

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 5: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (II).

TEMA 5: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (II)

5.1. Molienda Autógena.

Es aquella molienda en la cual la fragmentación se realizará por medio del propio mineral y, en algunos caso también con un pequeño porcentaje de bolas de acero.

Los esfuerzos que producirán la fragmentación serán esfuerzos combinados de percusión y/o atrición.

En función de los cuerpos de molienda empleados para realizar la fragmentación del mineral, surgen las siguientes definiciones:

Molienda Autógena (AG): Cuando el mineral se fragmenta en el interior del molino sin ayuda de otro tipo de medios moledores que no sea el propio mineral.

El mineral será Todo-Uno de mina o material previamente triturado en fragmentos gruesos.

Molienda Semi Autógena (SAG): Se provocará la fragmentación del mineral por el efecto combinado del propio mineral y de un pequeño porcentaje de bolas de acero.

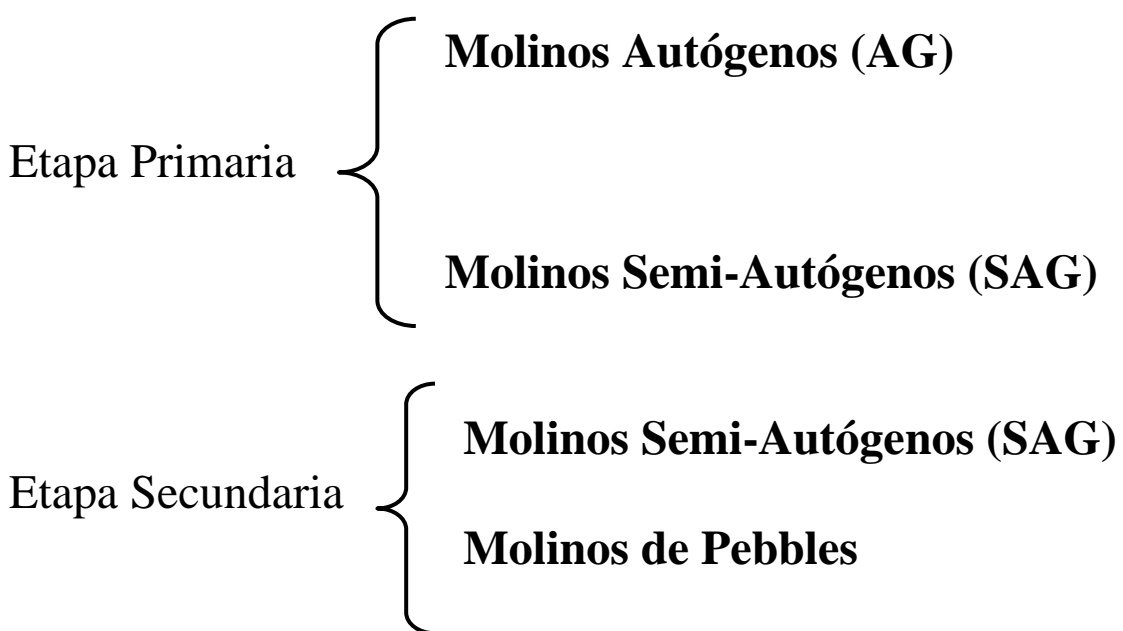
BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 5: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (II).

Molino de Pebbles: El mineral previamente molido a tamaño grueso o fino es introducido en un molino que emplea como medio de molienda pebbles.

Pebbles: Fragmentos de mineral de un determinado tamaño previamente clasificados mediante la intercalación de cribas en el circuito, u obtenidos del molino autógeno primario. Pueden ser naturales (mineral, grava, roca, etc.) o fabricados (cerámica).

La **molienda autógena (AG)** o **semi-autógena (SAG)**, es empleada en molienda primaria. La **molienda de pebbles** es normalmente utilizada en molienda secundaria.

Según la etapa de molienda los molinos se pueden clasificar como:



BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 5: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (II).

