

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I)

4.1. Introducción.

La molienda es la última etapa del proceso de conminución o fragmentación para la reducción del tamaño de las partículas.

Los tamaños de salida de los productos de esta etapa, según **Hukki** (ETSIMV, 1996), serán los siguientes:

Tabla 4.1: Clasificación del tipo de molienda.

Tipo de proceso	Tamaño de salida
Molienda gruesa	$\cong 1 \text{ mm}$
Molienda fina	$\cong 100 \mu\text{m}$
Molienda ultrafina	$\cong 10 \mu\text{m}$

Se puede encontrar también la siguiente clasificación según el tamaño de salida del producto:

Tipo de proceso	Tamaño de salida
Molienda gruesa	1-2 mm
Molienda media	200-500 μm
Molienda fina	50-100 μm

Tabla 4.2: Otra clasificación del tipo de molienda.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

La fragmentación de las partículas se va a conseguir por medio de la combinación de fuerzas de compresión, cizalladura y abrasión.

La fragmentación del mineral se realiza en el interior de unos equipos cilíndricos rotatorios de acero que se conocen con el nombre de **molinos de rodamiento de carga** (ver figura 4.1) o simplemente **molinos**.

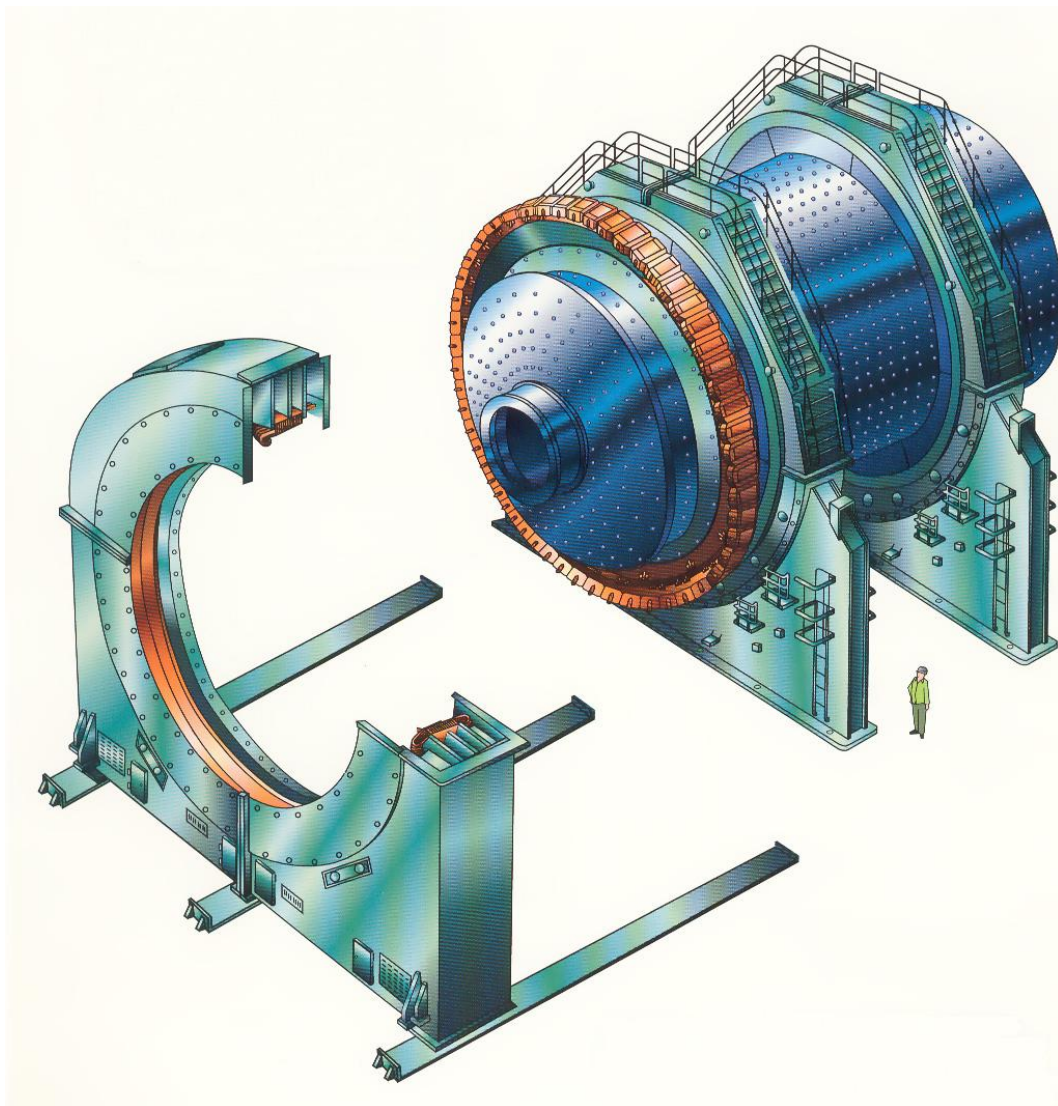


Fig. 4.1: Molino de 6.5 m de \varnothing x 9.7 m de longitud y 8.1 MW
(Cortesía de Nordberg).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Estos molinos llevan en su interior una mezcla de mineral a fragmentar junto con cuerpos molturantes o moledores que pueden ser barras, bolas, guijarros de sílex o incluso fragmentos gruesos del propio mineral.

Por lo tanto podemos realizar una primera clasificación de los diferentes tipos de molinos según el tipo de **cuerpos molturantes** que emplean:

- Molinos de barras.
- Molinos de bolas.
- Molinos autógenos (AG) o Semiautógenos (SAG).
- Molinos de pebbles (cuerpos no metálicos; naturales o fabricados).

Estos equipos pueden trabajar de **forma discontinua** y de **forma continua**.

- **Forma discontinua:** cuando el molino se recarga de material y se cierra para hacerlo girar, terminada esta operación, el molino se abrirá para a continuación separar el mineral de los cuerpos molturantes. Esta forma de trabajar se utiliza en molinos pequeños de laboratorio.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

- **Forma continua:** El molino se alimenta de forma continua por un extremo y simultáneamente se va descargando el mineral molido por el otro extremo (o por el centro según el molino). La operación únicamente se detendrá para trabajos de mantenimiento o recarga de los cuerpos molidores. En la industria minera y producción de áridos, se trabaja siempre de forma continua.

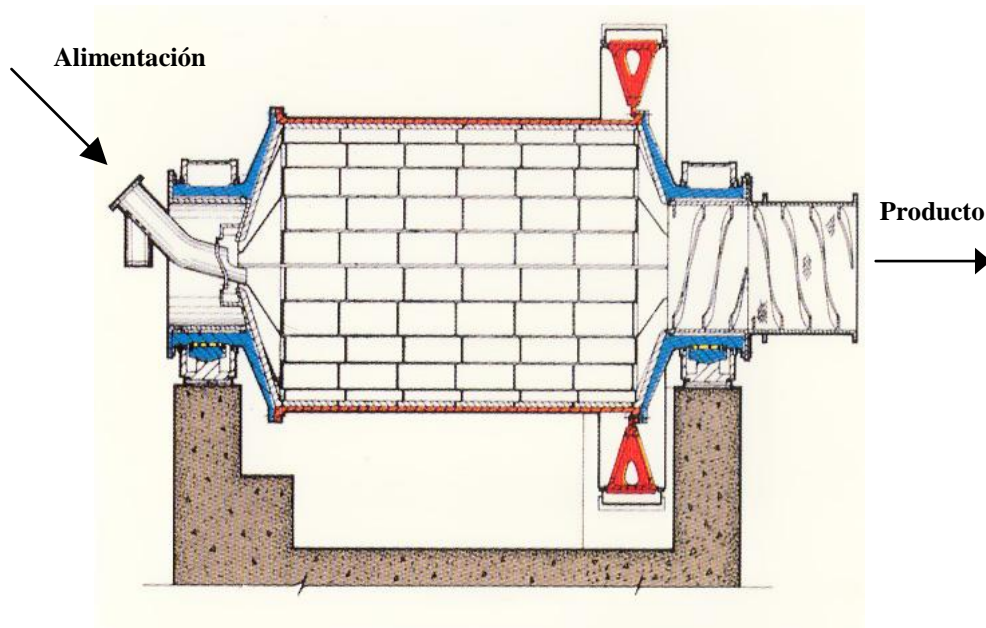


Fig. 4.2: Molino para trabajo en continuo.
(Cortesía de Fuller-Traylor).

Estos equipos pueden trabajar en **circuito abierto** o **circuito cerrado**; se dispone una criba o clasificador a la salida del producto que devuelva los sobretamaños.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

El circuito cerrado se emplea en molienda con bolas o autógena. En molienda con barras se emplea el circuito abierto generalmente.

La molienda se puede realizar por **vía seca** o por **vía húmeda**:

Vía seca: Molienda de materiales prácticamente **secos** (2 % de agua) o con una determinada humedad (**30 %** de agua).

Vía húmeda: Molienda de materiales que forman una pulpa (**30-300 %** de agua).



Fig. 4.3: Molino de barras (Foto propia).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

**Factores que determinan el tipo de molienda:
(molienda húmeda o molienda seca)**

- El tipo de etapa siguiente (húmeda o seca).
- La disponibilidad de agua.
- La molienda húmeda precisa menos energía por tonelada de mineral tratado (la humedad disminuye la resistencia de los fragmentos).
- La clasificación en medio húmedo exige menos espacio que la clasificación en seco (bombas, tubos, etc.).
- La molienda por vía húmeda no necesita captadores de polvo y existe menos calentamiento de los equipos.
- La molienda por vía húmeda tiene un mayor desgaste de cuerpos moledores y blindajes que la molienda por vía seca (principalmente debido a la corrosión), hasta 6 u 8 veces superior.
- Existen sustancias que reaccionan con el agua, produciéndose cambios fisico-químicos (clinker del cemento).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).



Fig. 4.4: Boca de salida del producto (Foto propia).



Fig. 4.5: Planta de Molienda (Foto propia).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Cuerpos Moledores:

Estos equipos van a necesitar el empleo de elementos que favorezcan el trabajo de molienda. Estos elementos o cuerpos moledores suelen ser:

Barras: Están fabricadas de acero con alto contenido en carbono. Poseen un alto límite elástico para evitar que se tuerzan las barras evitando que se rompan o se traben con otras barras.

Los molinos de barras se emplean para moliendas más gruesas.

Bolas: Pueden estar fabricadas de acero de fundición, acero forjado y éste puede estar aleado al Cr-Mo, para ser resistentes al desgaste por impacto o aleado con Ni (Ni-hard), para ser resistentes a la abrasión (bolas de acero muy duro).

En ocasiones no son esféricas, sino que toman formas cilíndricas, troncocónicas, etc.

Los molinos de bolas se emplean para moliendas finas.

Propio mineral: Los cuerpos de molienda van a ser el propio mineral (AG) o un porcentaje de mineral y otro de bolas u otro tipo (SAG).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

También se ha llegado a utilizar como cuerpos molturantes **guijarros de sílex** o **porcelana** cuando se pretende evitar la contaminación del mineral a causa del desgaste del acero.

