comunmente usados en la industria del cemento. Estos son cilindros de acero rotatorios donde la reducción de tamaño del material se realiza mediante el movimiento de cuerpos molidores. La rotación del cilindro del molino eleva los medios de molienda a una altura óptima necesaria para la molienda, y esta se realiza debido al impacto y a la fricción entre los medios de molienda, los cuales chocan entre sí, así como también entre los medios de molienda y el revestimiento del molino. La figura 4.1 muestra la representación esquemática del patrón de movimiento en un molino tubular.

En la molienda de la materia prima, de carbón y de clínker, los cuerpos molidores son bolas de acero de diversos tamaños distribuidos a lo largo del molino. El cilindro mismo del molino está dividido por diafragmas en dos o tres compartimientos.

El molino tubular es el tipo de molino más apropiado para la molienda de cemento sea en circuito abierto o cerrado y para la molienda de materia prima en proceso de vía húmeda, también se usa para la molienda de materia prima en proceso seco y en la molienda de carbón.

El molino tubular es de construcción simple y comprobada, su manejo correcto no presenta dificultades. El mantenimiento de un molino tubular requiere menos tiempo muerto y menos mano de obra que cualquier otro tipo de molino.

El diseño de molinos tubulares es todavía un asunto de experiencia, no existe teoría analítica completa disponible que permita diseñar en forma óptima un molino tubular. Existen muchas variables, tales como longitud y diámetro del molino, velocidad, peso de la carga de bola, etc., así como las características específicas del material, que influyen en la producción del molino y en la finura del producto final.

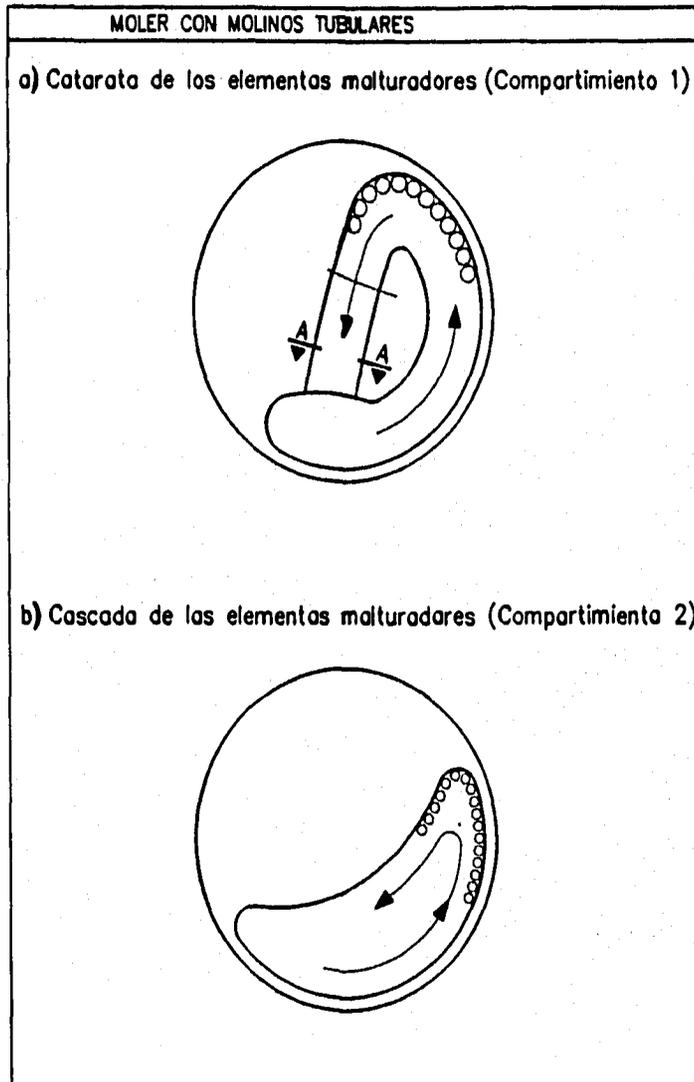
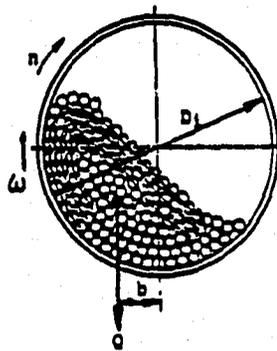


Fig. 4.1.- Movimiento de los cuerpos matoradores en un molino tubular.

#### 4.1.- Fuerza Motriz para Molinos tubulares.

La fuerza motriz total para un molino tubular es igual a la suma de la potencia neta necesaria para mantener el centro de gravedad de la carga en una posición de equilibrio cinético e incluye las pérdidas de potencia por fricción y por transmisión.



Donde:

$b$  = Distancia del centro de gravedad de la carga en un plano vertical a través del eje de rotación (m)

$D_i$  = Diámetro interior de las placas de blindaje (m)

$Q$  = Peso de la carga de bolas (N)

$n$  = Velocidad del molino (1/min)

$\omega$  = Velocidad angular (1/s)

Partiendo de la figura anterior la distancia "b" puede ser expresada como una función del diámetro del molino "Di", considerando las siguientes suposiciones:

a).- La distancia "b" tiene siempre la misma relación con el diámetro para molinos con el mismo grado de llenado pero con diferentes diámetros.

b).- La distancia "b" no depende de la velocidad del molino cuando esta oscila dentro de límites comunes.

En consecuencia puede derivarse la fórmula siguiente:  $b = x \cdot Di$   
donde "x" esta en función del grado de llenado y del tamaño de las bolas.

El torque "M" puede expresarse como:  $M = b \cdot Q$  o  $M = x \cdot Di \cdot Q$  (Nm).

La fuerza motriz "N" en función de la velocidad angular " $\omega$ " y del torque "M".

$N = M \cdot \omega$                       donde  $\omega = \pi \cdot n / 30$   
por lo tanto  $N = x \cdot Di \cdot Q \cdot \pi \cdot n / 30$  (KW)

Para calculos prácticos la fórmula puede resumirse de la siguiente manera:

$N = C \cdot Q \cdot Di \cdot n$  (KW)

Donde:

N = Fuerza motriz (KW)

Q = Carga de bola (t)

Di = Diámetro interno de las placas de blindaje (m)

n = Velocidad del molino (m)

C = Factor de consumo de energía (-);  $C = x \cdot \pi / 30$

La fórmula anterior determina el cálculo de la fuerza motriz total para un molino tubular considerando las pérdidas por fricción en cojinetes y pérdidas por transmisión con una exactitud de 5 - 10 %.

En molinos equipados con varios compartimentos, la fuerza motriz total se puede calcular sumando la fuerza motriz necesaria para cada compartimento. El factor de consumo de energía "C" depende del grado de llenado y del tamaño de las bolas, el valor de "x" y en consecuencia el valor de "C" no se pueden calcular teóricamente. Sin embargo por mediciones de fuerza motriz total de molinos en servicio y considerando los valores de Q, Di, y n, se puede calcular el factor de consumo de energía "C" en base a la tabla siguiente (fig. 4.2).

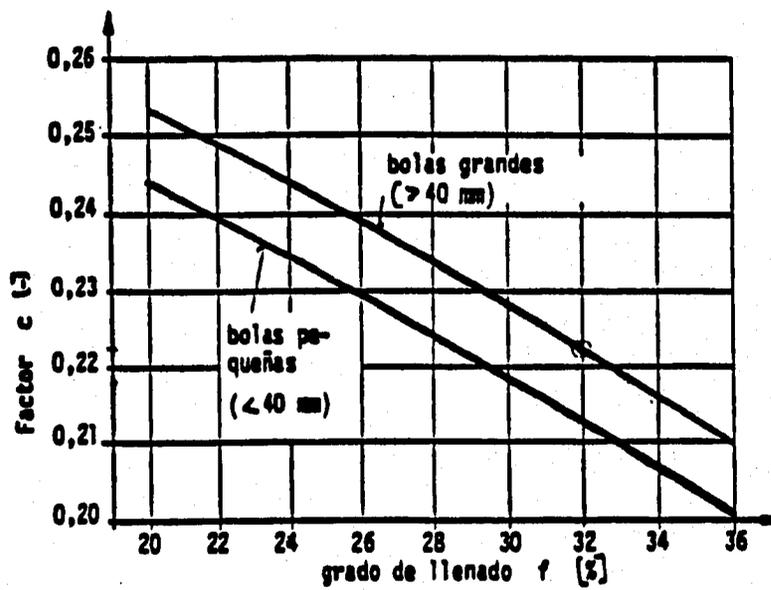


Fig. 4.2.- Tabla para calcular el factor "C" según el grado de llenado y el tamaño de las bolas.

#### 4.2.- Peso de la carga de bolas.

El peso de la carga de bolas puede calcularse con la siguiente fórmula:

$$Q = \pi/4 \cdot D_i^2 \cdot L_i \cdot \gamma \cdot \rho$$

Donde:

$L_i$  = Longitud interior del molino o del compartimento (m)

$\rho$  = Grado de llenado (%)

$\gamma \cdot \rho$  = Peso específico de la carga de bola ( $t/m^3$ )

$Q$  = Carga de bola (t).

En la tabla de la figura 4.3 se muestran los valores de peso específico de las bolas para molinos tubulares.

	Tamaño de bolas	Peso específico
Bolas de acero	100 - 60 mm	4.4 $t/m^3$
Bolas de acero	50 - 30 mm	4.6 $t/m^3$
Bolas de acero	30 - 20 mm	4.8 $t/m^3$
Cylpebs	30 - 20 mm	4.8 $t/m^3$

Fig. 4.3 Peso específico de la masa de la carga de bola.

Otra forma de obtener el peso de la carga de bola es multiplicando el volumen útil del molino por el correspondiente grado de llenado de las bolas en el apilamiento; con ello se obtiene el volumen del montón que ocupan las bolas.

$$V_m = \rho \cdot V \quad V = \pi D^2 / 4 \cdot L$$

Donde:

$L$  = Longitud del molino o del compartimento (m)

$D$  = Diámetro interior del molino o del compartimento (m)

$V_m$  = Volumen del montón de bola ( $m^3$ )

$\rho$  = Grado de llenado

$$\text{Por lo tanto: } V_m = \rho \cdot \pi D^2 / 4 \cdot L$$

Multiplicando por el peso específico de las bolas, se obtiene el peso de la carga de cuerpos moleadores

$$G = g_m \cdot V_m \quad \text{sustituyendo el valor de } V_m \text{ tenemos:}$$

$$G = g_m \cdot \rho \cdot \pi D^2 / 4 \cdot L \quad (t)$$

Donde:  $G$  = Carga de cuerpos moleadores (t)

$g_m$  = Peso específico del montón de bolas ( $t/m^3$ )

#### 4.3.- Grado de llenado.

El grado de llenado "°f" esta definido como el volumen "Vq" de la carga de bolas expresado como un porcentaje del volumen total del molino "Vm".

$$°f = Vq / Vm \quad (\%)$$

Donde:

°f = Grado de llenado (%)

Vq = Volumen de la carga de bola (m<sup>3</sup>)

Vm = Volumen total del molino (m<sup>3</sup>)

La figura 4.4 muestra una tabla donde se especifican los valores que se han adoptado para el grado de llenado de los molinos tubulares.

Tipo de Molino	Grado de llenado		
	Cámara I	Cámara II	Cámara III
Molino de una cámara	27 - 33 %	-----	-----
Molino de dos cámaras	27 - 33 %	25 - 30 %	-----
Molino de tres cámaras	26 - 32 %	26 - 30 %	23 - 27 %
Molino barrido por aire	26 - 30 %	-----	-----

Fig. 4.4 Grado de llenado para diferentes tipos de molinos tubulares.

El grado de llenado de un molino tubular se puede determinar prácticamente midiendo la altura libre "h" sobre la carga de bolas, según se indica en la figura 4.5, aunque también se puede calcular usando la siguiente fórmula:

$$°f = (0.9153 \cdot h / D) / 0.0085.$$

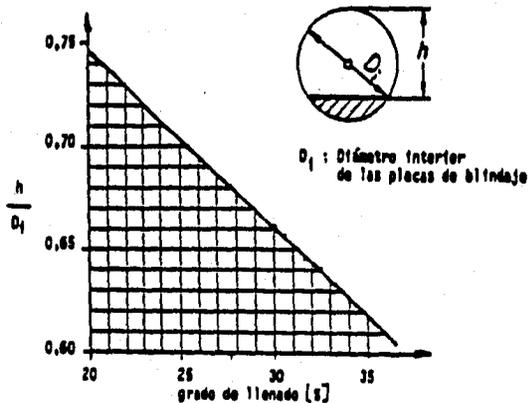


Fig. 4.5 Grado de llenado "°f" en función de la altura libre (h) sobre la carga de bola.

Ejemplo de cálculo de grado de llenado empleando la fórmula anterior, para lo cual es necesario contar con los datos siguientes:

**CAMARA I**

$$L = 4.25 \text{ m}$$

$$D = 4.60 \text{ m}$$

$$h = 3.05 \text{ m}$$

**CAMARA II**

$$L = 8.75 \text{ m}$$

$$D = 4.60 \text{ m}$$

$$h = 3.10 \text{ m}$$

La longitud y el diámetro se pueden tomar de los planos del molino o medirlos físicamente, la altura "h" se debe medir dentro del molino cuando la carga de boia se encuentre en posición horizontal.

Como primer paso del cálculo determinamos el área de cada cámara o compartimiento de molienda.

**Area de cámara I**

$$A = \pi D^2 / 4$$

$$A = 3.1416 (4.6)^2 / 4 = 16.6 \text{ m}^2$$

**Area de cámara II**

$$A = \pi D^2 / 4$$

$$A = 3.1416 (4.6)^2 / 4 = 16.6 \text{ m}^2$$

Aplicando la fórmula de grado de llenado para cada una de las cámaras tenemos:

**Grado de llenado cámara I:**

$$°f = (0.9153 - h / D) / 0.0085$$

$$°f = (0.9153 - 3.05 / 4.6) / 0.0085$$

$$°f = 29.6 \%$$

**Grado de llenado cámara II:**

$$°f = (0.9153 - h / D) / 0.0085$$

$$°f = (0.9153 - 3.10 / 4.6) / 0.0085$$

$$°f = 28.4 \%$$

Si calculamos la relación h / D y con el valor que resulte entramos a la gráfica de la figura 4.5 obtenemos los siguientes resultados:

**Cámara I**

$$h / D = 3.05 / 4.6 = 0.66$$

$$°f = 30 \%$$

**Cámara II**

$$h / D = 3.10 / 4.6 = 0.67$$

$$°f = 29 \%$$

Los valores obtenidos con los dos métodos son bastante semejantes por lo que en la práctica es indistinto usar cualquiera de los dos.

#### 4.4.- Longitud de los compartimientos.

Con respecto a la longitud de los compartimientos de molienda, los valores guía dados en la tabla de la figura 4.6 pueden aplicarse a molinos tubulares usados en proceso de molienda seco y húmedo.

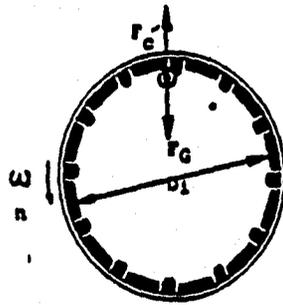
Algunos fabricantes, para molinos de tres cámaras consideran aproximadamente el 30 % de la longitud total del molino para el primer compartimiento y solamente 20 % de la longitud total para el segundo compartimiento.

TIPO DE MOLINO	% DE LONGITUD TOTAL		
	CAMARA I	CAMARA II	CAMARA III
Molino de dos cámaras	30 -- 35	70 -- 65	-----
Molino de tres cámaras	20	30	50
Descarga central	50	50	

Fig. 4.6 Longitud de los compartimientos para diferentes tipos de molinos.

#### 4.5.- Velocidad del molino.

La velocidad de operación de un molino puede ser expresada en porcentajes de la velocidad crítica del mismo. La velocidad crítica se obtiene cuando la fuerza centrífuga  $F_c$  obliga a la capa exterior de las bolas a girar con las placas de blindaje del molino. Esta consideración impide la caída continua en cascada de las bolas, de lo que depende una molienda eficaz.



- $F_c$  = fuerza centrífuga [N]
- $F_g$  = fuerza de gravedad [N]
- $D_i$  = diámetro interior de las placas de blindaje [m]
- $m$  = masa [kg]
- $\omega$  = velocidad angular [ $s^{-1}$ ]
- $g$  = gravedad [ $m \cdot s^{-2}$ ]

La velocidad crítica se obtiene cuando la fuerza centrífuga  $F_c$  es igual a la fuerza de gravedad  $F_g$ :

$$F_g - F_c = m \cdot g - m \cdot D_i / 2 \cdot \omega^2_{crit} = 0$$

La velocidad angular crítica  $\omega_{crit}$  será entonces:

$$\omega_{crit} = \sqrt{2 \cdot g / D_i}$$

$$\omega_{crit} = \pi \cdot n_{crit} / 30$$

tenemos lo siguiente

$$\sqrt{2 \cdot g / D_i} = n_{crit} / 30$$

La velocidad crítica del molino (  $n_{crit}$  ), por lo tanto se puede calcular en función del diámetro del molino  $D_i$ ,

$$n_{crit} = 30 / \pi \cdot \sqrt{2g / D_i}$$

$$n_{crit} = 42.3 / \sqrt{D_i} \quad (1/min),$$

La velocidad de operación del molino se calcula entonces como:

$$n = k \cdot n_{crit} \quad (1/min)$$

Donde:

$$n = \text{Velocidad de operación del molino} \quad (1/min)$$

$$n_{crit} = \text{Velocidad crítica del molino} \quad (1/min)$$

$$k = \text{Relación } n / n_{crit} \quad (\%)$$

$$D_i = \text{Diámetro interno del molino} \quad (m)$$

Las velocidades normales de operación de molinos tubulares en la industria del cemento fluctúa actualmente entre 70 y 76 % de la velocidad crítica. Hace algunos años el parámetro era entre 65 y 72 %.

La velocidad óptima depende básicamente del grado de llenado, del tamaño de las bolas y del tipo de placas del blindaje.

En la tabla de la figura 4.7 se muestran valores prácticos para el porcentaje de la velocidad crítica.

GRADO DE LLENADO	TIPO DE PLACAS DE BLINDAJE DEL MOLINO	% DE VELOCIDAD CRÍTICA K
Bajo	Blindaje con elementos elevadores	70 --- 71 %
Alto	Blindaje liso	74 --- 75 %

Fig. 4.7 Porcentaje de velocidad crítica en función del grado de llenado y del tipo de blindaje.

#### 4.6.- Relación longitud a diámetro de molinos tubulares.

La relación de longitud a diámetro de los molinos tubulares depende de varios factores:

- a).- Producción por hora
- b).- Dureza del material (molturabilidad)
- c).- Finura del producto final
- d).- Molienda en circuito abierto o cerrado
- e).- Tamaño de la materia prima
- f).- Sistema de molienda

La producción por hora dependera del corte transversal y por consiguiente del diámetro del molino. La finura del material en la salida del molino depende principalmente del tiempo de retención del material en el molino, el factor más determinante para el tiempo de retención es la longitud del molino. Por lo tanto, la relación de longitud a diámetro de un molino constituye un factor importante para el diseño óptimo del mismo.

Los valores dados en la tabla de la figura 4.8 pueden tomarse como guía para la relación longitud a diámetro ( $\lambda$ ) de un molino tubular.

	SISTEMA DE MOLINOS	RELACION	OBSERVACIONES
MOLINOS DE CEMENTO	Circuito abierto	3.0 --- 6.0	$\phi$ 2.0 - 2.4 $\lambda = 6.0$ $\phi$ 2.6 - 3.0 $\lambda = 5.0$ $\phi$ 3.0 - 4.0 $\lambda = 4.0$ $\phi > 4.0$ $\lambda = 3.0 - 3.5$
	Circuito cerrado	3.0 --- 3.5	Molinos grandes $\lambda = 3.0 - 3.2$ Una relación $\lambda$ baja da una carga circulante más alta.
MOLINOS DE PASTA	Relacion similar a la de molinos de cemento. Longitud máxima 12 - 14 metros.		
MOLINOS DE CRUDO	Descarga central	2.1 --- 2.7	Los valores $\lambda$ bajos se usan para molinos de crudo grandes
	Molino de 2 cámaras	2.0 --- 2.5	
	Molino de 1 cámara	1.7 --- 2.2	
	Barrido por aire	1.5 --- 2.0	

Fig. 4.8 Relación de longitud a diámetro  $\lambda$  para diferentes sistemas de molienda.