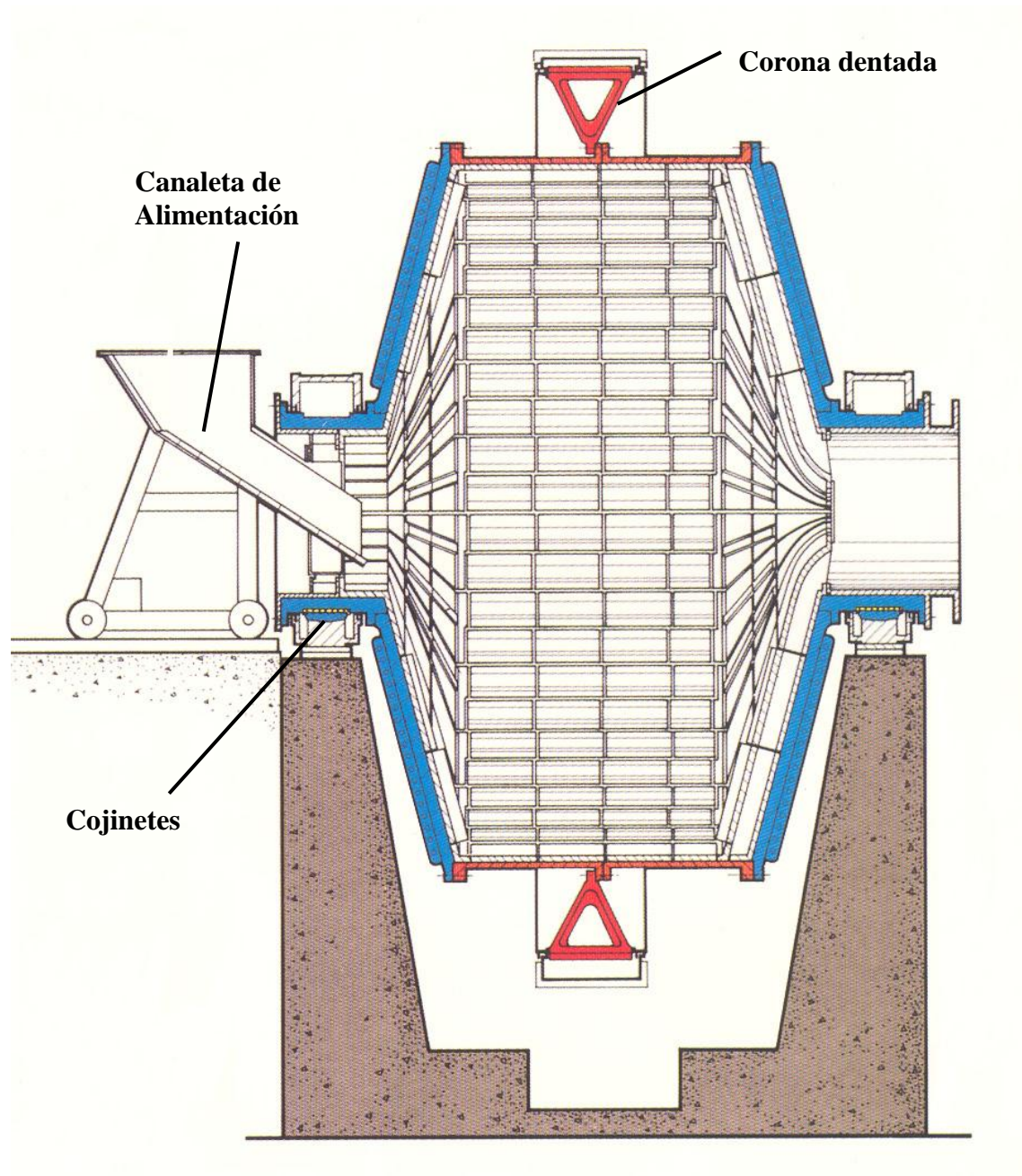


Fig. 5.1: Molino Semi-Autógeno (cortesía de Fuller-Traylor).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 5: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (II).

Molinos Autógenos, Semi-Autógenos y Pebbles.

El primer molino que apareció fue el molino Hadsel en 1930. Sin embargo la comercialización de los molinos autógenos comienza a partir de 1950.

Se alimentan con mineral procedente de la etapa de trituración primaria o con mineral Todo-Uno.