Revestimiento o Blindaje:

El interior del tambor está revestido por piezas intercambiables que forman lo que se denomina el blindaje del molino y deber cumplir las siguientes funciones:

- ⇒ Ser resistente a los impactos y a la abrasión.
- ⇒ Proteger la carcasa del molino contra la corrosión y el desgaste.
- ⇒ Minimizar el deslizamiento entre los cuerpos moledores y el tambor, favoreciendo un adecuado volteo del mineral.

Estos blindajes presentan resaltes o nervios que favorecen el movimiento de la carga del molino (fig. 4.6).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

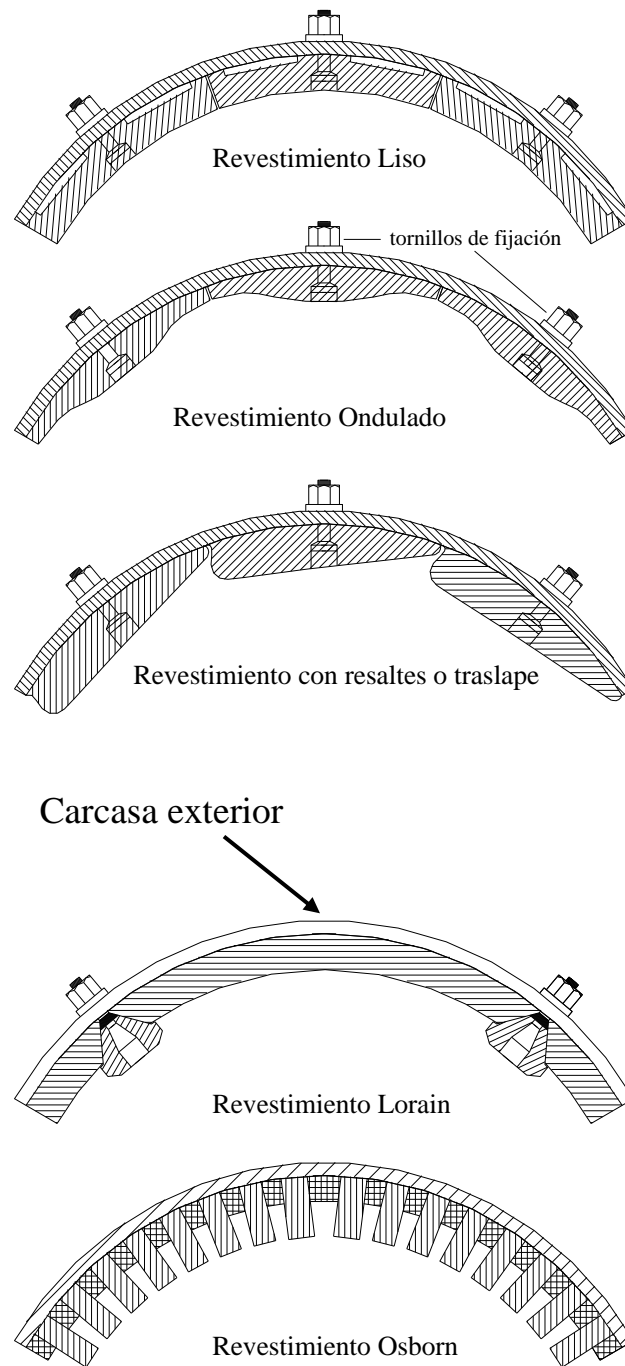


Fig. 4.6: Diferentes diseños de revestimiento

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Estos revestimientos pueden estar fabricados en alguna ocasión de **cerámica**, pero lo habitual es que estén fabricados de **acero fundido** o **acero laminado** debido a sus características resistentes. El empleo de **caucho** también se ha difundido, pero es más adecuado para molinos de bolas que traten mineral muy duro (en aquellos casos donde no se sobrepase los 80°C y no entre en contacto con reactivos de flotación).

4.2. Molinos de barras.

Los molinos de barras, como ya hemos visto anteriormente, son grandes tubos cilíndricos, dispuestos horizontalmente. Están contruidos a base de planchas de acero, protegidas contra el desgaste y la corrosión por revestimientos metálicos intercambiables (Fig. 4.7).

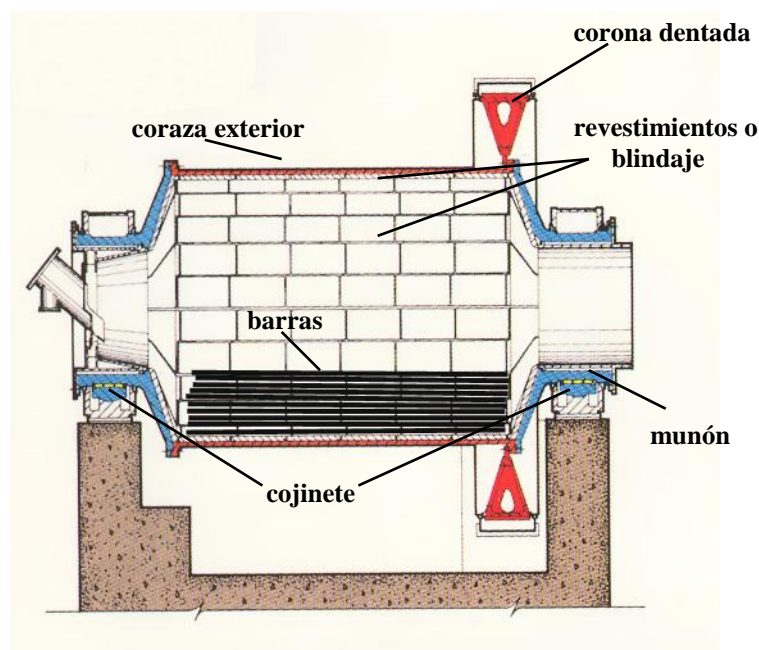


Fig. 4.7: Molino de barras típico (cortesía de Fuller-Traylor).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

La cámara cilíndrica gira alrededor de su eje horizontal apoyada en los extremos sobre unos cojinetes cilíndricos que descansan sobre unos soportes.

Parámetros que caracterizan a un molino de barras:

A continuación vamos a describir una serie de parámetros técnicos que caracterizan a un molino de barras y hay que tener en cuenta para un funcionamiento adecuado:

1. Velocidad Crítica:

Es aquella velocidad de giro mínima alcanzada por el molino, de forma que la fuerza centrífuga creada es suficiente para conseguir que las partículas queden adheridas a los revestimientos del molino.

Es lógico que si queremos moler el mineral; la velocidad a la que gire el molino deberá estar por debajo de dicha velocidad crítica, normalmente viene definida a través de un porcentaje de su velocidad crítica.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

La expresión que nos proporciona el valor de la velocidad crítica, para un molino de barras dado, es la siguiente:

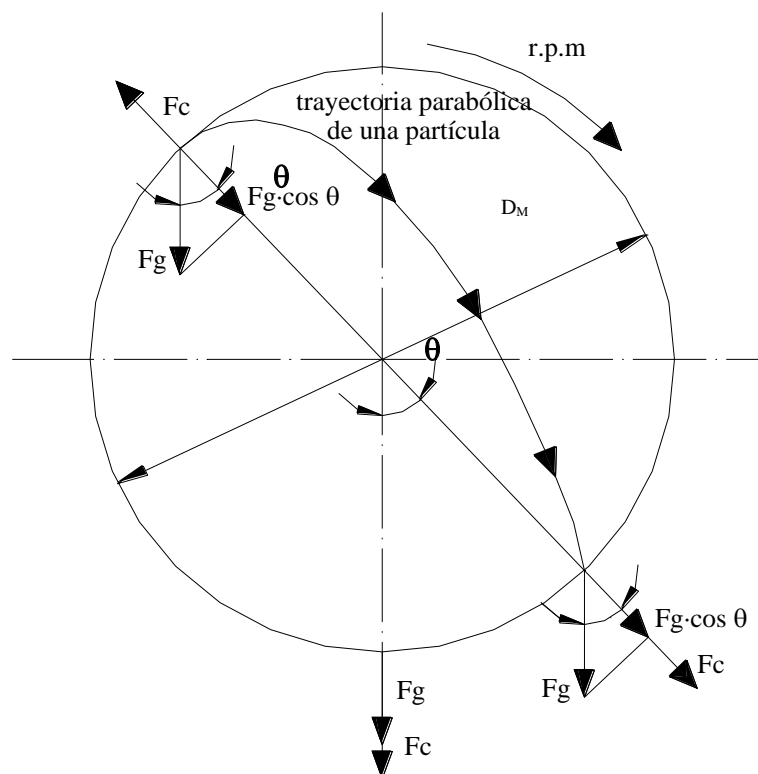
$$V_{crítica} = \frac{42.3}{\sqrt{D_M}} \quad (4.1)$$

Donde:

V = Velocidad crítica, *r.p.m.*

D_M = Diámetro del molino, *m.* (medido entre los revestimientos internos).

La expresión 4.1, ha sido obtenida a través del estudio de la trayectoria seguida por una partícula en el interior de un molino de barras.



BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Los molinos de barras suelen trabajar con velocidades comprendidas entre **62-68 %** de la velocidad crítica.

2. Volumen de la Carga:

Nos indica el volumen que ocupa la carga de barras en el interior del molino, considerando también los huecos vacíos existentes entre las barras y viene expresado en tanto por ciento (%) respecto al volumen total interior.

El volumen de llenado con el molino en reposo (**en vacío**) es menor que cuando el molino esta girando (**en carga**) con la misma carga de barras.

La relación que nos da el volumen de la carga **en vacío** es la siguiente:

$$V.C.(%) = 113 - 126 \cdot \frac{H_c}{D_M} \quad (4.2)$$

Siendo:

- H_c = Distancia interior máxima entre la parte superior del revestimiento y la parte superior de la carga en reposo.
- D_M = Diámetro interior del molino.

Los molinos de barras trabajan con un grado de llenado comprendido entre en **35-40 %**.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

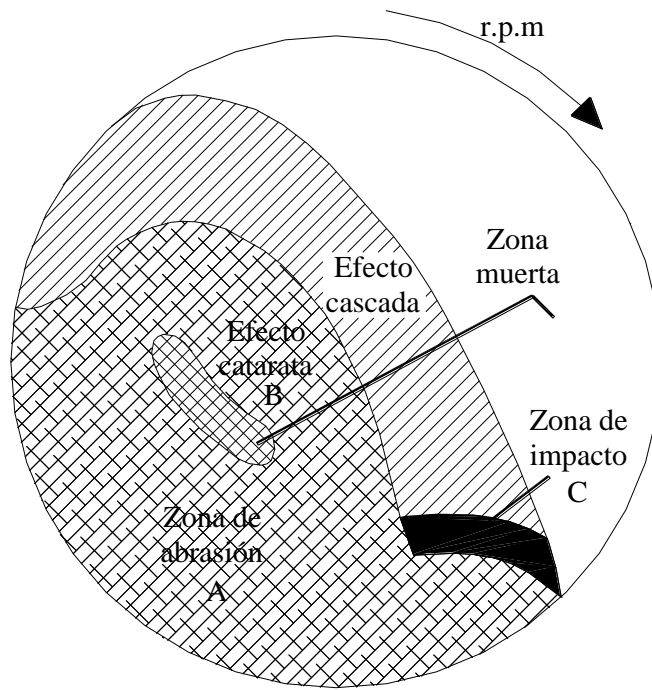


Fig. 4.8: Comportamiento de la carga de barras en un molino en carga.

