

## 8.1. Molienda

### 8.1.1. Grados de molienda

La molienda es el último escalón de la fragmentación<sup>1</sup> industrial, sigue a la trituración normalmente, y se caracteriza por el tamaño de salida de los productos que puede estar entre algunos mm y algunas  $\mu\text{m}$ .

Se persigue, normalmente, la liberación de unas especies mineralógicas con otras hasta aquel tamaño que permita una concentración diferenciada o bien llegar al tamaño de grano exigido por el método posterior de utilización del producto obtenido.

Se realiza mediante equipos denominados molinos y estos pueden trabajar en seco o en húmedo. La diferencia entre ambos medios se suele caracterizar por una humedad en torno al 8% (este valor produce en los productos una cierta adherencia y marca un límite en la tendencia del comportamiento dentro de los equipos de molienda). Por debajo se considera humedad superficial y el trabajo de los equipos es en seco, siendo deseable que esta humedad no rebase el 3%-4%.

El trabajo en húmedo se caracteriza por unos rangos de humedad elevados, del 40% al 70% de agua en volumen lo que representa para la mayoría de los minerales unos valores de Sp (relación de sólidos en peso) entre 55% y 80%.

Para una humedad entre el 5% y el 10% se produce una pasta pegajosa y el rendimiento decae de forma importante y para valores mayores, ya un trabajo en húmedo, se recupera un valor de rendimiento útil y que se mantiene hasta que la dilución es tan elevada (Sp inferior al 50%) que se impide o dificulta el choque de las bolas con los granos<sup>2</sup>.

Se diferencia en la tabla las denominaciones correspondientes a proceso, etapa y escalón.

Proceso	Etapa	Escalón	Humedad	Tipo de quipo
Fragmentación (Reducción de un bloque a tamaños menores)	Trituración (Etapa de la fragm. para tamaños gruesos)	Primaria Secundaria Terciaria	Seco o Húmedo	Trituradoras (Mandíbulas, conos, rodillos, martillos, etc.)
	Molienda (Etapa de la fragm. para tamaños finos)	Gruesa Media Fina Ultrafina	Seco o Húmedo	Molinos (Barras, bolas, SAG, autógenos y de guijarros)

**Tabla 8.1.** Escalones de la fragmentación.

### 8.1.2. Fuerzas dominantes en la trituración o molienda

Las máquinas utilizan una fuerza u otra de forma preferente y así según sea esta se considera el equipo y su función.

Los materiales y las sustancias a fragmentar se caracterizan para esta función, entre otras, mediante las propiedades siguientes:

- Molturabilidad: Aptitud o facilidad para la fragmentación, normalmente relacionada con la energía necesaria o con la dificultad para su fragmentación.
- Abrasividad: Carácter más o menos agresivo en cuanto al desgaste de los equipos y de los materiales entre si (abrasión o atricción). Se mide, normalmente, por el contenido en sílice ( $\text{SiO}_2$ ).

<sup>1</sup> La fragmentación es la reducción de un bloque a trozos menores, rompiendo la cohesión molecular en algunas partes, marcando líneas de rotura, y produciendo bloques de menor tamaño.

<sup>2</sup> Una humedad excesiva lava los granos y la onda de choque que precede a la bola aparta los granos si la viscosidad no es la adecuada.

- Pegajosidad: Cualidad de adherencia entre los materiales, que es función, normalmente, de la humedad y que se identifica también como pastosidad. No tiene relación directa con la viscosidad ya que esta última es una cualidad mensurable mediante ensayos normalizados y la pegajosidad es un concepto indicándose normalmente que aumenta o disminuye o afecta más o menos al proceso.

Las fuerzas que participan, normalmente, en un proceso de fragmentación son:

- Compresión.
- Cizallamiento.
- Percusión o impacto.
- Abrasión o atricción.

Según el predominio de una fuerza u otra en el equipo se considera:

- **Compresión.** Esta se puede aplicar de forma discontinua o de forma continua y así se tienen los equipos:

1. **Compresión discontinua:** Cada bloque se ve sometido a compresión varias veces. Se utilizan máquinas como las trituradoras de mandíbulas, trituradoras giratorias y cono triturador. Este tipo de maquinaria es de carácter universal (se puede utilizar con cualquier mineral). Tienen relaciones de reducción (Rr) comprendidas entre 4 y 10.

2. **Compresión continua:** El bloque sufre una única compresión variando la intensidad. Se utilizan trituradoras o molinos de cilindros o de rodillos. Se utilizan para el tratamiento de minerales poco abrasivos y no muy duros como el carbón. Tiene relaciones de reducción entre 4 y 6.

- **Choque impacto o percusión:** Cada bloque recibe una energía elevada de forma brusca (choque). Se utilizan las trituradoras de impactos, de martillos y de caída libre o cascada. En general no son aptas para materiales muy abrasivos y su relación de reducción es muy elevada, de 40 a 50.
- **Choque:** Esta componente adquiere importancia en los molinos cuando estos trabajan a velocidades altas, próximas a la velocidad crítica, y las bolas describen trayectorias parabólicas yendo a golpear en la zona del pie de carga, ver figura en apartados siguientes, correspondiente a zonas en el interior de un molino, (esta zona es donde el molino recibe la alimentación).
- **Flexión:** La fuerza que predomina es la flexión y el cizallamiento con un efecto de desgarrar y generalmente acompañado por una compresión adicional. Se utilizan trituradoras de cilindros dentados o acanalados, trituradores de cilindro y placa. Son adecuados para materiales tenaces pero poco abrasivos. La relación de reducción está entre 4 y 6 o entre 4 y 10 según tipo de equipo.
- **Mixto:** El conjunto de fuerzas predominante es una mezcla de compresión, fricción e impacto. Se utilizan molinos de barras, bolas, SAG autógenos y de guijarros. La relación de reducción es muy elevada, puede alcanzar valores de 60 ó 90, incluso superiores, y depende de la configuración de la instalación en circuito abierto o cerrado (esta última más generalizada por la economía de energía que representa a igualdad de condiciones del proceso mineralúrgico).

Cada etapa o escalón se puede configurar como un sistema que trabaje en *circuito abierto* o en *circuito cerrado*, generalizándose el trabajo en circuito cerrado en las etapas de molienda y en las últimas de la fragmentación y en circuito abierto en las primeras etapas de fragmentación.

### 8.1.3. Sistemas generales de las instalaciones y equipos

Los equipos de fragmentación tienen mecanismos o técnicas para hacer frente a los problemas inherentes al efecto de fragmentar, dentro de estas necesidades se puede indicar los siguientes:

- Sistema o técnica antidesgaste. Los productos y la operación a realizar obliga al contacto entre materia y equipo, más la necesidad de aplicar fuerzas de contacto. Esto produce un efecto mayor o menor de desgaste según la cualidad abrasiva del material, en el equipo, y es función de la característica del material y del tipo de proceso. Los elementos para disminuir este efecto, protecciones recambiables normalmente, se denominan sistema antidesgaste y se caracteriza por su disposición, resistencia y facilidad para ser restituido o cambiado en una operación de mantenimiento.
- Sistema de regulación de la granulometría. Las instalaciones deben ser capaces de dar un producto de salida que tenga ciertas variaciones y tener cierta capacidad de adaptarse a diferentes alimentaciones dando un producto de salida determinado, disponer de mecanismos de regulación de la granulometría en función de parámetros manejables por el operador.
- Sistema o mecanismo antiintritables. Estos sistemas deben garantizar la integridad del equipo ante elementos intritables (constituidos normalmente por piezas metálicas procedentes de roturas o procedentes del frente como barrenas, tornillos, etc.) o del transporte. Además de poner medios de identificación y retirada de intritables como imanes u otros, los equipos que representan fuertes inversiones (son caros) y donde las paradas constituyen pérdidas en reparación y por lucro cesante o pérdida de producción, deben tener en su diseño sistemas para paliar o evitar los efectos de la entrada no deseada de intritables a la máquina.
- *En general, todos los equipos de trituración y molienda disponen de los sistemas anteriormente mencionados*. Antidesgaste, Regulación, Antiintritables.
- Sistemas o barreras de seguridad. Disposición de elementos de protección para evitar caídas, atropamientos, y en general accidentes por el acceso no previsto o deseado a partes móviles del equipo. son máquinas de velocidad lenta por lo que se genera en su entorno una falsa sensación de control.

### 8.1.4. Zonas del interior de un molino

Los molinos son grandes cilindros que giran sobre su eje y en su interior existe una mezcla del material a moler junto con cuerpos moledores. Según sea la característica de estos cuerpos molturadores, cilindros metálicos (barras metálicas con una longitud muy superior al diámetros), bolas metálicas o de fundición, trozos gruesos del propio mineral a moler, compuestos de sílice o mezcla de componentes, así se puede denominar el molino.

La acción principal en el interior de un molino es la abrasión o atrición que se produce porque al girar el cilindro, la masa que está en su interior se desplaza sobre si misma produciendo un gran roce entre las partículas y de estas con los elementos molturadores. No es despreciable el efecto de impacto, función de la velocidad de rotación, de los cuerpos cuando son lanzados o por su caída en cascada o catarata por el efecto de giro y desplazamiento de masas.

En general para producir partículas finas prepondera el efecto abrasivo y para tamaños mayores, el impacto empieza a tener relevancia, en función del tamaño de los cuerpos moledores.

Los molinos pueden trabajar de forma discontinua, cerrando el equipo y haciéndolo girar por un tiempo determinado para después vaciar el contenido y separar el material molido de los cuerpos molturadores (bolas, guijarros, etc.), pero en minería y canteras el trabajo es, de forma general, en continuo. Esta forma de trabajo, en continuo, hace que la granulometría producida siga un proceso estadístico donde el tiempo de residencia dentro del molino afecta a la granulometría.

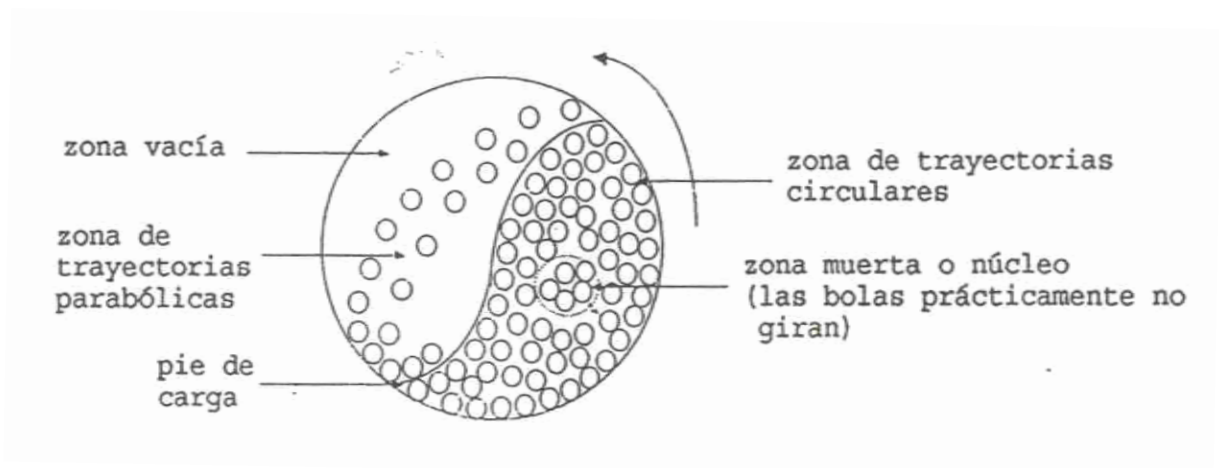
El cilindro gira sobre ejes o extremos huecos. Por el lado de la alimentación, y a través del espacio hueco del eje, se introduce el material a moler, agua si hay que ajustar el contenido de sólidos en peso o volumen, y la reposición de los cuerpos moledores y por el otro extremo (según el tipo de vertido: de rebose, lateral, central, otro) se produce una salida continua de material molido, normalmente arrastrado por una corriente de agua (molienda en húmedo) o de aire (molienda en seco).

El tiempo de residencia viene afectado por el tamaño del cilindro, volumen útil, y el caudal circulado por lo que la variación del caudal es una forma de regulación granulométrica y de adaptación del molino a necesidades cambiantes.

Dentro de un molino, tanto de barras como de bolas, se pueden definir diferentes zonas según el grado de llenado y la velocidad de rotación que son dos elementos fundamentales en la operación de molienda. Junto con las anteriores variables, adquiere una importancia relevante el grado de humedad del material a moler que condiciona el tipo de molienda y los resultados de la misma.

Se considera elementos característicos principales de funcionamiento de un molino los factores siguientes:

- Grado de llenado del molino.
- Velocidad de giro del molino.
- Humedad de los productos a moler (relación agua/sólido en los productos de la alimentación).



**Figura 8.1.** Zonas del interior de un molino.

El núcleo representa una zona de nula o baja actividad de molienda, y por el contrario, el pie de carga corresponde a la zona más activa del molino, la de mayor capacidad de fragmentación.

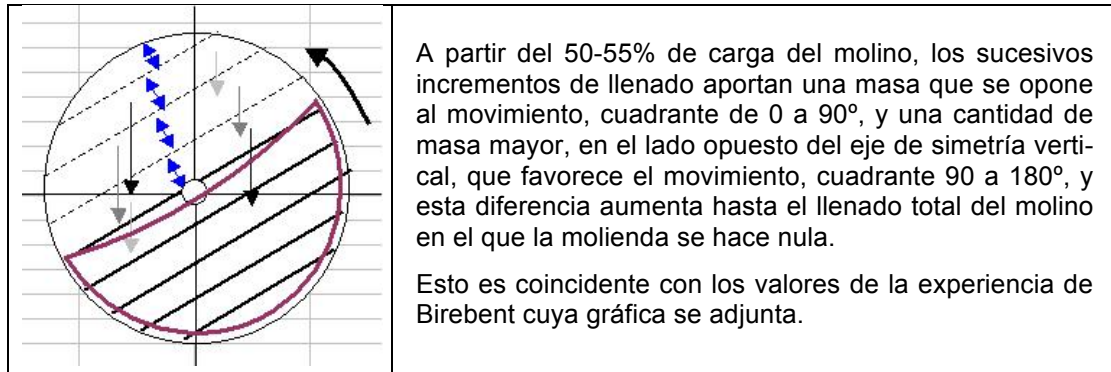
El esquema muestra las bolas (cuerpos moledores) de diámetro uniforme cuando en la realidad del interior de un molino en funcionamiento los diámetros muestran toda una gama de dimensiones, desde el menor posible, hasta el nominal que se introduce en la reposición.



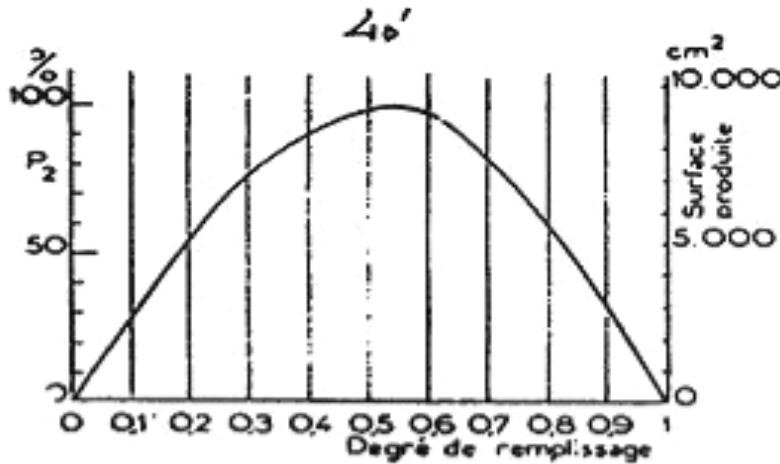
**8.1.5. Grado de llenado**

El grado de llenado, es decir la proporción del volumen interno del molino que ocupa la carga, conjunto de mena a moler y elementos molturadores, es un factor que afecta directamente al rendimiento del molino.

Representando la variación de la potencia consumida por el molino en función del grado de llenado se observa que tiene un máximo en el entorno del 50-55% de utilización del volumen interno. A partir de este valor disminuye la potencia demandada por el molino hasta hacerse nula para un grado de llenado del 100%.



**Figura 8.2.** Aumento del grado de llenado.



**Figura 8.3.** Influencia de la carga sobre la molienda. Relaciona del grado de llenado con la potencia consumida por el molino.

Este grado de llenado, en la práctica está comprendido entre el 40% y el 55%, habitualmente el 45%, y lo forman bolas o barras (elementos molturadores) y el propio mineral a moler.

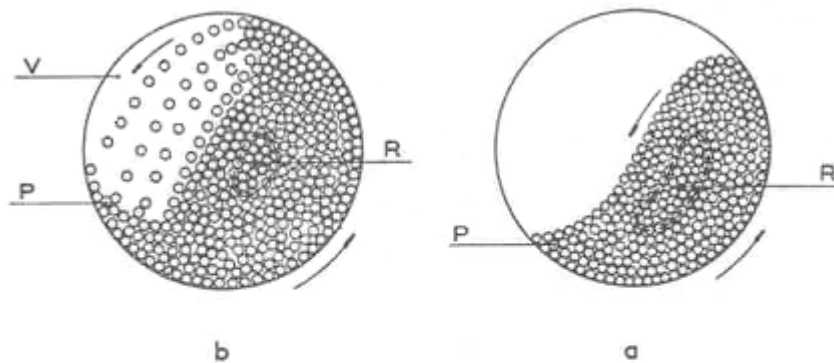
El volumen ocupado, lo producen normalmente los elementos molturadores y entre estos se introduce el material a moler, siendo estos huecos entre las barras o las bolas el concepto utilizado para obtener el peso del material molturador. Se considera por geometría que los huecos entre barras representan el 20% del volumen y entre las bolas el 40% del volumen y así se tiene:

Elemento	% huecos	Peso de los elementos molturadores	Observaciones
Bolas	40	$P_{\text{bolas}} = V_{\text{mol}} \cdot 0,45 \cdot 0,6 \cdot \delta_b$	$\delta_b$ : Densidad de las bolas, material molturador, para el acero $7,85 \text{ kg/dm}^3$
Barras	20	$P_{\text{barras}} = V_{\text{mol}} \cdot 0,45 \cdot 0,8 \cdot \delta_b$	$\delta_b$ : Densidad de las barras
Carga del molino	0%	$P_{\text{carga}} = V_{\text{mol}} \cdot 0,45 \cdot (0,6 \cdot \delta_b + 0,4 \cdot \delta_m)$ $= V_{\text{mol}} \cdot 0,45 \cdot (0,8 \cdot \delta_b + 0,2 \cdot \delta_m)$	Molino de bolas Molino de barras $\delta_m$ : Densidad del mineral

**Tabla 8.2.** Carga del molino.

### 8.1.6. Velocidad de giro/rotación

La velocidad de rotación del molino es un parámetro de importancia tanto en el consumo como en la operación de molienda que realiza. Este giro del molino sobre su eje produce el desplazamiento de la carga, hasta que el par resistente por el peso de la carga iguala al par motor transmitido, y produce el movimiento relativo de los elementos que la componen entre sí, produciéndose la fricción, choque, etc., que produce la molienda del mineral y el desgaste de los elementos molturadores que deben ser repuestos periódicamente.



- a) vitesse de rotation lente, marche en cascade.  
b) vitesse de rotation plus rapide, marche en cataracte.

**Figura 8.4.** Carga de un molino de bolas o varilla.

Este movimiento del molino se produce por diversos sistemas de acoplamiento entre el motor y el propio molino, normalmente función del tamaño. Estos sistemas, de forma esquemática se pueden clasificar en:

- Molinos pequeños, hasta unos 50 kW, se emplea un sistema a base de poleas y correas trapezoidales (contramarcha).
- Molinos medianos, que giran a menor velocidad (p.e.: 20 r.p.m.) se emplean sistemas de motor, reductor, piñón (externo al molino) y corona calada concéntrica con el molino<sup>3</sup>.
- Molinos grandes, se utiliza una tracción consistente en motor síncrono, piñón, y corona calada sobre el molino.
- Molinos muy grandes, de diámetro superior a 6 ó 7 m, el propio molino es el eje, con una zona bobinada solidaria con el molino, de un motor síncrono de gran tamaño. Al poner en marcha el motor gira el molino.

Los sistemas de acoplamiento pueden disponer de un sistema de acoplamiento hidráulico que suaviza los arranques y las brusquedades del sistema o mecanismos de arranque en carga mediante otros tipos de reguladores de velocidad estáticos (variadores, etc.).

### 8.1.6.1. Velocidad crítica

La velocidad de giro de un molino (velocidad de trabajo) se define como un porcentaje de la “*velocidad crítica teórica*” o “*velocidad crítica*” del molino, y que es aquella velocidad de rotación del molino para la cual la primera fila de bolas en contacto con la carcasa o las protecciones en su caso, y por el efecto centrífugo, se adhiere a la carcasa y deja de producir efecto de molienda, permanece adherida a la carcasa durante una vuelta completa. Esta velocidad es teórica y por el efecto de deslizamiento o el contrario de arrastre de los forros sufre ligeras modificaciones, pero siempre se considera una velocidad de referencia.

La definición de *velocidad crítica teórica* se refiere a aquella velocidad que centrifugaría una partícula infinitesimal situada en la periferia interna del molino.

El concepto de crítica se aplica porque representa la menor velocidad que produce el efecto mencionado, ya que cualquiera velocidad mayor que ésta, produce dicho efecto de adherencia en la fila de bolas exterior y en las siguientes en función del valor de dicha velocidad. En el momento que se alcanza la velocidad crítica, el molino pierde capacidad de molienda ya que hay un porcentaje de la carga de elementos molturadores que no realiza trabajo alguno.

El valor de la “*velocidad crítica, Vc o  $\omega_c$* ” es:

$$V_c = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \quad \omega_c = \frac{4,43}{\sqrt{D}}$$

Vc: Velocidad crítica en r.p.m.

$\omega_c$ : Velocidad crítica en rad/s.

D: Diámetro interno del molino en (m) y que puede tener la expresión  $D = D_n - 2 \cdot E_f - D_b/2$

- Dn: Diámetro nominal del molino, indicado normalmente en catálogo.
- Ef: Espesor medio de los forros.
- Db: Diámetro medio de las bolas/barras.

<sup>3</sup> Este sistema corresponde a la imagen habitual de los pictogramas que se utilizan para caracterizar a un molino.