Fig. 5.2: Molino SAG en operación (Fuente: www.womp-int.com).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 5: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (II).

La forma de los tambores de los molinos autógenos es similar a la forma de los molinos semi-autógenos.

Los molinos autógenos que trabajan por vía húmeda van a presentar dos diseños de tambor muy diferentes. Por un lado tenemos el diseño Norteamericano en los que la relación L/D varía entre 0.3 y 0.6, por otro lado tenemos el diseño Escandinavo o Surafricano en el que los molinos tienen relaciones L/D que varían desde 1 a 2.5 o superiores. Los molinos de estilo Surafricano son parecidos a los molinos normales de molienda.

Molinos Primarios de estilo “Norteamericano”.

Se caracterizan por sus grandes diámetros y una relación **L/D** ampliamente **inferior** al valor de **1**.

Los dos molinos que caracterizan a este grupo son el Cascade Hardinge y el Aerofall.

▪ Cascade Hardinge

$L/D \cong 1/3$

Son tambores de gran diámetro. En su interior lleva unas barras elevadoras para disminuir el deslizamiento del material dentro del molino y producir un adecuado volteo de la carga de mineral.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 5: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (II).

Estas barras elevadoras que forman el revestimiento interior del molino estarán fabricadas con una combinación de caucho y acero. Estas barras serán de dos alturas que irán alternándose.

La alimentación se realiza por la abertura que existe en un extremo del eje a través de canaletas inclinadas instaladas sobre un carro que permitirá la retirada de la canaleta cuando sea necesario acceder a su interior.

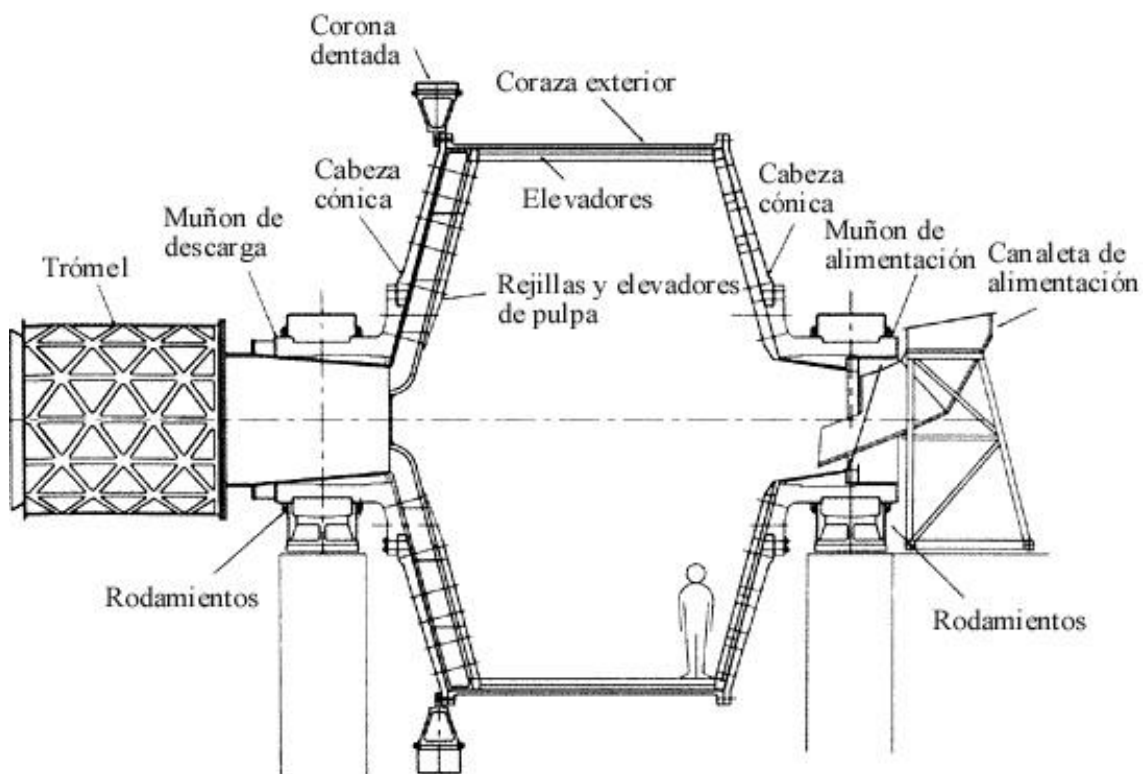


Fig. 5.3: Molino tipo "Cascade" (Cortesía de ANI-Grinding).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 5: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (II).