3. Tamaño de Alimentación:

El tamaño óptimo de alimentación según Allis Chalmers lo podemos obtener mediante la siguiente expresión:

$$D_{80} = 16000 \cdot \sqrt{\frac{13}{w_i}} \quad (4.3)$$

D_{80} = Abertura de la malla por la que pasa el 80 % de la alimentación (micras).

w_i = Índice de Bond.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

4. Tamaño del Producto:

Según Nordberg:

Tamaño máximo producido = 4.7 mm.

Tamaño mínimo producido = 0.5 mm.

Según SIM:

Tamaño normal producido = 1-2 mm.

Tamaño mínimo producido = 0.5 mm (c.a.)

Tamaño mínimo producido = 0.3 mm (c.c.)

5. Cociente de reducción:

Según Bond: Los límites son **12-20:1**, normal **16:1**.

Según SIM:

20-25:1 en circuito abierto (c.a.)

40-50:1 en circuito cerrado (c.c.)

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

6. Relación entre el Diámetro y la Longitud:

Para impedir que las barras se crucen, los molinos de barras se construyen de forma que la relación existente entre el diámetro (D_M) y la longitud (L) del molino no sea inferior a 1.25:

Para molinos pequeños ($\varnothing < 1.5$ m): $L = 2-2.5 \cdot \varnothing$

Para molinos grandes: $L = 1.5-2 \cdot \varnothing$

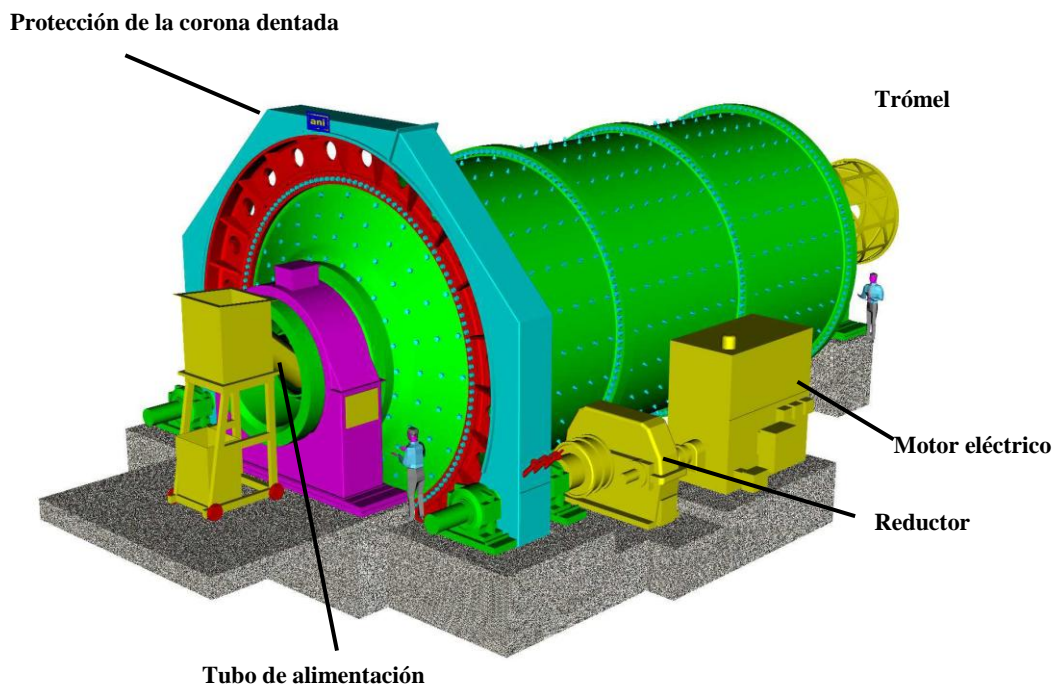


Fig. 4.9: Molino de barras con doble accionamiento lateral (Cortesía de ANI Mineral Processing).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

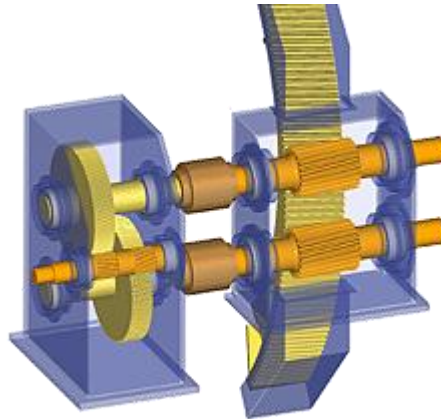


Fig. 4.10: Ataque directo a la corona dentada por un doble piñón (Cortesía de ANI Mineral Processing).

7. Longitud de las barras:

La longitud del molino medida interiormente entre revestimiento debe ser mayor que la longitud de las barras en un valor comprendido entre 10 y 15 cm.

8. Número de Elevadores:

El número de elevadores por círculo para un molino de barras es:

$$N^{\circ} = 6.6 \cdot D_M \text{ (m)} \quad (4.4)$$

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Clasificación en función de la descarga y Aplicaciones:

La clasificación de los molinos de barras, según el tipo de alimentación y descarga es la siguiente:

Molino de descarga por rebose

Trabajo en circuito cerrado para producir tamaños comprendidos entre 0.3-0.8 mm.

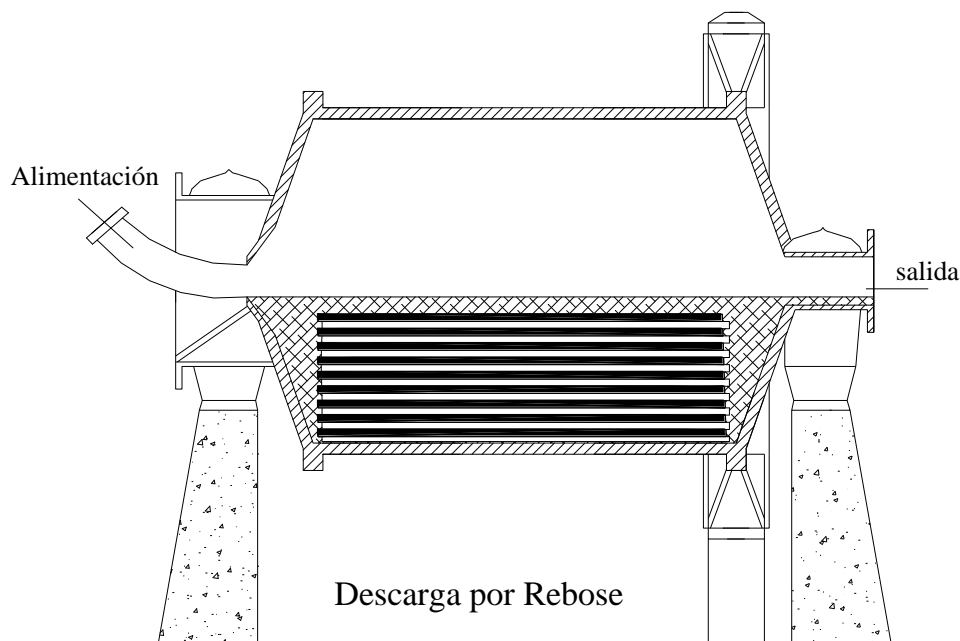


Fig. 4.11: Molino de descarga por rebose alimentado con tubo.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Molino de descarga periférica extrema

Se emplea en circuito abierto para producir tamaños máximos de 1-3 mm y en circuito cerrado para obtener tamaños máximos de 0.4-1 mm.

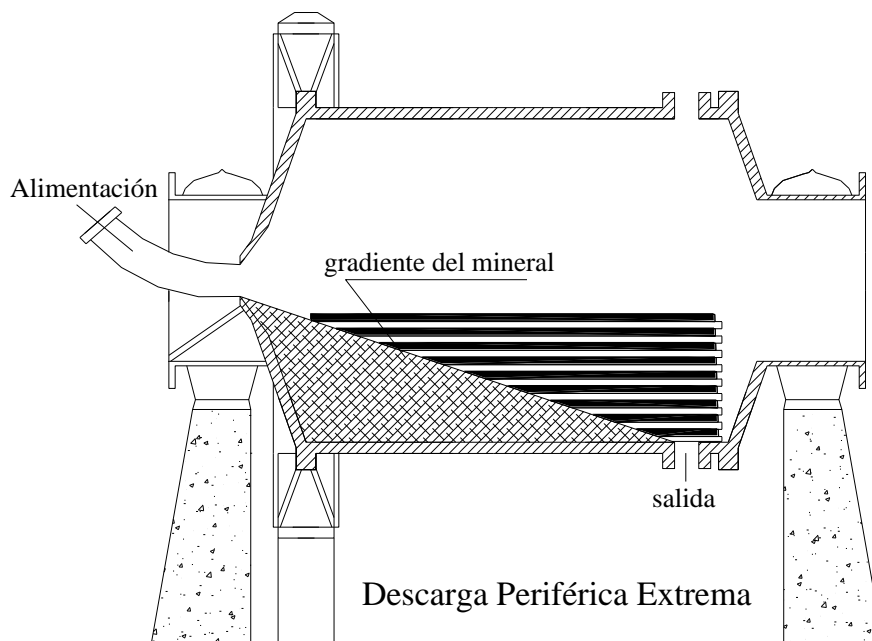


Fig. 4.12: Molino de barras con descarga periférica.

La descarga se realiza gracias a la abertura de rejillas perimetrales.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Molino de descarga periférica central

Se alimentan mediante tubos por los dos extremos y van a trabajar, generalmente en circuito abierto para obtener un tamaño máximo de 5-3 mm.

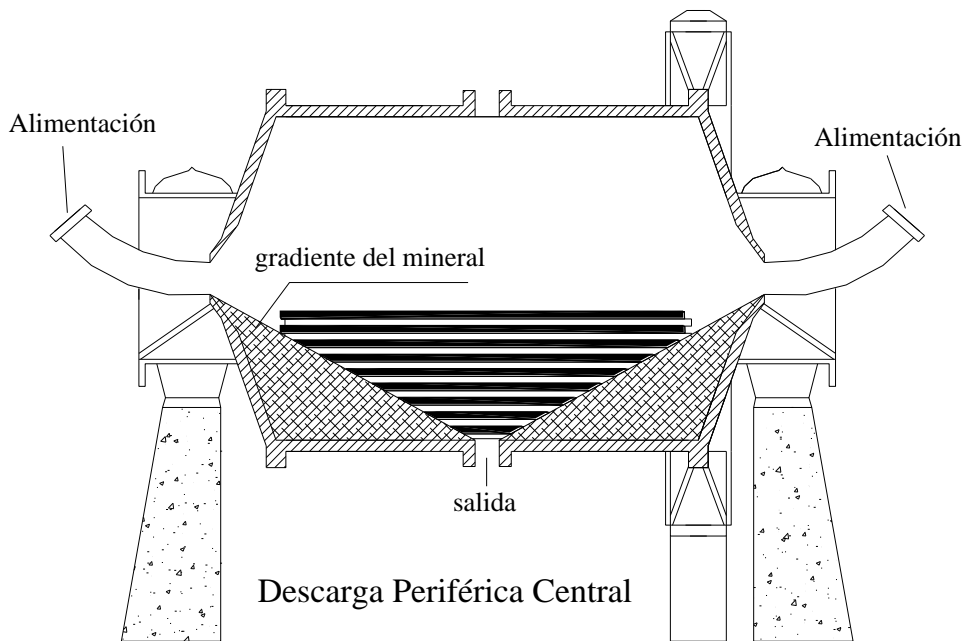


Fig. 4.13: Molino de barras de descarga periférica central.