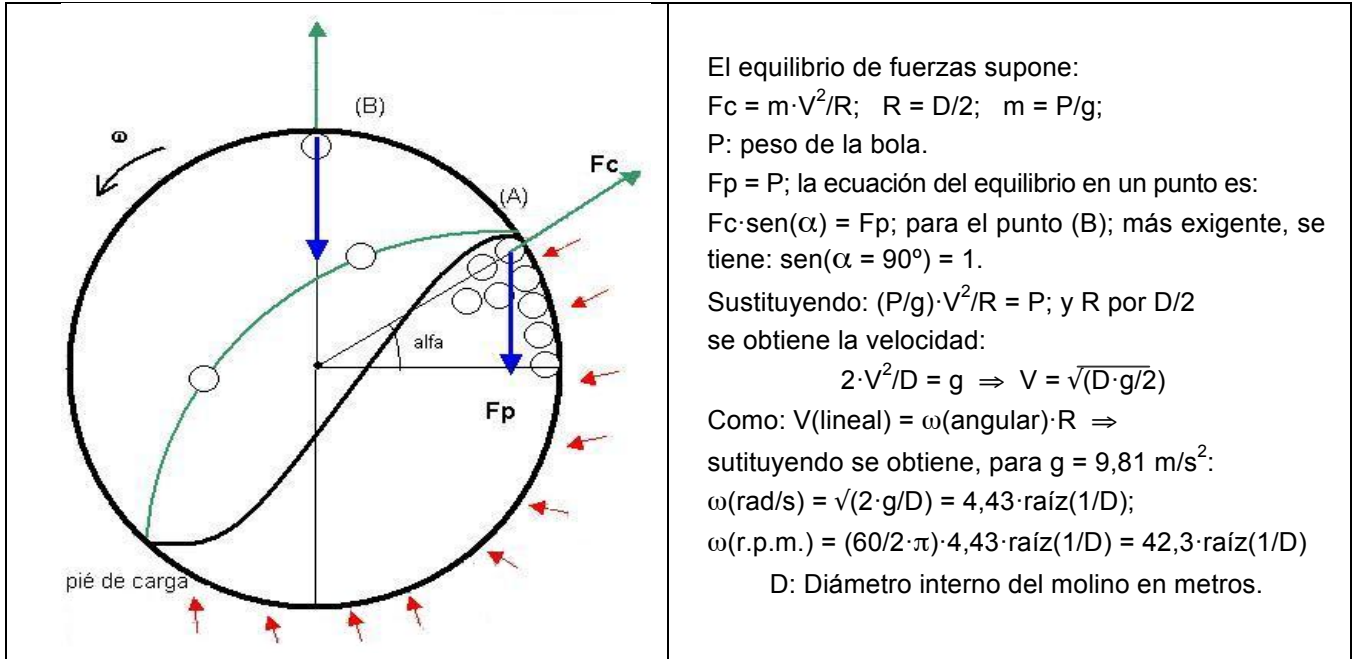


Figura 8.5. Obtención de la velocidad crítica del molino.

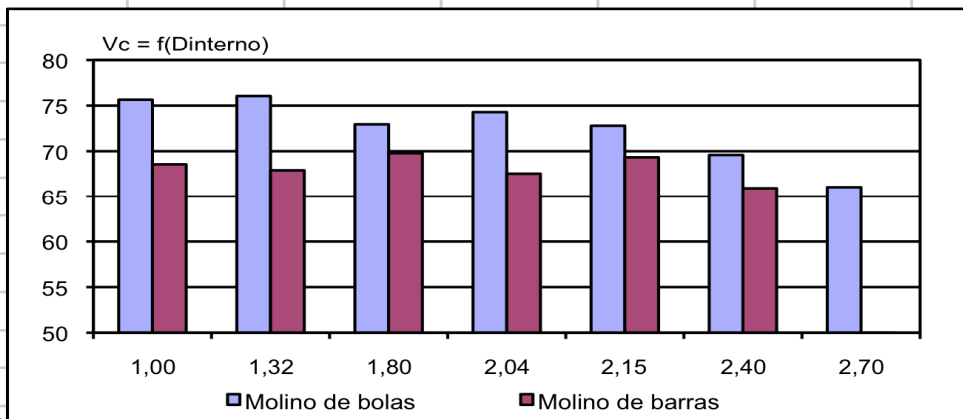
Se considera suficiente aproximación en la bibliografía la dada por  $D = D_n - 2 \cdot E_f$ . Para una partícula infinitesimal en la zona exterior,  $D = D_n$  que es el valor teórico.

Para obtener la expresión anterior se considera el equilibrio entre la fuerza centrífuga que impulsa la bola contra la carcasa y la fuerza de gravedad que tiende a separarla y se comparan en la peor situación para asegurar la adherencia en los  $360^\circ$ , esta se corresponde al punto (B) indicado en la figura

Se observa que esta velocidad crítica depende del diámetro interno del molino y es independiente del tipo de material molido.

La velocidad real del molino se suele fijar en un porcentaje de esta velocidad crítica y varía entre el 60% y el 80% normalmente. El punto de máximo rendimiento, medido por la potencia necesaria para accionar el molino, está en el entorno del 75% y se suelen utilizar velocidades de rotación de 65-70% para los molinos de bolas y de 50-70% para los molinos de barras.

<b>Molino de bolas</b>						
Diametro (m)	Longitud (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Potencia CV	Velocidad crítica Vc	Velocidad catálogo	Vc(r.p.m.) % Vc
1,00	3,5	2,75	50	42,3	32	76
1,32	5,0	6,84	100	36,8	28	76
1,80	6,0	15,26	200	31,5	23	73
2,04	6,0	19,60	250	29,6	22	74
2,15	6,0	21,77	250	28,8	21	73
2,40	6,0	27,13	400	27,3	19	70
2,70	6,0	34,34	450	25,7	17	66



<b>Molino de barras</b>						
Diametro (m)	Longitud (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Potencia CV	Velocidad crítica Vc	Velocidad catálogo	Vc(r.p.m.) % Vc
1,00	3,5	2,75	55	42,3	29	69
1,32	4,0	5,47	100	36,8	25	68
1,80	4,5	11,45	200	31,5	22	70
2,04	4,5	14,70	250	29,6	20	68
2,15	4,5	16,33	250	28,8	20	69
2,40	5,0	22,61	400	27,3	18	66

Tabla 8.3. Velocidades de trabajo indicadas por los fabricantes.

### Experiencia práctica de Birebent

El efecto de la velocidad de giro del molino en función del porcentaje de la velocidad crítica, medido sobre el aumento de potencia consumido por el molino, se da en el gráfico que se adjunta y que corresponde a la experiencia de Birebent. También se indica que a esta velocidad corresponde la máxima creación de nueva superficie.

La experiencia corresponde a la molienda obtenida durante 40 minutos en un molino de 63,5 cm de diámetro por 64 cm de largo.

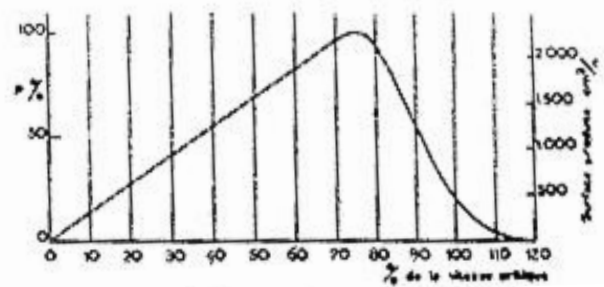
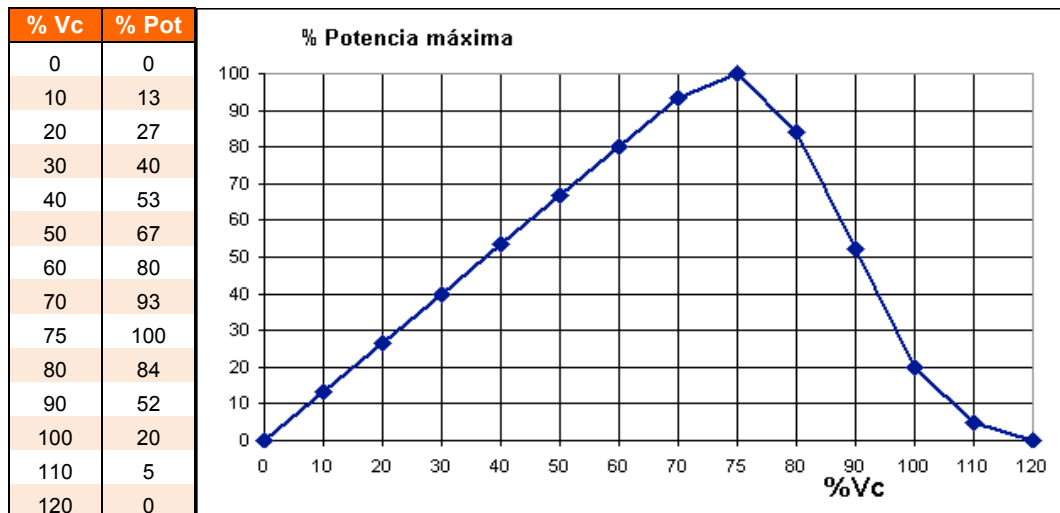


Figura 8.6. Influencia de la trituración de la velocidad de rotación.



**Figura 8.7.** Experiencia de Birebent.

### Ejercicio

Obtener para un grado de llenado determinado (%Vol), la expresión, en función de este grado de llenado, que hace nula la molienda por centrifugación total de la carga. Aplicar los resultados para un llenado del 45% y del 50% y comparar los resultados con los valores obtenidos de la experiencia de Birebent.

La velocidad crítica obtenida para los molinos,  $V_c$ , define aquella velocidad que hace que la línea de bolas (barras) en contacto con los forros del molino, permanezca sin deslizamiento ni rodadura por el efecto de la fuerza centrífuga que la impulsa contra la carcasa interior.

Se trata de conocer aquella velocidad de rotación del molino que hace que la línea de bolas, más próxima al centro del molino, permanece mediante un efecto de centrifugado adherida a la carcasa del molino, lo que significa, al ser esta fuerza mayor que la correspondiente a la línea exterior, que la totalidad de la carga permanece centrifugada sin realizar trabajo alguno de molienda.



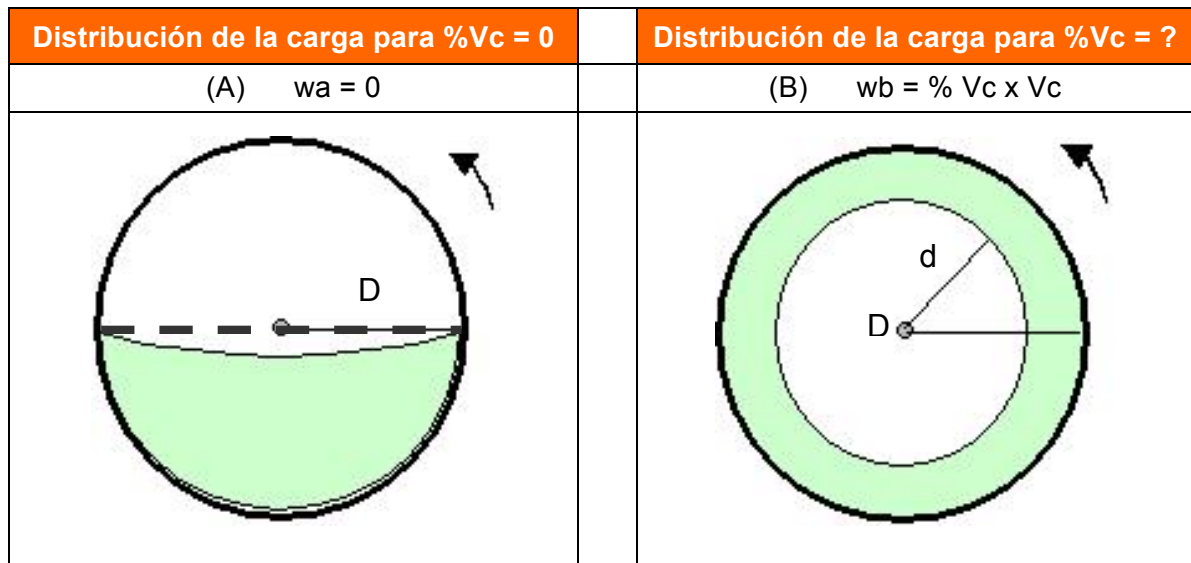


Figura 8.8. Distribución de la carga.

Se definen las variables:

- V: S·L, volumen interno del cilindro; S: sección interna libre; L: longitud útil.
- %Vol: volumen del molino ocupado por la carga en tanto por uno (fracción).
- Vc: velocidad crítica en r.p.m.;  $V_c = 42,3 / \text{raiz}(D)$ .
- vc: velocidad crítica para un molino de diámetro igual al diámetro interno de la corona circular.
- %Vc: fracción en tanto por uno de la velocidad crítica a la que gira el molino en la condición extrema (B).
- D: diámetro interno del molino.
- d: diámetro interno de la corona circular.
- (A): situación de la carga en reposo; (B): situación de la carga centrifugada.

El equilibrio de volúmenes entre la situación (A) y (B) permite plantear la igualdad:

$$\%Vol \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot L ; \text{ que simplificada: } d^2 = D^2(1 - \%Vol); \text{ luego:}$$

$$d = D \cdot (1 - \%Vol)^{1/2};$$

La velocidad crítica de un molino, para un diámetro igual al diámetro interno de la corona circular viene dada por:

$$vc = \frac{42,3}{\sqrt{d}}$$

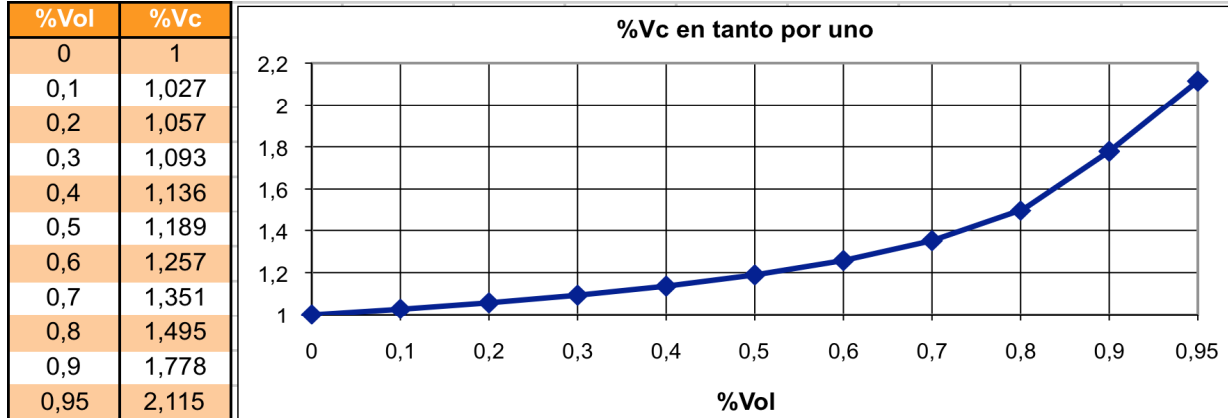
Sustituyendo en la fórmula anterior la relación entre diámetros, obtenida anteriormente, se obtiene la relación:

$$vc = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{(1 - \%Vol)}} \right)^2 ; \text{ que se puede describir como:}$$

$$vc = V_c \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{(1 - \%Vol)}} \right)^2 ; vc = V_c \cdot \%V_c ; \text{ siendo } \%V_c = \left( \frac{1}{\sqrt{(1 - \%Vol)}} \right)^2$$

Esta última expresión es una relación entre la velocidad crítica del molino de radio D y la velocidad necesaria, como función de la velocidad crítica, a la que debe girar el molino para centrifugación total de la carga o molienda nula.

La expresión anterior aplicada para un grado de llenado del 45% da 1,16 (116%) y para 50% da un valor de 1,19 (119%) que es coincidente con el experimento de Birebent.

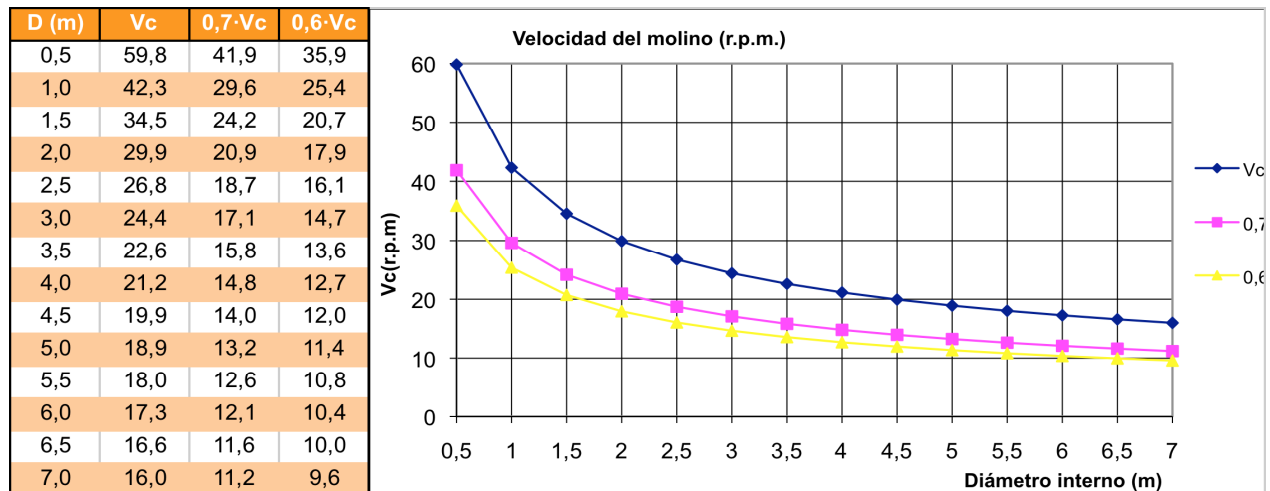


**Figura 8.9.** En el gráfico se dan los diferentes valores, como fracción de la velocidad crítica, para distintos grados de llenado del molino.

Se evidencia por lo anterior que no se debe sobrepasar la velocidad límite correspondiente al molino, ya que se producen todos los efectos de desgaste, consumo, etc., debidos a una mayor velocidad de giro y a la vez se perjudica la capacidad de molienda del equipo.

Los molinos son máquinas industriales con velocidades de rotación lenta, función del diámetro, y esta velocidad es tanto más lenta a medida que aumenta el tamaño del molino. En la figura que se adjunta se da la velocidad teórica crítica para diversos diámetros internos de molino y la correspondiente al 70% y 60% de esta velocidad crítica que es un rango real de funcionamiento cuando se realiza una operación minera de fragmentación.

Su funcionamiento genera, desde el punto de vista de la seguridad de operación, una sensación de falso control por este efecto de velocidad lenta, por lo que se debe disponer de un recinto de seguridad en torno al molino que impida el paso de forma involuntaria. Su baja velocidad está siempre unida a masas importantes en movimiento por lo que la energía de un posible accidente en caso de impacto es muy elevada.

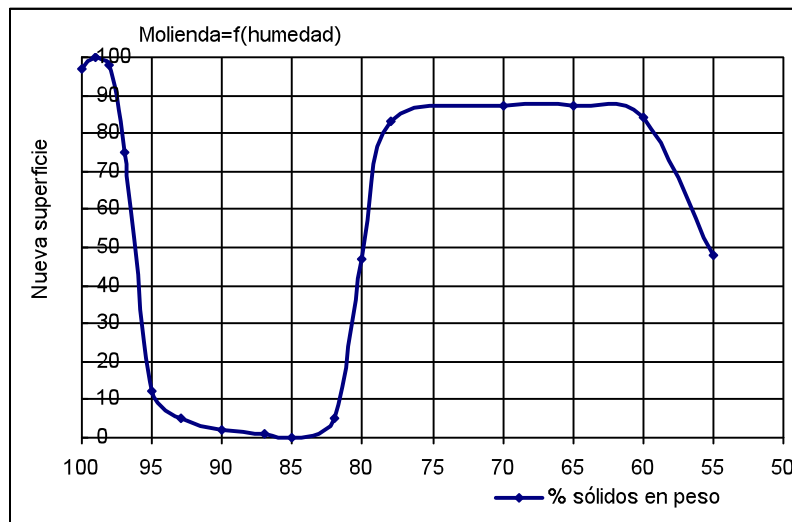


Se observa que para un margen amplio de tamaño de molino, la velocidad de trabajo está entre 10 y 20 r.p.m.

**8.1.7. Efecto de la humedad**

El mayor rendimiento de los molinos se consigue en seco, pero no absoluto, sino con una pequeña humedad (1%), que por alguna razón favorece la rotura de los granos.

Si la proporción de agua sigue aumentando, el rendimiento cae rápidamente, se produce una pasta pegajosa que recubre las bolas y forros e impide los choques y la abrasión, hasta alcanzar un valor del 8%-9% donde aumenta rápidamente el rendimiento de la molienda (evaluado como nueva superficie creada) y se mantiene este rendimiento alto hasta valores de 55%-60% de sólidos en peso.



**Figura 8.10.** Efecto de la humedad en la molienda.

Por diferentes facilidades en la molienda, (menos polvo, disminución del ruido, facilidad de transporte, entre otras), se prefiere (está más generalizada) la molienda en húmedo frente a la molienda en seco, con la salvedad hecha para aquellos productos a los que la humedad puede afectar (caso de la fabricación del cemento) o hacer reacción (oxidación o contaminación de la mena por otros efectos), o la evidente de disponibilidad de agua en cantidad adecuada.