Sin embargo, para conseguir las dimensiones óptimas de los molinos, hay que interrelacionar las cifras de longitud y diámetro con consideraciones y exigencias técnicas acerca de la molienda, de las cuales existen dos de carácter básico:

1).- Si se mantiene constante la longitud del molino, el incremento del diámetro da lugar a:

- a).- Mayor rendimiento energético
- b).- Menor espacio construido por unidad de capacidad
- c).- Menor cantidad de partículas muy finas en el producto final
- d).- Menor desgaste metálico por tonelada de producto molido

2).- Si se mantiene constante el diámetro del molino, y se alarga el tubo, esto da lugar a:

- a).- Menor costo de inversión por unidad de potencia instalada (KW)
- b).- Menor cantidad de partículas sobredimensionadas
- c).- Mayor cantidad de partículas muy finas en el producto final
- d).- Menor rendimiento energético
- e).- La posibilidad de dividir el molino en varias cámaras

## 4.7).- Cálculos prácticos

Con el fin de calcular las dimensiones principales de un molino tubular, en forma aproximada, se utilizan las siguientes fórmulas:

$$N = C \cdot Q \cdot D_i \cdot n$$

$$Q = \pi / 4 \cdot D_i^2 \cdot L_i \cdot \rho_f \cdot \gamma Q$$

$$n_{crit} = 42.3 / \sqrt{D_i}$$

$$n = k \cdot n_{crit}$$

Combinando las fórmulas anteriores, tenemos:

$$N = C \cdot \pi / 4 \cdot D_i^3 \cdot L_i \cdot \rho_f \cdot \gamma Q \cdot 42.3 / \sqrt{D_i} \cdot k$$

$$N = 33.22 (C) (L_i) (\rho_f) (\gamma Q) (k) (D_i)^{2.5}$$

Agregando la relación de longitud a diámetro en la fórmula anterior, tenemos:

$$N = 33.22 (C) (\lambda) (\rho_f) (\gamma Q) (k) (D_i)^{3.5} \quad \lambda = L_i / D_i$$

Despejando  $D_i$  podemos determinar el diámetro interno del molino:

$$D_i = (N / 33.22 C \rho_f \gamma Q k)^{0.286}$$

Donde:

$N$  = Fuerza motriz del motor del molino (KW)

$C$  = Factor del consumo de energía (-)

$Q$  = Peso de la carga de bolas (t)

$L_i$  = Longitud interna del molino (m)

$D_i$  = Diámetro interno de las placas de blindaje (m)

$k$  = Porcentaje de velocidad crítica (%)

$\rho_f$  = Grado de llenado (%)

$\gamma Q$  = Peso específico de la masa de bolas (t / m<sup>3</sup>)

$\lambda$  = Relación de longitud a diámetro (-)

A continuación se procede a la resolución de un ejemplo, haciendo ciertas consideraciones de carácter práctico para ver la utilización de las fórmulas:

Molino de cemento en circuito abierto, con una producción de 100 t/h de cemento normal con una superficie específica de 3000 cm<sup>2</sup>/g.

Se requiere determinar las siguientes características:

- a).- Fuerza motriz del motor del molino ?
- b).- Diámetro nominal del molino ?
- c).- Longitud total del molino ?
- d).- Longitud de los compartimientos ?
- e).- Carga total de bola ?
- f).- Carga de bola por compartimiento ?
- g).- Velocidad del molino ?

Para la solución del problema, haremos las siguientes suposiciones:

Grado de llenado	$\alpha f = 30 \%$
% de velocidad crítica	$k = 75 \%$
Relación longitud a diámetro	$\lambda = 3.5$
Peso específico de las bolas	$\gamma Q = 4.5 \text{ t/m}^3$

Soluciones

a).- Fuerza motriz del molino.

Tomando como referencia la curva de molidurabilidad (fig. 4.9), puede considerarse un consumo específico de energía  $\alpha$  de aproximadamente 33 Kwh/t para una superficie específica de 3000 cm<sup>2</sup>/g. La fuerza motriz requerida por el molino es:

$$N_{ms} = \alpha \cdot P = 33 \text{ Kwh/t} \times 100 \text{ t/h} \quad N = 3300 \text{ KW}$$

Si suponemos una eficiencia de transmisión total de 95 % la fuerza motriz es:

$$N = N_{ms} / \eta = 3300 / 0.95 \approx 3500 \text{ KW}$$

b).- Diámetro nominal del molino.

Este valor lo calculamos aplicando la siguiente fórmula:

$$D_i = [N / 33.22 C \lambda f \gamma Q k]^{0.286} \quad \text{El valor de "C" se obtiene de la tabla 4.2}$$

$$D_i = [3500 / 33.22 \times 0.225 \times 3.5 \times 0.3 \times 4.5 \times 0.75]^{0.286} = 4.04 \text{ m}$$

$$D_n = D_i + 2(\text{espesor de blindaje}) = 4.04 + 0.26 = 4.3 \text{ m}$$

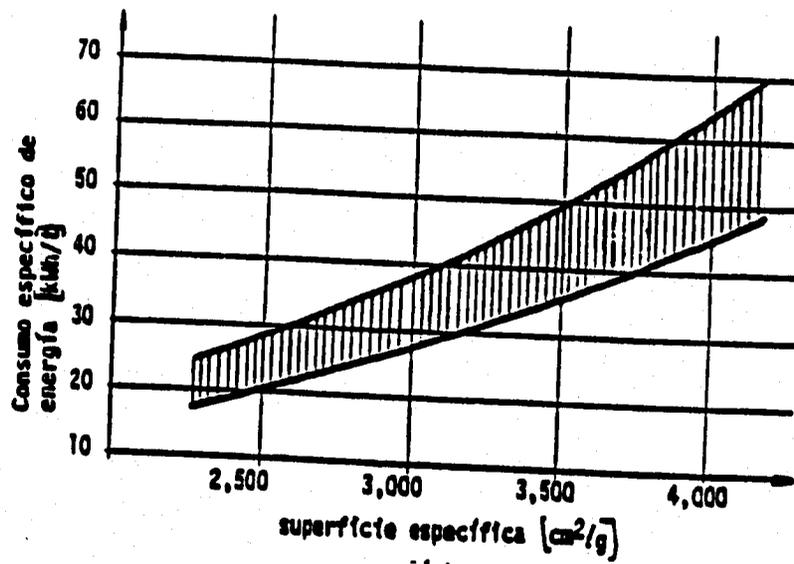


Fig.- 4.9 Molidurabilidad del clinker

c).- Longitud total del molino.

$$L_i = \lambda \cdot D_i = 3.5 \times 4.04 \text{ m} = 14.0 \text{ m}$$

d).- Longitud de los compartimientos.

De la figura 4.6 tomamos los porcentajes de longitud para un molino de cemento en circuito abierto con dos compartimientos de molienda, y tenemos que para el compartimiento 1 de 35 % y para el compartimiento 2 es de 65 %, con estos datos, tenemos:

$$L_1 = 0.35 \times 14 \text{ m} = 4.90 \text{ m}$$

$$L_2 = 0.65 \times 14 \text{ m} = 9.10$$

e).- Carga total de bola.

La carga total de bola la determinamos con la siguiente fórmula:

$$Q = \pi / 4 \cdot D_i^2 \cdot L_i \cdot \rho_f \cdot \gamma \cdot Q = 3.1416/4 \times 4.04^2 \times 14 \times 0.3 \times 4.5 = 240 \text{ ton.}$$

f).- Carga de bola por compartimiento.

$$Q_1 = L_1 / L_i \cdot Q = 4.9 / 14 \times 240 \text{ ton.} = 84 \text{ ton.}$$

$$Q_2 = L_2 / L_i \cdot Q = 9.1 / 14 \times 240 \text{ ton.} = 156 \text{ ton.}$$

g).- Velocidad del molino.

La velocidad del molino, la calculamos con la fórmula siguiente:

$$n_{crit} = 42.3 / \sqrt{D_i} = 42.3 / \sqrt{4.04} = 21.05 \text{ rpm}$$

En base a la velocidad crítica, la velocidad de operación del molino es:

$$n = K \cdot n_{crit} = 0.75 \times 21.05 \text{ rpm} = 15.8 \text{ rpm.}$$

Notas: Por razones prácticas se usaría un molino con diámetro estandarizado ya sea de 4.2 o 4.4 m. En consecuencia se deben ajustar tanto la longitud como los parámetros restantes del molino.

## 5.- ELEMENTOS DE LOS MOLINOS TUBULARES.

### 5.1.- Elementos mecánicos de molinos tubulares.

Los elementos mecánicos de un molino tubular pueden subdividirse en dos categorías:

Elementos externos

Elementos internos

Dentro de las partes externas tenemos las siguientes: Coraza del molino, cabezales del molino, cojinetes y los equipos de alimentación y descarga.

Las partes internas del molino están en relación directa con el proceso de molienda y abarcan en primer lugar las piezas de desgaste del molino, como son: Placas de blindaje, diafragmas y elementos molidores (bolas).

La tabla de la figura 5.1 muestra la división de los elementos mecánicos de un molino tubular.

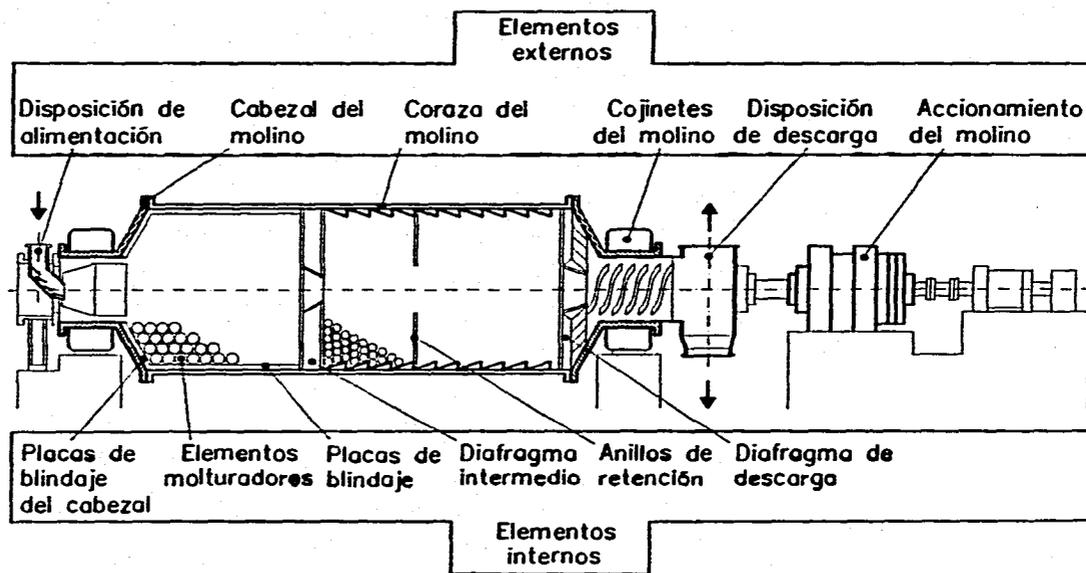
ELEMENTOS DE MOLINOS TUBULARES	
Elementos externos	Elementos internos
Disposición de la alimentación	Placas de blindaje de los cabezales
Disposición de la descarga	Placas de blindaje de la coraza
Cabezales del molino	Diafragma intermedio
Coraza del molino	Diafragma de descarga
	Elementos molidores

Fig. 5.1 División de los elementos mecánicos de molinos tubulares

Las dimensiones y el diseño de la coraza del molino, los cabezales y los cojinetes dependen básicamente de la capacidad de molienda requerida, mientras que el diseño de los dispositivos de alimentación y descarga son elegidos conforme a consideraciones de proceso, tales como molienda por vía húmeda, molienda por vía seca o secado-molienda.

La figura 5.2 muestra los elementos mecánicos y su localización en un molino tubular de dos compartimientos.

Fig. 5.2.- Localización de los elementos mecánicos de molinos tubulares



## 5.2.- Elementos externos.

### 5.2.1.- Dispositivos de alimentación.

Los dispositivos de alimentación deben cumplir con las siguientes funciones:

- a).- Flujo de material hacia el molino sin bloqueo alguno
- b).- No permitir regreso y derrame del material de alimentación
- c).- Permitir la entrada del aire de ventilación en caso de molinos de cemento
- e).- Permitir la entrada de gas caliente en caso de molinos de crudo

Existen diferentes tipos de arreglos para alimentación que cumplen los requisitos indicados. En la figura 5.3 se ilustra una selección de ellos, la cual se explica a continuación:

#### Tolva de alimentación.

Este alimentador se utiliza en molinos de pasta y en pequeños molinos de cemento. La sección transversal limitada permite el paso de un pequeño volumen de aire en caso de molienda en proceso seco.

#### Alimentador de tambor.

FLS (fabricante de equipo cementero) equipa sus molinos con un alimentador de este tipo, el cual tiene como desventaja una elevada pérdida de presión que se produce en el proceso de molienda por vía seca, en el que el molino debe ser ventilado.

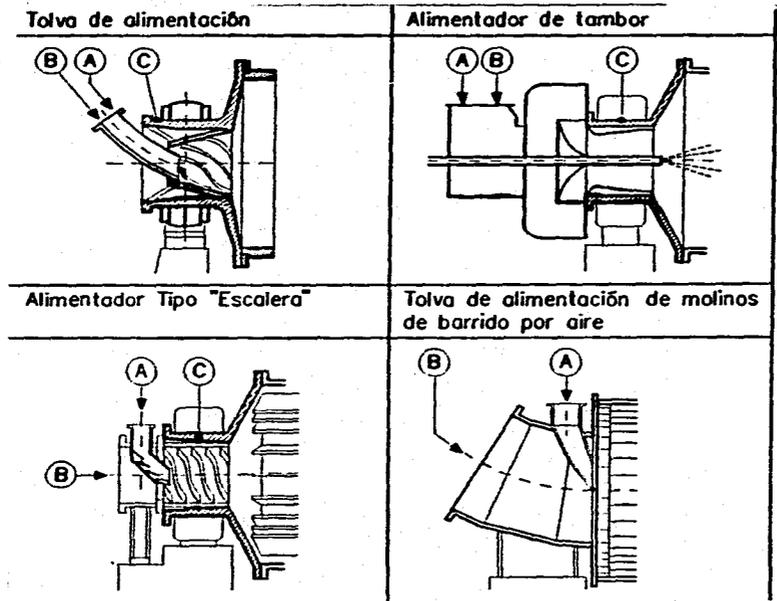
#### Alimentador tipo escalera.

Este alimentador se utiliza cuando se requiere gran cantidad de aire de ventilación o bien de gas para secado. La abertura grande permite obtener una caída de baja presión. Así mismo el aire puede entrar al molino a través de los escalones.

#### Tolva de alimentación para molinos con barrido de aire.

En este tipo de molino, el material molido es arrastrado por los gases de escape del molino, esto requiere una elevada tasa de flujo de gas dentro del molino. Por lo tanto, su dispositivo de entrada a sido diseñado para satisfacer este requisito. La materia prima es alimentada a la corriente de gas que entra al molino, para prevenir la entrada de aire falso, la alimentación debe ser sellada por medio de compuertas pendulantes o válvulas rotatorias.

Fig. 5.3. Dispositivos de alimentación para molinos tubulares.



Leyenda :

- (A) Alimentación al molino
- (B) Aire de ventilación
- (C) Muñón del molino

### 5.2.2.- Dispositivos de descarga.

Los dispositivos de descarga de un molino tubular dependen básicamente del tipo de molino y tipo de proceso de que se trate, en la figura 5.4 se ilustran diferentes tipos de dispositivos de descarga empleados en los molinos.

#### a).- Descarga central.

La descarga central se localiza entre los compartimientos de molinada de gruesos y de finos de un molino tubular. El molino es alimentado desde ambos lados a través de sus muñones huecos, el material es descargado por los compartimientos de molinada por medio de la descarga central.

#### b).- Descarga final.

El material sale del molino a través del muñón hueco situado en el lado de descarga del molino, la envoltura de salida incluye un sellado localizado entre las partes rotatorias y las estacionarias. Una depresión permanente previene la fuga de polvo.

#### c).- Descarga de molinos por barrido de aire.

El material molido que sale de este molino es transportado solo por gas, por lo tanto, el dispositivo de salida debe garantizar que el flujo de gas no sea obstruido y que no haya pérdidas de presión excesivas ni acumulación de material en el ducto.

### 5.2.3.- Coraza del molino.

La coraza del molino consiste en varias secciones de placas roladas y soldadas. El espesor de la coraza viene determinado por el peso del material, los elementos molturadores (bolas), las partes rotatorias y el diseño del molino.

El espesor de la coraza del tubo del molino va aproximadamente del 1/100 hasta 1/75 del diámetro del molino. Según el diámetro y la longitud del tubo, se utilizan los siguientes espesores:

DIAMETRO DEL TAMBOR DEL MOLINO (m)	ESPESOR DE LA CORAZA (mm)
Hasta ----- 1.6	18.0
1.6 ----- 2.0	20.0
2.0 ----- 2.2	25.5
2.2 ----- 2.4	28.0
2.5 ----- 3.5	38.0
3.5 ----- 4.25	52.0
4.25 ----- 4.5	58.0
5.0	63.5

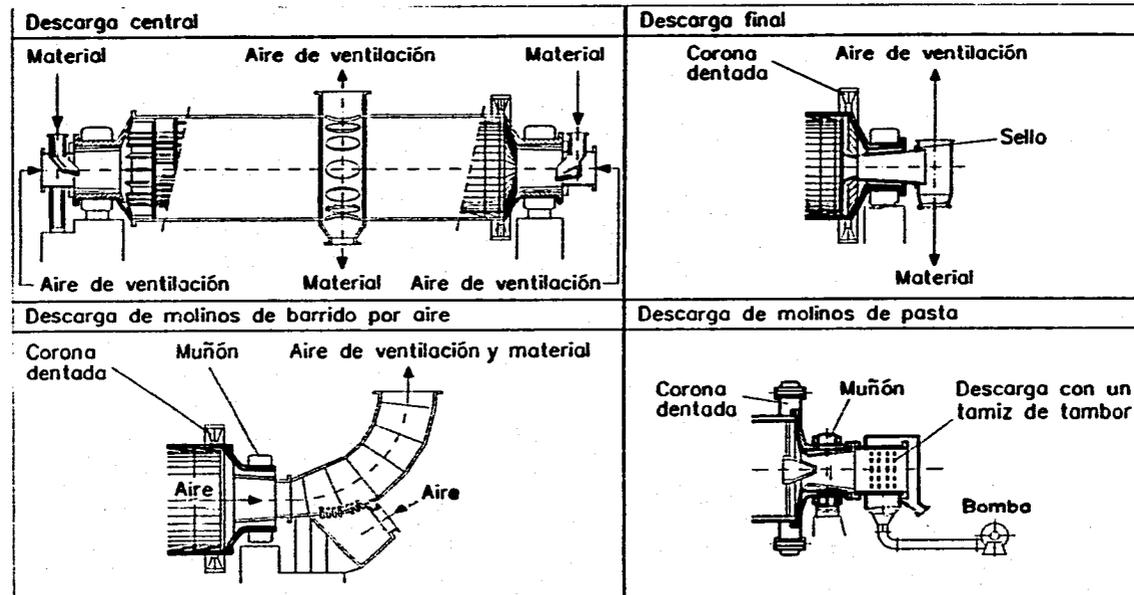
La coraza de los molinos se fabrican con los siguientes materiales:

#### a).- Placas de caldera HI

#### b).- St 37-3 (DIN 17155) con un bajo contenido de sulfuro

#### c).- ASTM A-238 grado C con un contenido de carbono < 0.2 % (USA)

Fig. 5.4. - Dispositivos de descarga para molinos tubulares.



#### 5.2.4.- Cabezales del molino.

Los molinos tubulares soportados por cojinetes de muñón cuentan con cabezales, y estos se encuentran atornillados o soldados a la coraza del molino. Existen cuatro tipos de cabezales los cuales se describen a continuación, y se ilustran en la figura 5.5.

1).- Cabezal atornillado a la coraza del molino.

Los molinos pequeños están equipados con cabezales de una sola pieza, en los que el muñón y el cabezal se encuentran fundidos como una sola pieza y están atornillados a la brida de la coraza del molino.

2).- Cabezal atornillado al muñón del molino.