Las aplicaciones de los molinos de barras se encuentra principalmente en la molienda de carbón y coque, fabricación de arena artificial para hormigón, molienda de clinker para cemento, sinterización de minerales de hierro, etc.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

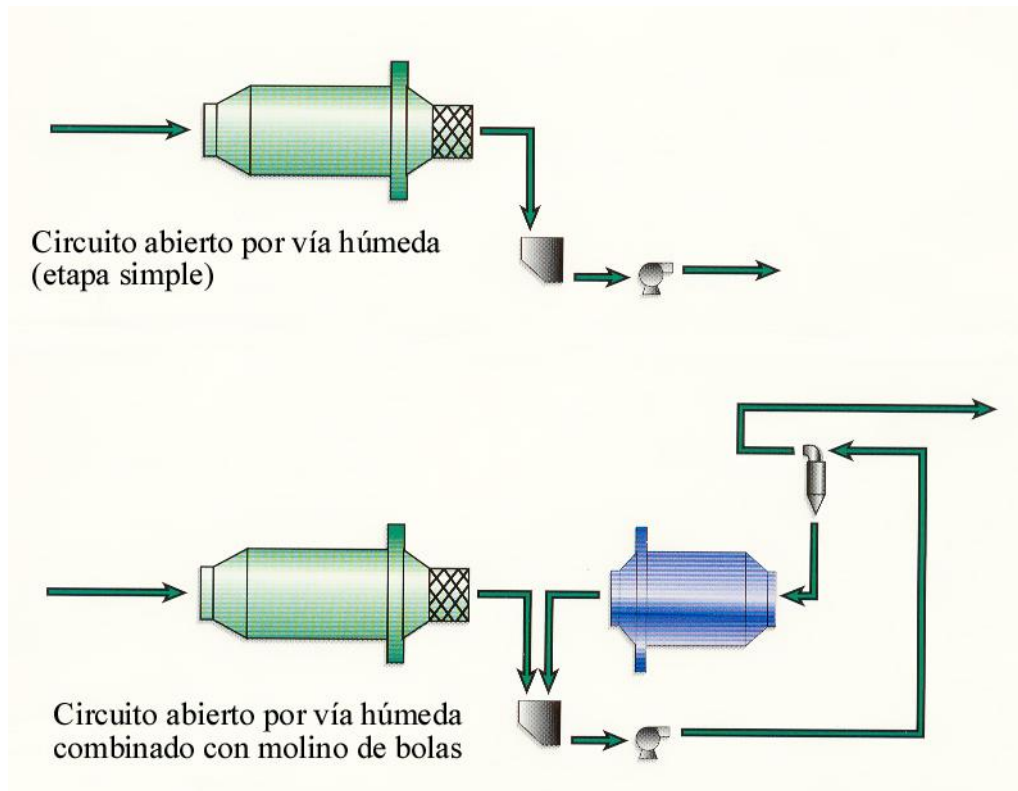


Fig. 4.14: Circuitos típico de molinos de barras (Cortesía de Nordberg).

Dimensionado de un Molino de Barras

Para dimensionar un molino hay que estudiar los parámetros siguientes:

- Diámetro y Longitud del molino.
- Granulometría del producto obtenido.
- Potencia absorbida y Tamaño de las barras

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Diámetro y Longitud

El **diámetro** y la **longitud** de un molino están relacionados de la forma que hemos expuesto anteriormente.

Potencia

La **potencia** de un molino es el principal parámetro que va a determinar sus dimensiones. Se puede obtener mediante:

- Fórmulas empíricas.
- Ábacos.
- Tablas de los fabricantes.

Mediante Fórmulas:

Potencia útil de un molino de barras por vía húmeda (según Nordberg):

$$kW = M_c \cdot \left(1.752 \cdot D^{0.34} \cdot (6.3 - 5.4 \cdot V_p) \cdot C_s \right) \quad (4.5)$$

Donde:

- M_c = Peso de la carga de barras (ton.).
- D = Diámetro interior entre revestimiento (m.).
- V_p = Volumen de carga ocupado por las barras (%).
- C_s = Porcentaje de la velocidad crítica.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Potencia absorbida por un molino de barras según Bond (expresión general).

$$P_a = 10 \cdot w_i \cdot \frac{1}{0.907} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right) \cdot C \quad (4.6)$$

Donde:

P_a = Potencia absorbida (kW)

C = Capacidad del molino de barras (ton/h).

w_i = Índice de Bond (kWh/t).

Al valor obtenido con la expresión 4.6 hay que multiplicarle una serie de **factores de corrección** (EF_i), para obtener la **potencia útil**, según las condiciones de trabajo del molino de barras, quedando la expresión siguiente:

$$P_m = P_a \cdot EF_1 \cdot EF_2 \cdot EF_3 \cdot EF_4 \cdot EF_5 \cdot EF_6 \cdot EF_7 \cdot EF_8 \cdot EF_9 \quad (4.7)$$

Los factores de corrección que hay que aplicar los enumeramos a continuación con sus valores respectivos:

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENTA (I).

Factores de Corrección (EF_i)

EF_1 (Molienda en Seco)

Molienda en húmedo: $EF_1 = 1$

Molienda en seco: $EF_1 = 1.3$

EF_2 (Molienda en Circuito Abierto)

Nota: Este factor tiene el valor de **1**; su valor será diferente a 1 en el caso de molinos de bolas.

EF_3 (Factor de Eficiencia del Diámetro)

Se va a obtener con la siguiente expresión:

$$EF_3 = \left(\frac{2.44}{D_M} \right)^{0.2} \quad (4.8)$$

Donde:

D_M = Diámetro interior entre revestimientos (m).

Nota: El valor de EF_3 no será inferior a 0.914 para diámetros superiores a 3.81 m.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

EF₄ (Factor de sobretamaño de la alimentación)

Se obtiene con la siguiente ecuación:

$$EF_4 = \frac{R_r + (w_i - 7) \cdot \left(\frac{D_{80} - F_o}{F_o} \right)}{R_r} \quad (4.9)$$

Donde:

R_r = Relación de reducción = D_{80}/d_{80}

w_i = Índice de Bond (molino de bolas) (kWh/sht).

F_o = Tamaño óptimo de alimentación:

$$F_o = 16000 \sqrt{\frac{13}{w_i}}$$

w_i = Índice de Bond (molino de barras) (kWh/sht).

EF₅ (Factor de molienda fina)

Se aplica cuando $d_{80} < 75\mu\text{m}$ y su valor es:

$$EF_5 = \frac{d_{80} + 10.3}{1.145 \cdot d_{80}} \quad (4.10)$$

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

EF₆ (Alto/Bajo ratio de reducción)

Este factor debe aplicarse cuando el valor de R_r no esté comprendido entre $(R_{ro}-2)$ y $(R_{ro}+2)$.

Su valor viene dado por:

$$EF_6 = 1 + \frac{(R_r - R_{ro})^2}{150} \quad (4.11)$$

Donde:

$$R_{ro} = 8 + \frac{5 \cdot L}{D_M}$$

Siendo L = Longitud de las barras.

EF₇ (Este factor se aplica en el caso de molino de bolas).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

EF₈ (Molienda de barras)

Dependiendo del tipo de circuito de molienda tenemos:

- Circuito de molienda formado sólo Molino de barras:

Alimentación al molino procedente de una trituración en circuito abierto: $EF_8 = 1.4$.

Alimentación al molino procedente de una trituración en circuito cerrado: $EF_8 = 1.2$.

- Circuito de molienda formado por Molino de barras + Molino de bolas:

(Sin concentración intermedia, si existiera estaríamos en el caso anterior).

Alimentación al molino procedente de una trituración en circuito abierto: $EF_8 = 1.2$.

Alimentación al molino procedente de una trituración en circuito cerrado: $EF_8 = 1$.

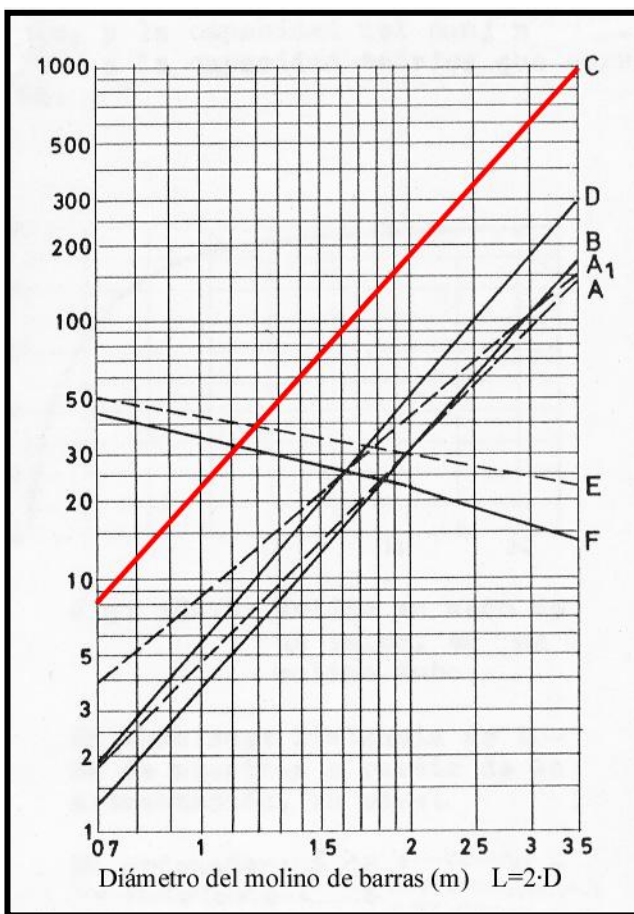
EF₉ (Factor por revestimiento de caucho).

Con revestimiento de caucho: $EF_9 = 1.07$

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Mediante Ábacos:

La potencia de un molino de barras también se puede obtener mediante ábacos o gráficas que proporcionan la potencia y otras características del molino.



Recta A: Peso del molino (ton)
Construcción normal.

Recta A₁: Peso del molino (ton)
Construcción pesada.

Recta B: Peso de la carga de
barras (ton.).

Recta C: Potencia máxima (kW).