En la tabla siguiente se dan recomendaciones para diferentes tipos de molino:

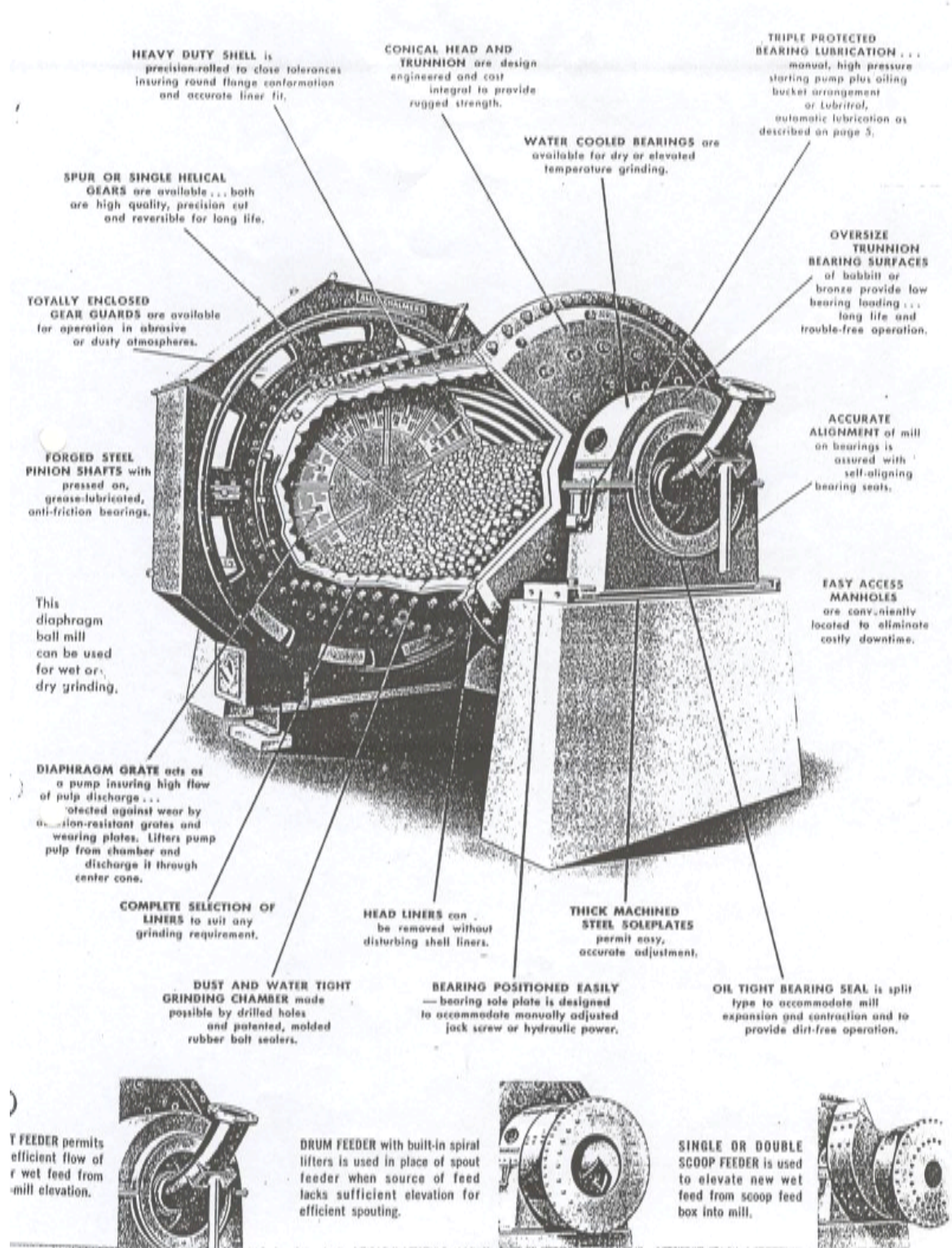
Tipo de molino	% de agua en volumen	% sólidos en peso (para una densidad de 2,7-3 kg/dm <sup>3</sup> )
Barras 1-2 mm	40-45	75-80
Bolas 0,2-0,5 mm	55-60	65-70
Bolas 0,05-0,1	65-70	55-60

**Tabla 8.4.** Densidades de pulpa usuales<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Referencia D. Ramón Álvarez, Catedrático de E.U.I. de Minas, Madrid.

**8.1.8. Esquema general de un molino<sup>5</sup>**

En la figura siguiente se describen los componentes, elementos externos e internos y los sistemas de carga más habituales.



<sup>5</sup> Taggart, Handbook of Mineral Processing. 1956.

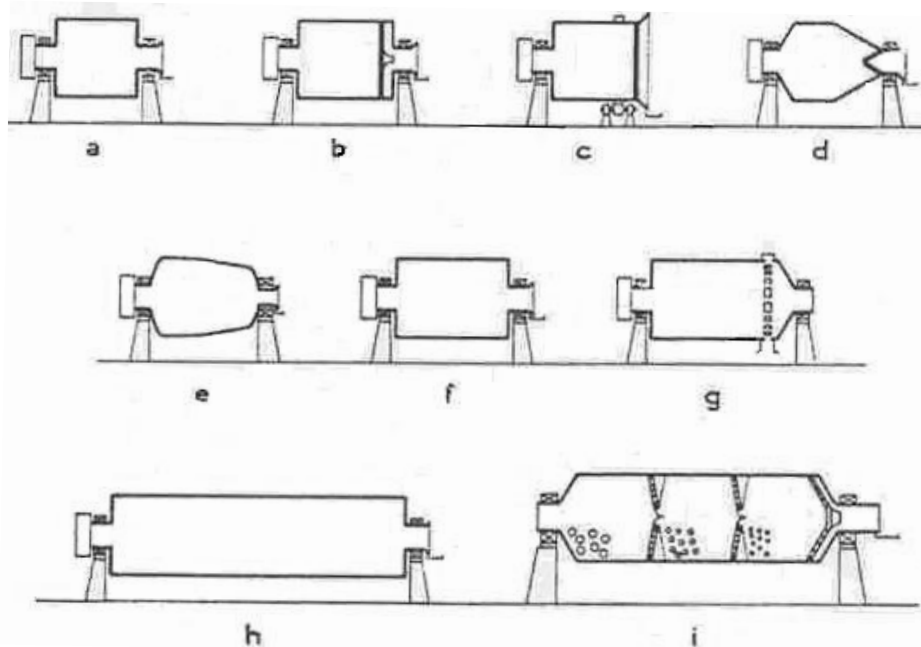


En el esquema anterior se identifican las partes fundamentales de un molino como son:

- Coraza: para exterior resistente, normalmente de forma cilíndrica, a la que van ancladas los revestimientos interiores.
- Cabezas laterales: superficies circulares con ligeras curvaturas, que deben soportar fuertes esfuerzos. Por la zona axial se introduce el mineral, boca de carga, y por la axial o un lateral de la parte opuesta se extrae la molienda.
- Boca de carga y su opuesta boca de descarga o salida: aberturas axiales donde se ubican los rodamientos. La carga se puede efectuar por alguna de los procedimientos siguientes:
  - Admisión directa: normalmente un tubo acoplada a la boca de entrada. La alimentación viene impulsada por una bomba o un ventilador.
  - Tambor de alimentación: hélice que en su movimiento de giro introduce la carga correspondiente al molino.
  - Alimentador de cuchara: simple a doble, alimenta al molino y tiene un efecto de elevación de la carga. Normalmente se utiliza con clasificadores de tornillo o racletas en los circuitos cerrados.
- Rodamientos: piezas que facilita el movimiento de giro, disminuyen los rozamientos, y que deben estar debidamente protegidos contra el polvo, mediante carcasas estancas.
- Bancadas: de construcción robusta, hormigón armado, deben soportar los esfuerzos y la carga del molino.
- Piñón de ataque (o sistema de accionamiento): debidamente protegido.
- Rejilla: elemento interno de clasificación, puede o no existir en determinados modelos o instalaciones.
- Blindajes o protecciones interiores: de diferentes materiales y formas, tiene la misión de proteger la carcasa del molino, ayudar al efecto de molienda y facilitar la disminución del ruido, entre otros.
- Rejilla de salida: en determinadas instalaciones y para no dañar los clasificadores se instalan, en la boca de descarga, rejillas para impedir la entrada en el clasificador de cuerpos grandes o intriturables.
- Sistemas de acoplamiento: descritos anteriormente. El de la figura corresponde a piñón y corona concéntrica con el molino.

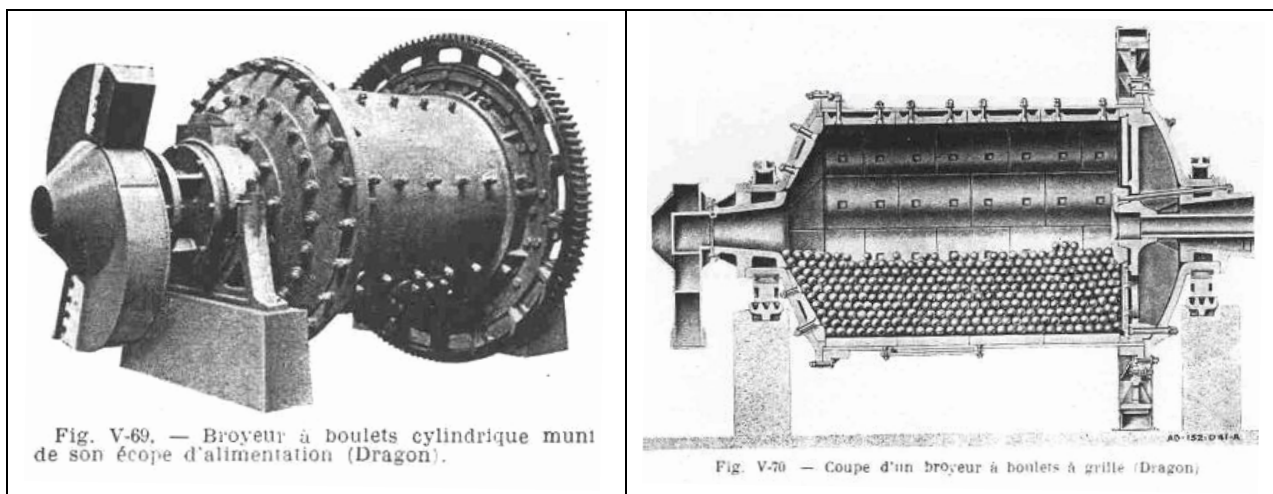
**8.1.9. Formas de los molinos**

Los molinos, según sus diferentes aplicaciones, tienen diferentes formas entre las que podemos describir las que se adjuntan en la figura siguiente:



**Figura 8.11.** Formas corrientes de los molinos de bolas y de barras.

- a) Molino de bolas de descarga por rebose.
- b) Molino de bolas cilíndrico con rejilla.
- c) Molino de bolas cilíndrico, con rejilla, de descarga periférica.
- d) Molino de bolas bicónico.
- e) Molino de bolas tricónico.
- f) Molino de barras de descarga por rebose.
- g) Molino de barras de descarga periférica.
- h) Molino tipo tubo.
- i) Molino de compartimentos.

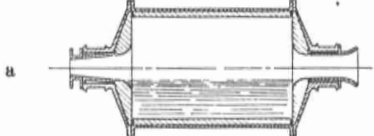
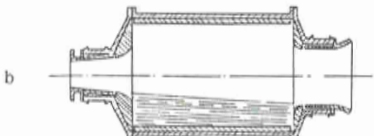
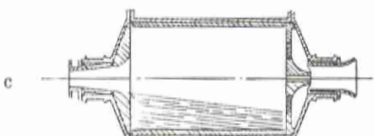
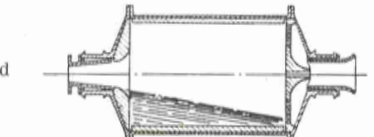
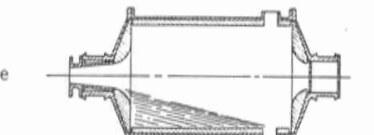
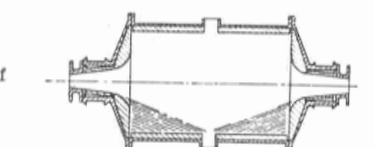


**Figura 8.12.** Molino con alimentación de doble cuchara y sección con vista interior de la rejilla.



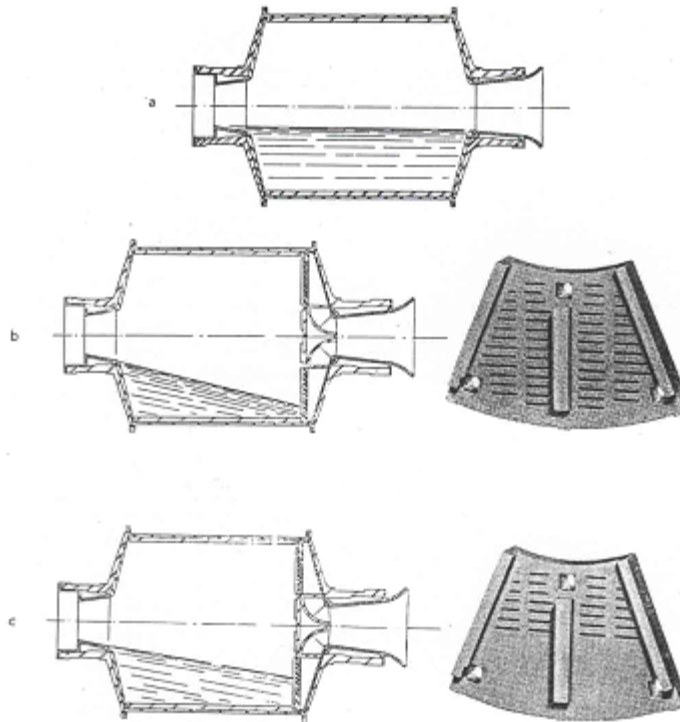
**8.1.10. Tipo de rebose, tiempo de permanencia en el interior**

El tiempo de permanencia del material a moler dentro del molino depende fundamentalmente del tamaño del molino, la velocidad de giro, que facilita el desplazamiento de la pulpa en el interior del molino, y del tipo de flujo que se establece en el interior. El tiempo medio de permanencia se obtiene por relación entre el volumen ocupado del cilindro y el flujo que se establece, teniendo en consideración el volumen real ocupado por el mineral a moler.

	<p><b>a)</b> Descarga por rebose, nivel alto.</p>
	<p><b>b)</b> Descarga por rebose, nivel bajo.</p>
	<p><b>c)</b> Descarga mediante rejilla, nivel medio.</p>
	<p><b>d)</b> Descarga con rejilla, nivel bajo.</p>
	<p><b>e)</b> Descarga periférica.</p>
 <p>Fig. V-78. — Types de décharge utilisés dans les broyeurs à barres et niveaux de pulpe correspondants dans le cas de broyage humide.</p> <p>a) décharge par débordement, niveau haut.  b) décharge par débordement, niveau bas.  c) décharge par grille, niveau moyen.  d) décharge par grille, niveau bas.  e) décharge périphérique.  f) décharge périphérique centrale, alimentation par les deux tourillons.</p> <p>(Document Allis-Chalmers).</p>	<p><b>f)</b> Descarga periférica central con alimentación por ambos lados del molino.</p>

El tipo de descarga, nivel alto, medio, central, etc., afecta de manera directa a la velocidad de paso por el molino y al tonelaje horario tratado. En los molinos de barras para obtener grandes tonelajes se emplea la descarga centra y alimentación por las dos bocas, además de las descargas habituales y en los de bolas se emplea la descarga lateral con diferentes alturas.

Para modificar dentro de un mismo equipo, las velocidades de paso y a la vez establecer un tamaño por encima del cual se impide la salida del material, se dispone de rejillas internas, sustituyibles, del tipo representado en la figura que se adjunta. Se da para un nivel de descarga por rebose (sin rejilla) descarga de nivel bajo y de nivel intermedio, los tipos de rejilla que se emplean.



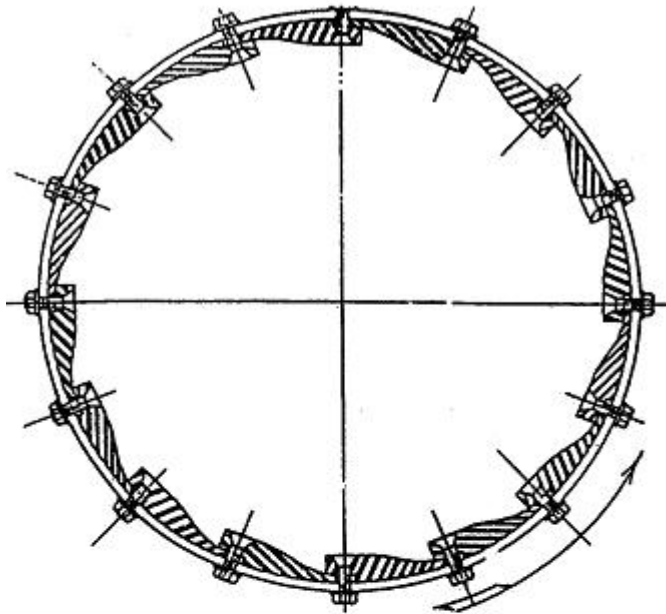
**Figura 8.13.** Nivel de pulpa en el molino.

Existen molinos de descarga central que son alimentados por ambos laterales y descargan por el centro del molino con lo que se produce un gradiente elevado, con tiempos de paso muy cortos.

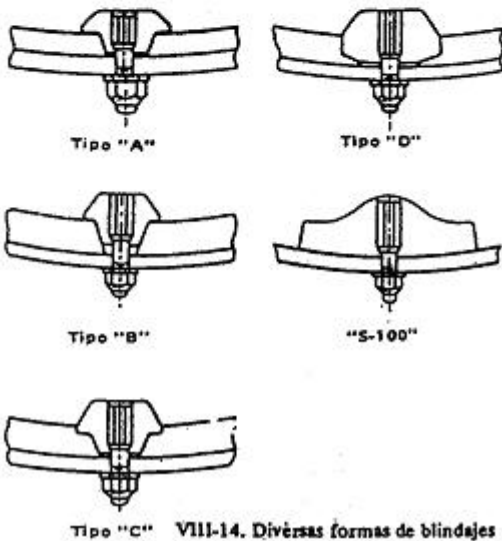
### 8.1.11. Blindajes y revestimientos

Estos sistemas tienen una doble misión, proteger la carcasa, elemento resistente del molino, de las acciones de la molienda, golpes, desgastes, etc., y favorecer el movimiento de la carga dentro del molino.

En la figura que se adjunta se dan algunos modelos, identificando el tipo de anclaje, que a ser posible y como método de diseño, debe tener la sujeción embutida, escaqueado a la acción de molienda, para evitar el daño por el efecto de la molienda y facilitar así su reposición por desgaste.



VIII-13. Blindaje con placas en cascada



VIII-14. Diversas formas de blindajes

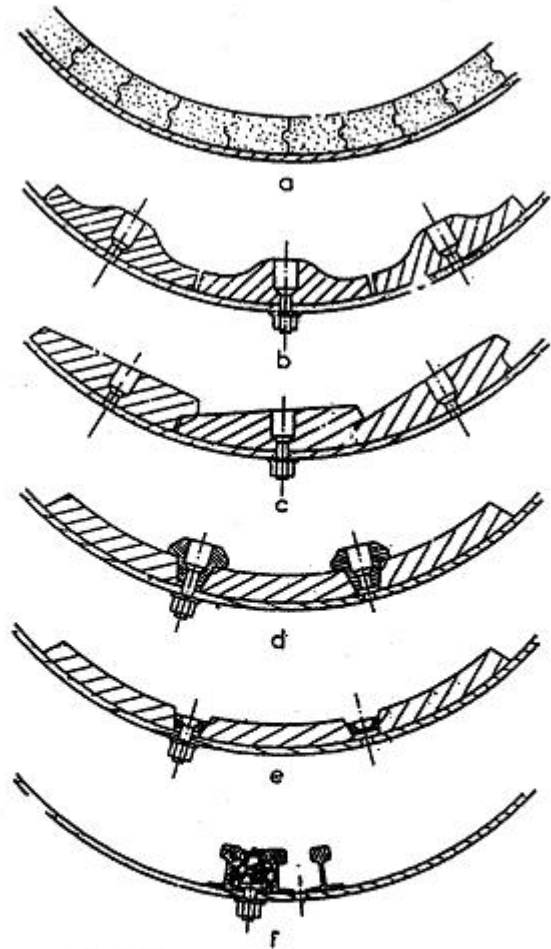


Fig. V-65. — Revêtements de broyeurs

- a) revêtement en briques jointoyées au ciment.
- b) blindage en forme de vagues
- c) blindage à recouvrements.
- d) blindage type Lorain.
- e) blindage de plaques.
- f) revêtement réalisé avec des rouleaux.



**Figura 8.14.**

Atasco en un molino de barras, se observa la rejilla de carga y la retención que esta hace para cuerpos de tamaño grande (barras) e igualmente actúa con elementos de mena con tamaños grandes.

La longitud de las barras debe ser 10 ó 15 cm menor que la longitud del molino, pero no mucho menor para evitar este efecto. En general los molinos de barras tienen una longitud de 2 ó 3 veces superior al diámetro el molino o incluso superior.

Esta limitación no es obligada en los molinos de bolas.

### 8.1.11.1. Materiales adecuados, fundiciones para las protecciones antidesgaste

Se resume el trabajo<sup>6</sup> “Comportamiento frente al desgaste de cuatro tipos de fundición”. El trabajo estudia el comportamiento frente al desgaste por abrasión, característico del trabajo de los materiales de recubrimiento en las trituradoras y molinos.

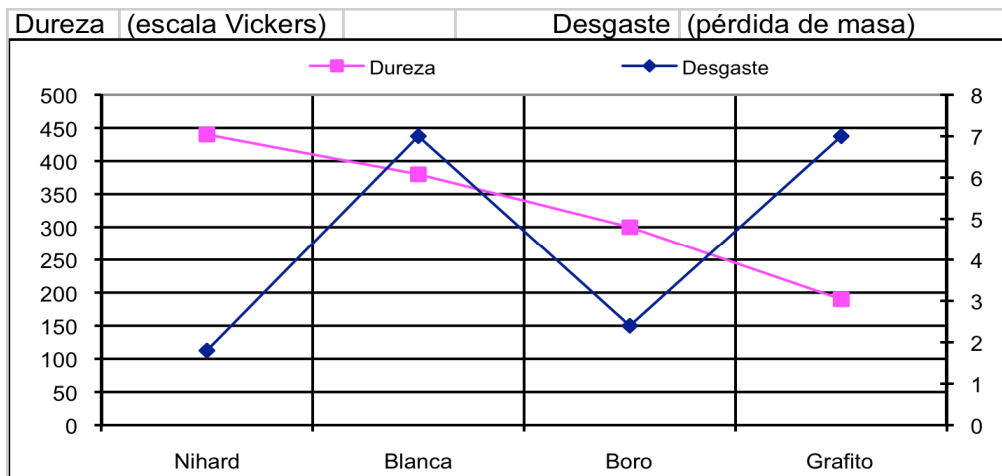
Las fundiciones<sup>7</sup> estudiadas corresponden a las descritas en la tabla:

Tipo de fundición	C (%)	Si (%)	Mn (%)	S (%)	P (%)	B (%)	Mg (%)	Ni (%)	Cr (%)
Blanca (*)	2,50	0,80	1,00	0,05	0,07	-	-	-	-
Grafito esferoidal	3,50	2,50	0,50	0,02	0,05	-	-	0,05	-
Boro	3,57	2,15	0,24	0,025	0,057	< 0,1	-	-	-
Ni-hard	2,75	0,50	0,50	0,02	0,04	-	-	4,50	2,00

(\*) Denominada en la bibliografía de trituración y molienda, con ligeras variaciones en la composición, fundición al manganeso, por el alto contenido en este compuesto y ausencia de Ni y Cr.

Las fundiciones han sido utilizadas tradicionalmente para la fabricación de piezas de maquinaria sometida a condiciones de trabajo de fuerte desgaste, fundamentalmente trabajo abrasivo, y aplicadas a sectores como la minería, el cemento, etc. Sus propiedades mecánicas son inferiores a las de los aceros pero absorben muy bien las vibraciones.

Lo indicado anteriormente se corresponde con el trabajo exigido en los equipos mineros que necesitan de alta resistencia a la abrasión, soportar vibraciones e impactos y tener una resistencia mecánica suficiente.



Dentro de los tipos estudiados, el que ofrece mejor comportamiento es el tipo Ni-hard con diferencia frente a los demás, también utilizados normalmente por su menor coste. La conclusión base indica: “La fundición blanca aleada conocida con el nombre de Ni-hard que debido a su mayor dureza y tenacidad sustituye a las fundiciones blancas en utilizaciones de fuerte desgaste como revestimientos de molinos, martillos y piezas destinadas a la preparación y molienda de minerales”.