Los muñones también pueden estar atornillados directamente a los cabezales del molino.

3).- Cabezal de molino de dos piezas.

En molinos grandes los cabezales están divididos concéntricamente en una parte exterior y una interior. La parte cónica interior del cabezal puede ser fundida junto con el muñón o bien estar unidos por soldadura. La parte exterior se encuentra atornillada a la parte interior y está soldada a la coraza del molino.

4).- Cabezal con cojinete de patín.

Con el fin de liberar a los cabezales del molino de las fuerzas elevadas de reacción del soporte, existe la tendencia a instalar cojinetes de patín en conjunto con un anillo de deslizamiento montado en la coraza del molino. En este caso el cabezal del molino consiste en una construcción soldada de placas de acero.

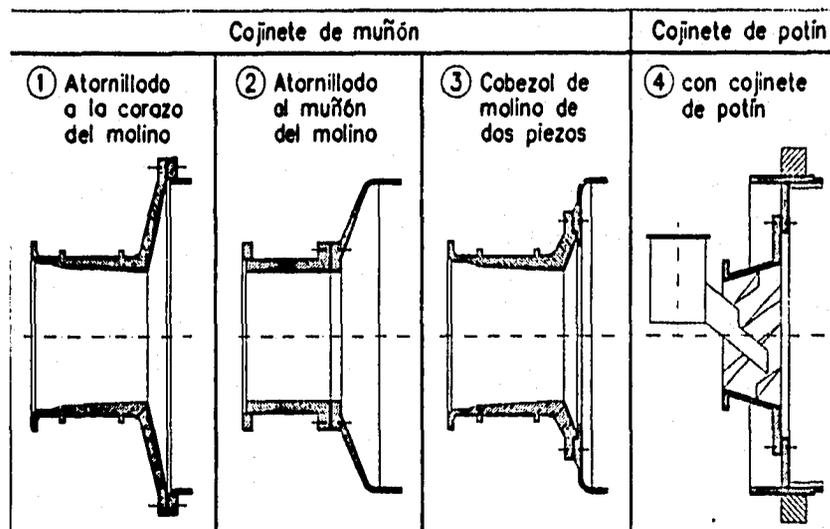


Fig. 5.5 Tipos de cabezales para molinos tubulares.

### 5.2.5.- Cojinetes del molino.

Para soportar los molinos tubulares tenemos dos tipos de cojinetes: Cojinetes de muñón y cojinetes de patín, de los cuales los primeros son la forma tradicional de soporte y los de patín son de aplicación más reciente. En la figura 5.6 se ilustran los dos tipos de cojinetes usados en los molinos tubulares.

#### 1).- Cojinetes de muñón.

Los muñones huecos de los molinos tubulares son soportados por cojinetes de muñón, el cual incluye la caja de envoltura con casquillo de cojinete, un soporte montado en superficies esféricas y un equipo de lubricación y refrigeración. El casquillo de cojinete está revestido con metal blanco.

Los cojinetes tienen lubricación hidrodinámica durante la operación normal e hidrostática durante el periodo de arranque, para lo cual son equipados con bombas de lubricación a baja presión para el primer caso y de alta presión para el segundo caso.

La ventaja de la lubricación hidrostática es que evita el contacto directo entre el cojinete y el muñón al inyectarle lubricante a presión con lo que se reduce el rozamiento entre las dos superficies al momento del arranque.

Para una operación normal del cojinete es necesario mantener una temperatura aceptable de los mismos, utilizando agua para enfriar el lubricante que circula por ellos, la cantidad mínima de agua es del orden de 20 a 25 litros por minuto para cada cojinete.

El consumo medio de agua se estima en 50 litros por minuto por molino con una presión máxima de 2 kilogramos por centímetro cuadrado a la entrada del cojinete.

#### 2).- Cojinete de patín.

En los molinos modernos los muñones pueden ser reemplazados por cojinetes de patín, en los cuales el anillo de deslizamiento apoya sobre varios patines. La lubricación hidrostática tiene lugar durante la fase de arranque, usándose lubricación hidrodinámica durante la operación normal. Los cojinetes de patín tienen las siguientes ventajas en comparación con los cojinetes de muñón:

- a).- No hay limitación de tamaño ni de capacidad del molino.
- b).- No se requieren cabezales grandes de construcción delicada.
- c).- Diseño simple de las placas de desgaste.
- d).- Aberturas grandes para alimentación y descarga, que permiten el paso de cantidades considerables de gas.
- e).- Ninguna limitación en cuanto a la temperatura del gas que influye en la expansión del muñón y del cojinete de muñón.

Al igual que los cojinetes de muñón, los de patín también requieren de agua para enfriamiento del aceite.

A continuación se define el término lubricación hidrostática y lubricación hidrodinámica:

**Lubricación hidrostática.**- Ocurre cuando la película se forma bombeando el lubricante bajo presión entre las superficies del cojinete y estas pueden moverse o no una con respecto a la otra. La presión hidrostática actúa para separar completamente las superficies de contacto.

**Lubricación hidrodinámica.**- Este tipo de lubricación depende del movimiento entre las dos superficies sólidas para generar y mantener la película lubricante.

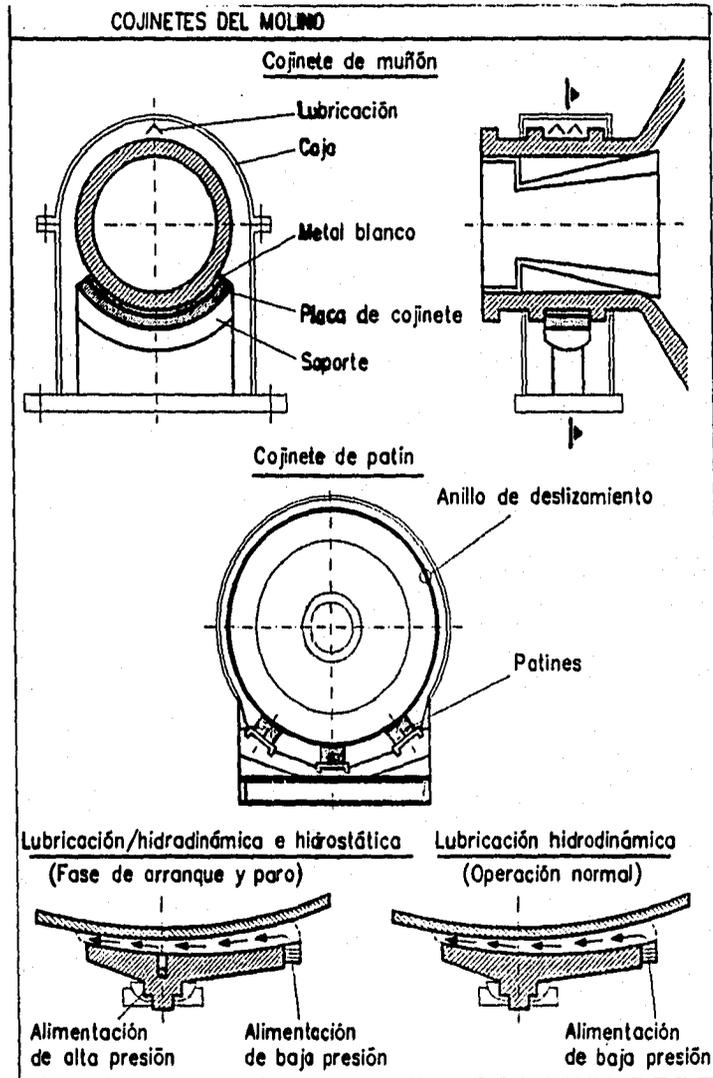


Fig. 5.6.- Cojinetes para molinos tubulares.

### 5.3.- Elementos Internos.

En la figura 5.7 se tienen ilustrados todos los elementos internos de un molino tubular de dos compartimientos de molienda, en base a esta figura se hará una descripción de cada uno de estos elementos.

**Placas.-** Las paredes internas de los molinos tubulares son protegidas por placas de blindaje resistentes al desgaste y deben ayudar al trabajo de molienda en el compartimiento respectivo. Las placas de blindaje deben de resistir las fuerzas de impacto sin sufrir deformaciones y rotura, la fricción y la corrosión. La forma y calidad del material de las placas debe satisfacer la exigencia de tiempo de vida y de interacción con los elementos molidores (bolas).

**Diafragmas.-** Los diafragmas se instalan para separar los compartimientos de molienda y deben elegirse de manera que permitan retener el material en el compartimiento de molienda anterior, así como un flujo suficiente de aire de ventilación o de gases de secado.

**Elementos molidores (bolas).-** Los elementos molidores son los encargados de moler el material al tamaño requerido, los tamaños de los elementos molidores así como la calidad del material, se determinan conforme a:

- a).- Tamaño del material alimentado
- b).- Finura del producto
- c).- Diámetro del molino
- d).- Longitud del molino
- e).- Molidurabilidad del material

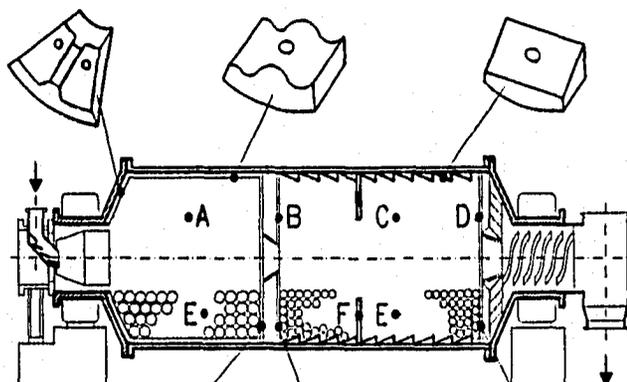
**Anillos de retención.-** Los molinos de circuito abierto, están a menudo equipados con anillos de retención. La finalidad de estos anillos es elevar el nivel del material y frenar con ello su flujo. Esto prolonga la estancia del material dentro del compartimiento con lo que se consigue una molienda fina mejorada.

**VISTA DE CONJUNTO SOBRE LOS ELEMENTOS INTERNOS**

Placas en el cabezal  
del molino

Placas de la caraza  
(Placas levantadoras)

Placas de la caraza  
(Placas clasificadoras)



Placas ranuradas

Placas ciegas

Placas ranuradas

- A Compartimiento de molienda de gruesos
- B Diafragma intermedio
- C Compartimiento de molienda de finos
- D Diafragma de descarga
- E Elementos molturadores
- F Anillos de retención

Fig. 5.7.- Elementos internos de molinos tubulares.

### 5.3.1.- Placas de blindaje del cabezal.

Los cabezales de los molinos tubulares se construyen en forma cónica (con cojinete de muñón) o bien regular (con cojinetes de patín). Ambos tipos de placas de blindaje están expuestas a un pronunciado desgaste por fricción debido al movimiento entre las placas de blindaje y los elementos molidores.

Algunas placas de blindaje de cabezales de molinos se diseñan con un nervio radial para reducir el movimiento relativo entre las placas de blindaje y los elementos molidores (bolas).

La relación de desgaste no es uniforme en los anillos de placas de blindaje, alcanzando su nivel máximo en la parte central de las placas. En la figura 5.8 se ilustra un arreglo de placas para cabezal de un molino tubular, y en los dibujos 5.8.1, 5.8.2 y 5.8.3.

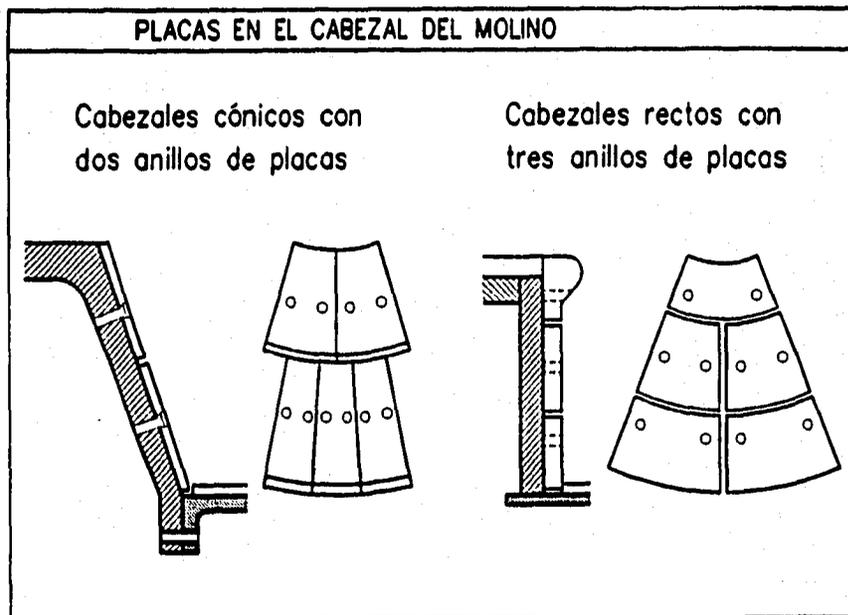
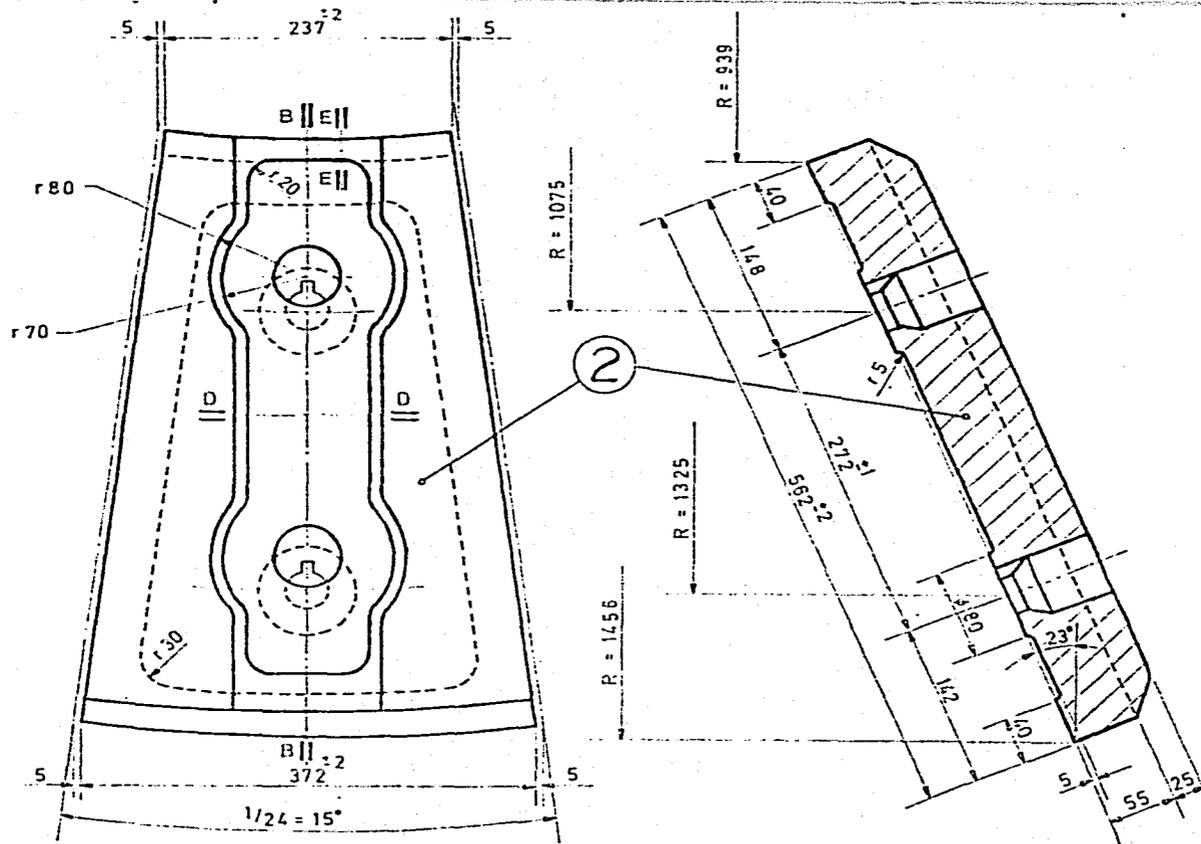


Fig. 5.8 Placas de blindaje del cabezal de molinos tubulares.

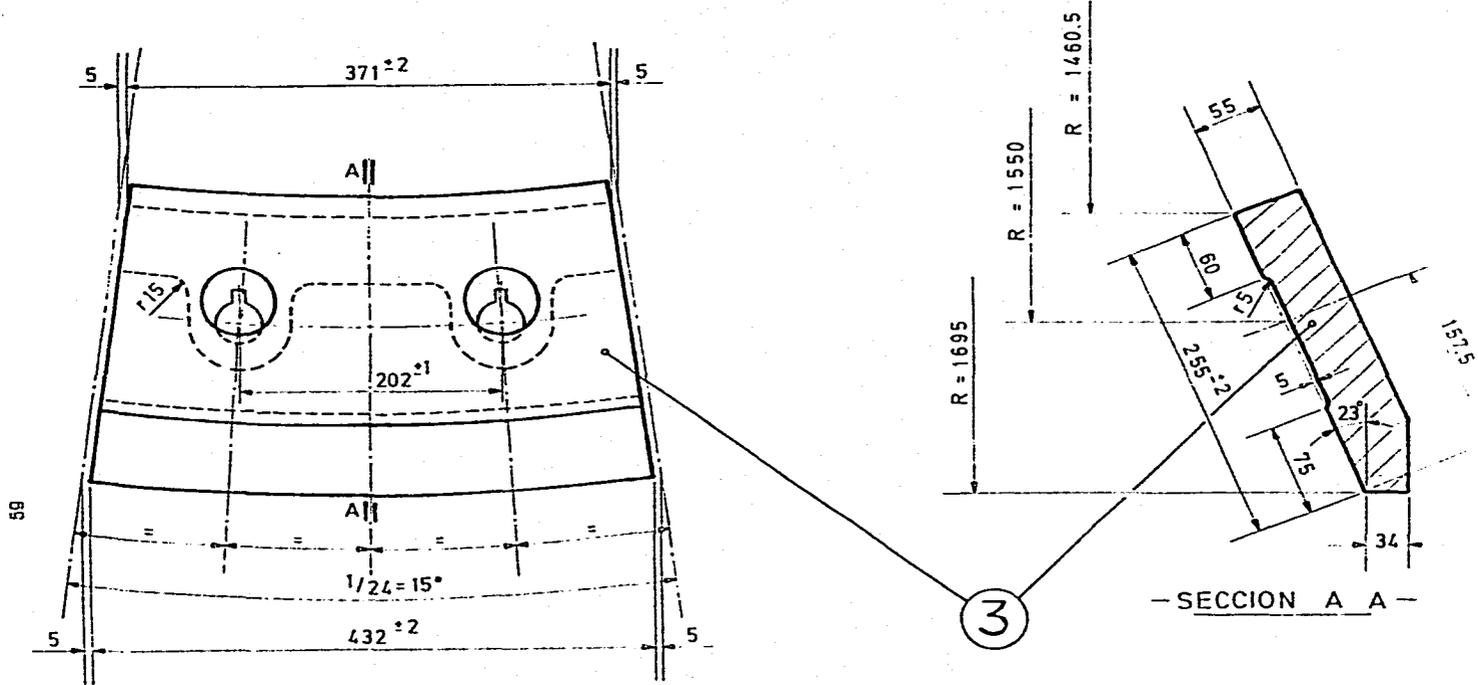




- SECCION B B -

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO		
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES "CUAUTTLÁN"		
DR. 56.2	TESIS PROFESIONAL	PLACA DE BUNDAJE
ACOT. mm	DEFERINO BOTILLA TOVAR	PARA CABEZAL POS 2.

58



MATERIAL : FMU - 22  
 Cantos y radios no indicados : 3 mm.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO		
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES "CUAUTITLAN"		
DIBUJO: 5.8.3	TESIS PROFESIONAL	PLACA DE BLINDAJE
ACOT mm	ZEFERINO BONILLA TOVAR	PARA CABEZAL POS S

### 5.3.2.- Placas de blindaje de la coraza.

La función de las placas de blindaje de la coraza es proteger a la chapa del molino del posible desgaste causado por la acción de los elementos molidores y a la vez ayudar al trabajo de molienda, dentro de este tipo de placas, tenemos las siguientes:

- a).- Placas levantadoras
- b).- Placas clasificadoras
- c).- Placas levantadoras - clasificadoras

La siguiente tabla muestra un patrón de desgaste dentro de los molinos tubulares y los requerimientos resultantes con respecto al material de las placas de blindaje.