Recta D: Capacidad del molino
de 25-0.2 mm (ton/h).
Mineral bastante duro.

Recta E: Velocidad de giro (r.p.m.)

Recta F: Velocidad crítica (r.p.m.)

Fig. 4.15: Ábaco de características para un molino de barras (ETSIM, 1969).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Mediante Tablas:

También se puede obtener mediante las tablas proporcionadas por los fabricantes. Las cuales nos proporcionan no sólo la potencia sino también datos como dimensiones de los molinos, velocidades, densidad de la carga de barras, etc.

Tamaño de las Barras (Diámetro máximo)

Para obtener el diámetro máximo de las barras para una carga inicial, y para posteriores reposiciones de la carga se emplea la siguiente expresión:

$$D_{barra} = \left(\frac{D_{80}^{0.75}}{160} \cdot \sqrt{\frac{w_i \cdot S_g}{(\% C_s) \cdot \sqrt{3.281 \cdot D_M}} \right) \cdot 25.4 \quad (4.12)$$

Siendo:

- D_{barra} = Diámetro máximo de las barras (mm).
- D_{80} = Dimensión de la abertura de malla para un 80 % de paso de la alimentación (μm).
- w_i = Índice de Bond (kWh/t).
- S_g = Peso específico del mineral (gr/cm^3).
- C_s = Porcentaje de la velocidad crítica.
- D_M = Diámetro interior de los revestimientos (m).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Las barras de un molino van siguiendo una **distribución de tamaños** de una manera equilibrada y que se obtiene por medio de tablas como la siguiente:

Tabla 4.3: Distribución de la carga de barras. Porcentaje en peso

Diámetro de barras (pulgadas/mm)	Distribución de la carga para cada diámetro máximo de barras (% en peso de la carga)					
	5 / 125	4 ½ / 115	4 / 100	3 ½ / 90	3 / 75	2 ½ / 65
5 / 125	18					
4 ½ / 115	22	20				
4 / 100	10	23	20			
3 ½ / 90	14	20	27	20		
3 / 75	11	15	21	33	31	
2 ½ / 65	7	10	15	21	39	34
2 / 50	9	12	17	26	30	66
% Total (peso de la carga)	100	100	100	100	100	100

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Granulometría de salida de un Molino de Barras

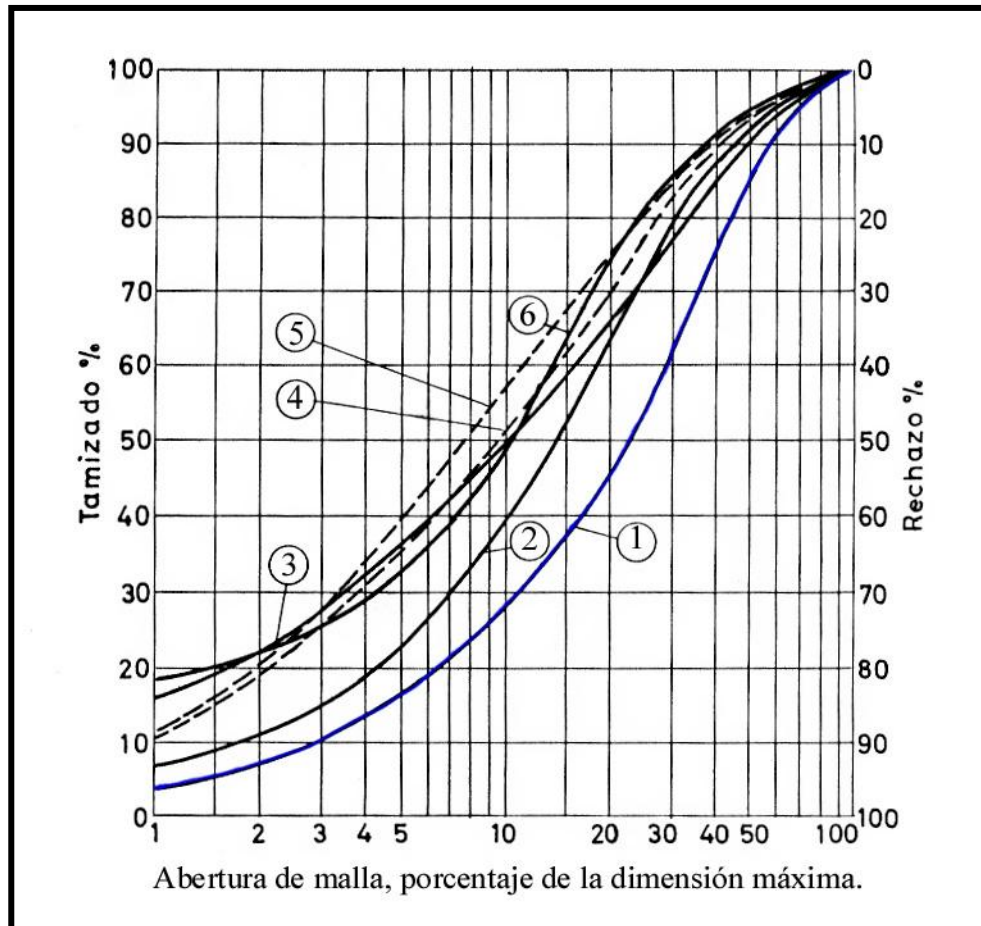


Fig. 4.16: Granulometría de salida de un molino de barras en c.a. (Curva 1) (ETSIM, 1969).

Tabla 4.4: Tamaños del producto obtenido en un molino de barras

Tipo de mineral	Circuito Abierto		Circuito Cerrado	
	Abertura de malla (80 % paso)	Abertura de malla (50 % paso)	Abertura de malla (80 % paso)	Abertura de malla (50 % paso)
Blando	30	12	30	10
Medio	42	22	39	15
Duro	52	32	56	25

Nota: la abertura de malla está expresada en porcentaje de la dimensión máxima del producto.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

4.3. Molinos de bolas.

Los molinos de bolas van a presentar algunas características comunes con los molinos de barras; sin embargo las diferencias serán mayores que las semejanzas.

Se van a emplear para obtener una granulometría de mineral comprendida entre 0-30 μm y 0-200 μm .

Los molinos de bolas también serán tambores cilíndricos o cilindro-cónicos con paredes interiores revestidas por los blindajes o revestimientos. Los cuerpos moledores serán de forma esférica (bolas) o de formas cilíndricas, cónicas o irregulares.

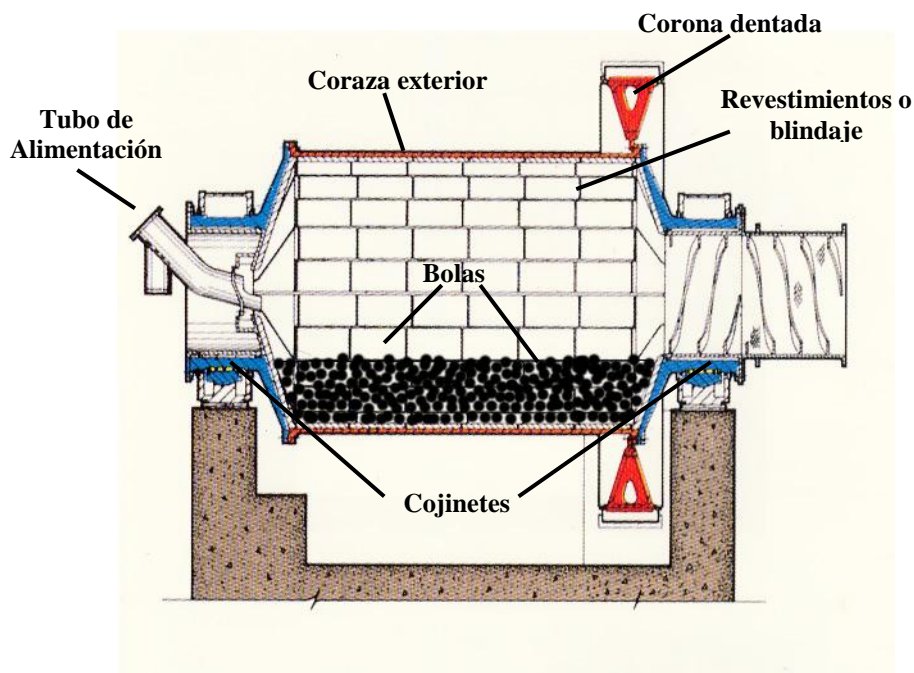


Fig. 4.17: Molino de bolas (cortesía de Fuller-Traylor).

Parámetros que caracterizan a un molino de bolas:

Los principales parámetros que van a caracterizar a un molino de bolas serán los siguientes:

1. Velocidad Crítica:

Es aquella velocidad de giro mínima alcanzada por el molino, de forma que la fuerza centrífuga creada es suficiente para conseguir que las bolas queden adheridas a los revestimientos del molino.

La expresión que nos proporciona el valor de la velocidad crítica, para un molino de bolas dado, es la siguiente:

$$V_{crítica} = \frac{42.3}{\sqrt{D_M}} \quad (4.13)$$

Donde:

V = Velocidad crítica, *r.p.m.*

D_M = Diámetro del molino, *m.* (medido entre los revestimientos internos).

Los molinos de bolas suelen trabajar con velocidades comprendidas entre un **72-77 %** de la velocidad crítica, dependiendo del diámetro del molino.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

2. Volumen de la Carga:

Nos indica el volumen que ocupa la carga de bolas en el interior del molino, considerando también los huecos vacíos existentes entre las bolas y viene expresado en tanto por ciento (%) respecto al volumen total interior.

El volumen de carga con el molino en reposo (**en vacío**) es menor que cuando el molino esta girando (**en carga**) con la misma carga de bolas.

La relación que nos da el **volumen de la carga en vacío** es la siguiente:

$$V.C.(%) = 113 - 126 \cdot \frac{H_c}{D_M} \quad (4.14)$$

Siendo:

- H_c = Distancia interior máxima entre la parte superior del revestimiento y la parte superior de la carga en reposo.
- D_M = Diámetro interior del molino.

Los molinos de bolas trabajan con un grado de llenado comprendido entre un **40-45 %** (descarga por rebose) y puede llegar en algunos casos hasta el **50 %** (descarga por rejilla).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).



Fig. 4.18: Interior de un molino de bolas (Fuente: www.mining.ubc.ca).

3. Tamaño de Alimentación:

El tamaño óptimo de alimentación según *Allis Chalmers* lo podemos obtener mediante la siguiente expresión:

$$D_{80} = 4000 \cdot \sqrt{\frac{13}{w_i}} \quad (4.15)$$

D_{80} = Abertura de la malla por la que pasa el 80 % de la alimentación, en micras (μm).

w_i = Índice de Bond; kWh/ton.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Según *Nordberg*:

Materiales Duros $\Rightarrow D_{80} = 25.4$ mm.

Materiales Blandos $\Rightarrow D_{80} =$ mm.

Según *SIM*:

Una etapa de molienda $\Rightarrow 25-30$ mm (máx.).

Una etapa de molienda $\Rightarrow 6-8$ mm (normal).

Etapa (barras+bolas) $\Rightarrow D_{95} = 1-1.5$ mm.