El coeficiente de fricción, para todas las fundiciones, se mantiene durante el ensayo entre 0,45 y 0,48. El informe también indica las características de los granos, su microestructura y como esto afecta al trabajo de las piezas.

<sup>6</sup> Angel Varela Lafuente y otros. Universidad de la Coruña y Politécnica de Madrid. Revista DYNA. Marzo, 2009.

<sup>7</sup> A nivel básico es suficiente la diferencia entre fundición y acero por la composición en carbono y este límite está en el 2%, por debajo es acero, con propiedades de soldabilidad y resistencia mecánica mejores, y por encima es fundición con mejores propiedades de resistencia al desgaste.

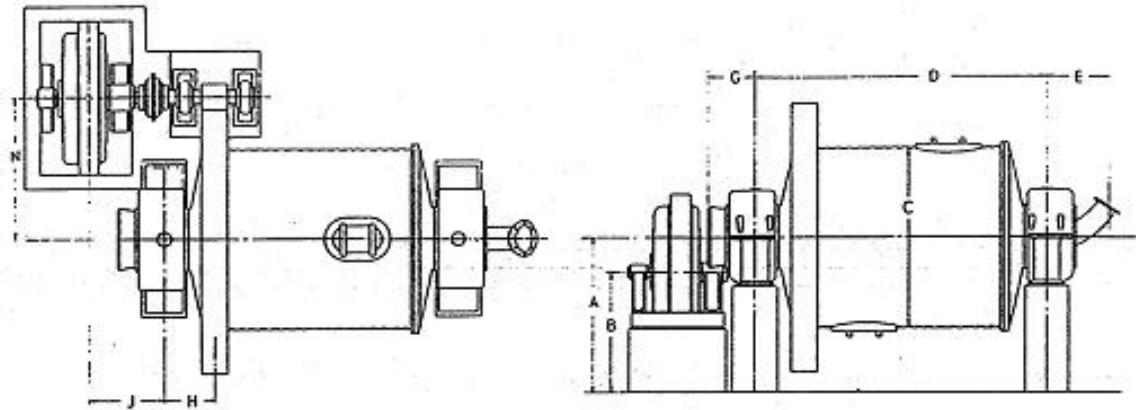
**8.1.12. Dimensiones de los molinos, potencias de accionamiento**

Se dan en las figuras que se adjuntan esquemas de acoplamiento y dimensiones de diversos tipos de molino.

**APPROXIMATE DIMENSIONS**

Dimensions shown are preliminary and are not to be used for construction purposes.

**FOR DIRECT DRIVE ROD MILLS**



Mill Size*	HP (Motor Size)	Mill Weight Lbs.**	Rod Charge Tons	A	B	C	D	E	G	H	J	N
913	450	249,000	55	8'11"	6'9"	9'0"	17'5"	2'9"	2'8"	2'3"	4'3"	7'1"
915	500	288,000	64	8'11"	6'9"	9'0"	19'5"	2'9"	2'8"	2'3"	4'3"	7'1"
1014	600	376,000	75	10'6"	8'6"	10'0"	18'0"	2'11"	2'6"	2'2"	5'0"	7'7"
1016	700	400,000	85.5	10'6"	8'6"	10'0"	20'0"	2'4"	2'6"	2'3"	7'8"	8'2"
1115	800	442,000	97	11'0"	9'3"	11'0"	20'5"	3'8"	2'11"	2'10"	7'11"	8'8"
1117	900	565,000	110	11'0"	9'3"	11'0"	22'5"	3'8"	2'11"	2'10"	7'11"	9'0"
1216	1000	614,000	124.5	12'6"	10'0"	12'0"	21'8"	3'11"	2'3"	2'6"	8'5"	9'11"
1218	1100	644,000	140	12'6"	10'0"	12'0"	23'8"	3'11"	2'3"	2'6"	8'11"	10'0"
1317	1250	713,000	158	13'6"	10'11"	13'0"	22'3"	4'0"	2'5"	2'10"	9'8"	12'0"
1318	1400	736,000	167.5	13'6"	10'11"	13'0"	23'3"	4'0"	2'5"	2'10"	9'8"	12'0"

\*For sizes other than those listed, consult factory.

\*\*Includes Grinding Media.



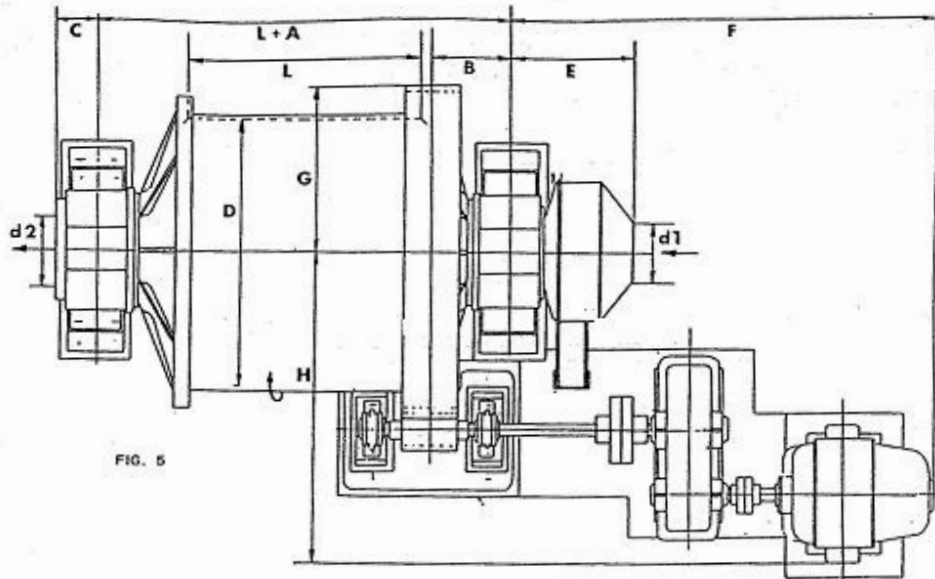


FIG. 5

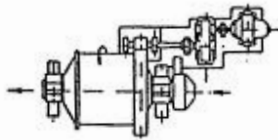


FIG. 6

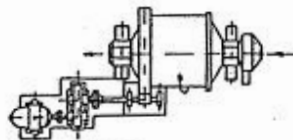


FIG. 7

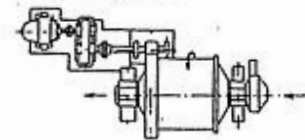


FIG. 8

**MOLINI TUBOLARI A PALLE**

Diametro	Lunghezza	A	B	C	E	F	G	H	Motore HP	Giri/1'
1000	1000 - 3500	600	300	210	600		680	1300	15-50	32
1320	1000 - 5000	1200	600	300	920		1300	2100	30-100	28
1800	1000 - 6000	1250	555	300	920	2600 3200	1300	2400	70-200	23
2040	1000 - 6000	1320	580	300	920	2600 3200	1300	2400	70-250	22
2150	1000 - 6000	1320	580	300	920	2600 3200	1400	2400	70-250	21
2400	2000 - 6000	1370	600	300	1200	2600 3200	1750	3000	180-400	19
2700	2000 - 6000	1370	600	300	1200	2600 3200	1750	3000	200-450	17

**MOLINI TUBOLARI A BARRE**

Diametro	Lunghezza	A	B	C	E	F	G	H	Motore HP	Giri/1'
1000	1500 - 3500	600	300	210	600		680	1300	20-55	29
1320	1500 - 4000	1200	600	300	920		1300	2100	40-100	25
1800	2500 - 4500	1250	555	300	920	2600 3200	1300	2400	70-200	22
2040	2500 - 4500	1320	580	300	920	2600 3200	1300	2400	70-250	20
2150	2500 - 4500	1320	580	300	920	2600 3200	1300	2400	70-250	20
2400	2500 - 5000	1370	600	300	1200	2600 3200	1750	3000	200-400	18



### Molino de bolas

Catálogo: [www.break-day.com](http://www.break-day.com) (2009)

**Break-day:** “El molino de bolas es el equipo más importante después de la trituración de los materiales y se utiliza ampliamente en el campo de minerales, industria química, construcción, cemento, materiales de construcción, materiales refractarios, fertilizantes químicos, la concentración de los metales, la producción de cerámica, etc.”.



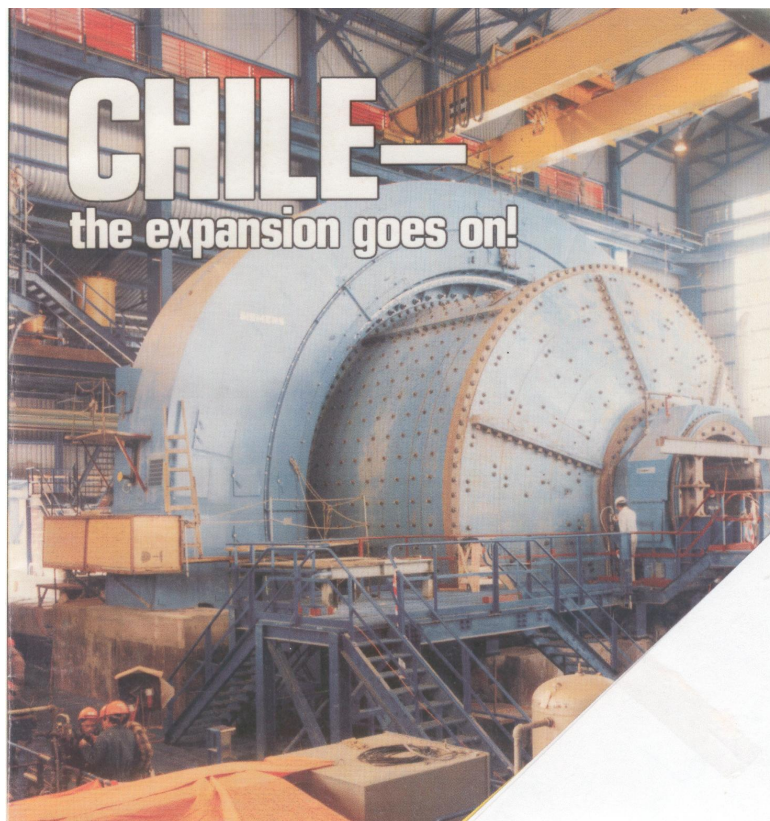
#### Especificaciones del molino (bolas)

Modelo	Velocidad (r/min)	Cantidad de llenado de bolas (T)	Tamaño de alimentación (mm)	Granulación de descarga (mm)	Producción (t/h)	Potencia de motor (kW)	Peso (t)
Φ900 × 1.800	38	1,5	≤ 20	0,075-0,89	0,65-2	18,5	3,6
Φ900 × 3.000	38	2,7	≤ 20	0,075-0,89	1,1-3,5	22	4,6
Φ1.200 × 2.400	32	3,8	≤ 25	0,075-0,6	1,5-4,8	45	12,5
Φ1.200 × 3.000	32	5	≤ 25	0,075-0,4	1,6-5	45	12,8
Φ1.200 × 4.500	32	7	≤ 25	0,075-0,4	1,6-5,8	55	13,8
Φ1.500 × 3.000	27	8	≤ 25	0,075-0,4	2-5	90	17
Φ1.500 × 4.500	27	14	≤ 25	0,075-0,4	3-6	110	21
Φ1.500 × 5.700	27	15	≤ 25	0,075-0,4	3,5-6	132	24,7
Φ1.830 × 3.000	24	11	≤ 25	0,075-0,4	4-10	180	28
Φ1.830 × 6.400	24	23	≤ 25	0,075-0,4	6,5-15	210	34
Φ1.830 × 7.000	24	25	≤ 25	0,075-0,4	7,5-17	245	36
Φ2.200 × 5.500	21	30	≤ 25	0,075-0,4	10-22	370	48,5
Φ2.200 × 6.500	21	30	≤ 25	0,075-0,4	14-26	280	52,8
Φ2.200 × 7.500	21	33	≤ 25	0,075-0,4	16-29	380	56
Φ2.200 × 9.500	21	38	≤ 25	0,074-0,4	18-35	475	62

Henan Liming Road & Bridge Heavy Industry Co., Ltd.



The world's largest operating SAG mill is a 36-ft-dia. × 15-ft unit, driven by a 15,000-hp wrap-around motor.



**Figura 8.15.** Molino de bolas con sistema de accionamiento, motor síncrono donde el rotor es el propio molino y el estator el toro circular que lo rodea. Instalado por Siemens en una mina de Cu, está accionado por un motor de 15.000 Hp (11.000 kW) y tiene unas dimensiones aproximadas de 10,97 m de diámetro interno por 4,57 m de longitud útil<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> 1 pié: 304,8 mm (12 pulgadas).

### 8.1.13. Molino de barras

Se indican algunas características específicas de estos equipos que permiten mayor precisión en los cálculos y estimaciones cuando se calcula la capacidad o la potencia necesaria. Siempre es de aplicación lo general de los molinos indicados anteriormente.

Estos molinos que trabajan normalmente en la trituración primaria, tamaños entre 2 m y 0,5 mm, se caracterizan por que los elementos molturadores son barras y esto le impone algunas características específicas que se indican a continuación.

Las barras producen en la zona de entrada un esponjamiento por el efecto de los granos mayores que permite desplazarse a los granos menores sin sufrir fragmentación hasta una zona de avance dentro del molino que si les afecta y al contrario, los granos mayores, en la entrada, soportan fuertes presiones por el peso que gravita sobre ellos y se fragmentan rápidamente.

El efecto es el indicado por el esquema siguiente:



En la zona de salida, las barras hacen un efecto de malla o tamiz y dejan pasar granos entre ellas y no dejan pasar aquellos que superan este valor por el efecto de fragmentación del peso que soportan, barras y mineral. Este efecto hace que el molino de barras no sea adecuado para producir finos y ultrafinos, labor que realizan los molinos de bolas.

Importante es la relación entre la longitud de las barras que debe ser de 10 a 15 cm inferior a la longitud del molino, pero nunca inferior a 1,5 veces, al menos, del diámetro para evitar atascos. Si se producen atascos, se debe entrar dentro del molino, cortar las barras y extraer los trozos para iniciar un nuevo proceso de carga de elementos molturadores (barras).

El *tamaño de la alimentación* considerado ideal por algunos autores es:

$$D_{80} (mm) = 16 \cdot \sqrt{\frac{13}{W_i}}$$

Trabajando en forma de pulpa, que es lo habitual, la pulpa debe estar entre 40-45% de agua en volumen lo que significa una fracción de sólidos en peso de 75%-80% para minerales de 2,7-3 kg/l.

El revestimiento interno de protección, forros, suele ser de material ondulado que facilita el movimiento de las barras y cuando se realiza en material de caucho se disminuye notablemente el ruido pero este material es poco resistente al corte. Los revestimientos de las bases del cilindros suelen ser lisos, gruesos y resistentes por el efecto de desgaste de grandes barras de acero, peso grande, actuando contra ellas.

El diámetro adecuado de las barras nuevas de alimentación se puede calcular a través de una fórmula propuesta por Bond:

$$D_{barra} (mm) = 0,1587 \cdot D_{80}^{0,75} \cdot \sqrt{\frac{W_i \cdot \rho}{fV_c \cdot \sqrt{3,281 \cdot D}}}$$

Siendo:

$fV_c$ : La fracción de la velocidad de giro expresada, en este caso, en tanto por ciento de la velocidad crítica.

D: Es el diámetro interior del molino en m.

El resto de parámetros son los ya definidos y en las unidades generales  $D_{80}$  en micras,  $W_i$  relacionado a toneladas cortas (si se usa "t" internacionales hay que corregir el parámetro) y  $\rho$  en  $kg/dm^3$ .

Al aplicar la fórmula de Bond se puede mejorar la precisión mediante los factores de corrección siguientes:

- F<sub>0</sub>: Corrección por seco o húmedo, 1,3 ó 1.
- F<sub>1</sub>: Corrección por circuito abierto a cerrado, fórmula general.
- F<sub>2</sub>: Corrección por diámetro de molino, fórmula general.
- F<sub>3</sub>: Factor de corrección por desviación del tamaño de la alimentación considerada ideal y dado por la expresión siguiente, con W<sub>i</sub> calculado para resultados en toneladas cortas por lo que se debe corregir para uso con toneladas métricas.

$$F_3 = 1 + (W_i - 7) \cdot \left( \frac{d_{80}}{16000 \sqrt{\frac{13}{W_i}}} - \frac{d_{80}}{D_{80}} \right)$$

- F<sub>4</sub>: Factor de corrección por desviación de la razón de reducción normal y que viene dado por la expresión siguiente. Se aplica cuando el valor de la fórmula  $(D_{80}/d_{80} - (8 + 5(L/D)))$  está fuera del rango -2 y +2.

$$F_4 = 1 + \frac{\left( \frac{D_{80}}{d_{80}} - (8 + 5 \frac{L}{D}) \right)}{150}$$

- F<sub>5</sub>: Corrige la fórmula de Bond por la diferente uniformidad de la granulometría y toma los valores de:  
1,4 circuito abierto; 1,2 circuito cerrado.  
1,2 y 1 respectivamente si se trata de un circuito serie de molino de barras-molino de bolas.

### 8.1.14. Molino de bolas

Se indican algunas características específicas de estos equipos que permiten mayor precisión en los cálculos y estimaciones cuando se calcula la capacidad o la potencia necesaria. Siempre es de aplicación lo general de los molinos indicado anteriormente.

Por los elementos molturadores usados, bolas, no se necesitan limitaciones dimensionales pero se puede identificar algunas tipos de diseño según el uso y así se tiene:

Si los molinos son para aplicaciones mineralúrgicas con fase final de concentración, tienen una relación L/D corta, de 1 a 2 para limitar la producción de finos que consumen mucha energía y son perjudiciales en los procesos de concentración en forma de pulpa (CMD o flotación).

La forma de trabajo de forma general es en circuito cerrado, da menos finos y energéticamente es mas económico. Cuando se quieren altas producciones, flujos mayores, se utilizan molinos tipo Marcy, con rejilla de salida<sup>9</sup> que permite el paso de la pulpa pero no de las bolas. El gradiente se regula en función de al altura de los orificios de paso de la rejilla.

En la elección de los forros, se recurre a la experiencia pero se pueden facilitar algunas reglas de ayuda:

Si se trabaja con bolas de acero de 50 a 60 mm y forros metálicos, se escogen del tipo doble onda. Si las bolas son mayores se suelen poner de onda sencilla. Las ondas suelen ser de 1,5 a 2 el espesor de los forros. Los forros pueden ser de 50 a 70 mm. Cuando las bolas son muy grandes, de 70 mm o mayores, los forros de tipo caucho pueden dar pérdida de potencia para moler y se deterioran muy rápido por lo que no son aconsejables.

<sup>9</sup> Rejilla construida con acero al manganeso de alta resistencia.



Las *densidades de pulpa* usuales para los molinos de bolas están entre 55 y 70 en % de volumen de agua, lo que representa entre el 60 y 70% de sólidos en peso para menas de 2,7 a 3 t/m<sup>3</sup> de densidad. Están mejor adaptados para producir finos y alimentaciones de tamaño menor que los molinos de barras.

El *tamaño máximo de alimentación*, se aconseja mediante la fórmula:

$$D_{80} = 4.000 \cdot \sqrt{\frac{13}{W_i}}$$

El *tamaño de bola mayor*, y de reposición con la alimentación, se puede calcular mediante la fórmula propuesta por Bond siguiente:

$$D_{bola} (mm) = 25,4 \cdot \sqrt{\frac{D_{80}}{K}} \cdot \sqrt[3]{\frac{W_i \cdot \rho}{fVc \cdot \sqrt{3,281 \cdot D_{molino}}}}$$

Siendo:

- D<sub>bola</sub>: El diámetro de la bola de acero en mm.
- W<sub>i</sub>: El índice de Bons relacionado a tonelada corta.
- fV: Es la velocidad de giro en porcentaje de la velocidad crítica.
- D<sub>molino</sub>: Es el diámetro interior del molino en metros.
- K: Es una constante que toma los valores siguientes:
  - 350: molinos de rebose en circuito abierto y cerrado, con pulpa.
  - 330: molinos de diafragma en circuito abierto y cerrado en pulpa.
  - 335: molinos de diafragma en circuito abierto y cerrado, en seco.
  - Cuando se utilicen bolas o bolos de otro material distinto al del acero, se debe corregir el diámetro máximo de alimentación de los elementos molidores para conseguir similares efectos de molienda mediante la expresión:

$$D_{bolo(silice, otro)} = D_{bola} \cdot \sqrt[3]{\frac{7,8}{\rho_b}}$$

Para el caso de guijarros de sílice, de densidad 2,7, el factor toma el valor de 1,43. Cuando se añaden materiales del propio mineral a moler se debe considerar que en los primeros momentos de trabajo pierden de un 15 a un 35% de su masa antes de su comportamiento como bolos reales y esta masa de debe aumentar en el cálculo.