	CAMARA I Molienda de gruesos	CAMARA II Molienda de finos
	Aspectos de desgaste dentro del molino tubular.	
Desgaste por impacto	Alto	Bajo
Desgaste por fricción	Bajo	Alto
	Requerimientos de calidad del material.	
Dureza	Baja	Alta
Resiliencia	Alta	Baja

Además el material debe cumplir con las siguientes características:

Endurecimiento homogéneo

Baja tasa de desgaste, ninguna deformación ni rotura

Las placas de blindaje de alto cromo son frecuentemente más utilizadas debido a su comportamiento de desgaste relativamente bajo. La dureza de las placas de blindaje para el compartimiento de molienda de gruesos es por lo general algo inferior a la dureza de los elementos molidores respectivos. En la tabla siguiente se ilustra la calidad del material y las aplicaciones de las placas de la coraza.

MATERIAL	COMPOSICION QUIMICA	DUREZA (HRC)	OBSERVACIONES Y APLICACIONES
Acero al manganeso	12 - 14 % Mn	40	Recomendado para molinos pequeños. En molinos grandes deformación de las placas.
Placas de blindaje al bajo cromo	2 - 3 % Cr, 0.5 - 0.6 C	40 - 42	Menor deformación, apropiado para molinos grandes y pequeños.
Placas de blindaje al alto cromo	12 - 15% Cr, 1.2 - 1.5 C	50 - 55	Apropiadas para molinos grandes y pequeños

Las dimensiones exactas de las placas de blindaje dependen del diámetro del molino, la norma DIN 24111 describe la longitud y el ancho de las placas de blindaje, según se ilustra en la figura 5.9.

El objetivo primordial de todo diseño de placas de blindaje, es lograr lo siguiente:

Un consumo mínimo de energía específica

Una capacidad de producción máxima en el molino tubular

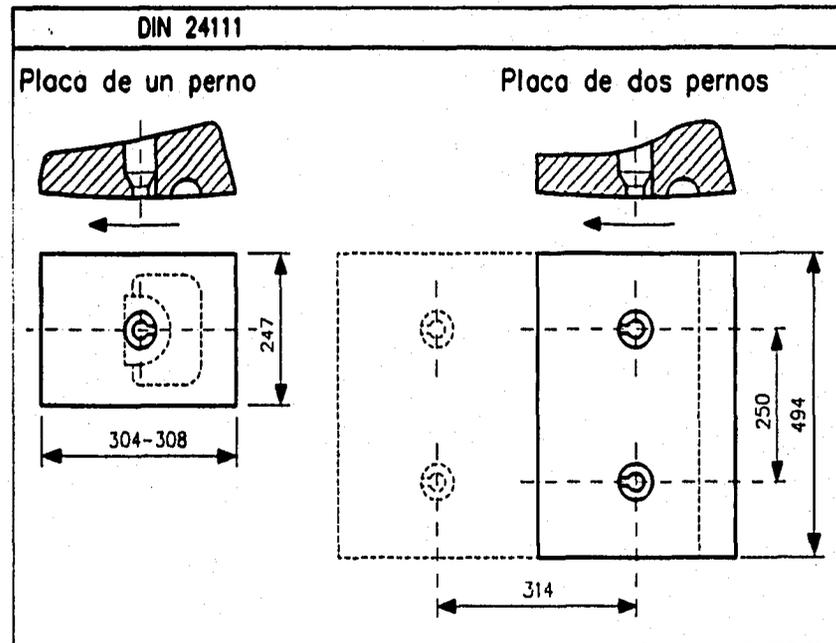


Fig. 5.9 Dimensiones de placas de blindaje según norma DIN 24111.

a).- Placas levantadoras.

Las placas levantadoras se utilizan en compartimientos de molienda de gruesos, así como también en compartimientos de molienda de finos, las placas deben levantar y liberar los elementos molidores (bolas) de modo que el impacto sea suficientemente fuerte como para romper las partículas grandes. Los elementos molidores no deben ser levantados excesivamente ya que algunos podrían caer en las placas de blindaje, provocando un desgaste prematuro de las placas y de los mismos elementos.

El espesor de las placas de blindaje depende del diámetro del molino y es entre 30 y 70 mm, su forma generalmente es rectangular y su peso fluctúa entre 50 y 150 Kg.

En la figura 5.10 se muestran algunos de los tipos más conocidos de placas levantadoras, y en el anexo P1 y P3 se muestran las dimensiones de las placas fabricadas por Maggotteaux.

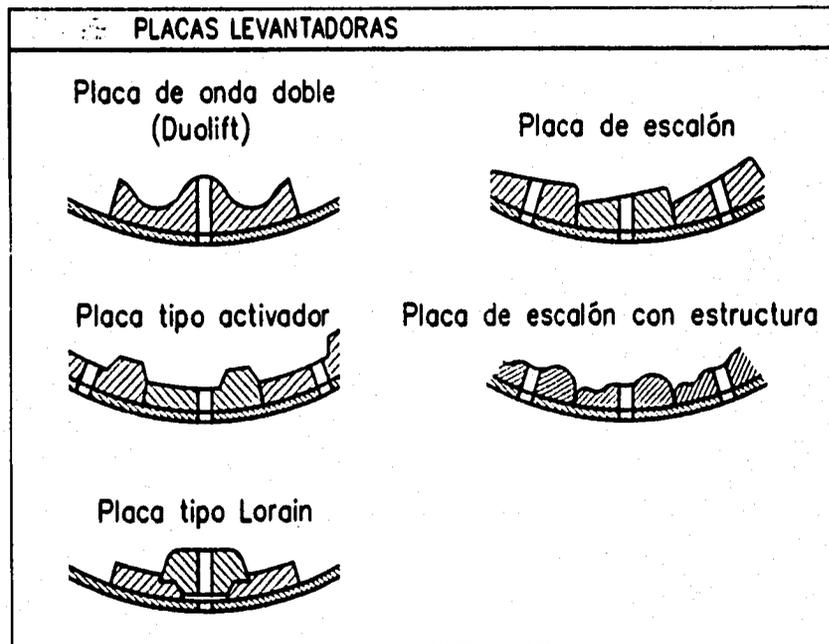


Fig. 5.10.- Placas levantadoras para molinos tubulares.

Diámetro del molino (m)		Relevo (mm)	Peso Unitario (Kg)	Peso/m <sup>2</sup> (Kg)
Permitido	Usual			
1.8 a 2.3	1.8 a 2.3	50-110	39.2	500
2.4 a 3.3	2.4 a 2.7	50-110	40.5	516
	2.8 a 3.3	50-115	41.6	530
3.4 a 5.2	3.4 a 3.8	50-115	40.4	514
	3.9 a 4.3	50-120	42.1	536
	4.4 a 4.8	50-130	45	573
	4.9 a 5.2	50-140	49.7	633
	5.3 a 6.0	55-150	55	700

Notas.- Los modelos fueron concebidos de tal manera que a partir de molinos donde el diámetro es mayor igual a 2.4 m, se permiten varias placas de relevo diferentes (por lo tanto de peso diferente) para un mismo diámetro. Esta tabla es válida para los perfiles relevadores simples y ondulados. Para las placas de las cuñas es conveniente aumentar 1 Kg al peso unitario y 13 Kg al peso por metro cuadrado.

Atención.- El perfil con la cuña se excluye formalmente en los casos siguientes:

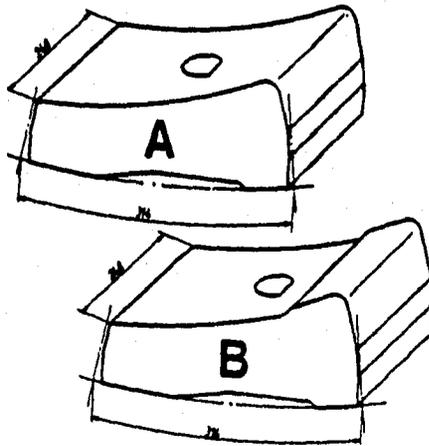
Diámetro del molino menor o igual a 3.2 m.

Circuito abierto.

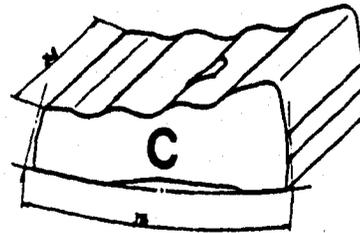
Diámetro máximo de bolas mayor a 100 mm.

Si se pasa en un 75% la velocidad crítica.

Si el molino es de 1 sola cámara.

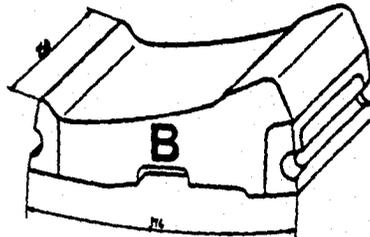
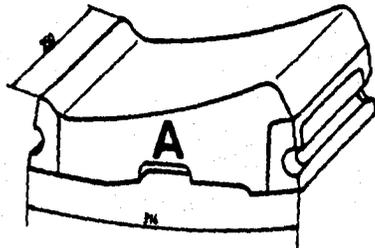


ANEXO P1

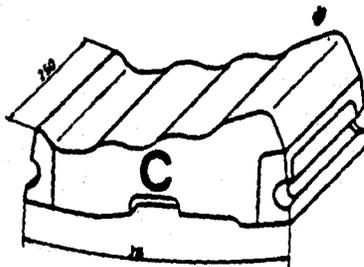


**U11 et U15**  
(sauf B)

Díametro Molino (m)	Relievo (mm)	Peso Unitario (Kg)	Peso/m <sup>2</sup> (Kg)
1.8 a 1.9	50-111	41.5	527
2.0 a 2.1	50-111	41.5	527
2.2 a 2.3	50-112	41.5	527
2.4 a 2.5	50-112	41.5	527
2.6 a 2.7	50-112	41.5	527
2.8 a 2.9	50-117	44.2	563
3.0 a 3.1	50-117	44.2	563
3.2 a 3.3	50-117	44.2	563
3.4	50-117	44.2	563
3.5 a 3.7	50-117	45.1	574
3.8 a 3.9	50-117	45.1	574
4.0 a 4.2	50-122	45.8	583
4.3 a 4.5	50-124	48.5	618
4.6 a 4.9	50-134	52	662
5.0 a 5.2	55-144	56	713
5.3 a 6.0	55-150	60.4	770



Notas.- Para las placas con cuña es conveniente aumentar 1 Kg al peso unitario y 13 Kg el peso por metro cuadrado.



b).- Placas clasificadoras.

El compartimiento de molineta de finos de un molino de tubular está equipado con placas clasificadoras, las cuales segregan en forma automática a los elementos molidores (bolas), los de mayor diámetro hacia el extremo de entrada del compartimiento con una disminución progresiva del diámetro de las bolas hacia la salida del molino, según se observa en la figura 5.11, y en el anexo P5 se muestran sus dimensiones.

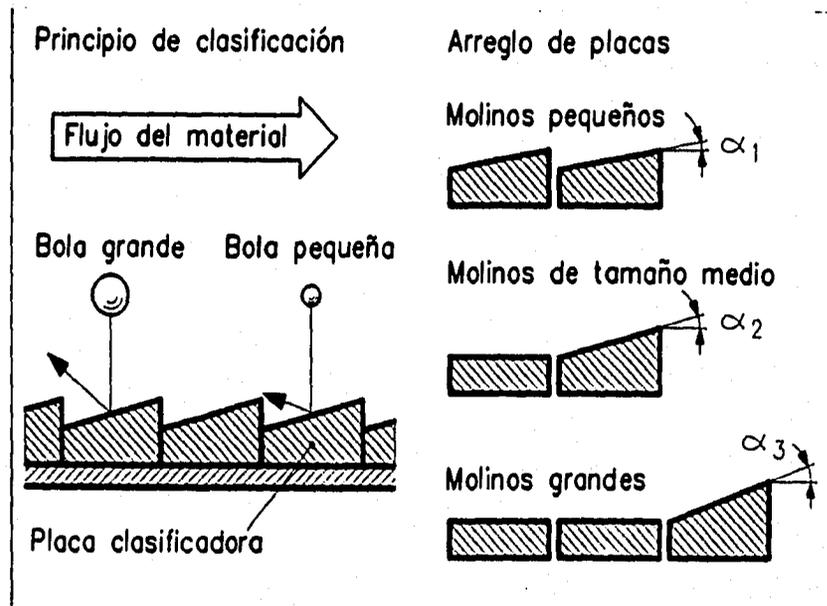


Fig. 5.11.- Placas clasificadoras para molinos tubulares.

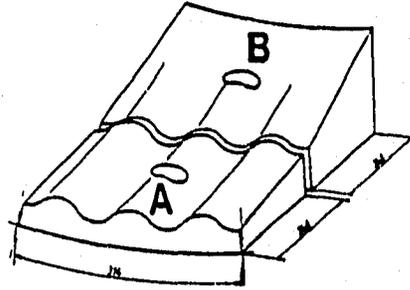
c).- Placas levantadoras y clasificadoras (combinadas).

Los molinos de barrido por aire tienen un solo compartimiento de molineta. Dado que una parte del material alimentado es grueso, los elementos molidores consisten así mismo de bolas de mayor diámetro, de hasta 80 mm. Una placa clasificadora normal no está adaptada a ese tamaño de bola.

La placa levantadora y clasificadora eleva los elementos molidores de tal forma que pueda moler el material grueso por impacto, debido a la función de clasificación, previene así mismo la clasificación inversa de la carga de bola.

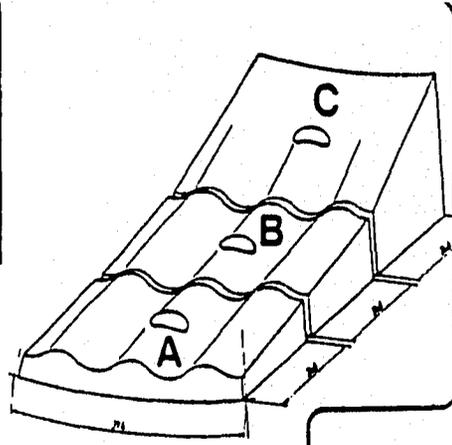
Los molinos de barrido por aire están equipados con placas levantadoras y clasificadoras en todo el compartimiento o bien solo en un tercio de su longitud, en este caso, los dos tercios restantes son equipados con placas clasificadoras convencionales.

Diámetro Molino (M)	Peso (Kg/m2)	Altura (mm)	Peso unitario Kg	
			P.B	P.H
1.80	333	60.5	20.9	32
2.00	336	60.5	20.9	32.3
2.20	376	63	22	36.9
2.40	376	63	22	36.9
2.60	376	66	22	36.9
2.80	376	66	22	36.9
2.90				
3.00	392	66.5	22	39.2
3.20	392	68.5	22	39.2
3.30				
3.40	433	76	25.5	42.5
3.50	433		25.5	42.5
3.60	433	76	25.5	42.5
3.80	433	76.5	25.5	42.5
4.00	433	76.5	25.5	42.5
4.20	433	76.5	25.5	42.5



Diámetro Molino (M)	Peso (Kg/m2)	Altura (mm)	Peso unitario Kg		
			P.B	P.M	P.H
4.40	465	86	25.5	31.8	52.5
4.60	465	86	25.5	31.8	52.5
4.80	466	86	25.5	31.6	52.5
5.00	466	86.5	25.5	31.8	52.5
5.20	466	86.5	25.5	31.8	52.5
5.40	460				
5.80	460				
6.00	460				

Nota.- Aumentar como mínimo un 5% a estos pesos para los blindajes no estándares y para los blindajes de molinos de carbón y "coke" abrasivos.



La figura 5.12 ilustra un arreglo de placas levantadoras y clasificadoras.

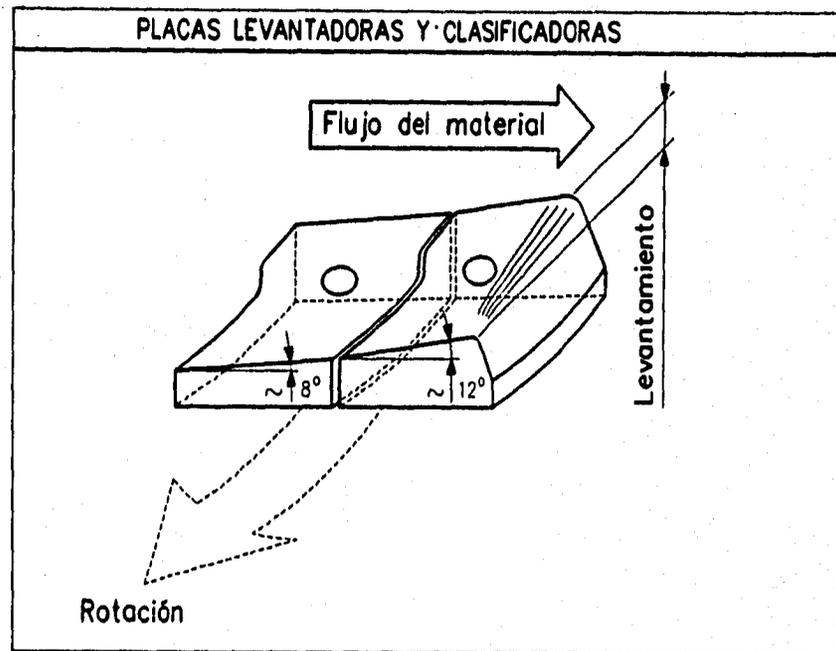


Fig. 5.12.- Arreglo de placas levantadoras y clasificadoras.

### 5.3.3.- Fijación e instalación de las placas.

Las placas de blindaje para la coraza del molino tubular pueden ser divididas conforme al método de fijación, en tres grupos:

#### a).- Placas de blindaje atornilladas al molino.

Las placas de blindaje atornilladas al molino, son fijadas a la coraza del molino por uno o dos tornillos en función de la placa del molino.

b).- Placas de blindaje atornilladas en número reducido.

En este tipo de fijación del blindaje, las únicas placas que se atornillan se encuentran dispuestas en un ángulo de 90° unas frente a otras.

c).- Placas de blindaje autotransportantes.

Las placas de blindaje son autosustentadoras, primero se recubre la parte inferior del molino fijándose las placas con clavijas. Luego, el molino es girado para facilitar el recubrimiento de la otra mitad del molino. La instalación debe ser supervisada por el proveedor de las placas de blindaje.

Las placas autotransportantes y las placas atornilladas en número reducido, ofrecen las siguientes ventajas en comparación con las placas con fijación convencional.

- Tiempo de vida más largo de la placa debido a la eliminación de los agujeros de fijación en los que suele iniciar el desgaste.
- Eliminación de paros del molino causados por rotura de tornillos.
- Ninguna fuga de material por la coraza del molino, al haberse eliminado los tornillos.

En la figura 5.13 se muestran las diferentes formas de fijación e instalación de placas de blindaje.

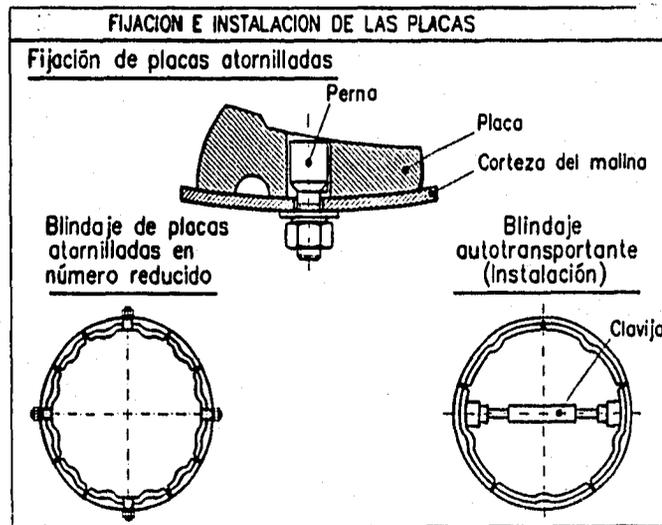


Fig. 5.13.- Fijación e instalación de las placas de blindaje.

#### 5.3.4.- Tiempo de vida de placas de la coraza.

El acero fundido aleado con alto contenido de cromo se utiliza para la fabricación de placas para la coraza, el tiempo de vida de esta parte de desgaste depende del tipo de material que está siendo molido.