4. Tamaño del Producto:

Según *Nordberg*:

Tamaño máximo producido = 0.420 mm.

Tamaño mínimo producido = 10 μ m.

Según *SIM*:

Tamaño de salida $\Rightarrow D_{95} = 30$ μ m.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

5. Cociente de reducción:

Según Blanc: La razón de reducción máxima es de **500:1**.

Según SIM:

(5-40):1 en circuito cerrado (razón óptima)

100:1 en circuito cerrado (razón máxima)

6. Relación entre el Diámetro y la Longitud:

Puesto que los molinos de bolas no tienen los inconvenientes que presentan los molinos de barras; van a permitir mayor flexibilidad respecto a la relación entre la longitud (L) y el diámetro (D) del molino.

Las relaciones varían desde ligeramente inferiores a 1:1 (L/D): $L = 0.9 \cdot D$

Hasta bastantes mayores de 1:1 (L/D): $L = 2 \cdot D$

7. Tipo de Alimentador:

En **circuito abierto** para volúmenes de carga elevados, en torno al 45-50 %, se emplean alimentadores de **cangilón de doble cuchara**.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

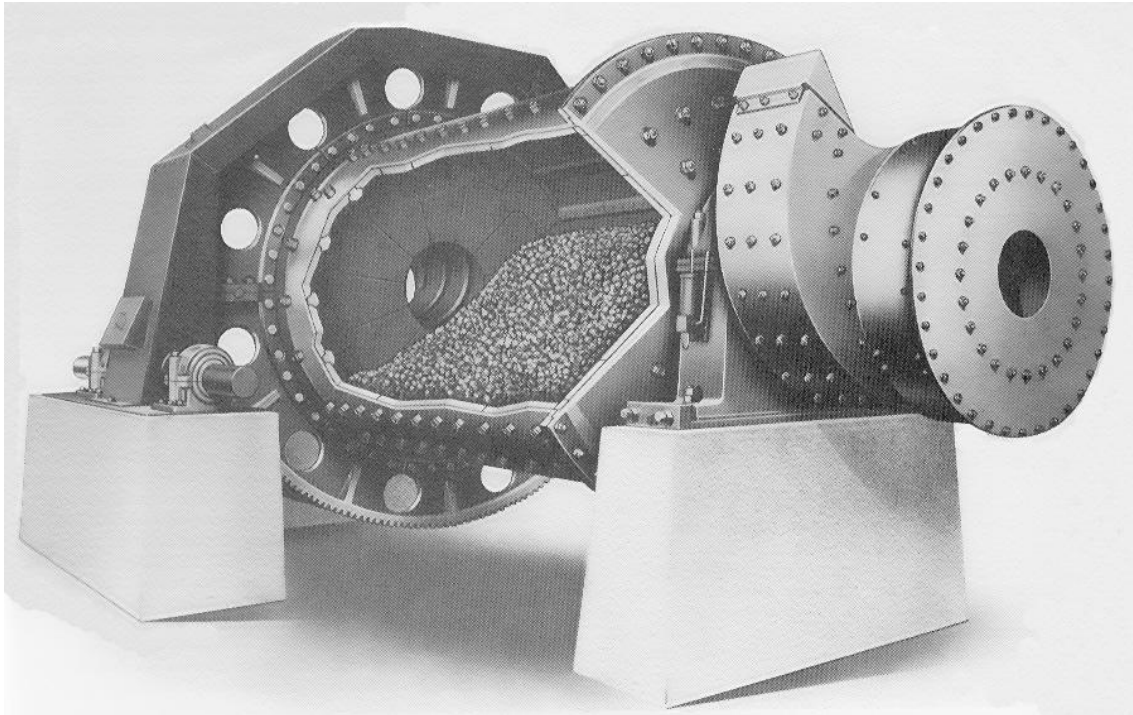


Fig. 4.19: Molino de bolas con alimentador de cuchara o cangilón
(Fuente: Rowland, 2002).

Para menores volúmenes de carga, se empleará **alimentadores de tubo.**

En **circuito cerrado** con clasificadores de rasquetas o de espiral se necesitarán alimentadores de cuchara y con clasificadores tipo ciclón se utilizarán alimentadores de tubo.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

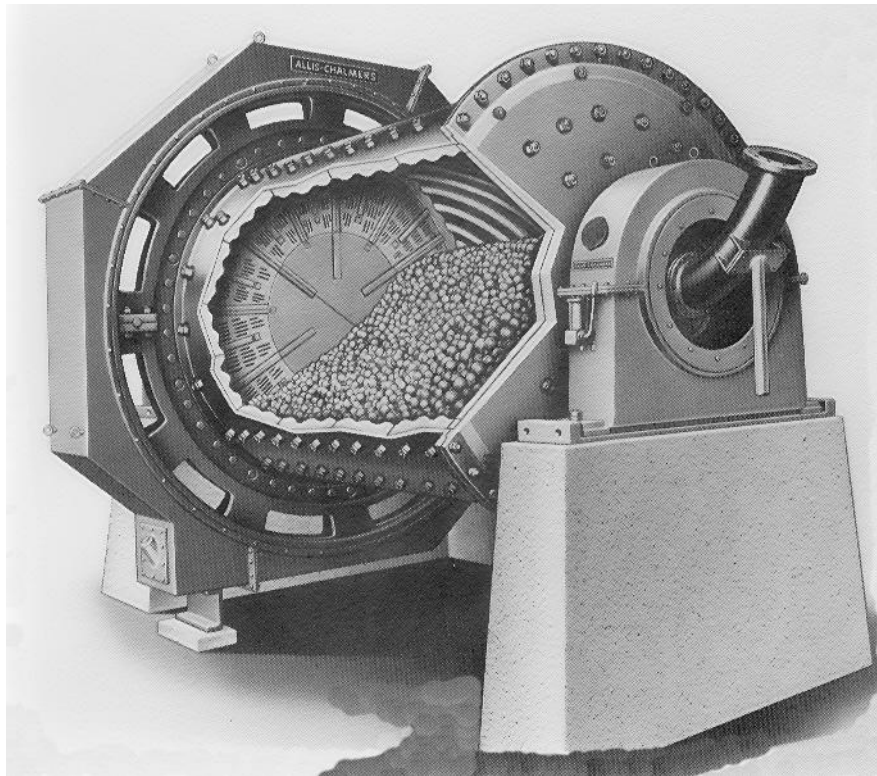


Fig. 4.20: Molino de bolas con alimentador de tubo
(Fuente: Rowland, 2002).

Clasificación en función de la descarga y Aplicaciones:

La clasificación de los molinos de bolas, según el tipo de descarga es la siguiente:

Molino de descarga por rebose

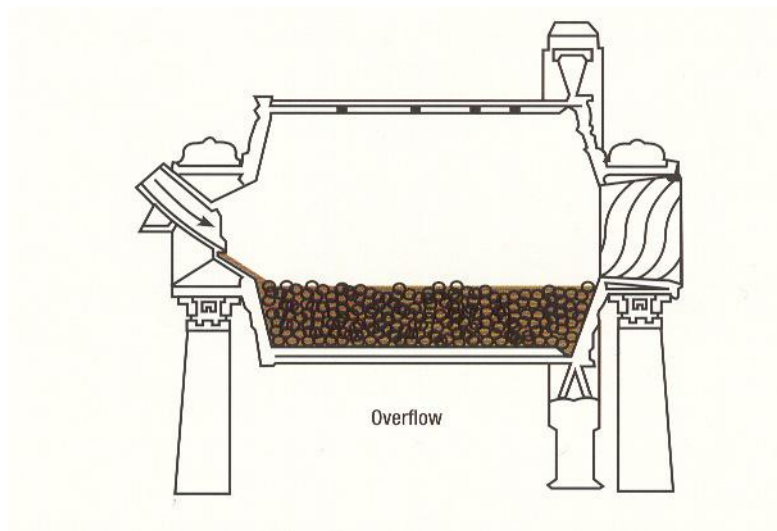


Fig. 4.21: Molino de bolas de descarga por rebose (Cortesía de Nordberg).

Se emplean en moliendas muy finas con tamaños de alimentación entre 10-15 mm.

Carga circulante entre 300-500 %. (Trabajando en circuito cerrado).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Molino de descarga por rejilla:

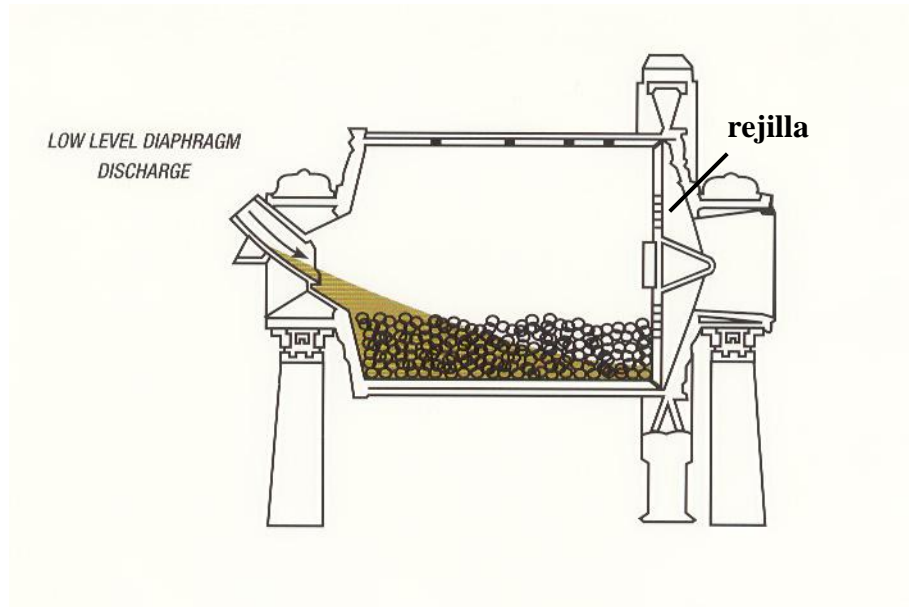


Fig. 4.22: Molino de bolas de descarga por rejilla
(Cortesía de Nordberg).

Se emplean para moliendas gruesas (60-80 μm), con tamaños de alimentación de hasta 50 mm.

Estos molinos son adecuados para molienda en seco.