La extracción del mineral molido se realizará por medio de rejillas y es elevada por brazos hasta la boca de descarga (por vía húmeda) o con la ayuda de caudales de aire a través de un circuito neumático (por vía seca).

En estos molinos se suele trabajar con un porcentaje del propio mineral previamente homogeneizado a un tamaño grueso para que sirva de medio de molienda.

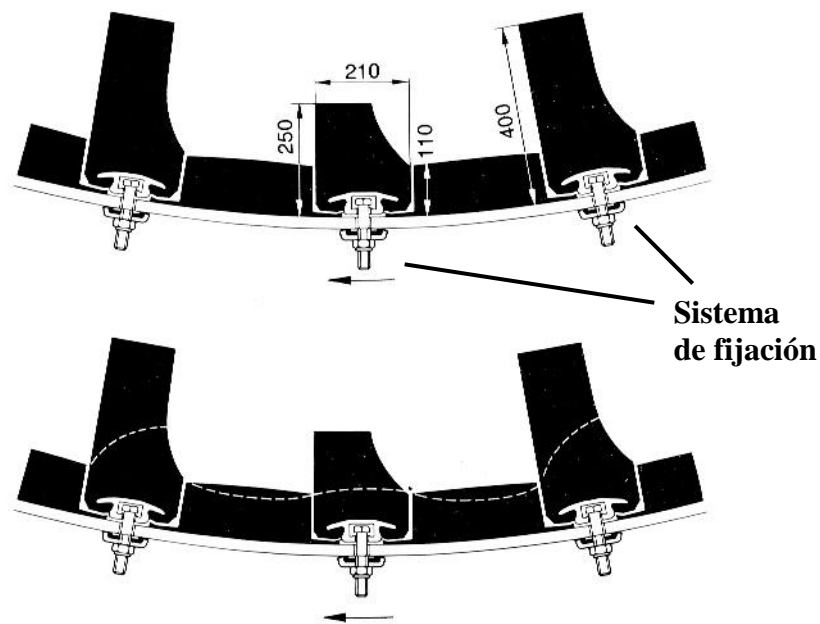


Fig. 5.4: Barras elevadoras de caucho (Cortesía de Skega AB).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 5: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (II).