Algunos de los aditivos usados en la molienda, tales como puzolana o escorias pueden ocasionar un desgaste pronunciado. A menudo no sólo son muy abrasivos, sino también húmedos lo que aumenta las velocidades de desgaste provocadas por la corrosión que genera la humedad.

En la tabla siguiente se muestran valores estimados de tiempo de vida esperados para placas de blindaje con un alto contenido de cromo (12 - 15 % Cr).

MATERIAL A MOLER	TIEMPO DE VIDA (Horas)	
	COMPARTIMIENTO DE MOLIENDA DE GRUESOS	COMPARTIMIENTO DE MOLIENDA DE FINOS
Harina de crudo (12-14 % R 90 µm)	30,000 - 40,000	60,000 - 80,000
Cemento portland (3000 cm <sup>2</sup> /g)	25,000 - 30,000	50,000 - 60,000
Cemento portland con aditivos menores.	23,000 - 27,000	46,000 - 54,000
Cemento compuesto	15,000 - 17,000	30,000 - 34,000

#### 5.4.- Diafragma intermedio.

La función del diafragma intermedio es dividir el molino en un compartimiento de molienda de gruesos y otro de molienda de finos. El material molido en el primer compartimiento pasa a través de las ranuras del diafragma intermedio, entrando en el siguiente compartimiento de molienda.

Hasta llegar al diafragma, el material alimentado debe ser molido a un tamaño inferior al ancho de las ranuras. El material de tamaño excesivo es retenido en el compartimiento de molienda de gruesos hasta estar suficientemente molido.

Los criterios más importantes de diseño para diafragmas intermedios son el ancho de las ranuras y el área total de las ranuras (área abierta).

Los diafragmas intermedios consisten de los siguientes elementos (diafragma doble),

Placas ranuradas

Pieza o cono central

Estructura de apoyo

Placas ciegas

Elevadores o levantadores

La localización de los diafragmas depende del tipo de molino y puede corresponder a los siguientes lugares:

Entre un compartimiento de secado y uno de molienda

Entre un compartimiento de molienda de gruesos y otro de molienda de finos

En el extremo de descarga del molino o bien en la descarga central

En la figura 5.14 se ilustra el funcionamiento del diafragma intermedio en un molino tubular.

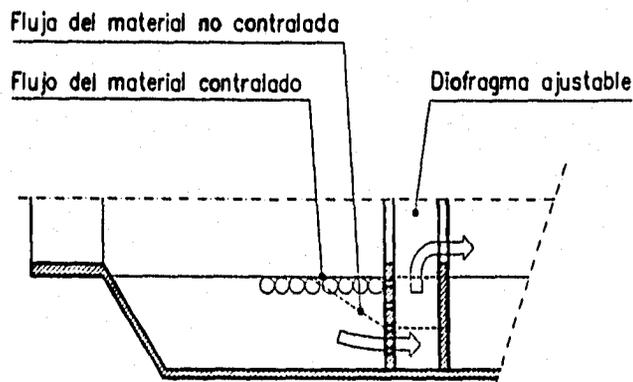


Fig. 5.14.- Funcionamiento de diafragmas intermedios.

#### 5.4.1.- Diafragma sencillo.

Este diafragma se usa en molinos pequeños como separación entre los compartimientos de molienda, el elemento central es construido abierto con una malla o bien en forma cerrada.

El diafragma sencillo se utiliza también como diafragma de descarga para los molinos de descarga central, en la figura 5.15 se muestra la aplicación de los diafragmas sencillos.

Los diafragmas sencillos están constituidos por:

Placas ranuradas

Elemento central

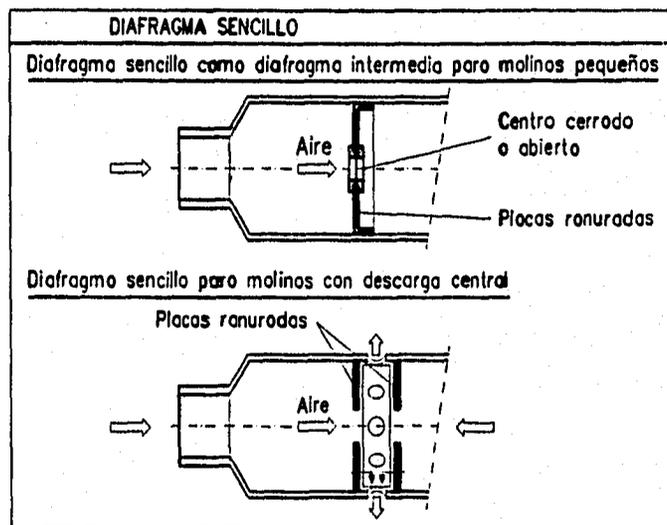


Fig. 5.15.- Diafragma sencillo.

#### 5.4.2.- Diafragma doble.

Dentro de los diafragmas dobles, tenemos los siguientes, diafragma doble con elevadores y el sistema combidan de diafragma doble de la firma FLS.

##### a).- Diafragma doble con elevadores

Estos diafragmas están formados por placas ranuradas en el lado de entrada y con placas ciegas en el lado de salida. El diafragma está equipado con elevadores para transportar el material, los elevadores son rectos o bien curvados, la parte central del diafragma está abierta a fin de permitir el paso de suficiente aire de ventilación o de secado a través del molino.

##### b).- Sistema combidan de diafragma doble (FLS).

El diafragma combidan de FLS cuenta en el lado de entrada no de una placa con ranuras, sino de una malla que cubre la sección transversal entera del molino. Esta malla relativamente fina está protegida contra el impacto de los elementos molidores (bolas) por medio de placas protectoras sólidas y resistentes al desgaste dispuestas de tal manera que permiten el paso de material premolido (pero no de material grueso) al compartimiento de separación localizado entre las placas sólidas y la malla.

En la figura 5.16 se muestran los dos tipos de diafragma doble.

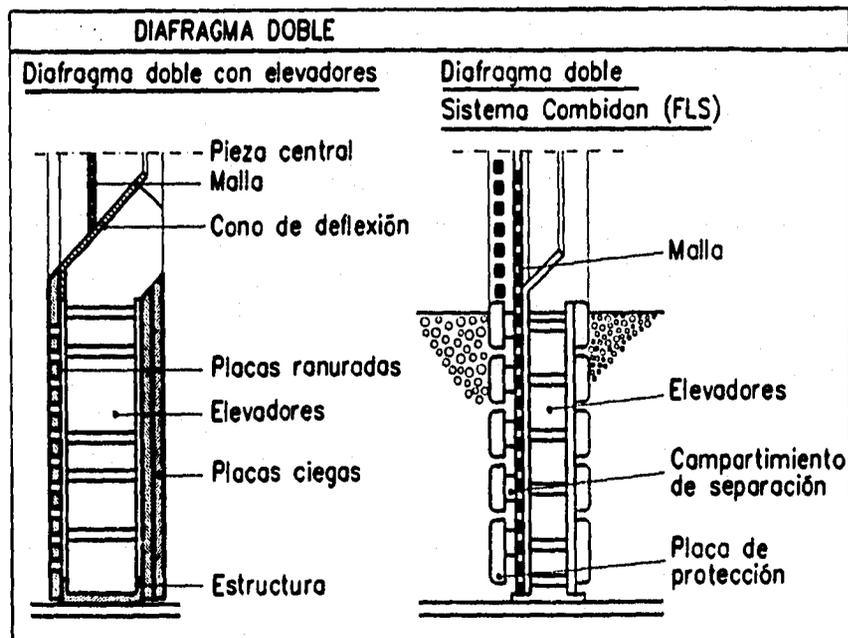


Fig. 5.16.- Diafragmas dobles.

### 5.4.3.- Diafragma ajustable.

La eficiencia de la molienda en un molino es influenciada por un tiempo de retención adecuado del material en el primer compartimiento. Existen varios sistemas para el control del flujo del material, los cuales en lugar de placas elevadoras de instalación fija. Slegten y Voest Alpine utilizan cucharones ajustables, mientras Pfeiffer controla el paso del material mediante un cambio de área abierta con un tubo ajustable.

La figura 5.17 muestra los sistemas principales de diafragmas ajustables.

Nota: Slegten, Voest Alpine y Pfeiffer son los nombres de los diferentes fabricantes de diafragmas.

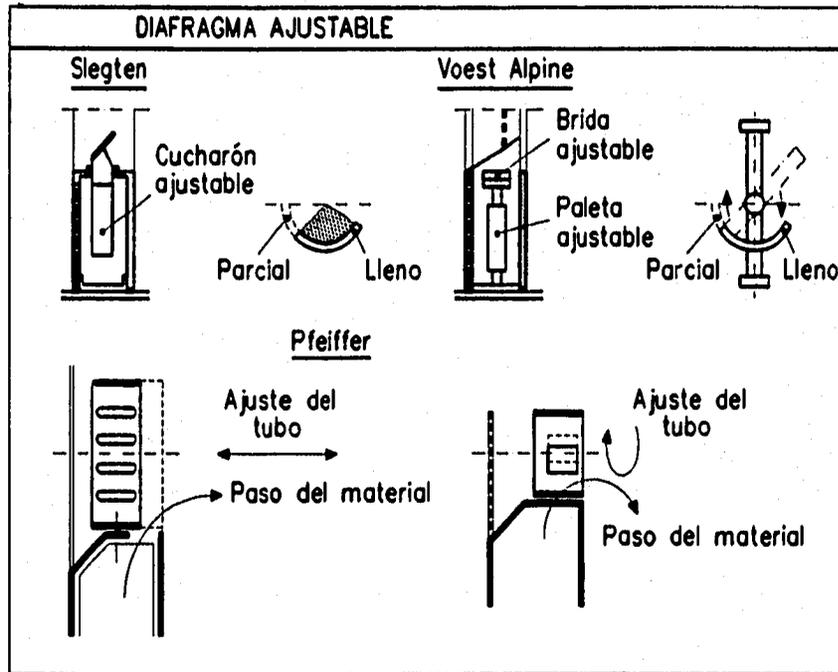


Fig. 5.17.- Tipos de diafragma ajustable.

#### 5.4.4.- Diafragmas abiertos (diafragmas del compartimiento de secado).

Los diafragmas abiertos se instalan como separación entre los compartimientos de secado y de molienda de gruesos, por lo tanto se les clasifica a menudo como diafragmas del compartimiento de secado.

Las ranuras de las placas deben ser suficientemente grandes para permitir la transferencia de material y de gas para secado a través del diafragma.

En operación con gases calientes la temperatura en el diafragma puede aumentar hasta los 400°C, por lo tanto el diafragma requiere ser resistente a los choques también a altas temperaturas.

En la figura 5.18 se muestra la disposición de un diafragma abierto en un molino de crudo.

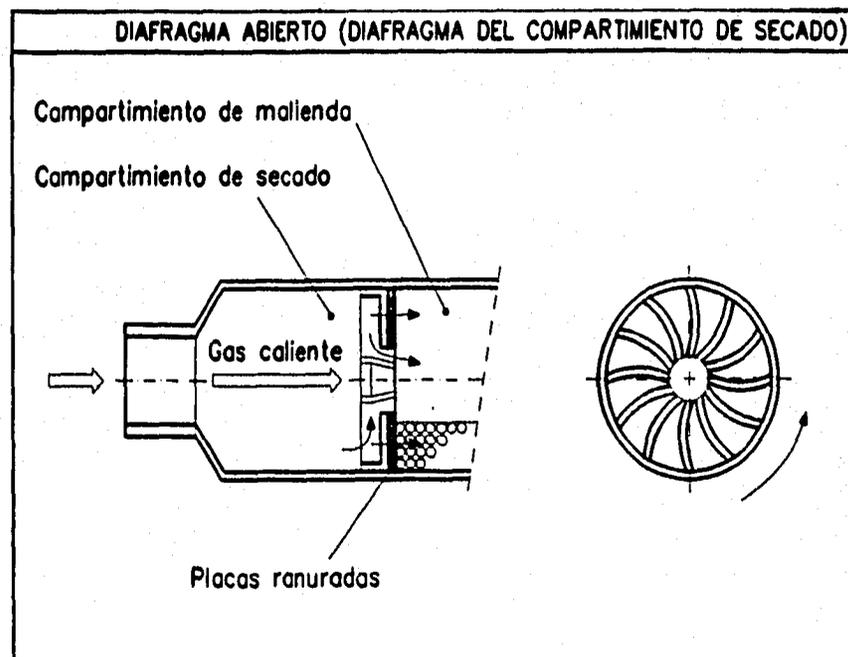


Fig. 5.18.- Diafragma abierto.

5.4.5.- Ranuras del diafragma intermedio.

En el lado de entrada los diafragmas intermedios están equipados con placas ranuradas fabricadas en acero resistente al desgaste. El ancho de las ranuras depende de:

- Material a ser molido.
- Diámetro de bolas.
- Longitud del compartimiento.
- Caudal del aire de ventilación del molino.

El diseño de las ranuras debe cumplir con las siguientes condiciones:

- Ancho constante de las ranuras, también con un desgaste continuo.
- Baja obstrucción al flujo de aire.
- Resistencia a la rotura de las ranuras.
- Ninguna obstrucción de las ranuras por partículas o a causa de impacto por bola.

En la figura 5.19 se muestran algunos ejemplos típicos de ranuras para diafragmas intermedios.

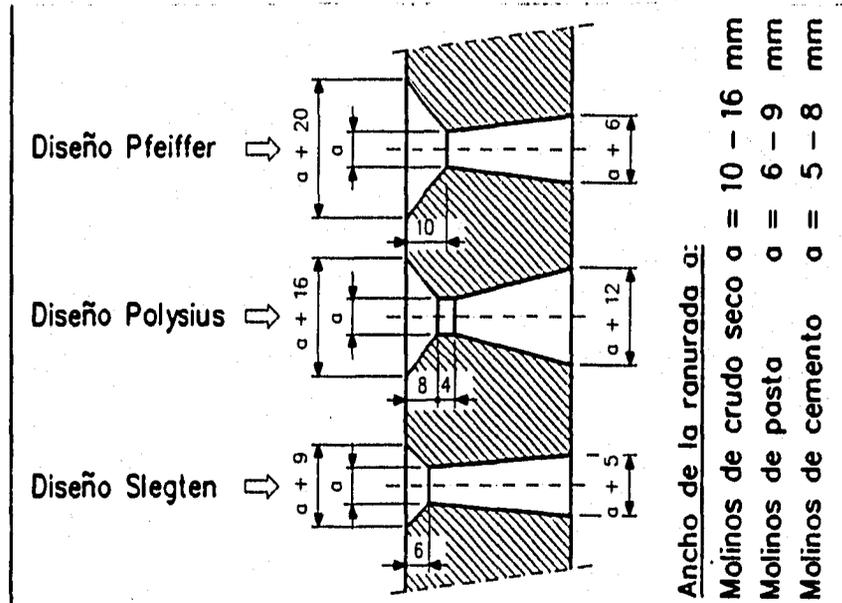


Fig. 5.19.- Diseño de ranuras para diafragma intermedio.

#### 5.4.6.- Tasa de desgaste y tiempo de vida de los diafragmas.

Las placas ranuradas se fabrican en acero endurecido y resistente al desgaste o bien de material fundido con alto contenido de cromo. Algunas características principales de ambos tipos de material se indican en la tabla siguiente:

MATERIAL	CONTENIDO EN CROMO	DUREZA DE LA SUPERFICIE
Fundición aleada con alto contenido de cromo	Hasta el 27 %	60 HRC
Acero laminado	Bajo	50 - 60 HRC

La tasa de desgaste o el tiempo de vida de un diafragma depende del tipo de material a ser molido y puede tomarse como referencia, las siguientes cifras guía:

MATERIAL	TIEMPO DE VIDA (HORAS)
Materia prima (15 % R 90 $\mu\text{m}$ - 17 Kwh/t)	10.000 - 15.000
Clinker (2800 $\text{cm}^2/\text{g}$ - 30 Kwh/t)	8.000 - 10.000

Desde el punto de vista de duración las placas ranuradas son la parte más débil de los molinos tubulares.

### 5.5.- Diafragma de descarga.

Los diafragmas de descarga son instalados en la salida de los molinos con descarga final o en el centro de los molinos con descarga central. Los componentes principales de un diafragma de descarga se muestran en la figura 5.20 y están equipados con elevadores y conos similares al diafragma doble.

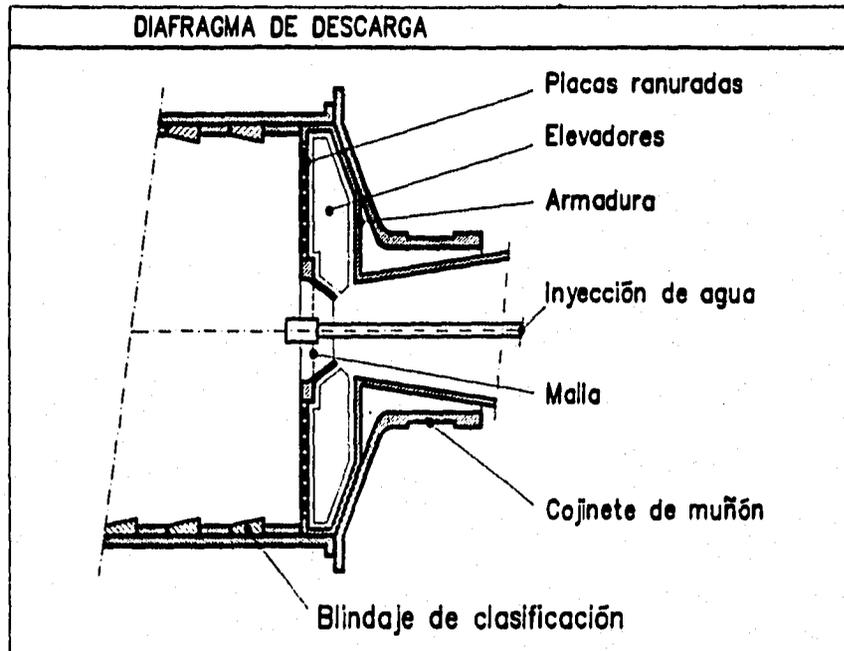


Fig. 5.20.- Diafragma de descarga.

#### 5.5.1.- Diafragmas para molino con descarga central.

El diafragma de descarga para este tipo de molino está formado por dos diafragmas sencillos instalados en la salida de los compartimientos de molienda de gruesos y molienda de finos. La diferencia entre ambos diafragmas es el ancho de sus ranuras, normalmente, las ranuras de las placas del compartimiento de molienda de finos son dos milímetros más anchas que las ranuras de las placas del compartimiento de molienda gruesa.

### 5.5.2.- Ranuras (diafragma de descarga).

Las ranuras del diafragma de descarga son más anchas que las del diafragma intermedio, pero también dependen del tipo de material a ser molido así como del tamaño de los elementos molidores (bolas) en el compartimiento de molida.

Se pueden tomar como referencia los siguientes valores orientativos para el ancho de las ranuras:

Molinos de crudo	12 - 18 mm
Molinos de pasta	8 - 11 mm
Molinos de cemento	7 - 10 mm

El desgaste en el diafragma de descarga es provocado por las fuerzas de fricción entre los elementos molidores (bolas) y el diafragma o bien entre el material y el diafragma. Puesto que no hay impacto pronunciado en las placas, la tasa de desgaste es más baja que en un diafragma intermedio.

En la figura 5.21 se muestran los diferentes diseños de ranuras para diafragmas de descarga, y en los dibujos 1 se muestra el detalle de las placas y sus ranuras.

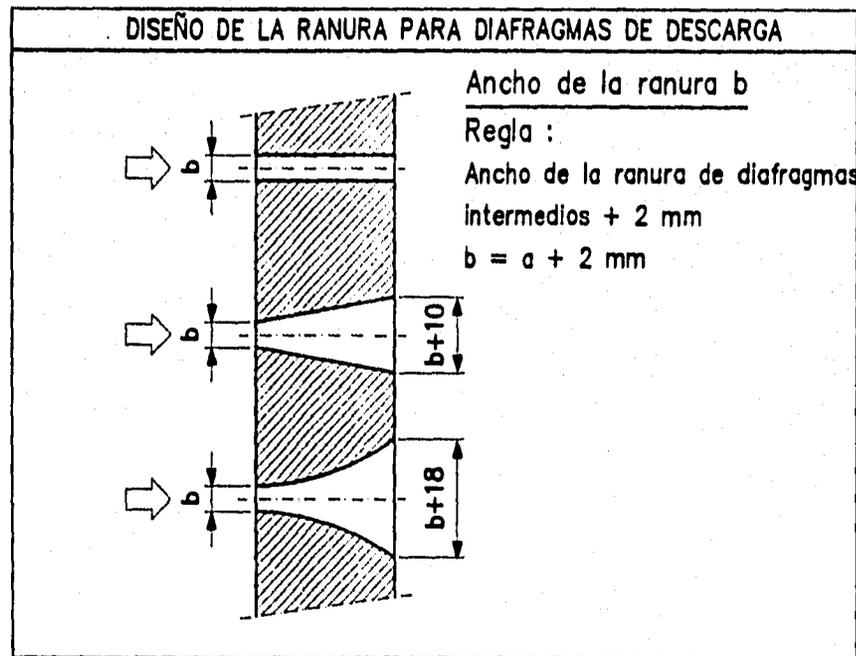


Fig. 5.21.- Diseño de ranuras para diafragmas de descarga.