En la siguiente figura (4.23) se aprecia un molino de bolas compartimentado para la molienda en seco de materias primas en la industria cementera. En ella también se puede apreciar un tipo de descarga periférica (molino Duodan de F.L.Smith).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

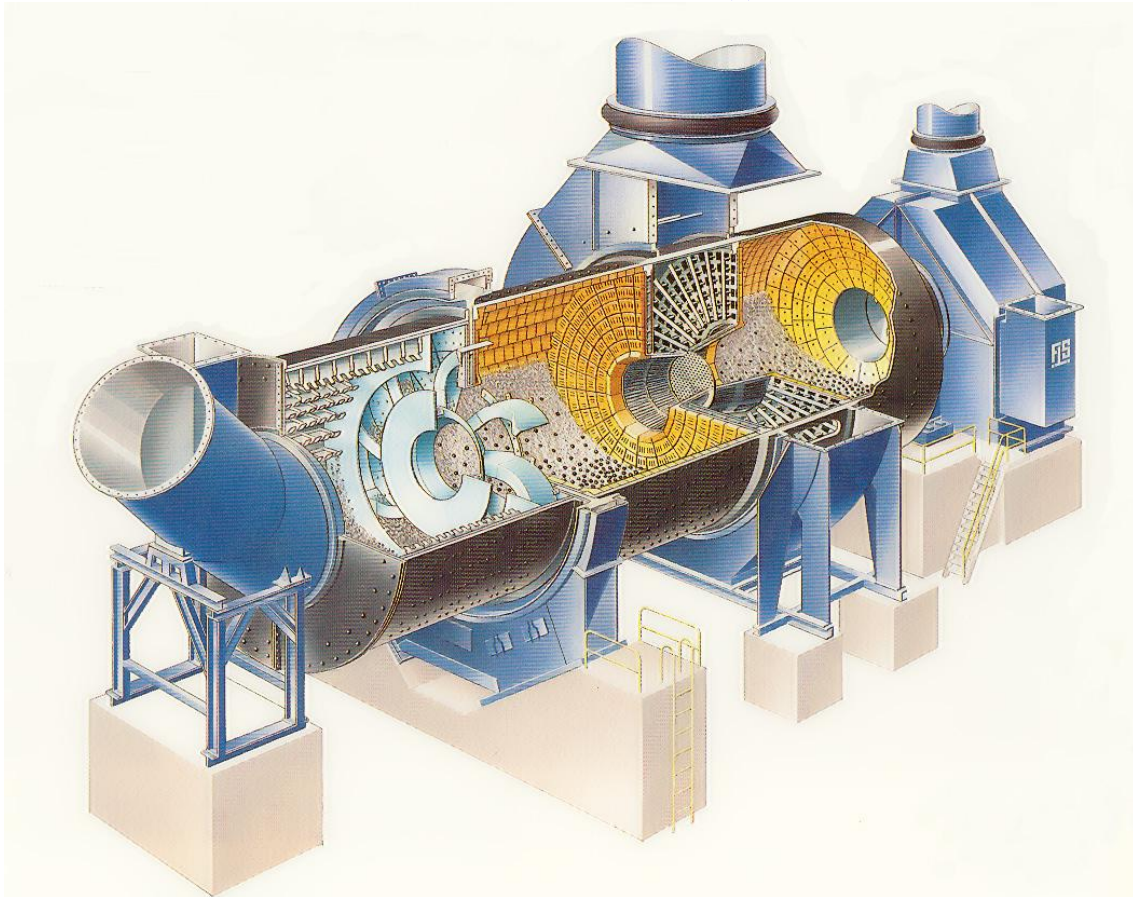
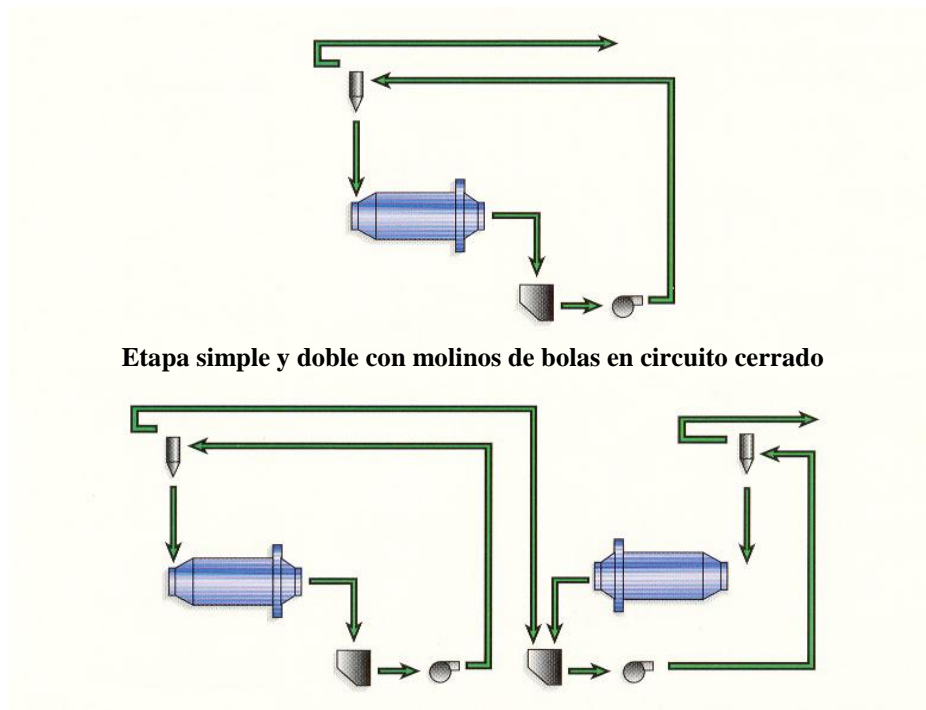


Fig. 4.23: Molino de bolas de varios compartimentos (Cortesía F.L.Smidth).



Etapa simple y doble con molinos de bolas en circuito cerrado

Fig. 4.24: Circuitos típicos para molinos de bolas (Cortesía de Nordberg).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Dimensionado de un Molino de Bolas

Para dimensionar un molino hay que estudiar los parámetros siguientes:

- Diámetro y Longitud del molino.
- Granulometría del producto obtenido.
- Potencia absorbida y Tamaño de las bolas

Diámetro y Longitud

El **diámetro** y la **longitud** de un molino están relacionados de la forma que hemos comentado anteriormente:

Las relaciones varían desde ligeramente inferiores a 1:1 (L/D): $L = 0.9 \cdot D$

Hasta bastantes mayores de 1:1 (L/D): $L = 2 \cdot D$

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Potencia

La **potencia** de un molino es el principal parámetro que va a determinar sus dimensiones. Se puede obtener mediante:

- Fórmulas empíricas.
- Ábacos.
- Tablas de los fabricantes.

Mediante Fórmulas:

Potencia útil de un molino de bolas de descarga por rebose (vía húmeda); según Nordberg:

$$kW = M_c \cdot \left(4.879 \cdot D_M^{0.3} \cdot (3.2 - 3 \cdot V_p) \right) C_s \cdot \left(1 - \frac{0.1}{2^{9-10 \cdot C_s}} \right) + S_s$$

Expresión desarrollada por Bond (4.16)

Donde:

M_c = Peso de la carga de bolas (ton.).

D_M = Diámetro interior entre revestimiento (m.).

V_p = Volumen de carga ocupado por las bolas (%).

C_s = Porcentaje de la velocidad crítica.

S_s = Factor de tamaño de las bolas (kW/ton. bolas).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Para molinos de bolas con un diámetro interior entre revestimientos superior a 3.3 m, es necesario aplicar el factor de tamaño de las bolas, cuyo valor se calcula con la siguiente expresión:

$$S_s = 1.102 \cdot \left(\frac{B - 12.5 \cdot D_M}{50.8} \right) \quad (4.17)$$

Teniendo:

S_s = Factor de tamaño de las bolas (kW/ton._{bolas}).

B = Tamaño de las bolas (mm).

Potencia absorbida por un molino de bolas según Bond (expresión general).

$$P_a = 10 \cdot w_i \cdot \frac{1}{0.907} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right) \cdot C \quad (4.18)$$

Donde:

P_a = Potencia absorbida (kW)

C = Capacidad del molino de bolas (ton/h).

w_i = Índice de Bond (kWh/t).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Al valor obtenido con la expresión 4.18 hay que multiplicarle una serie de **factores de corrección** (EF_i), para obtener la **potencia útil**, según las condiciones de trabajo del molino de bolas, quedando la expresión siguiente:

$$P_m = P_a \cdot EF_1 \cdot EF_2 \cdot EF_3 \cdot EF_4 \cdot EF_5 \cdot EF_6 \cdot EF_7 \cdot EF_8 \cdot EF_9$$

(4.19)

Los factores de corrección que hay que aplicar los enumeramos a continuación con sus valores respectivos:

Factores de Corrección (EF_i)

EF_1 (Molienda en Seco)

Molienda en húmedo: $EF_1 = 1$

Molienda en seco: $EF_1 = 1.3$

EF_2 (Molienda en Circuito Abierto)

$EF_2 = 1$ (circuito cerrado)

Es un factor que se aplica cuando el **circuito es abierto**, ya que se necesita una potencia complementaria a la que se necesitaría en circuito cerrado.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

El valor, de este factor, está relacionado con el grado de control que se requiere sobre el producto acabado (% de paso); según se indica en la siguiente tabla.

Tabla 4.5: Factor de corrección EF_2 .

Control sobre el tamaño del producto (% paso)	EF_2
50	1.04
60	1.05
70	1.10
80	1.20
90	1.40
92	1.46
95	1.57
98	1.70

EF_3 (Factor de Eficiencia del Diámetro)

Se va a obtener con la siguiente expresión:

$$EF_3 = \left(\frac{2.44}{D_M} \right)^{0.2} \quad (4.20)$$

Donde:

D_M = Diámetro interior entre revestimientos (m).

Nota: El valor de EF_3 no será inferior a 0.914 para diámetros superiores a 3.81 m.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENTA (I).

EF₄ (Factor de sobretamaño de la alimentación)

Se obtiene con la siguiente ecuación:

$$EF_4 = \frac{R_r + (w_i - 7) \left(\frac{D_{80} - F_o}{F_o} \right)}{R_r} \quad (4.21)$$

Donde:

R_r = Relación de reducción = D_{80}/d_{80}

w_i = Índice de Bond (molino de bolas) (kWh/sht).

F_o = Tamaño óptimo de alimentación:

$$F_o = 4000 \sqrt{\frac{13}{w_i}}$$

w_i = Índice de Bond (molino de bolas) (kWh/sht).

EF₅ (Factor de molienda fina)

Se aplica cuando $d_{80} < 75\mu\text{m}$ y su valor es:

$$EF_5 = \frac{d_{80} + 10.3}{1.145 \cdot d_{80}} \quad (4.22)$$

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

EF₆ (Alto/Bajo ratio de reducción).

En el caso de molinos de bolas $EF_6 = 1$

EF₇ (Bajo ratio de reducción).

Se aplica cuando la relación de reducción R_r es menor que 6.