*Correcciones de la fórmula de Bond:* de forma similar a como se ha indicado para los molinos de barras, en los molinos de bolas se puede mejorar los cálculos dados por la fórmula de Bond mediante la aplicación de los factores específicos para molinos de bolas siguientes:

- F<sub>0</sub>: Corrección por seco o húmedo, 1,3 ó 1.
- F<sub>1</sub>: Corrección por circuito abierto a cerrado, fórmula general.
- F<sub>2</sub>: Corrección por diámetro de molino, fórmula general.
- F<sub>3</sub>: Factor de corrección por desviación del tamaño de la alimentación considerada ideal y dado por la expresión siguiente, con W<sub>i</sub> calculado para resultados en toneladas cortas por lo que se debe corregir para uso con toneladas métricas.

$$F_3 = 1 + (W_i - 7) \cdot \left( \frac{d_{80}}{4.000 \sqrt{\frac{13}{W_i}}} - \frac{d_{80}}{D_{80}} \right)$$

F<sub>4</sub>: Factor de corrección por desviación de la razón de reducción normal y que viene dado por la expresión siguiente. Se aplica cuando el valor de la fórmula  $(D_{80}/d_{80} - (8 + 5(L/D)))$  está fuera del rango -2 y +2.

$$F_4 = 1 + \frac{\left( \frac{D_{80}}{d_{80}} - \left( 8 + 5 \frac{L}{D} \right) \right)}{150}$$

F<sub>5</sub>: Corrige la fórmula de Bond por tamaños del  $d_{80}$  menores de 75 micras y por el efecto de molienda muy fina. Toma los valores dados por la expresión:

$$F_5 = \frac{d_{80} + 10,3}{1,145 \cdot d_{80}}$$

F<sub>6</sub>: Corrige por la utilización de relaciones de reducción inferiores a 6, y su valor viene dado por:

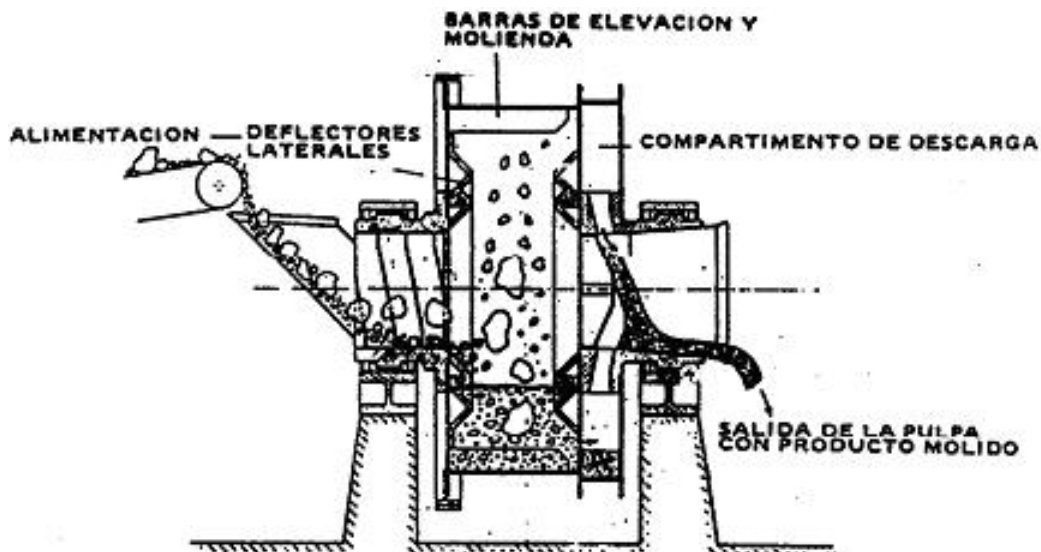
$$F_6 = 1 + \frac{0,13}{\frac{D_{80}}{d_{80}} - 1,35}$$



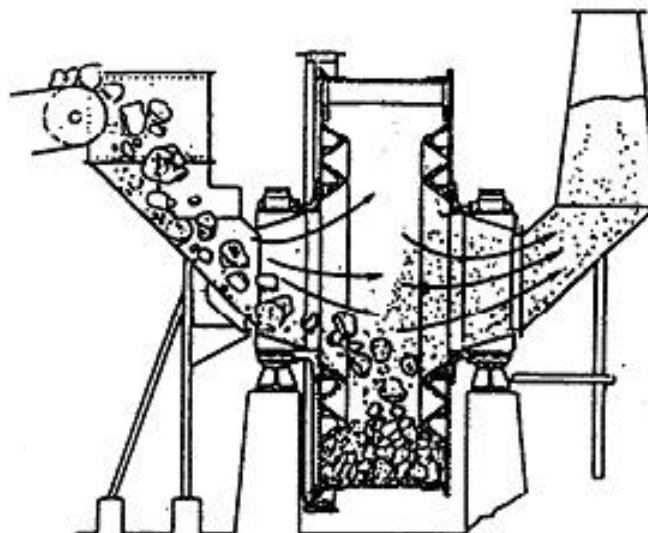
**8.1.15. Molinos especiales, guijarros, autógenos, SAG**

Se dan esquemas de molinos autógenos, en seco y en húmedo, indicando que estos suelen ser equipos de dimensiones muy elevadas donde la proporción entre el diámetro y la longitud es de varias veces superior para el diámetro.

Se denominan molinos SAG, molinos semiautógenos, aquellos que utilizan una mezcla de elementos molturadores, bolas normalmente, y material de tamaño grueso del propio mineral a moler. Estos equipos también modifican la relación  $D_{\text{interno}} / \text{Longitud}$  con respecto a los molinos normales y se suelen utilizar en las primeras etapas de molienda. El propio material de tamaño grueso realiza el efecto de molienda sobre los tamaños inferiores y se fragmenta a si mismo por este trabajo.



X-5. Molino "Hydrofall" ( cliché Fives Lille Call)



X-6. Molino "Aerofall" ( cliché Fives Lille Call)

### **8.1.15.1. Molinos de guijarros**

Es constructivamente similar a los molinos de bolas con la diferencia del elemento molturador, que suelen ser trozos de silex o pedernal. El revestimiento es goma o silex en lugar de acero. La capacidad del molino es un 30% de la correspondiente al molino de bolas y el consumo de energía sigue la misma proporción.

Se emplea para materiales que no pueden contaminarse con hierro como la arena de vidrio o materiales para la fabricación de pinturas que exigen alta pureza del mineral molido.

### **8.1.15.2. Molinos autógenos**

En estos equipos el elemento molturador son cuerpos del propio material a moler. El material grueso va a moler al fino, luego interesa que exista diferencia de dureza entre las partes gruesas y las finas. Las partes gruesas también son molidas en el proceso.

En este tipo de molino, el elemento que muele no tiene mucha dureza, así que la trayectoria de caída tiene que ser mayor para conseguir la energía necesaria para la fragmentación. Esta condición impone molinos con un diámetro claramente mayor que la longitud lo que es una característica de este tipo de equipos. Existe una desproporción muy acusada entre el diámetro y la longitud.

Pueden trabajar en seco (figura aerofall) y en húmedo (figura hydrofall) y de forma generalizada trabajan en circuito cerrado que proporciona un aumento de la capacidad de molienda importante.

La relación de reducción de estos equipos es muy alta, oscilando entre 50 y 200 y tienen un alto consumo de energía. Son máquinas caras y complejas, además de muy voluminosos.

### **8.1.15.3. Molinos semiautógenos**

Son en todo similares a los molinos de bolas con la característica básica de que el elemento molturador lo constituye una mezcla de bolas y elementos del propio mineral a moler de tamaño grande o notablemente mayor que el correspondiente a un molino solo de bolas.

Tiene, como el caso de los autógenos, un aumento en el diámetro del molino frente al correspondiente a un molino de bolas, para compensar la diferencia de densidad (energía necesaria para la molienda) del material a moler frente a las bolas de acero o fundición.

Es normal el funcionamiento de una unidad semiautógena trabajando en serie con un molino de bolas, el sistema es más eficiente que solo un molino de bolas. La primera etapa fragmenta las unidades mayores de la alimentación a la vez que muele lo fino y la segunda afina el proceso, previo eliminar del sistema los finos ya molidos mediante clasificadores de racletas, espiral o de tipo ciclones.

### **8.1.15.4. Molienda en seco**

Se utilizan las mismas máquinas que en húmedo, más alguna específica como puede ser los equipos especialmente diseñados para el cemento, pero de menos importancia en el proceso de concentración de minerales.

La capacidad del molino en seco es aproximadamente un 80% de la correspondiente al trabajo en húmedo y existe una cierta tendencia a utilizar estos equipos en circuito abierto.

El consumo de elementos molturadores es más reducido que en húmedo, estando entendido en estos procesos el trabajo con molinos autógenos.

Esta tecnología exige elementos de protección, más elaborados, contra el polvo, siendo este factor y el ruido producido por los equipos el elemento principal en contra de este sistema.

### 8.1.15.5. Características para algunos diseños, Autógenos y SAG

Los molinos Autógenos, de uso en minería específica, ofrecen algunas características específicas de interés y así, se puede indicar como *principales ventajas* las siguientes:

- Se efectúa la molienda por una mezcla de elementos molturadores de bolas y materiales del propio mineral a moler, de tamaño grande, extraídos de una fase anterior del proceso.
- La rotura es por impacto, caída desde una gran altura del mineral de tamaño grande con relación al tamaño a moler y se fragmentan ambos, el elemento molturador y el elemento molido.
- Al ser la rotura por impacto y abrasión entre trozos del mismo mineral, y menos energética que con las bolas de acero, se favorece la rotura por los planos de separación de los minerales con lo que se logra una liberación más selectiva y a mayor tamaño de grano medio. Esto favorece los procesos siguientes de la concentración.
- Por su concepción, permite eliminar etapas de trituración y molienda gruesa. Esto simplifica los procesos, circuitos de trituración y molienda, con ahorro de inversión y de gastos de operación.
- El efecto de rotura a mayor tamaño con liberación selectiva puede ser relevante en el consumo de energía, que como se ha indicado anteriormente, una variable de importancia en el proceso de molienda es el coste de la energía.
- Se reduce el consumo de acero de los elementos molturadores por el efecto de molienda del propio material.

*Entre los inconvenientes se puede indicar:*

- El mineral se debe prestar para este tipo de molinos. En caso contrario, el coste de corrección supera al de un circuito clásico de molienda.
- El proceso es sensible a las variaciones de la molidurabilidad de la mena en diferentes zonas del yacimiento y se requiere normalmente un parque de homogeneización.
- A veces se acepta incluso un ligero aumento en el gasto energético, frente a lo indicado anteriormente en ventajas, por otros factores económicos favorables. En este supuesto el sistema diseñado es sensible a la variación de precios energéticos.

Los molinos SAG, de mayor interés en minería y de uso más extendido, tienen las características favorables indicadas para los autógenos y reducen el efecto negativo. Se suelen alimentar de una etapa inicial con tamaños menores que los autógenos, los materiales proceden de un sistema de arranque de granulometría fina o de una etapa de trituración previa.

Estos equipos, normalmente, descompensan una de las dimensiones del molino frente a un diseño estándar, por el efecto de menor densidad del producto que el correspondiente a las bolas de acero, y así tiene un diámetro muy relevante frente a la longitud. Para estos equipos, la longitud suele ser del mismo orden que el diámetro.

El uso de estos equipos de tipos SAG es general en la minería como etapa previa a la molienda media o fina, trabajando en serie con un molino de bolas que, generalmente, tiene un esquema en circuito cerrado. Esta técnica está extendida en la minería de cobre, sin necesitar una especial adaptación del mineral como es el caso de los autógenos.

#### Ejemplo de molienda autógena

En la figura siguiente que se adjunta<sup>10</sup>, el mineral taconita, que va a ser sometido a un proceso de enriquecimiento posterior mediante flotación, se alimenta con aportación de reactivos necesarios para la flotación, en un molino autógeno (molino de cascada Hardinge). El producto de salida de (–) 75 mm, se clasifica mediante criba para hacer circuito cerrado ya que el mineral está en el rango de los tamaños adecuados para este tipo de clasificador.

El producto del molino autógeno, tamaños menores de 2 mm, pasa a la etapa siguiente de molienda en molino clásico con bolos del mismo material (pebbles).

<sup>10</sup> Apuntes de Trituración y Molienda de la E.T.S.de I. de Minas de Madrid. D. Ramón Álvarez.

Los tamaños entre 2 y 16 mm retornan al molino, circuito cerrado de molienda, mientras que los comprendidos entre 32 y 75 mm se separan para actuar como bolos o elementos molidores, en la molienda secundaria. Los tamaños en exceso al valor anterior se envían a un cono triturador para reducirlos de tamaño y retornar al molino.

Los tamaños entre 16 y 32 mm, que son demasiado pequeños para actuar de bolos y que tienden a acumularse, son enviados al cono triturador para reducirlos de tamaño y retornar al molino.

El circuito de molienda secundaria trabaja en circuito cerrado con hidrociclones, la alimentación va al clasificador, y el rechazo vuelve al molino.

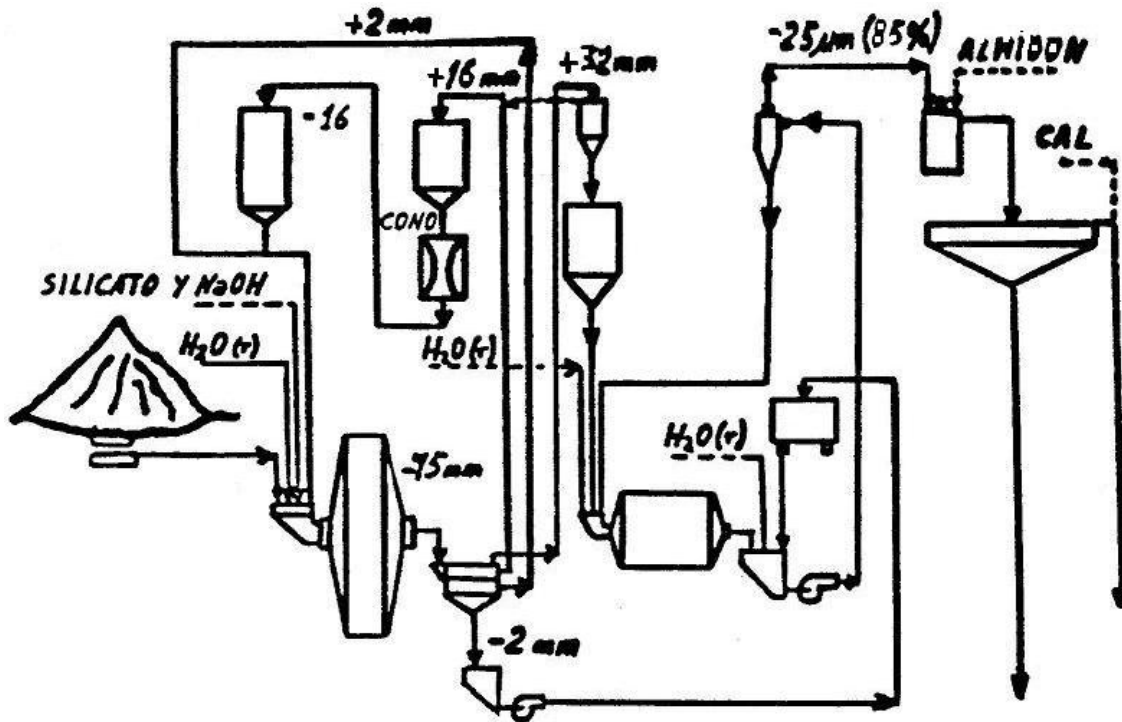


Figura 8.16. Esquema de molienda autógena.





Some 35,000 mt/d ore is processed by the Alls Mneras System ball-mills.

**Figura 8.17.** Taller de molienda con molinos semiautógenos, en primer plano, y molinos de bolas, trabajando en circuito cerrado con clasificadores de ciclones.



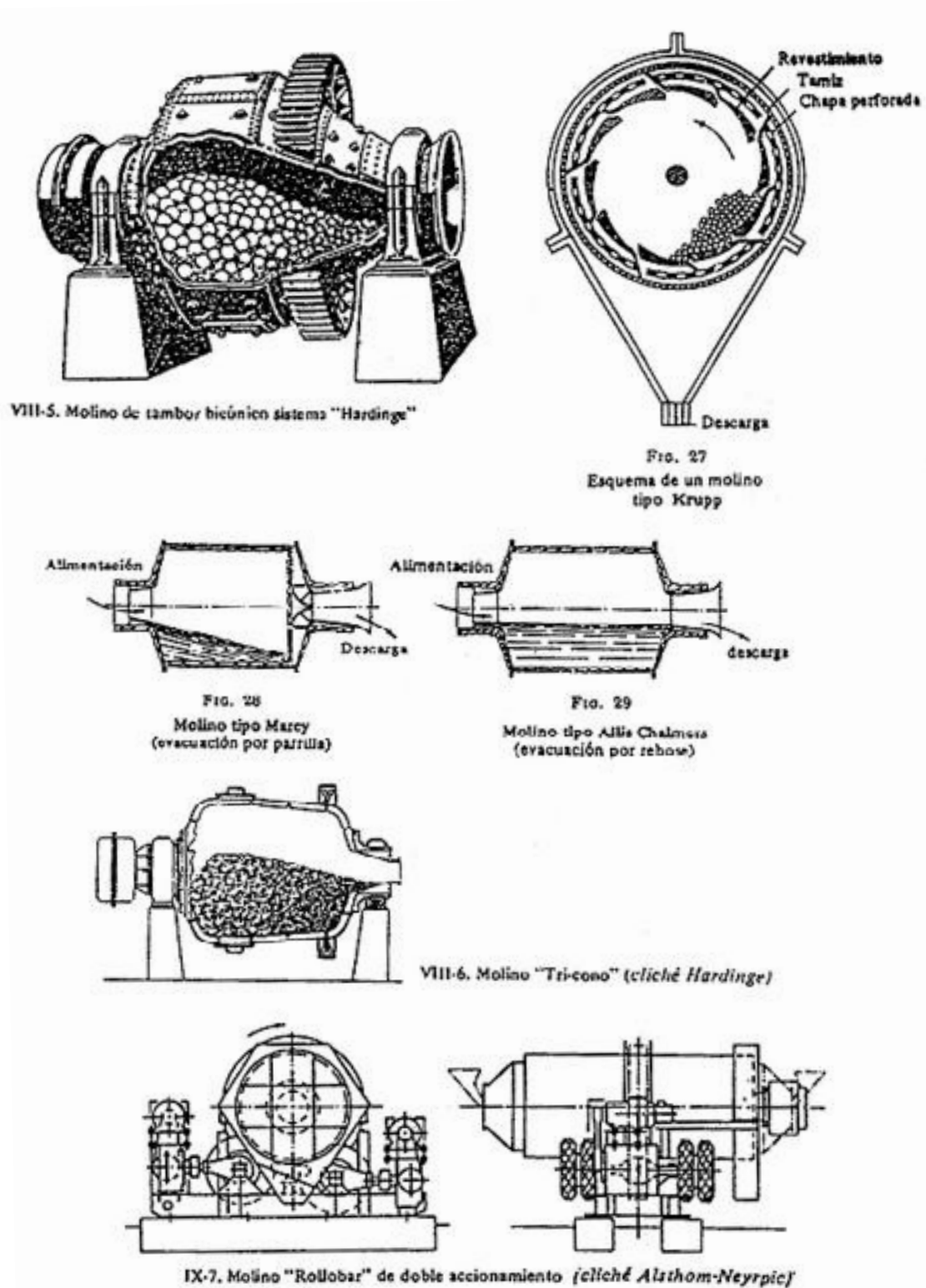


Figura 8.18. Diversos tipos de molino.

### 8.1.16. Dimensionamiento de los molinos. Potencia necesaria para su funcionamiento

Para elegir las dimensiones de un molino que pueda realizar una determinada operación de fragmentación, hay que relacionar la potencia necesaria para la molienda obtenida a través de la fórmula de Bond, que considera ya las necesidades del equipo (molino) con las correcciones y aproximaciones necesarias y determinar por otra parte, en base al método de funcionamiento de un molino, (su forma de trabajo) cual son las dimensiones y potencias para mantener un equipo de esta características en funcionamiento.

Se han propuesto diversas fórmulas empíricas (del tipo y forma que se incluyen a continuación) para evaluar las necesidades y dimensiones pero todas parten de un principio básico correspondiente al sistema dinámico del molino y luego ajustan el funcionamiento a la realidad de la molienda mediante las correcciones oportunas.

El funcionamiento de un molino, su efecto de rotación, produce un desplazamiento de la carga a una posición excéntrica. El mantenimiento de estas condiciones físicas, el par necesario, más la potencia necesaria para la moliendo propiamente, y los ajustes necesarios para accionar los acoplamientos, pérdidas e imponderables permiten un planteamiento teórico del tipo siguiente.

Las potencias calculadas por este procedimiento se consideran en el piñón de ataque al molino, a la que es preciso aumentar en las pérdidas en los reductores de velocidad, embragues y acoplamientos y multiplicar por un parámetro de seguridad que absorbe las irregularidades de la carga y del funcionamiento y que para los molinos se considera el valor de 1,3.

#### 8.1.16.1. Potencia teórica necesaria para accionar un molino

El efecto de giro en el molino, produce un desplazamiento de la carga y de los elementos molturadores hasta alcanzar un equilibrio El equilibrio se obtiene cuando se igualan las potencias resistentes con la potencia entregada por el motor. Las potencias resistentes las podemos encuadrar dentro de dos grupos, (conceptos):

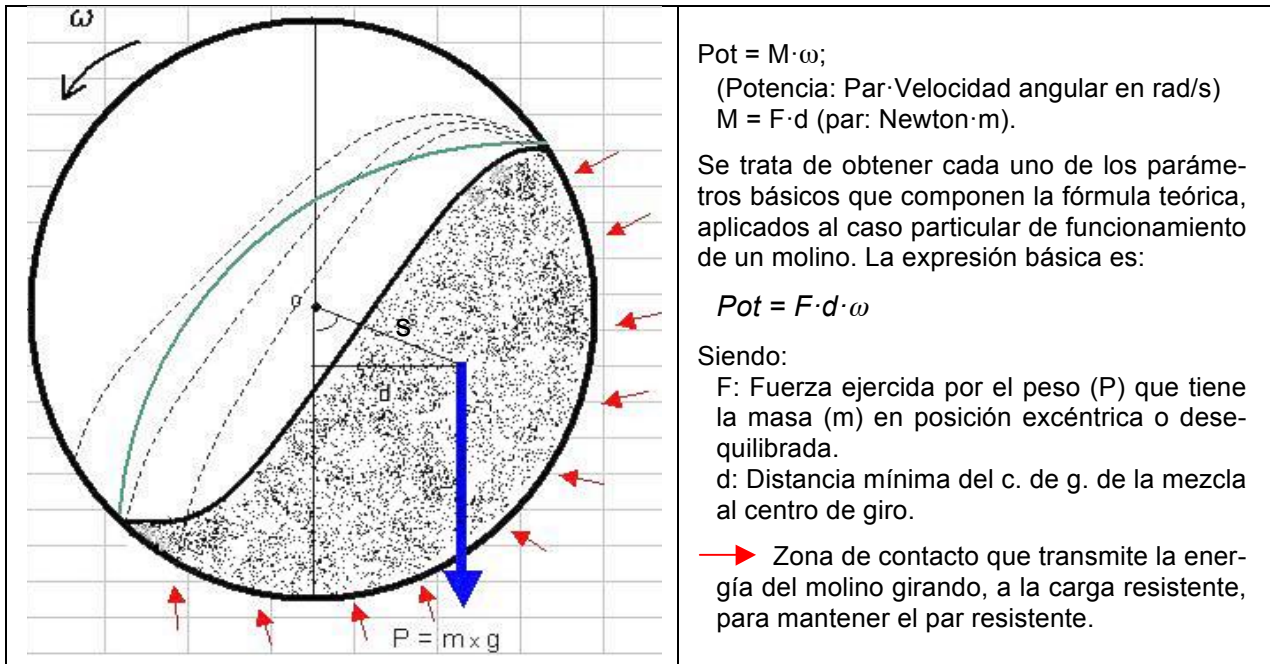
**P1.** La potencia necesaria para mantener en posición desequilibrada la carga más los elementos molturadores, incluyendo los desplazamientos internos entre las bolas y el mineral, los rozamientos y el propio efecto de trituración.

**P2.** Las perdidas del sistema, que son equivalentes a las producidas para mantener una masa equivalente a la suma del peso del molino más la carga de bolas y mineral, girando a la misma velocidad que el sistema. Es la potencia necesaria para mover un volante concéntrico del mismo peso que el molino y su carga.

Estas se corresponden con los rozamientos en el eje, las pérdidas de transmisión, los rendimientos de los reductores y el rendimiento del propio motor de accionamiento. Tiene un valor limitado, y multiplica el valor obtenido en el punto anterior P1. Suele ser del orden de magnitud de 1,1-1,05 el coeficiente multiplicador, se considera que las pérdidas por rendimientos y rozamientos tienen un valor entre el 5% y el 10% pero esta determinado una vez que se evalúen las necesidades principales y se determine el molino y su tipo de accionamiento, los fabricantes de motores y de transmisiones facilitan esta información con precisión suficiente.