### 5.6.- Elementos molturadores (bolas).

La carga de bola de un molino tubular consiste en bolas de acero de varios tamaños y de diferentes calidades de material. Para la molienda de gruesos, se utilizan bolas de entre 50 y 100 mm y para la molienda de finos se usan bolas de entre 15 y 50 mm. El tamaño máximo y mínimo de las bolas y su composición dependen de varios factores, tales como:

Tamaño máximo del material a ser molido.

Finura del producto

Diámetro y longitud del molino.

Molturabilidad del material alimentado.

Sistema del molino(círculo abierto/cerrado, número de compartimientos, carga circulante).

Dependiendo del proceso de molturación y de la etapa de molienda de que se trate, las bolas deben resistir:

Fuerzas de impacto de las propias bolas(especialmente en la molienda de gruesos con bolas grandes).

Desgaste causado por las fuerzas de fricción entre las bolas y las placas de blindaje.

Desgaste provocado por materiales abrasivos.

Corrosión (molienda por vía húmeda).

#### 5.6.1.- Calidad del material.

El molino puede ser llenado con bolas baratas de baja calidad y altas tasas de desgaste o con bolas caras de alta calidad, con bajas tasas de desgaste. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la bola de baja calidad requiere una recarga del molino más frecuente, a fin de reducir los elementos molturadores rotos o desgastados, lo que origina una utilización baja del molino y mayores costos de producción.

Debido a su buena resistencia al desgaste, existe una clara tendencia hacia el uso de bolas de hierro fundido con alto contenido de cromo (bolas al alto cromo). En la siguiente tabla se muestran las calidades del material para los elementos molturadores.

CALIDAD DEL MATERIAL	COMPOSICIÓN QUÍMICA	CARACTERÍSTICAS
Elementos molturadores forjados	0.5 - 1.0 % C 0.8 - 1.2 % Mn 0.8 - 12 % Cr	Disponible a precios favorables Usar en materiales no abrasivos. Dureza 25-65 HRC superficial
Elementos al bajo cromo	2.8 - 3.3 % C 0.1 - 0.4 % Mn 0.1 - 0.4 % Cr 0.4 - 0.8 % Si	Usados en molienda fina Grandes variaciones en calidad Solo para molinos < 3.5 m $\phi$ Especiales en molienda húmeda Dureza 45 - 48 HRC
Elementos al alto cromo	Crudo seco -- 2-3% C, ~ 12% Cr Crudo húmedo -- 20 - 30 % Cr Cemento -- 2-3% C, 12-17% Cr	Muy resistente al desgaste Dureza 48-68 HRC homogénea

#### 5.6.2.- Tasa de desgaste.

El desgaste de los elementos molturadores (bolas) es ocasionado por:

Impacto  
Fuerzas de fricción  
Abrasividad del material  
Corrosión

Los elementos molidores son forjados o fundidos en acero con alto contenido de cromo, resistente al desgaste. En función de la calidad de los elementos molidores, son de esperar tasas de desgaste de 15 - 1200 g/t de material.

Las bolas al bajo cromo no se pueden usar en el compartimiento de molienda de gruesos debido al peligro de la rotura de bolas, considerando las calidades del material mencionadas anteriormente, los valores indicados en la tabla siguiente dan una referencia de las tasas específicas de desgaste, partiendo de las siguientes suposiciones:

Materia prima 17 Kwh/t; 10 - 15 % R 90  $\mu$ m

Pasta 10 Kwh/t; 10 - 15 % R 90  $\mu$ m

Cemento 30 Kwh/t; 3000 cm<sup>3</sup>/g

Material	Unidad	Materia	Prima	Pasta	Pasta	Cemento	Cemento
		Bolas Pequeñas	Bolas Grandes	Bolas Pequeñas	Bolas Grandes	Bolas Pequeñas	Bolas Grandes
Bolas forjadas	g/Kwh g/t	2 - 10 30 - 170	10 - 30 170 - 500	15 - 50 150 - 500	20 - 80 200 - 800	2 - 15 60 - 450	10 - 40 300 - 1200
Bolas al bajo cromo	g/Kwh g/t	2 - 6 35 - 100	- -	20 - 60 200 - 600	- -	5 - 15 150 - 450	- -
Bolas al alto cromo	g/Kwh g/t	1 - 3 15 - 50	2 - 5 30 - 80	10 - 20 100 - 200	15 - 30 150 - 300	0.5 - 1.5 15 - 50	1 - 2 30 - 70

Las tasas específicas de desgaste indicadas para el cemento se refieren sólo al cemento portland. Para cementos compuestos, en los que parte del clinker son sustituidas por aditivos como escoria, puzolana, etc. las tasas de desgaste pueden ser mucho mayores, por ejemplo de aproximadamente 200 g/t en la molienda de cemento con puzolana con bolas al alto cromo.

Prueba de desgaste en bola de diferentes calidades realizada en un molino de cemento de la planta Apaxco, esta prueba fue realizada con la asesoría de la empresa Magotteaux de México.

Datos del molino:

Diámetro = 4.6 m.  
Longitud cámara I = 5.035 m.  
Longitud cámara II = 9.68 m.

A continuación se presenta el procedimiento que se utiliza para obtener el índice de desgaste de la bola, partimos de la fórmula siguiente:

**Desgaste =  $\Delta D / 2 \times S \times \delta / T$  [Kg/t] o [g/t], donde:**  
 $\Delta D$  = Pérdida de diámetros entre el original y último control (mm)  
 $S$  = Superficie específica de la carga total de bola en la cámara ( $m^2$ )  
 $\delta$  = Densidad del material de la bola al alto cromo ( $7.64 \text{ Kg/dm}^3$ )  
 $T$  = Toneladas producidas en el periodo de tiempo medido (ton)

Las bolas marcadas fueron introducidas al molino el 14 de Septiembre de 1993, haciéndose el último control el 31 de Enero de 1994, después de una producción de 237,638 toneladas.

Las calidades de bola fueron:

- 1.- Bola con un barrenos E18H08 (Maxicrom normal)
- 2.- Bola con dos barrenos a 90° E11HSPEC (11 Especial)
- 3.- Bola con dos barrenos a 180° E18HSPEC (Maxicrom especial)

La incógnita  $\Delta D$  (pérdida de diámetro) se obtiene a partir de las siguientes fórmulas:

$$\Delta D = D_{\text{inicial}} - D_{\text{final}}$$

$$D_{\text{inicial}} = \sqrt[3]{\text{Peso inicial promedio de bola} \times 250}$$

$$D_{\text{final}} = \sqrt[3]{\text{Peso final promedio de bola} \times 250}$$

Pesos iniciales:

Maxicrom normal = 2741.18 g      11 Especial = 2763.9 g      Maxicrom especial = 2756.36 g

Pesos finales:

Maxicrom normal = 2465.18 g      11 Especial = 2501.0 g      Maxicrom especial = 2571.0 g

Diámetro inicial para Maxicrom normal

$$D_i = \sqrt[3]{2741.18 \times 250} = 88.16 \text{ mm}$$

Diámetro final para Maxicrom normal

$$D_f = \sqrt[3]{2465.18 \times 250} = 85.1 \text{ mm}$$

Diámetro inicial para 11 Especial

$$D_i = \sqrt[3]{2763.9 \times 250} = 88.41 \text{ mm}$$

Diámetro final para 11 Especial

$$D_f = \sqrt[3]{2501 \times 250} = 85.51 \text{ mm}$$

Diámetro inicial para Maxicrom especial

$$D_i = \sqrt[3]{2756.36 \times 250} = 88.33 \text{ mm}$$

Diámetro final para Maxicrom especial

$$D_f = \sqrt[3]{2571 \times 250} = 86.30 \text{ mm}$$

Perdida de diámetro para Maxicrom normal:  $\Delta D = 88.16 - 85.10 = 3.06$

Perdida de diámetro para 11 Especial:  $\Delta D = 88.41 - 85.51 = 2.90$

Perdida de diámetro para Maxicrom especial:  $\Delta D = 88.33 - 86.30 = 2.03$

Para obtener la superficie específica de la carga "S" partimos de la carga de bola original y tenemos:

$\phi 3\frac{1}{2} = 25$  ton (25.51%)       $\phi 3" = 38$  ton (38.78%)       $\phi 2\frac{1}{2} = 35$  ton (35.71%)

la carga total de bola en la cámara es de 98 toneladas y equivale a 30.91 % de grado de llenado.

**S = Carga de bola de la cámara (ton) x Superficie específica de la bola (s)**

Los valores de (s) en bolas se obtienen de tablas y corresponden a:

Bolas de  $3\frac{1}{2}" \phi = 8.728$  m<sup>2</sup>/ton

Bolas de  $3" \phi = 10.207$  m<sup>2</sup>/ton

Bolas de  $2\frac{1}{2}" \phi = 12.276$  m<sup>2</sup>/ton

Como el grado de llenado encontrado al final de la prueba fue de 30.5% se consideró la carga inicial, y aplicando la fórmula de S tenemos:

$S = 25$  ton x  $8.728$  m<sup>2</sup>/ton =  $218.2$  m<sup>2</sup>

$S = 38$  ton x  $10.207$  m<sup>2</sup>/ton =  $387.866$  m<sup>2</sup>                       $S = 1035.726$  m<sup>2</sup>

$S = 35$  ton x  $12.276$  m<sup>2</sup>/ton =  $429.66$  m<sup>2</sup>

Por último aplicando la fórmula de desgaste para cada calidad de bola, tenemos:

Desgaste =  $\Delta D / 2 \times S \times \delta / T$

Desgaste en Maxicrom normal =  $3.06/2 \times 1035.726 \times 7.64 / 237,638 = 50.95$  g/ton

Desgaste en 11 Especial =  $2.9/2 \times 1035.726 \times 7.64/237,638 = 48.28$  g/ton

Desgaste en Maxicrom especial =  $2.03/2 \times 1035.726 \times 7.64/237,638 = 33.80$  g/ton

De lo anterior se deduce que la calidad de bola que presenta menos desgaste es la Maxicrom especial, la cual fue adquirida para introducirla al molino de cemento 4 de la planta de Cemento Apaxco en el Estado de México. Las dimensiones de la bola fueron las siguientes:

$3\frac{1}{2}$  pulgadas de diámetro = 25 toneladas

3 pulgadas de diámetro = 38 toneladas

$2\frac{1}{2}$  pulgadas de diámetro = 35 toneladas

Lo cual da una carga total de 98 toneladas de bola Maxicrom especial al alto cromo.

En la tabla siguiente se indican los datos de peso unitario y superficie específica de los cuerpos molidores, según MAGOTTEAUX DE MEXICO.

Diámetro mm	Diámetro pulgadas	Peso (g)	Superficie (cm <sup>2</sup> )	# de bolas por ton. métrica	Superficie específica (m <sup>2</sup> / TM)
150	± 6	13503.892	706.858	74	5.231
125	± 5	7814.752	490.874	128	6.283
110		5325.535	380.133	188	7.147
100	± 4	4001.153	314.159	250	7.854
90	± 3½	2916.841	254.469	343	8.728
80		2048.590	201.062	488	9.812
77	± 3	1826.658	186.265	548	10.207
70		1372.396	153.938	729	11.222
64	± 2½	1048.878	128.680	954	12.276
60		864.249	113.097	1157	13.085
50	± 2	500.144	78.540	2000	15.708
40		256.074	50.265	3905	19.628
38	± 1½	219.551	45.365	4555	20.664
35		171.549	38.485	5830	22.437
31.75	± 1¼	128.061	31.669	7809	24.730
30		108.031	28.274	9257	26.173
25	± 1	62.518	19.635	15996	31.408
23		48.682	16.619	20542	34.139
22.22	= 7/8	43.895	15.511	22782	35.337
20	± ¾	32.009	12.566	31242	39.259
17	± 5/8	19.658	9.079	50870	46.185
15		13.504	7.069	74052	52.342
10		4.001	3.142	249938	78.531

### 5.6.3.- Los mecanismos de desgaste.

Como se dijo anteriormente básicamente son tres los mecanismos que afectan al desgaste de los cuerpos molidores en un molino, y son:

**Abrasión**

**Impacto**

**Corrosión**, en el caso de molienda húmeda y molinos secadores.

Los factores influyentes de esos mecanismos de desgaste están resumidos en la tabla siguiente, según Magotteaux.

Mecanismos de desgaste	Factores influyentes	Medidas para evitar desgaste	
		Cuerpos molidores	Otros
Abrasión	Características del mineral Granulometría del mineral Forma de las partículas	Dureza del cuerpo molidor Contenido de carburos duros Estructura de la matriz	
Impacto	Características del molino Operación del molino Forma del blindaje	Tratamiento térmico del cuerpo molidor	Modificar características del molino. Modificar operación del molino. Modificar la forma del blindaje
Corrosión	Molienda húmeda Características de la pulpa Temperatura de la pulpa Tipo de blindaje	Contenido de cromo	Blindaje en acero

## ALEACIONES MAGOTTEAUX PARA PLACAS.

SIMBOLO	% C	% Cr	% Mn	Rc	J/cm <sup>2</sup>	% K	% Ar
U 9	0.8 a 1	1.0 a 1.8	1.0 a 1.8	30 a 36	106	3	
U 11	1.1 a 1.3	11.0 a 13.0	0.2 a 1.9	48 a 52	10	12	6
U 12	1.7 a 2.1	11.0 a 13.0	0.6 a 1.9	55 a 62	4	18	10
U 22	0.3 a 0.2	11.0 a 12.0	0.5 a 1.9	51 a 53	20		
U 26	0.1 a 0.2	10.0 a 11.0	0.9 a 1.8	42 a 45	50	1.7	
U 29	0.3 a 0.3	6.5 a 7.5	0.7 a 1.4	54			
U 40	2.4 a 2.7	23.0 a 26.0	0.3 a 2.0	61	4.5 a 27	20	
U 49	2.8 a 3.2	15.0 a 17.0	1.4 a 1.6	63 a 55		32	25
U 87	1.0 a 1.3	2.0 a 2.5	12.0 a 14.0	23 a 24	300		
U 89	1.0 a 1.3	0.5	12.0 a 14.0	16.4	300		
U 90	1.0 a 1.4	2.0 a 2.5	16.0 a 18.0	18.1	300		
U 96	1.0 a 1.4	2.5	16.0 a 18.0	18.1	300		
U 101	3.0 a 3.3	1.6 a 3.4	0.4 a 0.7	56			
U 102	2.6 a 2.9	1.4 a 3.0	0.4 a 0.7	54			
U 104	3.0 a 3.4	7.0 a 10.0	0.4 a 0.7	53			
U 226	0.5 a 0.6	2.0 a 2.5	0.5 a 0.8	31 a 38			

## ALEACIONES MAGOTTEAUX PARA BOLA.

SIMBOLO	% C	% Cr	Rc	DIAM.	% K	% Ar
E 11	2.5 a 2.9	11.0 a 13.0	60 a 68	50 a 70	27	12.0 a 25.0
E 12	2.9 a 3.4	10.0 a 13.0	62 a 68	50	32	13.0 a 35.0
E 18	2.0 a 2.5	15.0 a 19.0	57 a 65	50 a 125	23	10.0 a 17.0
E 21	2.7 a 3.0	19.0 a 22.0	62 a 64	50 a 125		
E 32	2.1 a 2.4	28.0 a 32.0	50	40 a 90	35	6.0 a 25.0
E 50	2.9 a 3.1	19.0 a 22.0	61 a 68	40 a 70	30	5.0 a 25.0
E 55	2.9 a 3.2	26.0 a 20.0	66 a 68	40	31	15.0 a 20.0

NOTAS: % K = Por ciento de carburos de cromo.  
 % Ar = Por ciento de austenita residual.  
 Las zonas sombreadas corresponde a las aleaciones más utilizadas.

## ALEACIONES MAS IMPORTANTES.

BOLA	% CROMO	DUREZA	OBSERVACIONES
MAXICROM	17 % Cr	50 Rc	Para cámara I y molinos monocámara
HARDALLOY	12 % Cr	63 Rc	Para cámara II

## CABEZAL, PLACAS RANURADAS Y PLACAS CIEGAS.

ALEACION	% CROMO	DUREZA	RESILIENCIA
FMU 11	12 % Cr	50 Rc	10 - 15 J/cm <sup>2</sup>
FMU 22	11.6 % Cr	52 Rc	20 J/cm <sup>2</sup>
FMU 26	10.6 % Cr	43.5 Rc	60 J/cm <sup>2</sup>
FMU 29	7 % Cr	51 - 54 Rc	30 - 20 J/cm <sup>2</sup>
FMU 40	24.5 % Cr	61 Rc	4.5 J/cm <sup>2</sup>

## PLACAS DE BLINDAJE PARA LA CORAZA DEL MOLINO.

ALEACION	% CROMO	DUREZA	RESILIENCIA
FMU 11	12 %	50 Rc	10 - 15 J/cm <sup>2</sup>
FMU 12	12 %	57 Rc	4 - 5 J/cm <sup>2</sup>
FMU 22	11.60 %	52 Rc	20 J/cm <sup>2</sup>

<b>TABLA DE CONVERSION DE DUREZAS.</b>
--

TABLA DEL GRUPO MAGOTTEAUX PARA CONVERSION DE VALORES MAYORES DE 450 HB EN VALORES Rc.

HB	HRc	HB	HRc
455	47.00	650	
460	47.70	655	61.00
465	48.40	660	
470	48.70	665	
475	49.10	670	62.00
480	49.50	675	
485	49.80	680	62.50
490	50.10	685	
495	50.40	690	63.00
500	51.20	695	
505		700	
510	51.90	705	63.80
515		710	
520	52.60	720	64.60
525		725	65.00
530	53.10	730	
535		735	
540	53.80	740	65.70
545	54.00	745	
550		750	
555	54.50	755	66.40
560		760	
565	55.00	765	
570	55.20	770	67.00
575			
580	55.70		
585			
590	56.30		
595			
600	56.80		
605			
610	57.40		
615			
620	58.00		
625			
630	59.00		
635			
640			
645	60.00		

## 6.- TIPOS DE TRANSMISION PARA MOLINOS TUBULARES.

La transmisión para molinos tubulares puede ser dividido basicamente en tres grupos:

- Transmisión con corona dentada y piñón
- Transmisión central
- Transmisión sin reductor

Cada tipo de accionamiento puede ser aplicado a determinado rango de potencia de motor. la potencia máxima esta limitada a aproximadamente 11.000 KW dado que con valores de potencia superiores, las dimensiones del cilindro del molino comienzan a crear problemas de transporte.

Con respecto al rendimiento de la transmisión de molinos con transmisión central o con corona-piñón, no se dispone de pruebas evidentes de la superioridad de un tipo sobre el otro, ya que ambas transmisiones, para molinos que permitan compararse, muestran rendimientos muy similares. Sin embargo desde el punto de vista económico, esta claramente demostrado que la transmisión central para las mismas dimensiones de molino es 5 % más caro que una transmisión con corona-piñón. de igual manera el costo de una transmisión con motor de anillo supera en 15 % el costo de una transmisión central con reductor planetario. En la figura 6.1 se muestra la aplicación de diferentes transmisiones de molinos para un determinado rango de potencia.