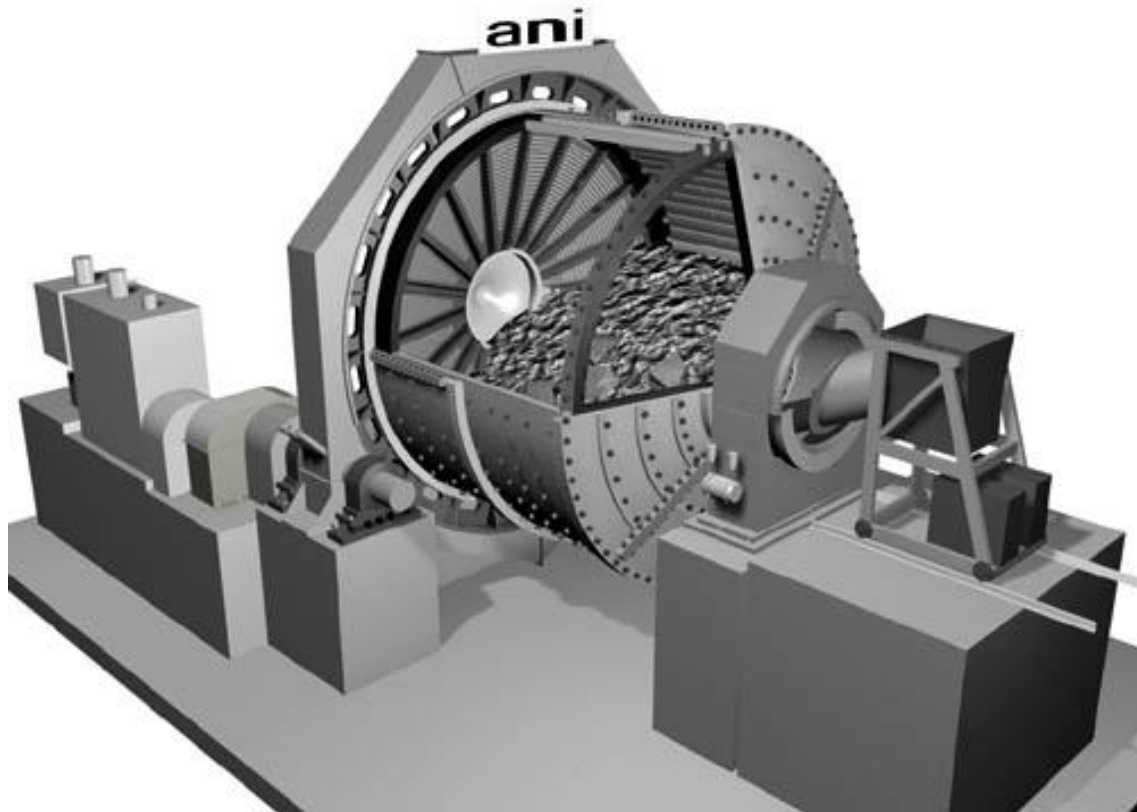


Fig. 5.5: Molino Autógeno tipo Cascade (cortesía ANI-Grinding).

- Molino Aerofall

$$1/5 < L/D < 1/2.5$$

Estos equipos también están equipados con barras elevadoras para facilitar los movimientos de elevación y caída de la carga.

La alimentación del mineral y su extracción se lleva a cabo de forma similar a la empleada con el Cascade Hardinge.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 5: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (II).

La carga molturante estará formada por el propio mineral y puede incluir una pequeña carga de bolas de acero (semi-autógeno).

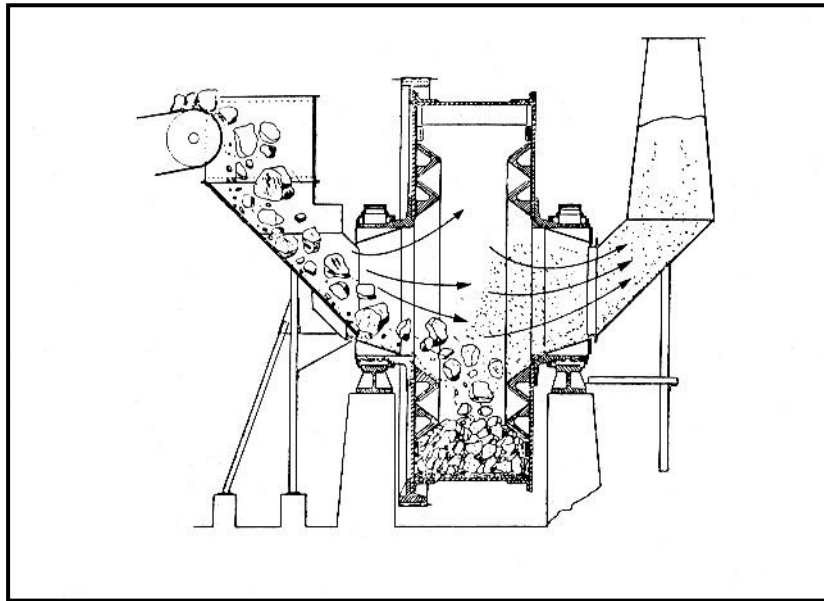


Fig. 5.6: Molino Aerofall (Cortesía Fives-Lille).

Estos molinos trabajan con volúmenes de carga comprendidos entre un 20 y un 35 % y, girando a velocidades cuyo rango va desde el 70 al 85 % de la velocidad crítica correspondiente.

El aire empleado en el Aerofall puede ir caliente con el fin de obtener un producto totalmente seco (p.e.: molienda de materias primas para la fabricación de cemento que suelen contener un 15-20 % de humedad).