#### 8.1.16.2. Calculo del valor teórico de P1. Potencia para equilibrar el par resistente

El cálculo de la potencia necesaria para compensar las necesidades del apartado P1 se fundamenta en la ecuación básica de la física que nos da la potencia para mantener una masa desequilibrada que por rozamientos se mantiene en desequilibrio, y que responde a la formula



Pot = M·ω;  
(Potencia: Par·Velocidad angular en rad/s)  
M = F·d (par: Newton·m).

Se trata de obtener cada uno de los parámetros básicos que componen la fórmula teórica, aplicados al caso particular de funcionamiento de un molino. La expresión básica es:

$$Pot = F \cdot d \cdot \omega$$

Siendo:

F: Fuerza ejercida por el peso (P) que tiene la masa (m) en posición excéntrica o desequilibrada.

d: Distancia mínima del c. de g. de la mezcla al centro de giro.

→ Zona de contacto que transmite la energía del molino girando, a la carga resistente, para mantener el par resistente.

Figura 8.18. Esquema de principio. Sección de un molino.

ω: Corresponde a la *velocidad angular del molino*. El par resistente se aplica en la superficie de contacto (expresada en rad/s). Esta velocidad se expresa como una fracción de la velocidad crítica (fVc), expresada en tanto por uno y en unidades adecuadas será:

$$Vc = \frac{42,3}{\sqrt{D}}; \quad fVc \cdot Vc(\text{rev/min}) \cdot 2\pi (\text{rad/rev}) \cdot 1/60 (\text{min/s})$$

$$\omega = k_1 \frac{fVc}{\sqrt{D}}; \quad \longrightarrow k_1 = \frac{42,3 \cdot 2\pi}{60} = 4,43$$

d: Corresponde a la *distancia a la que se aplica la fuerza F* con respecto al eje que pasa por el origen.

d = s·sen(α); α: Ángulo que forma el segmento (s) que une el centro del molino (origen de coordenadas) con el c.d.g. de la masa desequilibrada. Expresado en función del diámetro del molino, se tiene:

$$s = k \cdot R; \text{ con } 0 < k < 1; \text{ luego: } s = k_2 \cdot D, \text{ con } 0 < k_2 < 0,5$$

$$d = k_2 \cdot D \cdot \text{sen}(\alpha); \quad \text{y en su expresión aproximada el valor: } d = 0,16 \cdot D.$$

El valor de s, para un llenado del 50%, pasa por el eje de coordenadas, par nulo, cuando la carga está en la parte inferior, sin desplazamiento, y es de  $(1/3) \cdot R \cdot (4/\pi)^{11}$  cuando la carga está en su punto de máximo desequilibrio, carga totalmente vertical y tiene un valor máximo de R a carga infinitesimal, casi nula y con desplazamiento máximo. Luego k<sub>2</sub> (independiente del diámetro) tendrá una variación máxima de 0,21-0,25 veces el diámetro y a efectos prácticos con llenados del 45-50% corresponde un valor aproximado de 0,22. Precisión suficiente para cálculos de aproximación para la capacidad de un molino y la potencia necesaria de accionamiento.

El valor de alfa, ángulo de desplazamiento sobre la vertical, varía de 0° a 90°. Con velocidades en el entorno del 70% de la velocidad crítica es ligeramente superior a 45° y así se considera el valor de seno (45°), 0,71 aproximación suficiente para estimar el molino.

<sup>11</sup> Coordenada del c.d.g. para un semicírculo  $(4/3) \cdot (R/\pi)$  (llenado del molino al 50%).

La expresión, dependiente del diámetro del molino,  $d = k_2 \cdot D \cdot \text{sen}(\alpha)$ ;

se simplifica a  $d = 0,12 \cdot D$  a  $(0,15 \cdot D)$

**F:** La fuerza, expresada en Newton, está producida por el peso P (kg) de la carga (mezcla de mineral a moler y elementos molturadores).

Se usan las abreviaturas:

$P = m \cdot g$ ; m: masa de la carga (kg); g: 9,81 m/s<sup>2</sup>

$$m = V_{\text{carg}} \cdot \rho_{\text{carg}};$$

$V_{\text{carg}}$ : Volumen ocupado por la carga.

$\rho_{\text{carg}}$ : Densidad media de la carga, mezcla de bolas / barras y mineral.

$V_{\text{carg}}$ : Volumen de la carga. Se suele expresar como una fracción del volumen del molino, y así:

$$V_{\text{carg}} = (fV_{\text{mol}}) \cdot V_{\text{mol}};$$

$fV_{\text{mol}}$ : Fracción en tanto por uno del volumen del molino.

D: Diámetro interno del molino.

Se tienen las relaciones geométricas:

$$V_{\text{carg}} = (fV_{\text{mol}}) \cdot (\pi \cdot D^2 \cdot L / 4) = k_3 \cdot D^2 \cdot L \cdot fV_{\text{mol}}; \quad k_3 = \pi/4 = 0,7854$$

La densidad media de la carga será:

$$\rho_{\text{carg}} = (Vol_{\text{bolas}} \cdot \rho_b + Vol_{\text{mineral}} \cdot \rho_m) / (Vol_{\text{bolas}} + Vol_{\text{mineral}})$$

Y utilizando el concepto de fracción se definen las variables:

$fV_b = Vol_{\text{bolas}} / (Vol_{\text{bolas}} + Vol_{\text{mineral}})$ , fracción correspondiente a los elementos molturadores.

$fV_m = Vol_{\text{mineral}} / (Vol_{\text{bolas}} + Vol_{\text{mineral}})$ , fracción correspondiente al mineral a moler.

Se obtiene la densidad media de la carga mediante:

$$\rho_{\text{carg}} = fV_b \cdot \rho_b + fV_m \cdot \rho_m$$

La sustitución de los valores anteriores da, para la fuerza F, la expresión:

$$F = k_3 \cdot D^2 \cdot L \cdot (fV_{\text{mol}}) \cdot (fV_b \cdot \rho_b + fV_m \cdot \rho_m) \cdot g \quad ; \quad \text{con } k_3 = 0,7854$$

### 8.1.16.2.1. Potencia teórica necesaria para el accionamiento

La potencia, expresada en función de parámetros ligados al molino y la operación que realiza será, sustituyendo cada uno de los elementos de la expresión:

$Pot = F \cdot d \cdot \omega$ ; luego:

$$Pot(kW) = k_1 \cdot fV_c (1/\text{raiz}(D)) \cdot k_2 \cdot D \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot k_3 \cdot D^2 \cdot L \cdot (fV_{\text{mol}}) \cdot (fV_b \cdot \rho_b + fV_m \cdot \rho_m) \cdot g$$

Reordenando y simplificando:

$$Pot(kW) = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot g \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot (fV_c) \cdot D^{2,5} \cdot L \cdot (fV_{\text{mol}}) \cdot (fV_b \cdot \rho_b + fV_m \cdot \rho_m)$$

Y que en su forma simplificada aplicando los valores anteriores, y expresando la densidad en t/m<sup>3</sup> (kg/m<sup>3</sup>/1.000) se puede escribir:

$$Pot(kW) = \{k_1 \cdot k_2 \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot k_3 \cdot g\} \cdot [(fV_c) \cdot D^{2,5} \cdot L \cdot (fV_{\text{mol}}) \cdot (fV_b \cdot \rho_b + fV_m \cdot \rho_m)]$$

$$Pot(kW) = 4,096 \cdot (fV_c) \cdot D^{2,5} \cdot L \cdot (fV_{\text{mol}}) \cdot (fV_b \cdot \rho_b + fV_m \cdot \rho_m)$$

La expresión anterior, obtenida por métodos analíticos, es susceptible de ser aproximada a la realidad de la molienda mediante la aplicación de aquellos factores ligados al proceso de molienda, que son función de características geométricas o dinámicas del proceso, y que la práctica ha demostrado su ajuste a la realidad. Así se aplica la corrección por diámetro del molino, por similitud con el procedimiento utilizado al aplicar la fórmula de Bond, factor que corresponde a  $(2,44/D)^{0,2}$ . En este caso la fórmula queda como sigue:

$$Pot(kW) = \{k_1 \cdot k_2 \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot k_3 \cdot g\} \cdot [(fV_c) \cdot D^{2,5} \cdot L \cdot (fV_{mol}) \cdot (fV_b \cdot \rho_b + fV_m \cdot \rho_m)] \cdot (2,44/D)^{0,2}$$

$$Pot(kW) = 4,896 \cdot (fV_c) \cdot D^{2,3} \cdot L \cdot (fV_{mol}) \cdot (fV_b \cdot \rho_b + fV_m \cdot \rho_m);$$

Siendo las variables:

$fV_c$ : Fracción, tanto por uno, de la velocidad de giro con relación a la velocidad crítica.

$D$ : Diámetro interno del molino en m.

$L$ : Longitud útil del molino en m.

$fV_{mol}$ : Fracción del volumen del molino utilizado por la carga, tanto por uno.

$fV_b$ : Fracción ocupada por las bolas dentro de la carga, tanto por uno.

$\rho_b$ : Densidad del elemento molturador, bolas / barras,  $t/m^3$ .

$fV_m$ : Fracción ocupada por el mineral dentro de la carga, tanto por uno.

$\rho_m$ : Densidad media del mineral a moler,  $t/m^3$ .

### 8.1.16.2.2. Expresiones prácticas utilizadas en los equipos de molienda

Para los diferentes tipos de molino se han desarrollado formulaciones específicas sobre el principio obtenido anteriormente. A continuación se dan algunas de las utilizadas para molinos de bolas y de barras, adaptadas a la realidad práctica de la molienda.

Ligeras variaciones en la fórmula, frente a la expresión teórica pura, son debidas a la utilización de densidades aparentes, o coeficientes relativos formulados de manera distinta, más algunos aspectos que contemplan realmente su utilización práctica.

Fórmulas de utilización práctica (semiempíricas)<sup>12</sup>:

- Fórmula analítica (teórica):

$$Pot(kW) = 4,896 \cdot (fV_c) \cdot D^{2,3} \cdot L \cdot (fV_{mol}) \cdot (fV_b \cdot \rho_b + fV_m \cdot \rho_m)$$

- Molinos de barras:

$$Pot(kW) = 1,367 \cdot L \cdot D^{7/3} \cdot (6,3 - 5,5 \cdot fV_{bar}) \cdot fV_{bar} \cdot fV_c \cdot \rho_{a,b} \cdot F$$

$fV_{bar}$ : Fracción, en tanto por uno, del volumen del molino que ocupan las barras en reposo. Equivale al producto de  $fV_{mol} \cdot fV_b$ .

$\rho_{a,b}$ : Densidad aparente de las barras ( $7,85 \text{ kg/l} \cdot 0,8 = 6,28 \text{ kg/l}$ ).

$F$ : 1 (barras nuevas);

1,06 (barras usadas).

<sup>12</sup> Manual de Áridos. Loemco y E.T.S.I. Minas. Madrid.



- Molinos de bolas:

$$Pot(kW) = L \cdot D^2 \cdot fVbol \cdot \rho_{a,b} \cdot (3,832 \cdot D^{0,3} \cdot (3,2 - 3 \cdot fVbol) \cdot fVc \cdot (1 - \frac{0,1}{2^{(9-10 \cdot fVc)}}) + S) \cdot F_1 \cdot F_2$$

*fVbol*: Fracción, en tanto por uno, del volumen del molino que ocupan las bolas. En una primera selección y para esferas nuevas se puede usar 0,4.

$\rho_{a,b}$ : Densidad aparente de las bolas<sup>13</sup> (7,85 kg/l·0,6 = 4,71 kg/l, para acero forjado), (6,94 kg/l·0,6 = 4,17, para fundición).

S: Coeficiente función del diámetro del molino y del tamaño de las bolas.

S = 1, para diámetros inferiores a 3,3 m.

S = 0,01704·(B – 12,5·D); B: Tamaño máximo de la bola en mm; D en m; para diámetros mayores de 3,3 m.

F<sub>1</sub>: 1 (Molino en húmedo y de rebose).

1,16 (Trabajo en húmedo y con rejilla de bajo nivel).

1,08 (Trabajo en seco con rejilla total).

F<sub>2</sub>: Coeficiente función del tipo de forros:

1: Forros nuevos.

1,06: Forros usados.

0,9 a 0,95: Forros de caucho.

La función no considera la densidad del material o de la pulpa pero indica la posibilidad de corregir esto si se usan materiales molturadores de densidad baja (menor que el acero forjado<sup>14</sup> o que la fundición).

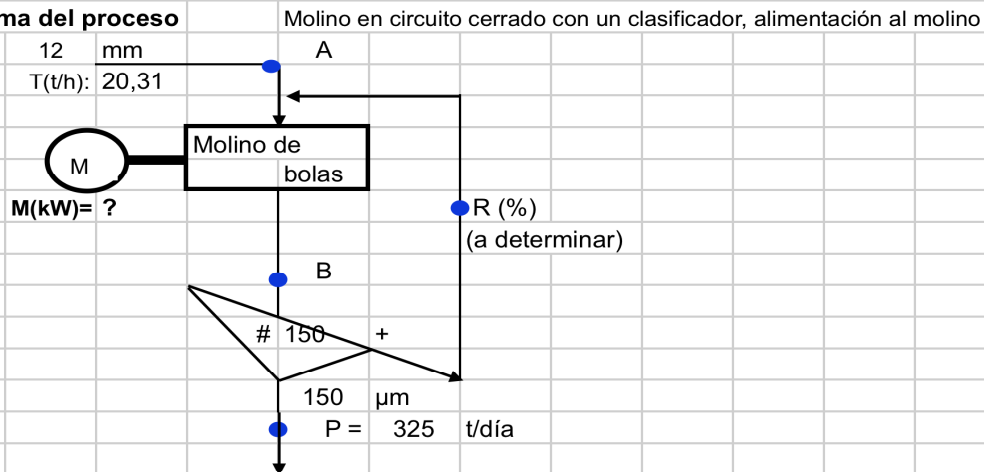


<sup>13</sup> Acero: porcentaje de carbono inferior al 2%; Fundición: Porcentaje de carbono superior al 2%.

<sup>14</sup> Forjado: método de fabricación de las bolas o barras.

**Ejercicio:** Determinar el proceso de molienda necesario para tratar, mediante un molino de bolas en circuito cerrado con un clasificador de tornillo, una pulpa de las características siguientes:  
 Se procesan 325 t/día de un mineral con un índice de Bond ya conocido de,  $W_i = 13,5$  kW/t y trabajando a dos turnos 16 h/día. (mineral: caliza)  
 La operación de molienda a realizar, necesaria, es:  $D_{80} = 12$  mm;  $d_{80} = 150$  micras;  
**A)** Identificar el tamaño del molino necesario y la potencia del motor de accionamiento.

**Esquema del proceso**



**Solución**

La energía necesaria para la molienda, en circuito cerrado, viene dada por la expresión de Bond generalizada

$$W_B = 10 \cdot W_i \left( \frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right) \prod F_i$$

$F_1: 1$  molienda en húmedo  
 $F_2: (250/Cc)^{0,1}$   $Cc: 250$  Estimación inicial para cálculo, también se puede considerar otra más eficiente  
 $F_3: (2,44/D)^{0,2}$   
 $D:$  Valor a determinar  
 para el tonelaje horario tratado 20,31 t/h, será:

$W_B(\text{kWh/t}) = 9,79 \cdot (2,44/D)^{0,2}$   
 $W_B(\text{kWh/h}) = 198,9 \cdot (2,44/D)^{0,2}$

El funcionamiento de un molino, en su expresión analítica, responde a la ecuación:

$$Pot(kW) = 4,896 \cdot (fV\varrho) \cdot D^{2,3} \cdot L \cdot (fVmol) \cdot (fVbp_b + fVmp_m)$$

Se utilizan los valores iniciales de cálculo siguientes:

- fVc: 0,70 Los valores normales están entre 60 y 70%
- fVmol: 0,45 Los valores normales de llenado están entre 45 y 50%
- fVb: 0,60 Molino de bolas, fracción de la masa ocupada por las bolas
- pb: 7,85 kg/l; densidad del acero forjado. 6,94 para bolas de fundición
- fVm: 0,40 Fracción de la masa ocupada por el mineral
- pm: 2,75 kg/l; densidad media del mineral, tipo caliza

La aplicación de los valores anteriores a la expresión anterior da:

$$Pot(kW) = 8,96 D^{2,3} L$$

Se tiene que resolver la ecuación:

$$8,96 D^{2,3} L = 198,9 \cdot (2,44/D)^{0,2}$$

$$D^{2,5} L = 26,53 \rightarrow D^{3,5} = 26,53 / (L/D)$$

Cc:	Solución para la relación L / D					
250	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
<b>D(m):</b>	<b>3,1</b>	<b>2,6</b>	<b>2,3</b>	<b>2,1</b>	<b>2,0</b>	<b>1,9</b>
<b>L(m):</b>	1,6	2,6	3,4	4,2	4,9	5,6
<b>kW:</b>	<b>189,4</b>	<b>197,1</b>	<b>201,7</b>	<b>205,1</b>	<b>207,7</b>	<b>209,9</b>
Motor-instalar(kW):	240	250	260	260	270	270
Volumen-molino(m <sup>3</sup> ):	11,8	13,0	13,8	14,4	14,9	15,3

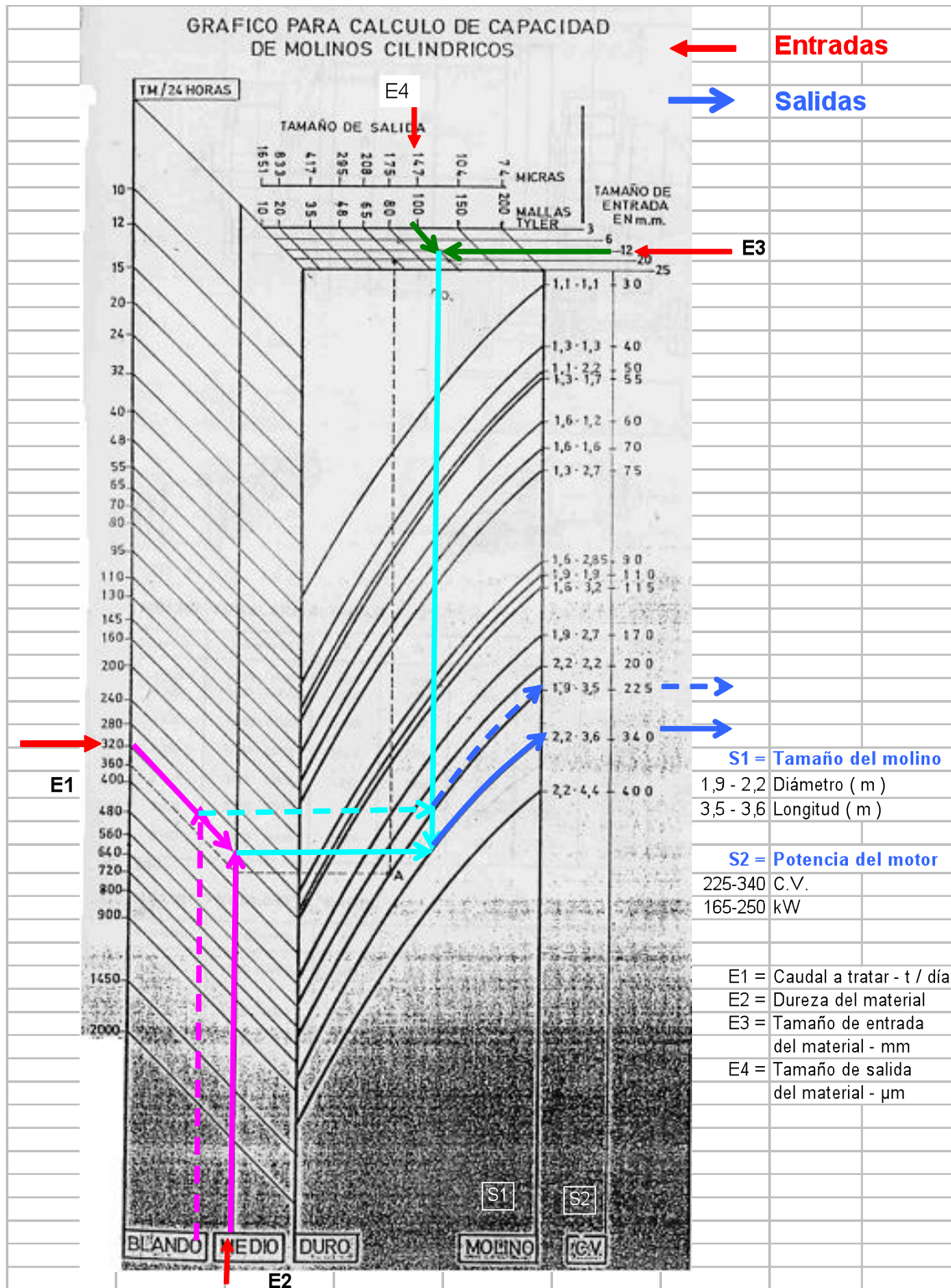
<b>Ejercicio cont.</b> Aplicación con las expresiones de uso práctico, para un molino de bolas, en húmedo:										
$Pot(kW) = L \cdot D^2 \cdot f \cdot Vbol \cdot \rho_{a,b} \cdot (3,832 \cdot D^{0,3} \cdot (3,2 - 3 \cdot f \cdot Vbol) \cdot f \cdot Vc (1 - \frac{0,1}{2^{(9-10 \cdot f \cdot Vc)}}) + S) \cdot F_1 \cdot F_2$										
fVc:	0,70	Los valores normales están entre 60 y 70%		(80% para molinos de diámetro pequeño)						
fVbol:	0,27	fVmol·fVb								
fVmol:	0,45	Los valores normales de llenado están entre 45 y 50%								
fVb:	0,60	Molino de bolas, fracción de la masa ocupada por las bolas								
p <sub>ab</sub> :	4,71	Densidad aparente de las bolas		(7,85 t/m <sup>3</sup> ·0,6)						
Este proceso no considera la densidad del material a moler, pulpa, pero considera la posibilidad de su utilización reformulando la densidad media.										
S:	0	Se considera un diámetro menor de 3,3 m. Si sale mayor se debe recalcular								
F <sub>1</sub> :	1	Se considera un molino de rebose en húmedo								
F <sub>2</sub>	1,06	Forros usados								
La aplicación de los valores a la expresión anterior da:							f(2,Vc): 0,975			
Pot(kW)=	8,426	D <sup>2,3</sup> L								
Se tiene que resolver la ecuación:				Cc:	Solución para la relación L / D					
8,426 D <sup>2,3</sup> L=	198,9	(2,44/D) <sup>0,2</sup>		250	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
D <sup>2,5</sup> L=	28,21	D <sup>3,5</sup> = 28,21 /(L/D)		<b>D(m):</b>	<b>3,2</b>	<b>2,6</b>	<b>2,3</b>	<b>2,1</b>	<b>2,0</b>	<b>1,9</b>
				L(m):	1,6	2,6	3,5	4,3	5,0	5,7
				<b>kW:</b>	<b>188,8</b>	<b>196,4</b>	<b>201,0</b>	<b>204,3</b>	<b>207,0</b>	<b>209,1</b>
				Motor-instalar(kW):	240	250	260	260	260	270
				Volumen-molino(m <sup>3</sup> ):	12,5	13,8	14,6	15,2	15,7	16,1
Optimización modificando la carga circulante										
Pot(kW)=	8,426	D <sup>2,3</sup> L								
Se tiene que resolver la ecuación:				Cc:	Solución para la relación L / D					
8,426 D <sup>2,3</sup> L=	187,5	(2,44/D) <sup>0,2</sup>		450	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
D <sup>2,5</sup> L=	26,6	D <sup>3,5</sup> = 26,6 /(L/D)		<b>D(m):</b>	<b>3,1</b>	<b>2,6</b>	<b>2,3</b>	<b>2,1</b>	<b>2,0</b>	<b>1,9</b>
				L(m):	1,6	2,6	3,4	4,2	4,9	5,6
				<b>kW:</b>	<b>178,6</b>	<b>185,8</b>	<b>190,2</b>	<b>193,3</b>	<b>195,8</b>	<b>197,9</b>
				Motor-instalar(kW):	230	240	240	250	250	250
				Volumen-molino(m <sup>3</sup> ):	11,8	13,1	13,9	14,4	14,9	15,3

La solución es un abanico acotado por la lógica de la experiencia, donde se debe evaluar en una segunda fase la optimización de la inversión a realizar. Molinos mayores son más eficientes, circuitos cerrados de molienda son, igualmente más eficientes, pero la inversión es mayor.