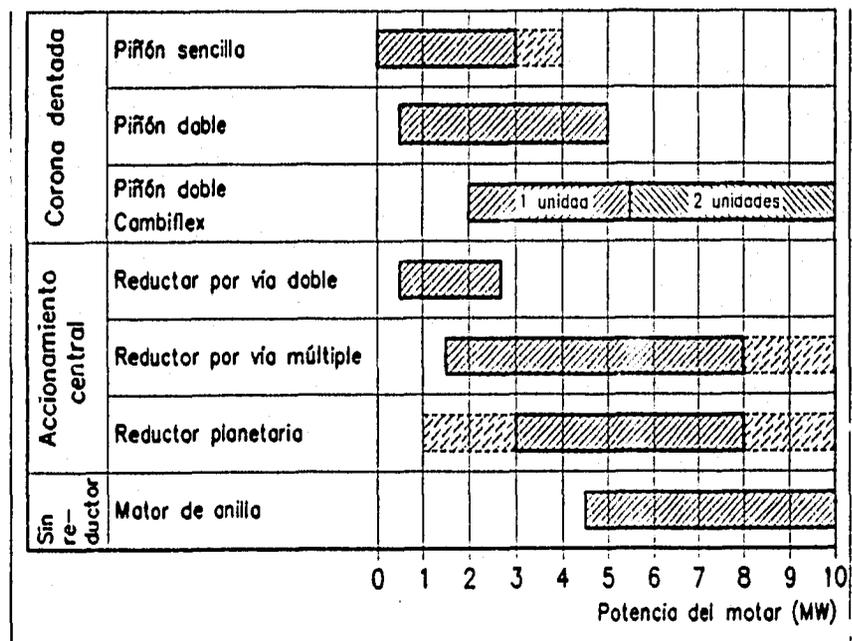


Fig.6.1.- Rango de potencia de diferentes transmisiones para molinos tubulares.

### 6.1.- Transmisión con corona dentada y piñón.

La corona dentada se atornilla al cuerpo del molino y es accionado por uno o dos piñones, tal y como se ilustra en la figura 6.2. El reductor de velocidad, colocado entre el piñón y el motor del molino, está equipado con una transmisión auxiliar, esto permite el giro a muy baja velocidad del molino (0.2 - 0.3 RPM) para la inspección o para girar el molino a una posición determinada. La corona dentada se encuentra en una caja sellada y es lubricada por inmersión o lubricación por pulverización. Los fabricantes norteamericanos prefieren a menudo usar un motor sincrónico de baja velocidad en lugar de un reductor.

La transmisión de potencia con piñón sencillo, se utiliza hasta 4000 KW, para potencias superiores se utiliza doble piñón. Cuando se desean transmitir potencias superiores a los 5000 KW se tiene la alternativa de usar un reductor combiflex el cual consiste en dos piñones, si se instalan dos unidades, cuatro piñones transmiten fuerza a la corona dentada. Este diseño permite instalar potencias de más de 10,000 KW. Otra característica del reductor combiflex es que la corona dentada y el anillo de deslizamiento se localizan uno frente al otro y están cubiertos por la misma caja.

Para una operación sin problemas del mando, son prerequisites el engranado correcto y el contacto parejo en todo el ancho de los dientes, por lo tanto:

- a).- El mando tiene que ser montado, alineado y puesto en marcha adecuadamente.
- b).- La corrección de la alineación tiene que ser realizada a intervalos.
- c).- Los siguientes factores afectan el engranado y la alineación.

- Movimientos de los fundamentos (bases)
- Deflexión y deformación en los engranes, coraza y soporte.
- Diferencias en la temperatura y cambios dimensionales resultantes en la coraza, soportes y engranes.
- Desgaste en soportes y rodamientos.
- Soltura de fijaciones.
- Intervenciones de mantenimiento.
- Cambio de la carga de bola.

Una de las partes más importantes que influye en la duración de los engranes es la lubricación, la cual tiene el propósito de:

- Evitar contacto metal con metal entre los dientes.

- Reducir la fricción

- Evitar la corrosión

- Enfriamiento.

Dentro de los sistemas existentes para lubricar los engranes, tenemos principalmente tres tipos:

- Lubricación de rociado automático (hornos y molinos)
- Lubricación con rueda de paletas (hornos)
- Lubricación forzada (molinos).

Cuando el sistema de lubricación esta diseñado y operado correctamente, proporciona las siguientes ventajas:

Muy bajo consumo de grasa (4 g/h por cm. de ancho del diente)  
 Cubre adecuadamente los dientes.  
 lubricante limpio (solo se usa una vez).

Los mandos por engranes de los molinos tubulares están protegidos por guardas, las cuales protegen a los engranes de la contaminación y de partículas extrañas que pueden meterse entre los dientes y además sirven de protección al personal. Para una adecuada funcionalidad de las guardas, se debe considerar lo siguiente:

Colocar puertas de inspección en los lugares adecuados.  
 Controlar desgaste de los sellos que están en contacto con partes rotatorias.  
 El fondo de la guarda debe estar provisto para extraer fácilmente el lubricante usado.

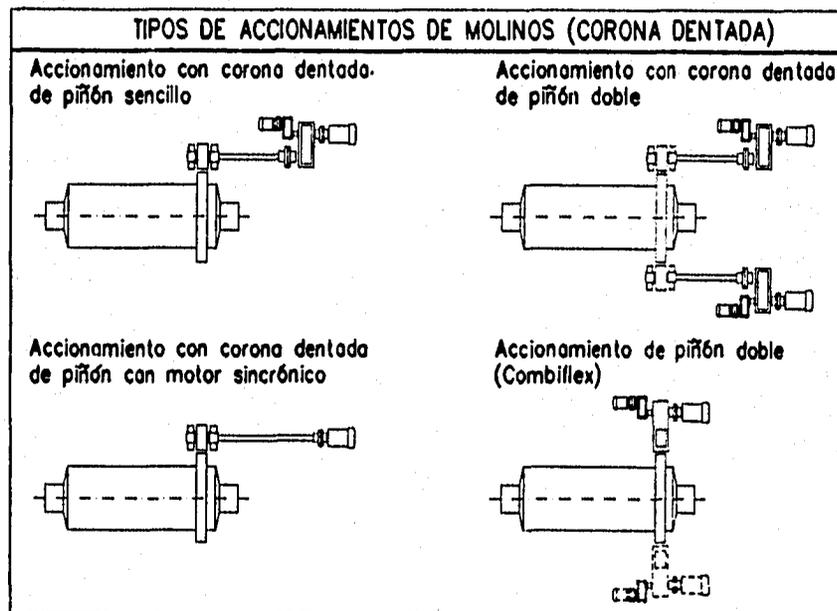


Fig. 6.2.- Transmisiones de molinos con corona dentada.

En la planta de Cemento Apaxco, en el Estado de México, se tienen cinco molinos tubulares con transmisión de corona-piñón, cuyos datos técnicos del conjunto se enlistan a continuación:

**Molinos de cemento 1 y 2:**

**Motor de rotor devanado.**

<b>Marca:</b> Brown Boveri	<b>Modelo:</b> SO266rx
<b>Voltaje 1:</b> 3000 Volts	<b>Corriente 1:</b> 360 Amperes
<b>Voltaje rotor:</b> 875 Volts	<b>Corriente rotor:</b> 1150 Amperes
<b>Potencia:</b> 1600 KW	<b>Factor de potencia:</b> 0.9
<b>Velocidad:</b> 1185 RPM	<b>Frecuencia:</b> 60 Hertz

**Reductor de velocidad:**

<b>Marca:</b> Flender	<b>Modelo:</b> ZPMG I430
<b>Velocidad entrada:</b> 1190 RPM	<b>Velocidad salida:</b> 124 RPM
<b>Potencia:</b> 1450 KW	<b>Relación:</b> 9.59:1

**Capacidad aceite:** 350 Litros

Con estos datos se puede conocer la velocidad real del molino, para lo cual usamos la fórmula siguiente:

$$N1 Z1 = N2 Z2$$

Donde:

**N1 = Velocidad de entrada**

**Z1 = Número de dientes del piñón**

**N2 = Velocidad de salida**

**Z2 = Número de dientes de la corona**

Para este caso la velocidad N1 corresponde a la salida del reductor y la velocidad N2 es la que correspondera al molino:

$$N2 = N1 Z1 / Z2$$

$$N2 = 124 \text{ rpm} \times 23 \text{ dientes} / 172 \text{ dientes}$$

$$N2 = 16.5 \text{ RPM}$$

**Molino de cemento 3:**

Para este molino se tiene una transmisión igual a la de los molinos 1 y 2, diferenciándose solo en el número de dientes de la corona.

$$N1 Z1 = N2 Z2$$

$$N2 = N1 Z1 / Z2 = 124 \text{ rpm} \times 23 \text{ dientes} / 180 \text{ dientes}$$

$$N2 = 15.8 \text{ RPM.}$$

**Molino de crudo y molino de cemento 4.**

Motor de rotor devanado (4 piezas, 2 por cada molino).

Marca: General Electric

Modelo: 5M26376AC2

Voltaje l: 6600 Volts

Corriente l: 262 Amperes

Voltaje rotor: 1285 Volts

Corriente rotor: 1210 Amperes

Potencia: 3350 HP

Armazón: 6376 3 fases

velocidad: 1185 RPM

Frecuencia: 60 Hertz

Reductor de velocidad (4 piezas, 2 por cada molino).

Marca: Mecánica Falk

Modelo: 43 x 26ZS2

Velocidad entrada: 1180 RPM

Velocidad salida: 122 RPM

Potencia: 3500 KW

Relación: 9.675:1

Capacidad de aceite: 87l Litros

Factor de servicio: 1.75

Con estos datos calculamos la velocidad del molino de crudo:

$$N1 Z1 = N2 Z2$$

$$N2 = N1 Z1 / Z2 = 122 \text{ rpm} \times 33 \text{ dientes} / 282 \text{ dientes}$$

$$N2 = 14.27 \text{ RPM.}$$

Para el molino de cemento 4:

Con estos datos calculamos la velocidad del molino de cemento 4:

$$N1 Z1 = N2 Z2$$

$$N2 = N1 Z1 / Z2 = 122 \text{ rpm} \times 33 \text{ dientes} / 266 \text{ dientes}$$

$$N2 = 15.13 \text{ RPM}$$

### 6.2.- Transmisión central.

El reductor de una transmisión central para molinos tubulares puede estar unido por medio de un eje hueco, un árbol de torsión o bien directamente con el molino. El reductor opera en un baño de aceite dentro de una caja completamente cerrada.

Los molinos pequeños con potencias de hasta 3000 KW están equipados con un reductor por vía doble con uno o dos motores, para una potencia de transmisión mayor puede usarse un reductor por vía múltiple o un reductor planetario.

Los reductores planetarios de motor único se construyen para potencias de hasta 8500 KW, para potencias de hasta 10,000 KW se ofrecen reductores planetarios dobles. Los reductores planetarios son por lo general más caros que los reductores por vía múltiple, pero ofrecen a cambio una alta eficiencia del reductor y son de un diseño muy compacto.

La transmisión con reductor planetario, en la que el reductor está embridado al molino (MAAG-ZAHNRAEDER AG Zurich) no tiene contacto directo con el fundamento del molino, es decir, que los movimientos del molino o cualquier descenso del fundamento no tiene efecto alguno sobre los dientes del reductor.

El sistema de máquinas acopladas axialmente permite dilataciones térmicas sin deformaciones de la coraza y sin disminuir el contacto de los flancos de los dientes. Las desviaciones del frente del molino son absorbidas por acoplamientos dentados y barras de torsión.

La temperatura del reductor es controlada automáticamente y de modo óptimo, a través de un sistema de circulación de aceite que sirve a la lubricación, en función de la temperatura del exterior. Todas las operaciones necesarias que requieran rotación lenta, parada en cualquier posición deseada, pueden hacerse de modo sencillo por medio de una transmisión auxiliar.

La relación de velocidad del reductor planetario permite prever un motor normal con 1000 RPM y alto rendimiento, el del motor asíncrono crece con número de vueltas y potencia creciente, el espacio total necesario para este sistema de transmisión es menor que para otras soluciones, ciertamente que no pueden ser fijados límites en sentido longitudinal. La disposición de la transmisión permite un acceso total tanto al molino como al motor.

Los costos de inversión de una instalación de molienda con transmisión con reductor planetario son más elevados que los de una transmisión de corona y dos piñones, pero son mucho más favorables que los de una transmisión con motor periférico.

En la planta de Cemento Apaxco, se tiene una transmisión con reductor planetario en el molino de cemento 5, esta transmisión tiene los siguientes datos técnicos:

Motor de rotor devanado.

Marca: Asea Brown Boveri

Modelo: ASD630/6-263

Voltaje l: 6600 Volts

Corriente l: 380 Amperes

Voltaje rotor: 1546 Volts

Corriente rotor: 1430 Amperes

Potencia: 3600 KW

Velocidad: 1191 RPM

Frecuencia: 60 Hertz, 3 fases

Peso: 12378 Kg.

Reductor planetario:

Marca: MAAG-ZAHNRAEDER AG

Modelo: CPU - 30

Velocidad entrada: 1190 RPM

Velocidad salida: 15.5 RPM

Potencia: 3600 KW

Relación: 76.7:1

En este tipo de transmisión la velocidad de salida del reductor planetario corresponde a la velocidad a la que gira el molino, en este caso el molino gira a 15.5 RPM.

En la figura 6.3 se ilustran los tipos de transmisión central existentes para los molinos tubulares.

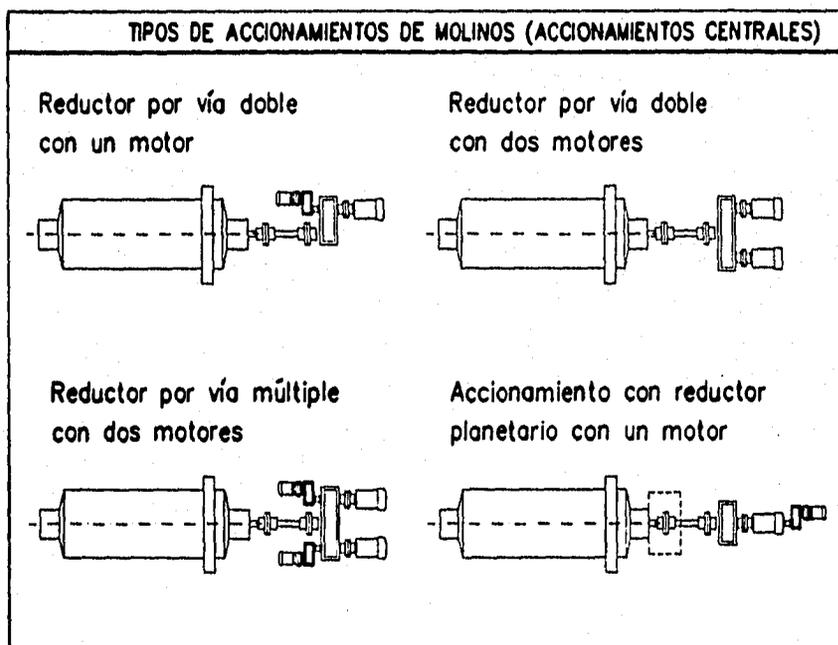


Fig. 6.3.- Tipos de transmisión central para molinos tubulares.

### 6.3.- Transmisión sin reductor.

Los molinos tubulares grandes pueden ser movidos con motores eléctricos de baja frecuencia, los llamados motores de anillo o motores envolventes. El motor de anillo se encuentra colocado directamente alrededor de la coraza del molino, es decir que no se necesita ningún tipo de reductor.

Para la velocidad requerida por los molinos tubulares, de 13 - 15 RPM, se usan motores de velocidad ajustable con una frecuencia de 5 - 6 Hertz.

La transmisión de los molinos tubulares sin reductor puede realizarse de dos formas diferentes:

El motor puede estar apoyado en un cabezal extendido.

El motor puede ser dispuesto directamente en la coraza del molino.

El motor de anillo puede ser acelerado desde el reposo hasta la velocidad de servicio. Por un tiempo limitado, el molino puede ser girado a velocidad muy baja con la finalidad de posicionar los registros de inspección o para posicionarlo correctamente para cuando se tenga que cambiar alguna placa del blindaje.

En la figura 6.4 se ilustran los dos arreglos típicos para la transmisión de potencia de molinos tubulares sin reductor de velocidad.

Las ventajas principales del motor de anillo en comparación con los tipos de transmisión convencional son las siguientes:

- a).- Velocidad ajustable del molino.
- b).- Ninguna parte de desgaste en la transmisión del molino.
- c).- No se requiere lubricación costosa.
- d).- Bajos costos de mantenimiento mecánico.
- e).- Diseño más flexible de la sala del molino.

Desventajas principales:

- a).- Baja eficiencia de transmisión (91 -92 %).
- b).- Altos costos de inversión para unidades pequeñas.
- c).- Carga extra en el cojinete del molino debido al peso del motor (aproximadamente 15 % )
- d).- Susceptible a fallas eléctricas.

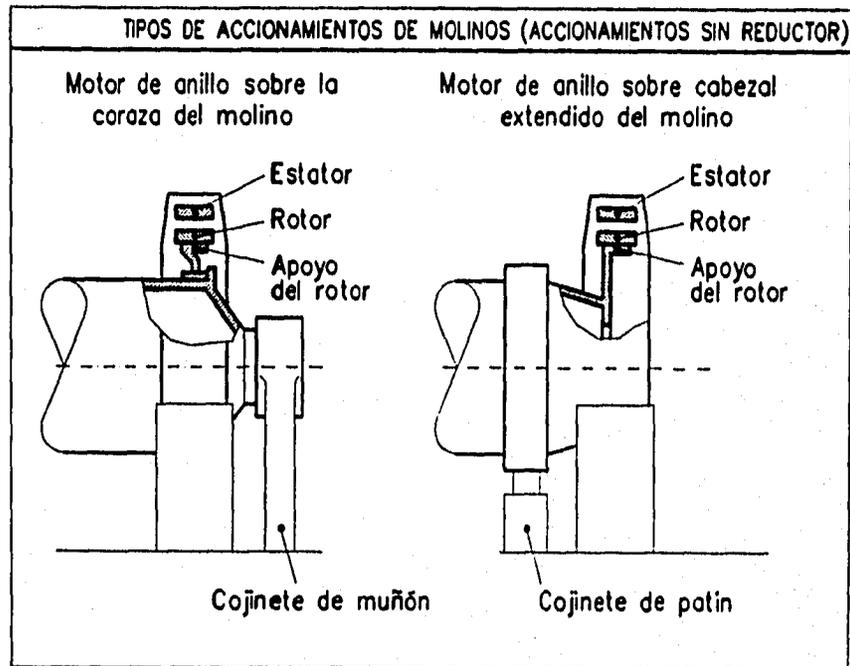


Fig. 6.4 Tipos de transmisión sin reductor para molinos tubulares.

#### 6.4.- Criterios de selección para transmisión de molinos tubulares.

Para hacer una selección correcta del tipo de transmisión de molinos tubulares deben considerarse los siguientes aspectos:

- a).- Costos de inversión.
- b).- Costos de operación (por ejemplo, eficiencia del reductor).
- c).- Costos de mantenimiento (Mano de obra y partes de repuesto).
- d).- Requisitos del proceso (Diseño de la descarga del molino).
- e).- Disponibilidad y estabilidad.
- f).- Requerimiento de espacio.

Las instalaciones nuevas de molinos tubulares tienden hacia el uso de transmisiones Combiflex por piñón doble o de transmisiones centrales por medio de un reductor planetario.

La comparación de ambos tipos muestran que la transmisión por reductor planetario tiene una buena eficiencia, pero requiere elevados costos de inversión, mientras que el combiflex presenta una baja eficiencia, pero a cambio de esto tiene un costo de inversión bajo.

Estos dos tipos de transmisión para molinos tubulares permiten la instalación de potencias motrices altas (10 MW).

La siguiente tabla muestra las características principales para transmisiones de molinos tubulares:

Transmisión del molino		Rango de potencia (MW)	$\eta$ 500 a 2500 KW 1	$\eta$ > 2500 KW 1	Costo de inversión 2	Costo de operación 3	Costos de mto. de espacio 4	Requerimiento de espacio
Corona dentada	Piñón sencillo	0.1 - 4	93	93.5	B	A	A	M
	Piñón doble	1 - 5		92.5	B	A	A	M
	Piñón doble (Combiflex)	2 - 10	92	92.5	B - M	A	B	B
Transmisión central	Vía doble	1 - 3			M	M	M	M
	Vía múltiple	1.5 - 10	93	93.5	M	M	M	A
	Reductor Planetario	3 - 10	94	94.5	A	B	B	B
Sin reductor	Motor de anillo	> 4.5		92	A	A	B - M	B

Leyenda:

B = Bajo

M = Medio

A = Alto

$\eta$  = Eficiencia

1 = Eficiencia mecánica y eléctrica considerada.