Cuando el molino trabaja por vía húmeda se denomina **Hidrofall** y las condiciones de trabajo (volumen de carga, velocidad, etc.) son similares al Aerofall.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 5: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (II).

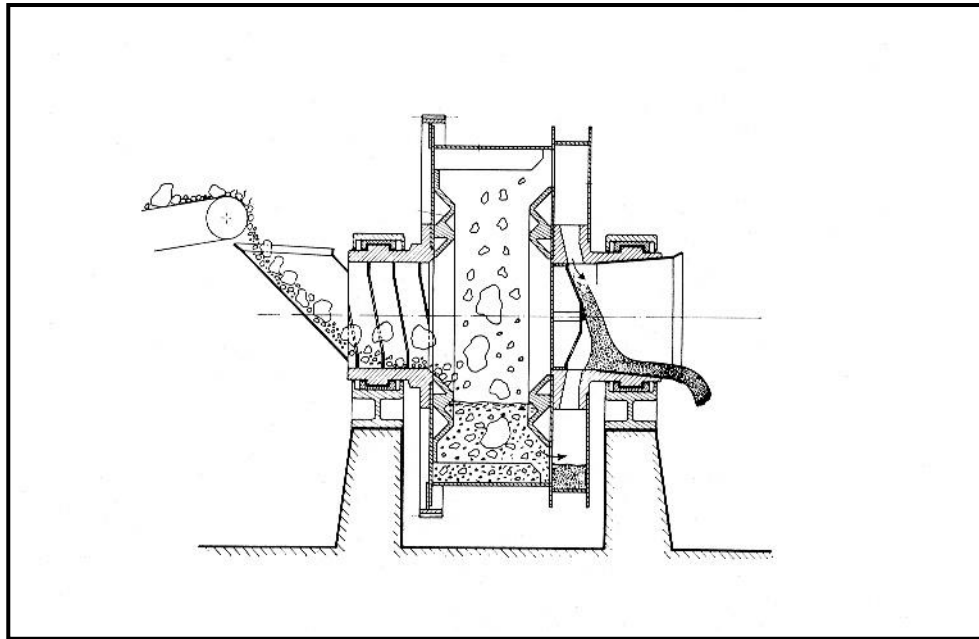


Fig. 5.7: Molino Hidrofall (Cortesía de Fives-Lille).

Tanto el Aerofall como el Hidrofall, disponen de unos deflectores laterales con el fin de orientar la caída del material evitando la concentración del mineral en determinadas zonas del molino por tamaños.

La molienda autógena primaria generalmente puede reemplazar a las etapas de machaqueo y de molienda con barras excepto la trituración primaria (mandíbulas o giratorias), en una planta convencional.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 5: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (II).

Ventajas de los molino autógenos integrales:

- ⇒ Mejora la estructura del mineral obtenido.
- ⇒ Buena liberación con un mínimo de finos.
- ⇒ Relaciones de reducción de **1000:1** (suprimiendo varias etapas de machaqueo y molienda).
- ⇒ Reducción de instalaciones de manejo, clasificación, almacenamiento intermedio, etc. (Ahorro de equipos).
- ⇒ Reducción de costes de mantenimiento.
- ⇒ Bajos desgastes metálicos (1000 gr/ton. tratada).
- ⇒ Contaminación de la carga baja.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 5: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (II).



Fig. 5.8: Molino SAG (Morgardshammar) estilo Norteamericano (Cortesía Nordberg).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 5: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (II).

Molinos Primarios estilo “Surafricano”

Relación EGL (effective grinding length inside liners):
 $L/D \cong 1 - 6$ ($D \cong 6.3$ m).

Son alimentados con bloques de mineral que van desde 300 hasta 400 mm.

Se emplean en circuitos con etapas simples y donde se requiere una molienda fina del mineral que proporciona a su vez una carga circulante muy manejable.

Los minerales donde se emplean estos molinos son de leyes bajas y de dureza media.