La utilización de gráficos da una orientación pero son sensibles a la elección de valores. En la figura que se adjunta se da la solución para el problema anterior con ligeras oscilaciones del valor de dureza y se obtiene variaciones entre 165 kW y 250 kW de potencia del motor. Sirven en una primera fase para dar una idea de tamaño o confirmar o negar un cálculo.

Los catálogos de los fabricantes presentan, para un modelo, la gama de motores que admite en función de la rigidez de la construcción, y se debe conocer por otro medio la capacidad de molino que se necesita para la mineralurgia a realizar.





### 8.1.17. Comparación de molinos

La comparación de molinos de diferentes tamaños, cuando realizan operaciones semejantes, se fundamenta en el principio establecido para el cálculo de un molino detallado en apartados anteriores y la energía necesaria o en su caso el motor de accionamiento del molino se obtiene de la aplicación de la fórmula de Bond:

$$Pot(kW) = 4,896 \cdot (fVc) \cdot D^{2,3} \cdot L \cdot (fVmol) \cdot (fVb \cdot \rho_b + fVm \cdot \rho_m)$$

$$W_B(kWh/t) = 10 \cdot W_i \left( \frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right) \Pi F_i \quad Pot_{motor}(kW) = W_B \cdot T(t/h) \cdot 1,3$$

La comparación de molinos, cuando realizan operaciones semejantes, se fundamenta en las expresiones anteriores. Una operación se considera que es semejante cuando cumple las siguientes condiciones:

- a) Se trata el mismo mineral:
  - a1)  $W_i(A) = W_i(B)$ .
  - a2)  $\rho(A) = \rho(B)$ .
- b) Se realiza la misma operación de molienda:
  - b1)  $D_{80}(A) = D_{80}(B)$ .
  - b2)  $d_{80}(A) = d_{80}(B)$ ;  $Rr(A) = Rr(B)$ .
- c) Se trabaja en ambos molinos en condiciones semejantes:
  - c1) Ambos en húmedo o seco.
  - c2) Ambos con similar índice de llenado y relación bolas/mineral.
    - $fVmol(A) = fVmol(B)$ .
    - $fVbol(A) = fVbol(B)$ .
  - c3) Igual velocidad de rotación con relación a la velocidad crítica correspondiente a cada molino.
    - $fVc(A) = fVc(B)$ .

En estas condiciones se obtiene, por cociente simple, la relación dada por:

$$\frac{Pot_A(kW)}{Pot_B(kW)} = \frac{D_A^{2,3} \cdot L_A}{D_B^{2,3} \cdot L_B} \quad \text{Relación de semejanza.}$$

Relación que permite comparar las dimensiones de un molino, en una instalación de evaluación o de laboratorio, con las dimensiones de un molino real de producción. Se indica también que es necesario mantener una cierta proporción entre la relación D/L en cada molino para que el tiempo de residencia y la geometría de la carga en su interior sea similar al trabajar en ambos molinos. Esto se puede indicar diciendo que las figuras del molino deben ser homotéticas o de proporciones semejantes.



### 8.1.18. Costes de funcionamiento

Los principales y mayores costes de funcionamiento de la fragmentación corresponden a:

- Costes energéticos. Evaluados mediante la aplicación de la fórmula de Bond, indicada anteriormente, para el tonelaje tratado.
- Elementos moledores y blindajes (forros). Por desgaste es necesario su reposición mediante la adición de nuevas cantidades periódicas o sustitución para los blindajes deteriorados. Función del tratamiento, del tipo de mineral, de su abrasividad y dureza, su coste se estima mediante expresiones como la indicada posteriormente.
- Otros costes de operación. Estimados, normalmente, como una fracción o factor que multiplica a los anteriores. Su incidencia real en el coste del producto es menos representativa.
- Costes de instalación. Amortización de las inversiones en las instalaciones. Estimadas estas mediante las fórmulas de Rumher debidamente actualizadas.

#### 8.1.18.1. Consumo de elementos moledores y forros

La sustitución de los forros obliga a parar el molino mientras que los elementos moledores se compensan añadiendo nuevas unidades del elemento mayor.

En el caso corriente de utilización de acero o fundiciones el desgaste es mucho mayor en húmedo que en seco debido fundamentalmente a un efecto de corrosión. Esta diferencia puede llegar a ser de 5 a 10 veces más de gasto en húmedo que en seco. El efecto abrasivo de un determinado mineral está muy relacionado con su dureza mineralógica, con la forma de sus granos y en el caso de molienda en húmedo con su alteración por el agua o reacción de sus productos de alteración con ella o con los reactivos que se puedan añadir.

Para un mineral o roca dado el efecto abrasivo total en condiciones normales, suele ser proporcional a la potencia consumida por el molino por lo que se puede determinar el consumo de acero multiplicando su potencia por el consumo típico en kg/kWh. Este consumo típico se halla normalmente a través de la experiencia o mediante la utilización del *índice de abrasión*,  $A_i$ , que se puede determinar mediante ensayos experimentales.

Como indicación se puede tomar las siguientes fórmulas para el cálculo del consumo típico de acero en molinos de bolas y barras, trabajando en húmedo:

- Molinos de barras en húmedo:

$$\text{Barras (kg/kWh)} = 0,175 \cdot (A_i - 0,020)^{0,2}$$

$$\text{Forros (kg/kWh)} = 0,175 \cdot (A_i - 0,015)^{0,3}$$

- Molinos de bolas en húmedo:

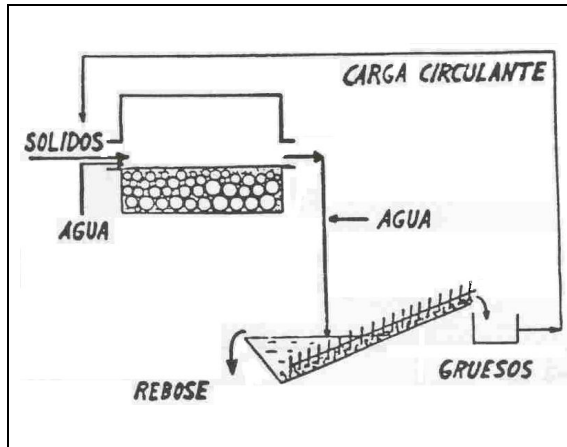
$$1 \text{ Bolas (kg/kWh)} = 0,175 \cdot (A_i - 0,015)^{1/3}$$

$$\text{Forros (kg/kWh)} = 0,013 \cdot (A_i - 0,015)^{0,3}$$

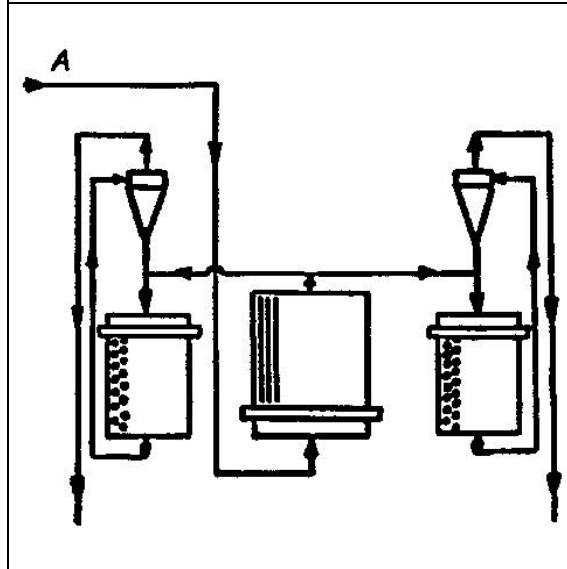
Substancia	Índice de abrasión, $A_i$	Densidad, $t/m^3$	Dureza
Caliza - $CaCO_3$	0,01 - 0,03	2,71	3
Cuarcita - $SiO_2$	0,75 - 0,12	2,65	7
Dolomía - $CaMg(CO_3)_2$	0,01 - 0,05	2,85	3,5 - 4
Granito	0,55 - 0,11		
Magnetita - $Fe_2O_3$	0,20 - 0,30	5,18	6

**Tabla 8.5.** Ejemplo indicativo para valores del índice de abrasión.

**8.2. Esquemas y circuitos de fragmentación**



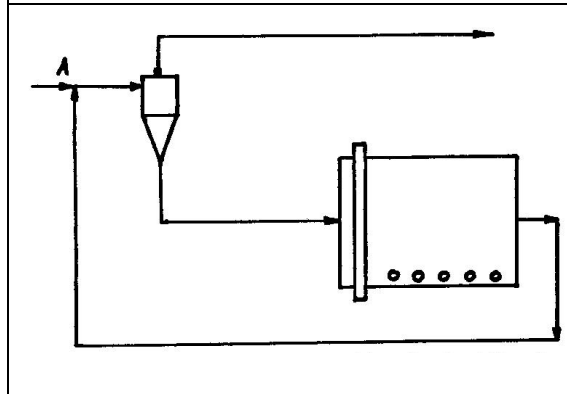
Esquema de circuito cerrado con un molino de rebose y un clasificador en espiral o de tornillo. Una forma de controlar el tamaño de corte del clasificador es mediante la adición de agua que varía la viscosidad de la pulpa y controla también la carga circulante. La alimentación nueva se hace directamente al molino. Cuando la alimentación nueva contiene ya muchos finos se alimenta directamente al clasificador.



Dado el principio de funcionamiento de los molinos de barras y de bolas, los primeros están mejor adaptados a alimentaciones gruesas y los de bolas a las finas.

Dado que la capacidad de los molinos de barras es grande, se puede con un solo molino alimentar dos de bolas y así se tiene el circuito de la figura. Esta disposición se usa para capacidades superiores a 40 t/h, donde el molino de barras trabaja en circuito abierto y los de bolas en circuito cerrado.

Si la capacidad es menor se prefiere alimentar directamente a un molino de bolas y usar un tamaño de bola mayor.



Circuito cerrado con alimentación al clasificador tipo ciclón. Los ciclones se suelen usar para tamaños de corte inferiores a 75 micras.

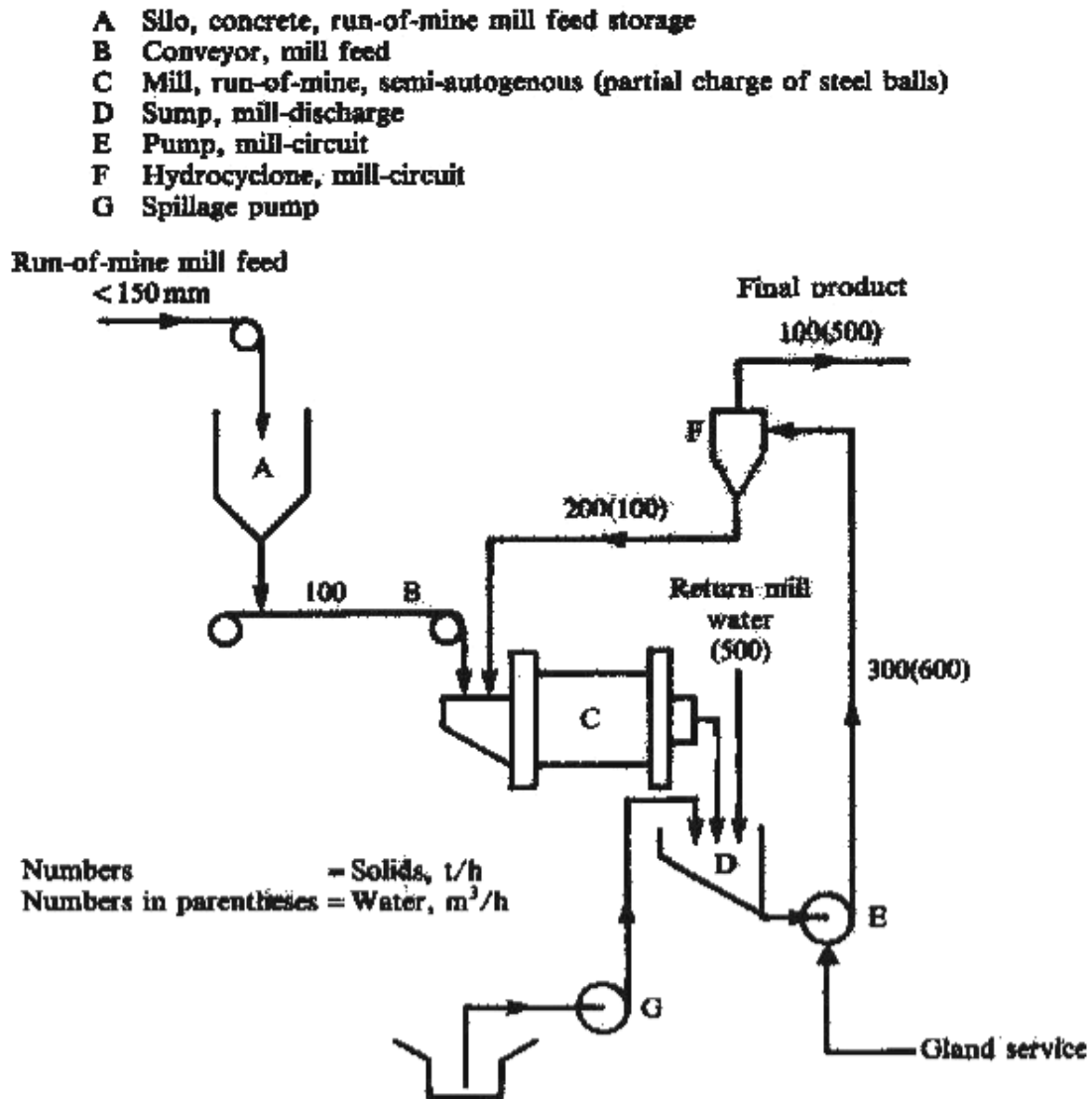


Figura 8.19. Esquema básico, simplificado, de molienda; equipo semiautógeno.

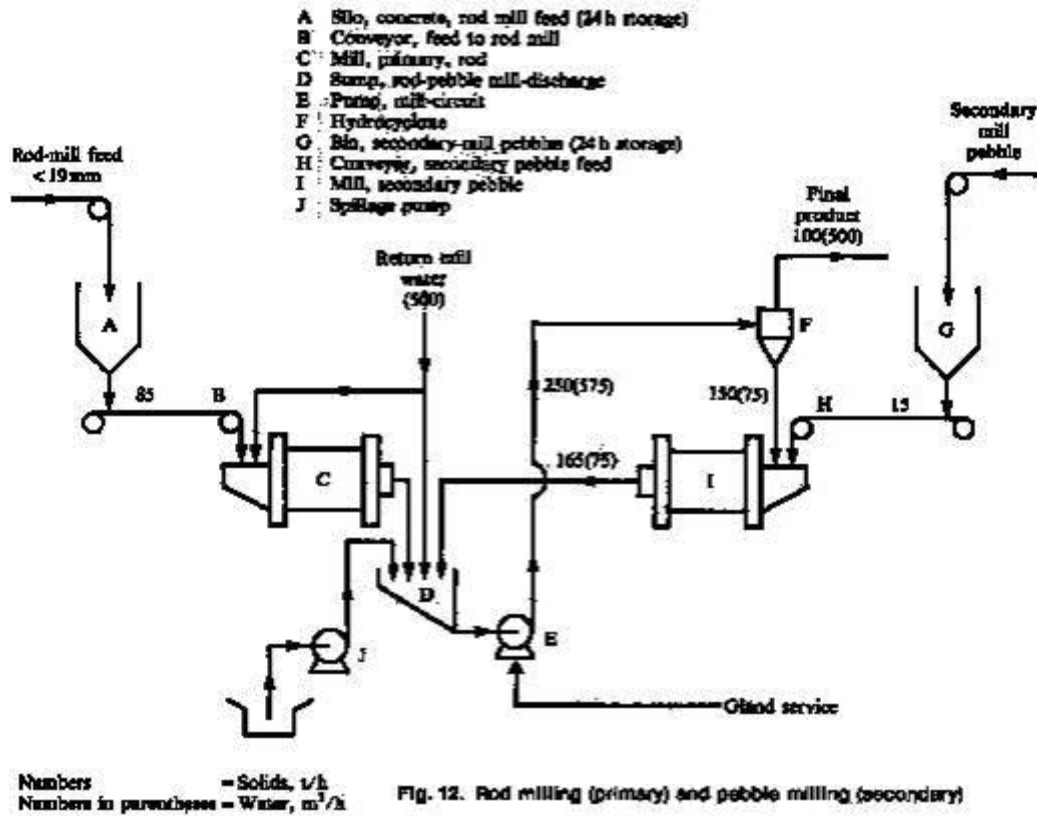


Fig. 12. Rod milling (primary) and pebble milling (secondary)

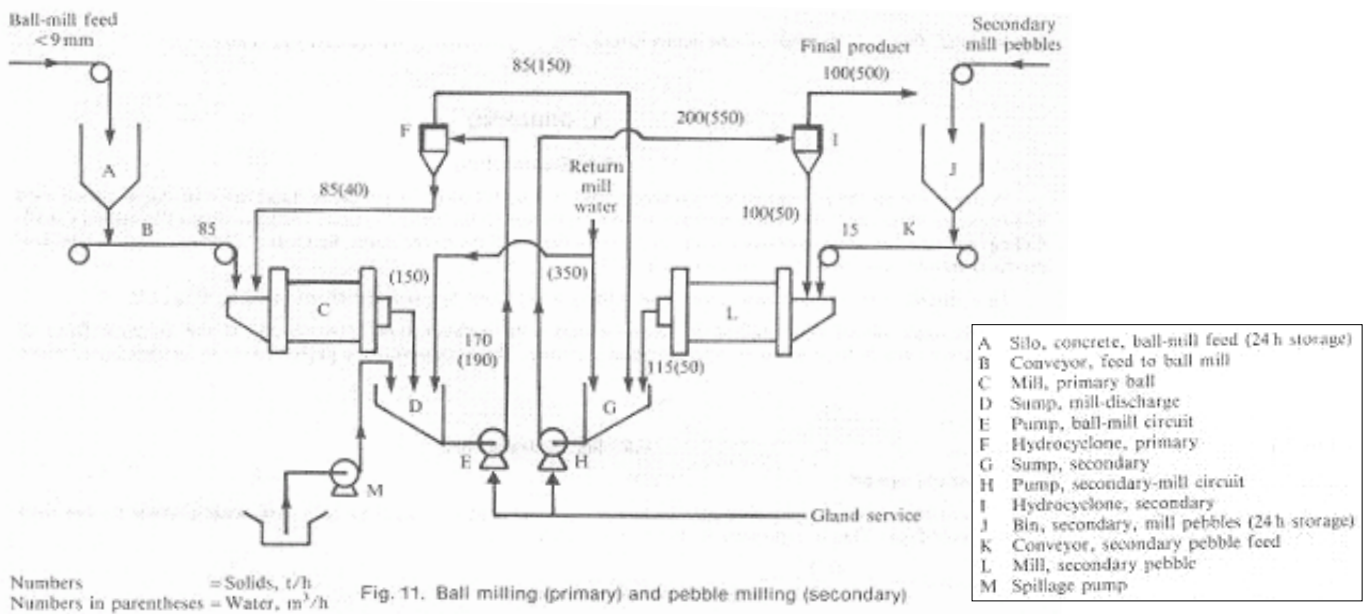


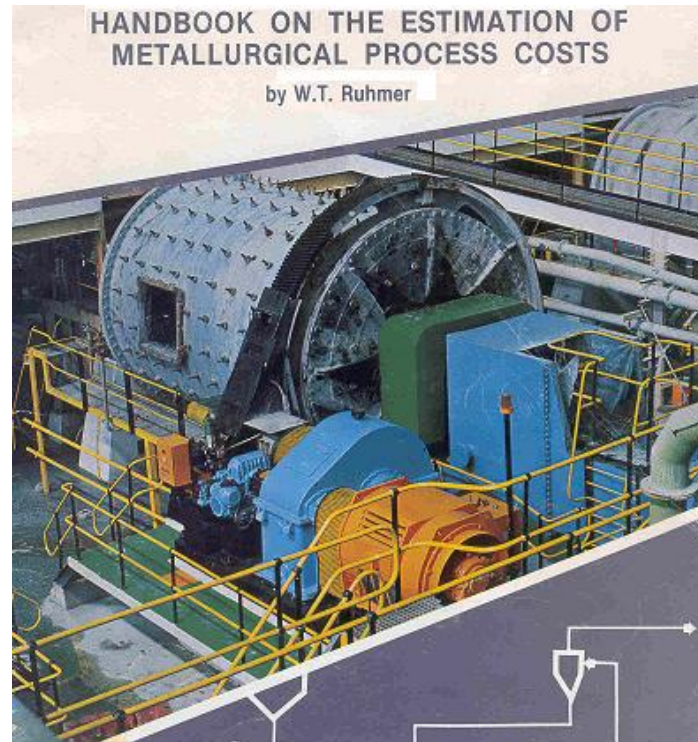
Fig. 11. Ball milling (primary) and pebble milling (secondary)

## Anexo. Coste de las instalaciones de fragmentación

W.T. RUHMER: HANDBOOK ON THE ESTIMATION OF METALLURGICAL PROCESS COSTS

El modelo describe una serie de métodos rápidos para estimar el capital inicial y el coste de operación de las principales unidades y operaciones de los procesos en las plantas Mineralúrgicas (concentración de minerales). Constituye, igualmente, una ayuda en la selección de procesos y rutas cuando existen varias alternativas.