2 = Transmisión incluyendo molino tubular

3 = Energía eléctrica y lubricación

4 = Personal y partes de repuesto.

## 7.- MANTENIMIENTO DE MOLINOS TUBULARES.

Los molinos de cemento y de crudo pertenecen a las instalaciones claves de toda planta cementera, por lo tanto es propósito primordial de los departamentos de mantenimiento y producción operar el molino con una alta utilización y disponibilidad.

La disponibilidad de una instalación o de una máquina está determinada por los siguientes criterios principales:

### Fiabilidad técnica.

Depende principalmente del diseño, la calidad de fabricación y el costo del equipo.

### Mantenibilidad.

La rapidez y facilidad con la cual pueden ejecutarse las actividades de mantenimiento para ayudar a prevenir malos funcionamientos o para corregirlos si ocurren.

### La manera en la cual se ejecuta el mantenimiento.

Esto incluye el sistema de mantenimiento, la organización, la infraestructura del mantenimiento, la capacidad del grupo de mantenimiento, etc.

Para la fiabilidad técnica y la mantenibilidad, el fabricante es el principal responsable, sin embargo, la mantenibilidad puede ser influenciada o mejorada por el departamento de mantenimiento. Por lo tanto este departamento es responsable por el mantenimiento total.

## 7.1.- Daños típicos en molinos tubulares.

La práctica a demostrado que en la mayoría de los elementos importantes de los molinos tubulares, ocurren fallas o daños, los cuales pueden ser simples o bastante graves, en este último caso significa el paro del equipo por largo tiempo. En la tabla siguiente se enlistan los elementos de los molinos tubulares donde se presentan la mayoría de los daños.

ELEMENTO DEL MOLINO	FALLAS O DAÑOS
Coraza del molino	Grietas o fisuras, desgaste, deformación.
Extremos de fundición y muñón del molino	Grietas o fisuras, desgaste, deformación, fractura/soltura de tornillos de fijación.
Brida del molino	Grietas o fisuras, desgaste, deformación, fractura/soltura de tornillos de fijación.
Cojinete del muñón	Grietas o fisuras, desgaste.
Cojinete de zapata deslizante	Grietas o fisuras, desgaste, desplazamiento.
Anillo de zapata deslizante	Grietas o fisuras, deformación y desgaste.
Corona y piñón	Daños en las superficies de las bridas, grietas o fisuras, fracturas, desgaste, deformación, soltura de tornillos de fijación, vibración.
Reductores de velocidad (caja de engranes)	Daños en los dientes de los engranes, fallas en los rodamientos, grietas o fisuras en los engranes, vibraciones excesivas.
Placas de desgaste y levantadoras	Grietas, fracturas, desgaste, deformación, soltura o rotura de tornillos de fijación.
Diafragmas	Grietas, fracturas, desgaste, deformación, soltura o rotura de tornillos de fijación.
Chutes de alimentación, descarga.	Desgaste.
Sellos	Desgaste, desplazamiento.
Unidad de lubricación	Taponamiento, fugas, corrosión, desplazamiento de las espreas, falta de lubricante.
Cimientos o fundamentos	Grietas, vibración.

## 7.2.- Inspecciones de mantenimiento realizadas a los molinos de cemento.

A continuación se enlistan las actividades que se realizan a los diferentes elementos de los molinos tubulares.

- a).- Cuerpo del molino.
- b).- Elementos internos.
- c).- Muñones o extremos del molino.
- d).- Cojinete de muñón.
- e).- Corona - piñón
- f).- Guarda de la corona y piñón.

g).- Unidad de lubricación por rociado.

h).- Mando principal y estación de lubricación.

Inspecciones para el cuerpo del molino:

ELEMENTO	INSPECCION	FRECUENCIA
Coraza del molino	Revisión visual del área de entrada hombre, superficie exterior total, grietas, ranuras, deformaciones.	Cada 6 meses
	Pruebas de partículas magnéticas o de líquidos penetrantes en soldaduras.	Cada año
	Revisión visual de la superficie interna, grietas, ranuras, desgaste.	Cuando se cambie el blindaje.
Brida o cabezal del molino	Revisión visual de la superficie exterior, grietas, ranuras.	Cada 6 semanas.
	Revisión total de la superficie interna, grietas, ranuras, desgaste.	Cuando se cambie el blindaje.
	Prueba de partículas magnéticas o de líquidos penetrantes del área de soldadura, área de radios	Una vez al año.

Inspecciones para los elementos internos.

ELEMENTO	INSPECCION	FRECUENCIA
Blindaje de desgaste del muñón.	Revisar funcionamiento de los elementos de desgaste, fijación.	Cada 3 meses o a inspecciones internas.
Cámara de secado	Revisión de elevadores, placas de desgaste, fijación y taponamiento de parrilla.	Cada 2 semanas.
Diafragma	Revisar desgaste, grietas, ranuras, fijación de tornillos, taponamiento y ancho de las ranuras.	Cada 2 semanas
Blindaje del molino	Revisión de desgaste, grietas, fracturas y fijación.	Cada 2 semanas.
Registro entrada de hombre	Colocación correcta, revisión de fugas, desgaste, grietas.	Cada 3 meses o a inspecciones internas.
Criba	Revisar desgaste, sujeción y taponamiento.	Cada 2 semanas.
Blindaje de desgaste del muñón de descarga.	Revisar funcionamiento de los elementos de desgaste, fijación.	Cada 3 meses o a inspecciones internas.

## Inspecciones para los extremos de los molinos.

ELEMENTO	INSPECCION	FRECUENCIA
Extremos de fundición del molino.	Revisión visual a la superficie completa por grietas, ranuras.	Cada 6 meses.
	Prueba de partículas magnéticas en área de radios, placa interna de desgaste y barrenos.	Una vez al año.
	Inspección visual: Área axial del cojinete, área de radio del muñón, ranuras, grietas.	Una vez al mes, o cuando se presente una alta temperatura en el cojinete.
Tornillos de fijación	Revisión visual: Que estén bien apretados y completos.	Una vez al mes.

## Inspecciones para cojinetes de muñón.

ELEMENTO	INSPECCION	FRECUENCIA
Bomba de engranes	Checar funcionamiento, ruido, temperatura del motor, fugas de aceite.	Cada semana.
Filtro de aceite.	Hacer limpieza o cambiar el elemento.	Cada 6 meses o cuando este sucio.
Indicador de flujo.	Revisar operación correcta.	Una vez al año.
Bomba de lubricación de alta presión.	Revisar temperatura del motor, funcionamiento, ruido, presión del aceite y manómetro.	Una vez cada semana.
Sello de tleltro.	Revisar estado del sello, apriete de los tornillos y lubricación.	Una vez al mes.
Chumacera y cojinete.	Revisar el depósito de aceite por presencia de agua y sedimento.	Una vez al mes.
	Revisar nivel del aceite.	Cada 2 semanas.
	Revisar desgaste del cojinete.	Una vez al año.
	Limpieza de las mirillas de inspección.	Cada cambio de aceite.
Agua de entriamiento.	Revisar flujo y temperatura del agua que circula por el entriador y la chumacera.	Una vez cada semana.
Temperatura del cojinete.	Checar la lectura de temperatura en el tablero de control.	Cada hora.
	Checar funcionamiento del termopar.	Una vez cada 3 meses.

## Inspecciones para corona - piñón.

INSPECCION	FRECUENCIA
Revisar visualmente el contacto de los dientes durante la operación normal con lámpara estroboscópica. chechar vibración a tacto, fugas de grasa por la cubierta y ruidos anormales en la transmisión.	Diario.
Medir con pirómetro la temperatura del flanco de los dientes del piñón durante la operación normal. Revisar el sellado correcto de las puertas de inspección.	Una vez cada semana.
Medición de la velocidad de vibración (in/s) con instrumento IRD 810. Inspeccionar visualmente los flancos de los dientes en cuatro posiciones con el equipo parado.	Una vez al mes.
Con el equipo parado, checar la medición del contacto de los dientes y del juego en cuatro posiciones. Revisar que las guardas no tengan partes sueltas y que estén en posición correcta.	Una vez cada 6 meses.
Medición de la vibración por medio de un análisis de frecuencia. Medición del contacto, juego y perfil del diente en ocho posiciones. Medición del claro de la junta de la corona. Medición de niveles en los fundamentos o bases. Medición de la alineación del acoplamiento. Inspección del anillo de la corona y el montaje. Revisar el apriete del piñón contra la flecha. Revisar chumaceras de soporte de la flecha del piñón. Revisar el apriete de la tornillería en bridas, juntas, bases.	Una vez al año.

## Inspecciones para la carcaza de la corona y el piñón.

ELEMENTO	INSPECCION	FRECUENCIA
Sello de fieltro.	Revisar desgaste, fugas de grasa y apriete de tornillos.	Cada semana.
Placa de montaje.	Revisar para evitar fugas de grasa y la sujeción del sistema de lubricación por rociado.	Cada semana.
Carcaza.	Revisar apriete de los tornillos, vibración y ajuste.	Cada semana.
Puertas de inspección.	Revisar que no existan fugas de grasa.	Cada semana.

Inspecciones para unidad de lubricación por rociado.

INSPECCIONES	FRECUENCIA
Revisar que las boquillas de las espreas esten libres de contaminantes o suciedad.	Diario.
Comprobar el patrón correcto de rociado.	Diario.
Revisar el estado de la lubricación en los flancos de los dientes de corona y piñón.	Una vez cada semana.
Revisar y limpiar el filtro de grasa.	Una vez cada semana.
Limpieza exterior del equipo de rociado.	Una vez cada semana.
Revisión y limpieza de filtros de aire comprimido y de los separadores de agua.	Una vez cada semana.
Revisar funcionamiento de los instrumentos de control y señalización del equipo de rociado.	Una vez al mes.
Revisar el tiempo de inyección de grasa y el intervalo de reposo.	Una vez al mes.
Revisar y pesar el contenido de lubricante en el tambor (llevar estadística diaria de consumo).	Diario.
Retirar lubricante usado y contaminado de la guarda, especialmente en el área del piñón.	Una vez cada semana.
Inspección de los componentes mecánicos del mando de la bomba del tambor.	Una vez al año.
Revisar fugas, funcionamiento de las espreas y válvulas distribuidoras de grasa.	Una vez cada semana.
Inspección del compresor (de acuerdo a las instrucciones del fabricante).	Cada 3 meses.

## Inspecciones para el mando principal y su estación de lubricación.

ELEMENTO	INSPECCION	FRECUENCIA.
Cojinete móvil	Revisar nivel de aceite, funcionamiento de la lubricación, ruido y vibración.	Una vez cada semana.
Cojinete fijo.	Revisar nivel de aceite, funcionamiento de la lubricación, ruido y vibración.	Una vez cada semana.
Motor y bomba de lubricación de cojinetes.	Revisar ruido, vibración y temperatura del motor, lectura del manómetro.	Una vez cada semana.
Filtro de aceite.	Checar funcionamiento, revisar por fugas y limpiarlo.	Una vez cada semana.
Indicador de flujo.	Revisar funcionamiento.	Una vez cada semana.
Tubería y depósito de aceite.	Limpieza y revisión por fugas de aceite en el depósito.	Una vez cada semana.
Flecha de mando.	Apriete de tornillos, condiciones de los acoplamientos y de la flecha, guarda de la flecha.	Cada 6 meses.
Motores del mando principal y mando auxiliar.	Checar temperatura del motor, condición de los rodamientos con IRD 810, ajuste y fijación de los motores.	Cada 3 meses.
Reductores del mando principal y mando auxiliar.	Condición del flanco de los dientes.	Cada 6 meses.
	Condición de los rodamientos.	Cada 3 meses.
	Checar vibración con IRD 810.	Cada semana.
	Checar ruidos anormales.	Diario.
	Revisar nivel de aceite.	Una vez al mes.
Muestrear aceite para análisis.	Cada 6 meses.	
Estación de lubricación del reductor.	Limpieza y revisión por fugas de aceite.	Cada 3 meses.
Motor y bomba.	Checar temperatura del motor, ruido, fugas, estado de los coples y condición de los rodamientos.	Cada 3 meses.
Filtro duplex de aceite.	Checar funcionamiento, revisar por fugas y limpieza.	Una vez al mes.
Válvula de sobreflujo, indicador de flujo.	Checar funcionamiento, revisar por fugas de aceite.	Cada 3 meses.
Enfriador de aceite.	Checar funcionamiento, revisar por fugas, limpieza de la tubería interna de enfriamiento.	Una vez al mes.
Indicador de presión, manómetro	Revisar funcionamiento y calibración.	Cada 3 meses.

## Inspecciones para la estación de llenado de lubricante.

ELEMENTO	INSPECCION	FRECUENCIA
Bomba de tambor	Checar el funcionamiento correcto, revisar las conexiones por fugas de grasa.	Una vez cada semana.
Atomizador de aceite.	Revisar las conexiones de las tuberías en caso de fugas.	Diario.
Electroválvula	Revisar las conexiones de las tuberías en caso de fugas.	Diario.
Válvulas reductoras de presión.	Checar que la presión en el manómetro sea de 4 kg/cm <sup>2</sup> .	Una vez al mes.
Separador de agua.	Drenar el agua acumulada y limpiar.	Diario.
Interruptor de presión.	Ajuste de presión a 7 Kg/cm <sup>2</sup>	Una vez al mes.
Filtro de alta presión.	Hacer limpieza al filtro.	Una vez al mes.
Compresor.	Checar nivel de aceite, funcionamiento y limpieza a los filtros de admisión.	Cada semana.

### CONCLUSIONES.

El presente trabajo pretende proporcionar de una manera condensada, los conocimientos necesarios para poder entender la importancia de los sistemas de molienda con molinos tubulares dentro de la industria cementera de nuestro País.

Esta información es el resultado de la recopilación de diversas fuentes informativas, la mayoría procedentes de cursos y manuales impartidos y editados por el consorcio cementero de nacionalidad Suiza "HOLDERBANK", otra fuente de información importante fueron los catálogos y folletos proporcionados por los diferentes fabricantes de equipo para la industria del cemento a nivel mundial, tales como: Polysius, Fuller, FLS.

El contenido del presente trabajo adquiere una gran importancia desde el punto de vista del proceso de molienda ya sea de crudo o de cemento, ya que proporciona las herramientas y conocimientos necesarios para comprender el comportamiento de un molino tubular en operación normal y con plena capacidad de producción, a la vez que indica las acciones que se deben tomar al presentarse problemas anormales dentro del molino.

Por los resultados obtenidos durante el desarrollo del presente trabajo, se pueden hacer las siguientes conclusiones:

1.- Para poder entender la importancia de un molino tubular dentro del proceso de fabricación del cemento, es necesario conocer los diferentes pasos o transformaciones que van teniendo los diferentes tipos de materiales o subproductos generados en cada área del proceso, hasta la obtención del producto final que es el cemento.

2.- En la descripción de los diferentes sistemas de molienda, es de gran importancia entender su funcionamiento por que esto influye directamente a la hora de seleccionar un sistema de molienda adecuado a determinadas características de los materiales que deben ser molidos. Esto también es importante a la hora de realizar reajustes o modificaciones que puedan acarrear trastornos al sistema existente.

3.- Las fórmulas y cálculos tratados en este tema sirven de guía para hacer comprobaciones de rutina para molinos tubulares en operación, tales parámetros a controlar pueden ser: Consumo de energía del motor del molino, carga de bola en los compartimientos del molino, los cuales sirven para determinar el consumo específico de energía eléctrica consumida por cada tonelada de producto que se obtiene.

4.- En la operación normal de un molino tubular es de gran importancia la interacción existente entre los elementos mecánicos de los molinos tubulares, los cuales son externos e internos, ya que estos últimos desempeñan un papel muy importante en la eficiencia del equipo, en caso de presentarse una disminución en la eficiencia del equipo, se deben tomar las medidas de corrección necesarias, las cuales pueden ser desde: Clasificación y cambio de la carga de bola, sustitución del blindaje de la coraza del molino, sustitución de las placas de blindaje del cabezal y el cambio de las placas ranuradas del diafragma central y del diafragma de descarga.

5.- La importancia que tiene la implementación de un programa de mantenimiento predictivo y preventivo, para poder tener al molino en óptimas condiciones de operación para lograr su producción máxima con la mejor calidad y al más bajo costo de producción.

6.- Las comprobaciones finales con respecto a la eficiencia del molino deberán ser realizadas por el responsable del proceso y el departamento de control de calidad para poder determinar si el producto obtenido del molino cumple con las guías de calidad vigentes.

**TERMINOLOGIA EMPLEADA**

**ARCILLA.**- Sustancia mineral empapada en agua, impermeable y plástica, formada principalmente por silicato aluminico.

**ARENA SILICA.**- Polvo duro y granuloso, compuesto generalmente de partículas de sílice impuras.

**BLINDAJE.**- Revestimiento con chapas o placas metálicas de protección.

**CALCINACION.**- Acción de calcinar o quemar.

**CALCINAR.**- Someter a fuego vivo la caliza, y por extensión, cualquier otro mineral.

**CALIZA.**- Carbonato de calcio natural.

**CEMENTO PORTLAND.**- Conglomerado hidráulico que resulta de la pulverización del clinker frío, a un grado de finura determinado, al cual se le agrega sulfato de calcio natural.

**CEMENTO COMPUESTO.**- IDEM al anterior al cual se le agregan aditivos tales como la puzolana y la escoria.

**ESCORIA.**- Sustancia vítrea que sobrenada en los metales fundidos.

**GRANULOMETRIA.**- Tamaño de los fragmentos detriticos de las rocas sedimentarias y de los sedimentos.

**MOLIENDA.**- Cantidad de una cosa que se muele de una vez.

**MOLTURABILIDAD.**- Comportamiento de resistencia contra la reducción en tamaño de un material en un proceso de molturación.

**PUZOLANA.**- Roca volcánica pulverulenta que sirve para hacer cemento.

**TRITURACION.**- Proceso de desmenuzar a quebrar una cosa dura.

**YESO.**- Sulfato de calcio hidratado que, molido y amasado con agua, se endurece rápidamente.

## ABREVIATURAS USADAS.

a	Ancho de ranura para diafragmas intermedios.
b	Ancho de ranura para diafragmas de descarga.
C	Carbono
Cm /g	Centímetro cuadrado por gramo.
Cr	Cromo.
Di	Diámetro interior.
Dn	Diámetro nominal.
f	En función de ...
°f	Grado de llenado.
g/t	Gramos por hora.
g/KWh	Gramos por Kilowatt hora.
g/t	Gramos por tonelada.
HRc	Dureza Rockwell "c".
KW	Kilowatts
KWh/t	Kilowatts hora por tonelada.
Li	Longitud total.
L1	Longitud del compartimiento I.
L2	Longitud del compartimiento II.
m/s	Metros por segundo.
Mn	Manganeso.
Mw	Megawatts.
%R 90 µm	Por ciento de retenido en malla de 90 micras.
%R 200 µm	Por ciento de retenido en malla de 200 micras.
R	Retenido.

RPM	Revoluciones por minuto.
Si	Silicio.
t/h	Toneladas por hora.
t/d	Toneladas por día.
t	Toneladas.
$\phi$	Diámetro.
$\lambda$	Relación longitud a diámetro.
$\eta$	Eficiencia.

**BIBLIOGRAFIA.**

- 1.- Cement Data Book.  
Walter H. Duda.  
Bauverlag GmbH, Wiesbaden Berlin.
  
- 2.- A. F. Taggart.  
Handbook of Mineral Dressing.
  
- 3.- Manual de Molinos.  
J. Decasper      Reporte VA 80-4738-S  
Holderbank, Suiza.
  
- 4.- Design and Operation Problems of Mill and Kiln Girth Gear Drives.  
B. Saxer      Reporte VA 80-4781-E  
Holderbank, Suiza.
  
- 5.- Manuales Técnicos Magotteaux.  
Magotteaux de México S. A. de C. V.
  
- 6.- Sistemas de Molienda.  
H. P. Fish      Reporte VA 93-4013-S  
Holderbank, Suiza.
  
- 7.- Curso de Cemento 1995 (Ramos Arizpe Coahuila, México).  
M. Burki      Reporte VA 95-4313-S  
Holderbank, Suiza.
  
- 8.- Diseño de Elementos de Máquinas.  
V. M. Falres  
Montaner y Simón S. A.  
Barcelona, España.
  
- 9.- Manual Tecnológico del Cemento.  
Antonio Sarabia.  
Editores Técnicos Asociados.  
Barcelona, España.