El valor de EF_7 , valdrá entonces:

$$EF_7 = \frac{2 \cdot (R_r - 1.35) + 0.26}{2 \cdot (R_r - 1.35)} \quad (4.23)$$

EF₈ (molinos de barras)

No se aplica. $EF_8 = 1$

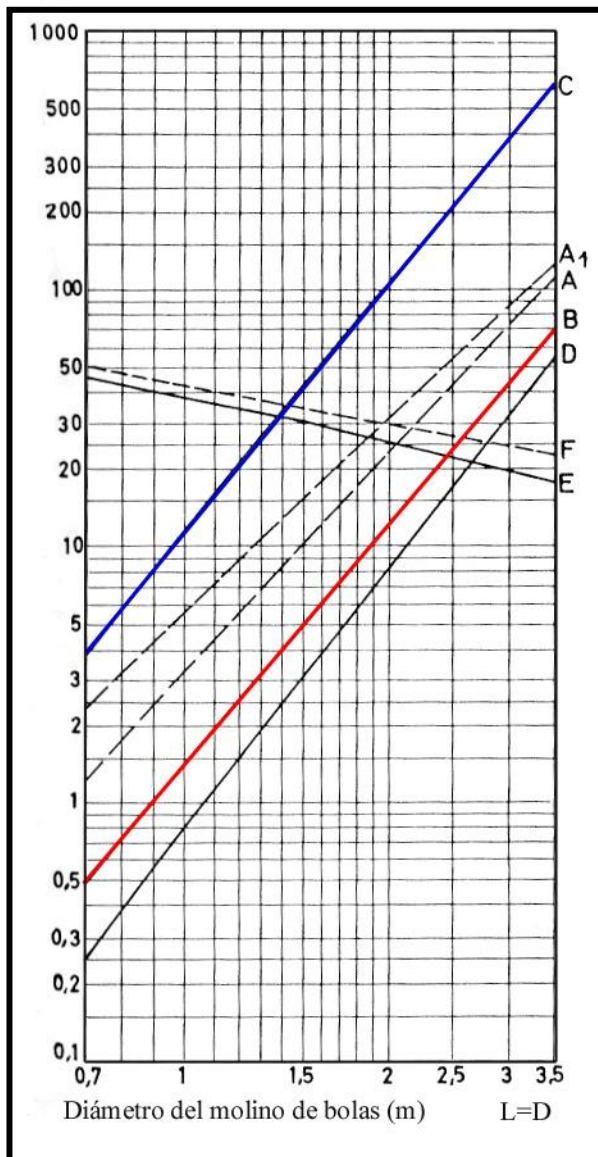
EF₉ (Factor por revestimientos de caucho)

Con revestimiento de caucho: $EF_9 = 1.07$

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Mediante Ábacos:

La potencia de un molino de bolas también se puede obtener mediante ábacos o gráficas que proporcionan la potencia y otras características del molino.



Recta A: Peso del molino (ton)
Construcción normal.

Recta A₁: Peso del molino (ton)
Construcción pesada.

Recta B: Peso de la carga de
bolas (ton.).

Recta C: Potencia máxima (kW).

Recta D: Capacidad del molino
de 12-0.2 mm (ton/h).
Mineral bastante duro.

Recta E: Velocidad de giro (r.p.m.)

Recta F: Velocidad crítica (r.p.m.)

Fig. 4.25: Ábaco de características para un molino de bolas (ETSIM, 1969).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Mediante Tablas:

También se puede obtener mediante las tablas proporcionadas por los fabricantes. Las cuales nos proporcionan no sólo la potencia sino también datos como dimensiones de los molinos, velocidades, densidad de la carga de bolas, etc.

Tamaño de las Barras (Diámetro máximo)

Para obtener el diámetro máximo de las barras para una carga inicial, y para posteriores reposiciones de la carga se emplea la siguiente expresión:

$$D_{bola} = \left(\left(\left(\sqrt{\frac{D_{80}}{K}} \cdot \sqrt[3]{\frac{w_i \cdot S_g}{(\% C_s) \cdot \sqrt{3.281 \cdot D_M}}} \right) \right) \right) \cdot 25.4 \quad (4.24)$$

Siendo:

- D_{bola} = Diámetro máximo de las bolas (mm).
- D_{80} = Dimensión de la abertura de malla para un 80 % de paso de la alimentación (μm).
- w_i = Índice de Bond (kWh/t).
- S_g = Peso específico del mineral (gr/cm^3).
- C_s = Porcentaje de la velocidad crítica.
- D_M = Diámetro interior de los revestimientos (m).
- K = Coeficiente que viene dado en la tabla siguiente

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Tabla 4.6: Coeficiente K

Tipo de molino y circuito de molienda	Bolas de acero K
Rebose húmedo, circuito abierto	350
Rebose húmedo, circuito cerrado	350
Parrilla húmeda, circuito abierto	330
Parrilla húmeda, circuito cerrado	330
Parrilla seca, circuito abierto	335
Parrilla seca, circuito cerrado	335

Las bolas de un molino van siguiendo una **distribución de tamaños** de una manera equilibrada y que se obtiene por medio de tablas como la siguiente:

Tabla 4.7: Distribución de la carga de bolas. Porcentaje en peso

Diámetro de bolas (pulgadas/mm)	Distribución de la carga para cada diámetro máximo de bolas (% en peso de la carga)						
	4.5" / 115	4" / 100	3.5" / 90	3" / 75	2.5" / 65	2" / 50	1.5" / 40
4.5" / 115	23						
4" / 100	31	23					
3.5" / 90	18	34	24				
3" / 75	15	21	38	31			
2.5" / 65	7	12	20.5	39	34		
2" / 50	3.8	6.5	11.5	19	43	40	
1.5" / 40	1.7	2.5	4.5	8	17	45	51
1" / 25	0.5	1.0	1.5	3	6	15	49
% Total (peso de la carga)	100	100	100	100	100	100	100

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Granulometría de salida de un Molino de Bolas

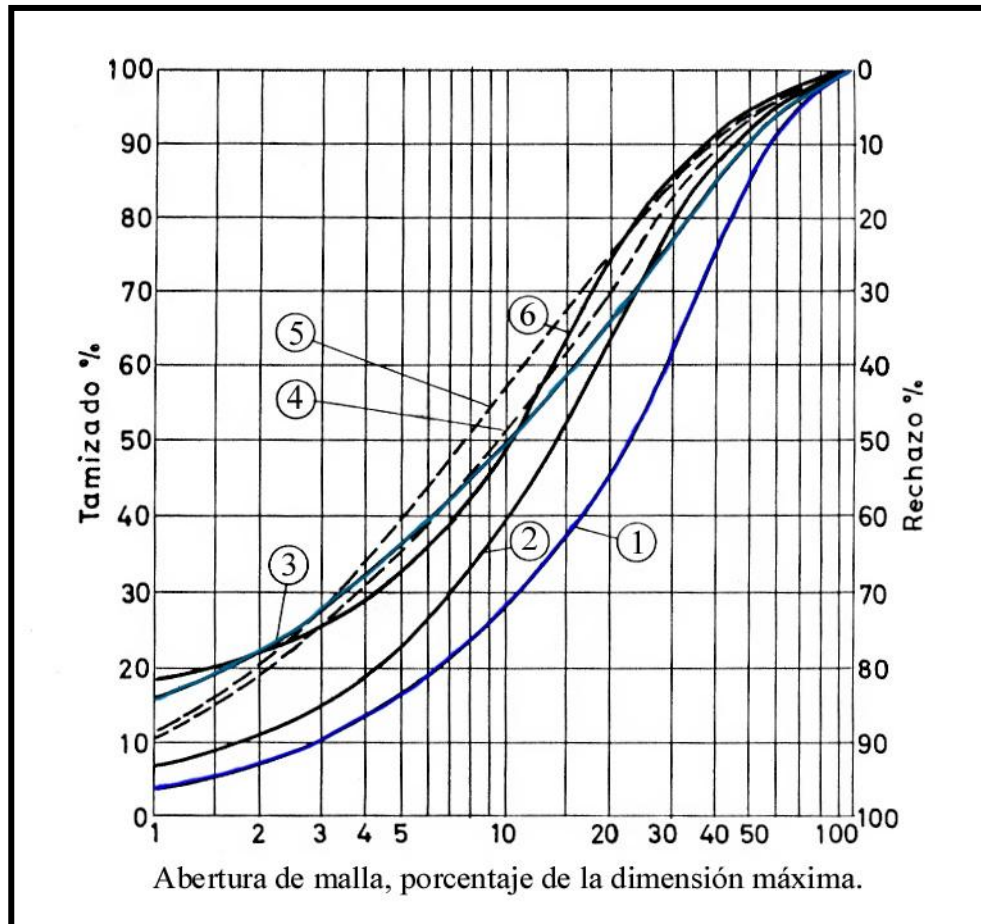


Fig. 4.26: Granulometrías de salida de un molino de bolas (ETSIM, 1969).

- Curva 2: Molino de bolas de descarga por rebose (c.c)
- Curva 3: Molino de bolas de descarga por rejilla (c.c)
- Curva 4: Molino de bolas bicónico (c.c)
- Curva 5: Molino de bolas bicónico (c.a)
- Curva 6: Molino de bolas de descarga por rebose (c.a)

Donde c.c.: circuito cerrado; c.a.: circuito abierto.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 4: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (I).

Tabla 4.8: Tamaños del producto obtenido en un molino de bolas (Taggart)

Tipo de mineral	Circuito Abierto		Circuito Cerrado	
	Abertura de malla (80 % paso)	Abertura de malla (50 % paso)	Abertura de malla (80 % paso)	Abertura de malla (50 % paso)
	Molino de bolas de descarga por rebose			
Blando			20	7
Medio	25	12	30	13
Duro			40	25
	Molino de bolas de descarga por rejilla			
Blando			25	8
Medio			34	14
Duro			52	25
	Molino de bolas bicónico			
Blando	12	3	23	7
Medio	24	8	27	9
Duro	28	12	37	17

Nota: la abertura de malla está expresada en porcentaje de la dimensión máxima del producto.

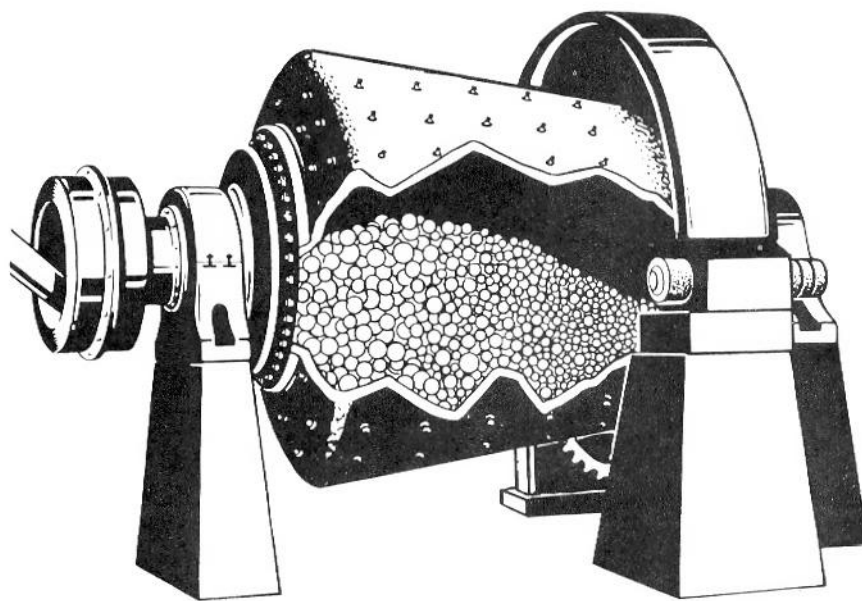


Fig. 4.27: Molino cónico de bolas Hardinge (Cortesía Koppers Co.).