Las implicaciones y las estimaciones de costes técnicos se evalúan, de forma rápida, mediante expresiones matemáticas de fácil uso. La información está actualizada a 1990 y se sugiere un método lineal de actualización.



Se utiliza, de forma generalizada, una ecuación cuadrática de la forma:

$$y = a + b \cdot x + c \cdot x^2$$

Donde:

y: coste o consumo de energía.

x: parámetro característico del equipo, potencia, tamaño o capacidad.

Si no se indica lo contrario en la columna de descripción, el coste no considera la instalación. En estos casos se puede considerar de 8 a 10% para transporte e instalación de los equipos.

Los valores indicados en la tabla están actualizados a 1990, debiendo ser actualizados al momento de utilización, bien por el incremento del ipc<sup>15</sup> más la variación en el cambio de moneda, relación €/\$, o bien por un valor singular conocido actualmente y admitiendo que la variación se mantiene.

<sup>15</sup> IPC: incremento de precios al consumo para la diferencia de años transcurridos. El valor de 1990 a 2009, 20 años es de 99%. Factor 1,99. La relación actual €/\\$ es de 0,78.



Descripción	Price power	a	b	c	Size / Capacity	Range
Trituradoras de mandíbulas	R,000's	9,531 + 00	1,447 + 02	8,881 + 01	Dimensión de abertura, m <sup>2</sup>	0,10 – 1,95
	kW	-1,120 + 00	1,608 + 02	-1,750 + 01		
Trituradora giratoria primaria, aproximado, incluido accionamiento	R,000's	5,450 + 01	7,786 – 01	6,984 – 05	Capacidad, t/h	400 – 2.500
	kW	6,080 – 0,2	3,658 – 01	-8,387 – 05		
Cono triturador, incluido accionamiento (Symons e hidroconos) (diámetro base inferior)	R,000's	4,745 + 02	-6,986 – 01	3,743 – 04	Tamaño, mm	900 – 2.100
	kW	5,097 + 01	1,212 – 01	2,148 – 05		
Molinos de bolas, incluido accionamiento, (reductor y motor). Velocidad 85% de crítica, carga 44%. Instalación sobre ruedas, Instalado	R,000's	3,730 + 01	6,534 – 01	7,745 – 03	Potencia, kW	3 – 150
Molinos de bolas, incluido accionamiento, reductor y motor. Velocidad 85% de crítica, carga 44%. Trunnion-mounted, Instalado	R,000's	1,714 + 02	2,229 + 00	-2,122 – 03	Potencia, kW	50 – 550
Molinos de barras, incluido accionamiento. Velocidad 87% de crítica, carga 42%. Instalación sobre ruedas, Instalado	R,000's	3,118 + 01	2,001 + 00	-1,767 – 03	Potencia, kW	3 – 150
Molinos de barras, incluido accionamiento, reductor y motor. Velocidad 87% de crítica, carga 42%. Instalación Trunnion-mounted, Instalado	R,000's	1,751 + 02	2,165 + 00	-2,014 – 03	Potencia, kW	50 – 550
Molino, run-of-mine <sup>16</sup> , incluido accionamiento. Velocidad 88% de crítica.	R,000's	6,509 + 02	1,076 + 00	-1,314 – 04	Potencia, kW	950 – 3.300

**Tabla 8.6.** Precio de equipos. Valores de los coeficientes de Rumher.

### Ejemplo de utilización

Instalación normal de molienda para una potencia de 1.500 kW

$$a: 650,9$$

$$b: 1,076$$

$$c: -0,0001314$$

$$\text{Coste (\$, 1.990): } 650,9 + 1,076 \cdot 1.500 - 0,0001314 \cdot 1.500^2 = 1.945,25 \cdot 10^3 \$$$

Actualización:  $F(ipc)$ : 1,99 (valor semi-estable);  $F(€/\$)$ : 0,78 (variable según cotización).

$$\text{Coste (€, 2.009): } 1.945,25 \cdot 10^3 \cdot F(ipc) \cdot F(€/\$) = 3.019,42 \cdot 10^3 €$$

<sup>16</sup> Run-of-mine o run-of-the-mill. Expresión para indicar común, normal, corriente. Esquema normal o general de molienda.

<b>EJERCICIO</b>	Ref: Molienda	nota: (para el cálculo automático, en excel, se pueden modificar datos pero no unidades)							
Para moler	15 toneladas ( t )	de un mineral desde	4 mm	hasta $d_{80}$	150 Mesh (Tyler),				
hemos consumido	135 kWh.	Considerar un molino de dimensiones estandar,	$D_m = 2,44$ m.						
Calcular:									
1.-	Que motor se debe instalar en un molino de bolas para una producción de	1750 t / día,							
	si debe moler, el mismo mineral, desde	6 mm	hasta	200 Mesh ( 75 )micras					
	Cálculo con la teoría de Bond y considerar un factor de disponibilidad del:	95%							
2.-	Elegir el molino de bolas más adecuado, utilizando los datos del catálogo que se adjunta,	si se va a trabajar en húmedo, con descarga por rebose y en circuito cerrado. Suponer que el							
	trabajo se va a realizar en condiciones estandar de molienda. (Carga circulante de 250 %)								
	Estudiar la mejor solución técnica para un molino, dos molinos y tres molinos. Obtener el costo								
	de cada instalación aplicando la expresión de Ruhmer, en la que X representa la potencia instalada,								
	en kW, y el coste, en euros, viene dado por la fórmula de Ruhmer:								
$P(kW) > 900$	$P(€) = 1000 \cdot ( a + b \cdot x + c \cdot x^2 ) \cdot fa$	$a = 650,9$	$b = 1,076$	$c = -0,0001314$					
$P(kW) < 700$		$a = 175,1$	$b = 2,165$	$c = -0,0002014$					
	Factor de actualización al año 2008:	1,99	y	0,78	$fa = 1,552$				
3.-	Se considera una solución técnica correcta poner forros de	10 cm,	los datos del						
	fabricante se consideran interiores entre chapa, ¿ Qué velocidad tendrá el molino, en r.p.m., si se								
	considera adecuado llevar una velocidad crítica de 73%								
	Calcular la relación de reducción que deberá tener el elemento de acoplamiento entre el motor								
	y el molino, si el motor eléctrico de accionamiento gira a 1000 r.p.m. (motor de anillos rozantes								
	de 6 polos). Efectuar un tanteo para más de una etapa de reducción (dos, tres).								
<b>Esquema del proceso</b>									
<b>Instalación piloto</b>									
<b>Instalación industrial</b>									

Datos resumidos obtenidos del catálogo del fabricante							
		Tabla I	<b>Molino de bolas (*)</b>				
Potencia	Mod	Diametro	Longitud	Volumen	Velocidad	Velocidad	Nc (r.p.m.)
CV	size	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	crítica Nc	catálogo	% Nc
50	B.1	1,00	3,5	2,75	42,3	32	76
100	B.2	1,32	5,0	6,84	36,8	28	76
200	B.3	1,80	6,0	15,26	31,5	23	73
250	B.4	2,04	6,0	19,60	29,6	22	74
250	B.5	2,15	6,0	21,77	28,8	21	73
400	B.6	2,40	6,0	27,13	27,3	19	70
450	B.7	2,70	6,0	34,34	25,7	17	66
		Tabla II	<b>Molino de bolas (*)</b>				
Potencia	Mod	Diametro	Longitud	Volumen	Velocidad	Peso	Peso de
CV	size	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	crítica Nc	t (**)	bolas (t)
300	B.10	2,75	3,0	17,89	25,5	65,8	26
350	B.11	2,75	3,3	19,69	25,5	79,2	29
400	B.12	2,75	4,0	23,45	25,5	95,5	35,5
450	B.20	3,05	3,4	24,50	24,2	108,0	40
500	B.21	3,05	3,7	26,73	24,2	119,7	44
600	B.22	3,05	4,3	31,18	24,2	136,4	52
700	B.30	3,36	3,5	30,54	23,1	158,8	58
800	B.31	3,36	4,4	38,63	23,1	186,0	67,7
900	B.40	3,66	4,1	43,30	22,1	192,8	78
1000	B.41	3,66	4,7	49,71	22,1	216,1	90
1100	B.42	3,66	5,0	52,92	22,1	223,8	96
1250	B.50	3,97	4,8	59,28	21,2	266,4	106
1400	B.51	3,97	5,5	67,75	21,2	296,8	120
1500	B.52	3,97	5,8	71,52	21,2	313,9	127
* Para trabajo en húmedo y descarga por rebose							
(**) Incluido los elementos molturadores							
El diametro se considera interior y entre chapa (carcasa). (sin forros)							
		Tabla III	<b>Molino de barras</b>				
Potencia	Mod	Diametro	Longitud	Volumen	Velocidad	Velocidad	Nc (r.p.m.)
CV	size	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	crítica Nc	catálogo	% Nc
55	b.1	1,00	3,5	2,75	42,3	29	69
100	b.2	1,32	4,0	5,47	36,8	25	68
200	b.3	1,80	4,5	11,45	31,5	22	70
250	b.4	2,04	4,5	14,70	29,6	20	68
250	b.5	2,15	4,5	16,33	28,8	20	69
400	b.6	2,40	5,0	22,61	27,3	18	66
La fracción sobre la velocidad crítica, utilizada para el trabajo en los molinos, disminuye al aumentar el diametro del molino, y es menor , para igualdad de diametro interno, en los molinos de barras con relación a los de bolas							

Tamices: Luces de malla			Mesh	micras	UNE 7050	ASTM
En las mallas Tyler, los tamices aumentan			5,00	125000	125000	117600
en la proporción de:			4,24	106000		
superficie:	raiz <sup>4</sup> (2)	1,18920712	U	4,00	100000	100000
	potencia(1/4)=	1,189207115	S	3,50	90000	88900
			A	3,00	75000	80000
nota de equivalencias: 1' = 12"			2,50	63000	63000	63500
1" = 25,4 mm			2,12	53000		
pié = 12 pulgadas			2,00	50000	50000	50800
1' = 305 mm			1,75	45000		
	Tamiz		1,50	37500	40000	38100
origen de	nº	raiz <sup>4</sup> (2)		1,25	31500	31800
cálculo	1	26900	T	1,05	26900	25000
	2	22620	Y	0,883	22600	
	3	19004	L	0,742	19000	20000
	4	15977	L	0,624	16000	16000
	5	13454	E	0,525	13500	12500
	6	11352	R	0,441	11200	
	7	9418		0,371	9510	10000
	8	7997		2,5	8000	8000
	9	6727		3,0	6730	6300
	10	5659		3,5	5660	
	11	4759		4	4760	5000
	12	4003		5	4000	4000
	13	3364		6	3360	3150
	14	2825		7	2830	
	15	2380		8	2380	2500
	16	2001		9	2000	2000
	17	1682		10	1680	1600
	18	1413		12	1410	
	19	1186		14	1190	1250
	20	1001		16	1000	1000
	21	841		20	841	800
	22	707		24	707	
	23	595		28	595	630
	24	500		32	500	500
	25	420		35	420	400
	26	353		42	354	315
	27	298		48	297	
	28	250		60	250	250
	29	210		65	210	200
	30	177		80	177	
	31	150		100	150	160
	32	126		115	125	125
	33	105		150	105	100
	34	88		170	88	80
	35	75		200	75	
	36	63		250	63	63
	37	53		270	53	50
	38	45		325	44	40
	39	37		400	37	

<b>SOLUCION</b> Calculos previos para unificar dimensiones:										
		4	mm	4000	micras		6	mm	6000	micras
		150	Mesh	105	micras		200	Mesh	75	micras
<b>1.- Motor necesario. La energía necesaria para la molienda en circuito cerrado viene dada por la expresión generalizada de Bond</b>										
		1		1	(250) 0,1					Kl : función de ø, ver teoría
		-----		-----	-----					Cc : carga circulante en %
		d80		D80	( Cc ) 0,1					Wi : índice de Bond
Suponemos Cc (estandar) = 250 y Ki = 1 ; molino de dimensión estandar.										
		1		1			1		1	calculos. auxiliares
		-----		-----	= 10 x Wi x	-----	-----			0,097590007
		d80		D80			105		4000	0,015811388
		135								0,081778619
		-----		Wi = 11,01						calculos. auxiliares
		15								0,115470054
				1		1				0,012909944
		W'p = 10 x 11,01 (Wi)		-----		-----			W'p = 11,29 kWh / t	0,102560109
				75		6000				
La potencia del motor en ( C.V.) para un molino viene dada por la expresión:										
		P(C.V.) =		T(t/h) . Wp(kWh/t) .1,36 (C.V./ kW) . fi					fi = 1,3	(ver teoría)
				1750 t/día						
		P(C.V.) =		-----		11,29 kWh/t x 1,36			c.v/kW x 1,3	factor(máquina) = 1532 C.V.
				24 h/día		95%				
										Motor a instalar = <b>1500 1550 C.V.</b>
El coeficiente fi corrige la "potencia media consumida" para obtener la potencia necesaria del motor.										
<b>2.- Elegir el molino</b> (una, dos o tres Ud)										
		Instalación con un molino		Pteórica = 1532		Pcatálogo= 1500		Psiguiente= 1500		
		<b>P(1m)(C.V.) =</b>		1500						que corresponde a un molino con un D = 3,97 m
				2,44		0,2		2,44		0,2
		P(1) = P(0) x		-----		= 1532		-----		= 1532 x 0,917 = 1404 C.V.
				Dinterno		3,77				
		Pcatálogo-inferior=		1400		Psiguiente= 1400				
El proceso por simplicidad de instalaciones aconseja instalar unidades iguales, luego dividimos por 2, 3, etc hasta encontrar un número de unidades iguales que cubra nuestro proceso										
		1532								opción
		(2m) =		-----		= 765,8 C.V./ Ud		menor 700		D = 3,36 m 1º
				2				mayor 800		D = 3,36 m 2º
		1532								
		(3m) =		-----		= 510,6 C.V./ Ud		menor 500		D = 3,05 m 3º
				3				mayor 600		D = 3,05 m 4º
Con el diametro previo obtenido para las diferentes soluciones debemos rehacer los cálculos para considerar el efecto de la disminución de la energía necesaria para la molienda al aumentar el tamaño de los molinos. En los cálculos iniciales no se puede corregir, ya que se desconoce el orden de magnitud. De hecho, se realizan para tantear el tamaño.										
		Probamos la solución inferior para		D =		3,355 m				
El cálculo de Bond se modifica por el factor correspondiente al diametro del molino y queda:										
				2,44		0,2		2,44		0,2
		Wi = Wi(1) x		-----		= 11,01		-----		= 11,01 x 0,95 = 10,45 kWh/t
				D		3,155				
Nota: El factor de corrección se puede obtener del gráfico pero no facilita el cálculo automático										
Aplicando este valor a las condiciones del proceso, se obtiene una nueva potencia necesaria que se										



calcula con el procedimiento anterior, y se obtiene:										calculos. auxiliares			
				1				1		0,115470054			
W'p =	10 x	10,45 (Wi)	-----					W'p =	10,72 kWh / t	0,012909944			
			75							0,102560109			
				6000									
La potencia del motor en ( C.V. ) para un molino viene dada por la expresión:													
P(C.V.) =	$T(t/h) \cdot Wp(kWh/t) \cdot 1,36 (C.V./ kW) \cdot fi$							fi =	1,3	(ver teoría)			
		1750	t/día										
P(C.V.) =	-----					10,72 kWh/t	x	1,36	c.v/kw	x	1,3	factor(máquina) =	1455 C.V.
		24	h/día		95%								
Las unidades tendrán una potencia unitaria de													
P(C.V.) =	727,5							Motor a instalar =	<b>700</b>   <b>750</b>	<b>C.V.</b>			
esta solución es posible, ya que es proxima a la solución estudiada										700 C.V.			
El proceso anterior, para tres unidades será:													
Probamos la primera solución para D = 3,05 m													
El índice de Bond se modifica por el factor siguiente:													
		2,44	0,2		2,44	0,2							
Wi =	Wi(1)	-----		=	11,01	-----		=	11,01	x	0,969	=	10,67 kWh/t
		D			2,85								
Aplicando este valor a las condiciones del proceso, se obtiene una nueva potencia necesaria que se calcula con el procedimiento anterior, y se obtiene:													
				1				1		calculos. auxiliares			
W'p =	10 x	10,67 (Wi)	-----					W'p =	10,94 kWh / t	0,115470054			
			75							0,012909944			
				6000						0,102560109			
La potencia del motor en ( C.V. ) para un molino viene dada por la expresión:													
P(C.V.) =	$T(t/h) \cdot Wp(kWh/t) \cdot 1,36 (C.V./ kW) \cdot fi$							fi =	1,3	(ver teoría)			
		1750	t/día										
P(C.V.) =	-----					10,94 kWh/t	x	1,36	c.v/kw	x	1,3	factor(máquina) =	1485 C.V.
		24	h/día		95%								
Las unidades tendrán una potencia unitaria de													
P(C.V.) =	494,9							Motor a instalar =	<b>450</b>   <b>500</b>	<b>C.V.</b>			
esta solución es posible, ya que es proxima a la solución estudiada										500 C.V.			
<b>Instalación más adecuada. Las posibles soluciones se dan en el cuadro siguiente:</b>													
Instalación		Solu- ción	nº de molinos	Potencia/Ud C.V.	Total kW	Total C.V.	Peso Ud	(t) Total	Coste (*) K€ de los molinos	Coste (€/t) de molinos			
para	1 molino	A	1	1400	1030	1400	297	297	2.514.719	8.473			
para	2 molinos	B	2	700	515	1400	159	318	3.840.299	12.095			
para	3 molinos	C	3	500	368	1500	120	359	4.398.371	12.248			
(*) El coste se obtiene aplicando la ecuación de Ruhmer para una unidad y multiplicándola por el nº de unidades ( X = potencia instalada en Kw = C.V. * 0,736 )													
P(€) =	1000	· ( a + b · x + c · X² ) · fa											
y el coeficiente de actualización se considera:							fa =	1,552					

La solución más adecuada es la A o B que reúne las características siguientes:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- simplicidad de la instalación</li> <li>- menor coste de inversión considerando la inst. completa</li> <li>- menor coste de operación</li> <li>- menor gasto de mantenimiento</li> <li>- circuitos mas sencillos</li> </ul>																																				
La solución A tiene el inconveniente que por avería del molino se para el 100% de la producción																																					
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">nº de molinos</th> <th style="width: 50%;">1</th> <th style="width: 50%;">2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>marca</td> <td>Allis Chalmers ó similar</td> <td>Allis Chalmers ó similar</td> </tr> <tr> <td>modelo</td> <td>B.51</td> <td>B.30</td> </tr> <tr> <td>Potencia</td> <td>1400</td> <td>700 C.V. / Ud</td> </tr> <tr> <td>Potencia total</td> <td>1400</td> <td>1400 C.V.</td> </tr> <tr> <td>Diametro interno</td> <td>3,965 m</td> <td>3,355 m</td> </tr> <tr> <td>Longitud</td> <td>5,49 m</td> <td>3,46 m</td> </tr> <tr> <td>Volumen interno</td> <td>67,75 45% = 30,49 m3</td> <td>30,54 61,08 45% = 27,49 m3</td> </tr> <tr> <td>Coste</td> <td>2.515 k€</td> <td>3.840 k€</td> </tr> <tr> <td>Para trabajar en</td> <td>circuito cerrado</td> <td>circuito cerrado</td> </tr> <tr> <td>Trabajo</td> <td>húmedo</td> <td>húmedo</td> </tr> <tr> <td>Descarga</td> <td>rebose</td> <td>rebose</td> </tr> </tbody> </table>	nº de molinos	1	2	marca	Allis Chalmers ó similar	Allis Chalmers ó similar	modelo	B.51	B.30	Potencia	1400	700 C.V. / Ud	Potencia total	1400	1400 C.V.	Diametro interno	3,965 m	3,355 m	Longitud	5,49 m	3,46 m	Volumen interno	67,75 45% = 30,49 m3	30,54 61,08 45% = 27,49 m3	Coste	2.515 k€	3.840 k€	Para trabajar en	circuito cerrado	circuito cerrado	Trabajo	húmedo	húmedo	Descarga	rebose	rebose
nº de molinos	1	2																																			
marca	Allis Chalmers ó similar	Allis Chalmers ó similar																																			
modelo	B.51	B.30																																			
Potencia	1400	700 C.V. / Ud																																			
Potencia total	1400	1400 C.V.																																			
Diametro interno	3,965 m	3,355 m																																			
Longitud	5,49 m	3,46 m																																			
Volumen interno	67,75 45% = 30,49 m3	30,54 61,08 45% = 27,49 m3																																			
Coste	2.515 k€	3.840 k€																																			
Para trabajar en	circuito cerrado	circuito cerrado																																			
Trabajo	húmedo	húmedo																																			
Descarga	rebose	rebose																																			
<b>3.- Para la solución con dos molinos, se calcula la velocidad de rotación</b>																																					
erno) = 3,355 m coraza, forros = 10 cm (elección del usuario)	(calculo)= 3,155																																				
42,3																																					
Nc = -----	Nc = 23,81 r.p.m. y para el 73% Nc = 17,38 r.p.m.																																				
raiz(D)																																					
Las etapas del reductor se deben elegir en proporción a números naturales sencillos. (relación de engranages)																																					
	Velocidad del motor 1000																																				
Relación general de reducción =	----- = 57,52																																				
	Velocidad del molino 17,38																																				
Las relaciones posible son																																					
6 x 10: 60 error de 0,398 % velocidad final 16,67 70% de Nc																																					
5 x 12: 60 ( es normal trabajar con dos etapas de reducción )																																					
3x4x5: 60 etc.																																					
<b>Notas.</b>																																					
Los molinos de potencia pequeña y mediana utilizan motores de anillos rozantes, y se arrancan con carga usando los reostatos de arranque, ya que tienen un gran par de arranque, y suelen girar normalmente a 1000 o 1500 r.p.m. Los motores																																					
Se acciona el molino mediante corona y piñones, utilizando dos etepas de reducción normalmente, incluida la del propio molino.																																					
Estas instalaciones suelen trabajar a jornada continua, dos o tres turnos.																																					
Los molinos grandes, a partir de 500 o 700 C.V. utilizan motores síncronos especialmente fabricados para el molino que van a mover, y transmiten la potencia al molino a través de corona y piñón que se acopla al motor a traves de un sistema de accionamiento hidráulico.																																					
Este accionamiento hidráulico, hace de amortiguador en los arranques, transmite el par de forma progresiva.																																					
Se hace muy dificultoso, practicamente imposible, utilizar reductores en los molinos grandes, porque las dimensiones serían muy grandes, y exigirían algún sistema de acoplamiento, de todas formas, para suavizar los arranques.																																					
Los molinos extragrandes, utilizan motores del tipo "wrap around" donde el propio molino es el rotor del motor																																					