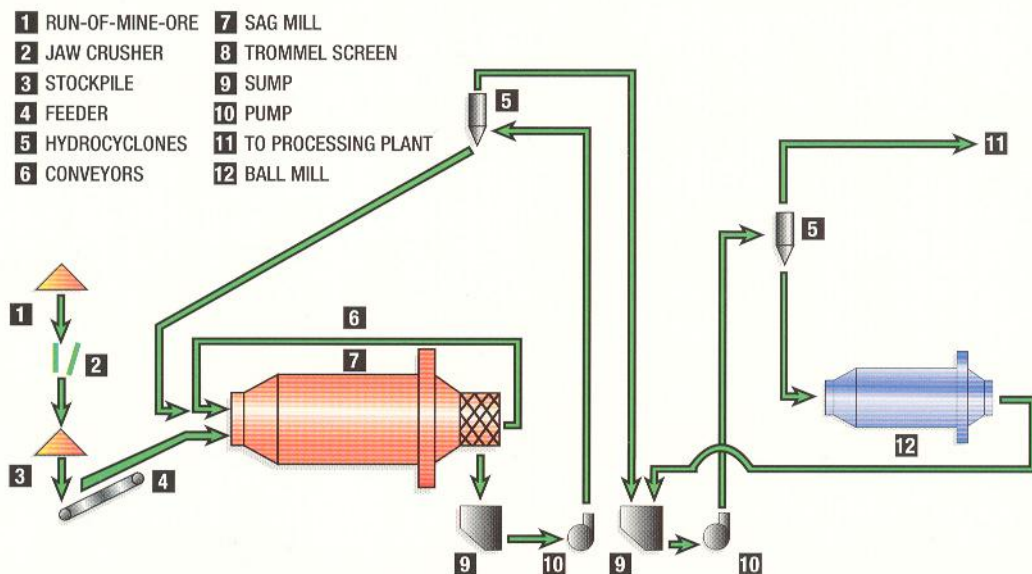


Fig. 5.9: Circuito con molino SAG y molino de bolas (Cortesía de Nordberg).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 5: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (II).

Aunque hemos comentado los diferentes molinos autógenos y semi-autógenos en etapas primarias, decir que estos molinos pueden aplicarse también en etapas intermedias o finales por vía húmeda.

Molinos de Pebbles.

Relación EGL (effective grinding length inside liners):

$$L/D \leq 2$$

Son similares a los molinos de bolas. Los cuerpos molturantes están constituidos por fragmentos del propio mineral previamente calibrados.

Normalmente el molino de pebbles reemplaza al molino de bolas en algunos circuitos y se suele utilizar en molienda secundaria.

Estos molinos se emplean para obtener un producto fino a partir de una alimentación (0-3 mm) que procede de un molino autógeno o de un molino de barras.

Dan un producto más fino que el que se conseguiría con un molino de bolas de idénticas características como consecuencia de los efectos de atrición.

El volumen de carga con el que trabajan estos molinos está en torno al 50 % y giran a velocidades comprendidas entre un 75 y un 80 % de su velocidad crítica.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 5: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (II).

Los molinos de pebbles trabajan generalmente por vía seca tanto en circuito cerrado como en circuito abierto. Uno de los campos más importantes es la industria del vidrio, la cerámica y la química.

Los revestimientos de estos molinos son similares a los empleados en los molinos de barras o de bolas, pero de diferentes diseños. Fabricados de hierro blanco, Ni-hard o de cromo molibdeno.

La descarga se efectúa a través de parrillas (construidas de Ni-hard, cromo-molibdeno, goma o de plástico).

Poseen menor desgaste de acero.

**Aplicaciones de los molinos Autógenos,
Semi-Autógenos y Pebbles.**

El campo principal de aplicación de la molienda autógena, semiautógena y de pebbles es el tratamiento y preparación de minerales (Cu, Pb, Zn, Fe, baritina, fosfatos, amianto).

También hay molinos de este tipo trabajando en el tratamiento de materias primas para la fabricación de cemento, fabricación de arena artificial, etc.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 5: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (II).

Dimensionado de los Molinos Autógenos

Para la selección de este tipo de molinos se deberán tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Tamaño óptimo de alimentación.
- Grado de llenado.
- Velocidad de Giro
- Potencia.

Tamaño Óptimo de Alimentación

En molinos primarios tenemos los siguientes criterios:

Según Allis-Chalmers: $D_{80} = 0.95 \cdot D_M^{2/3}$ (5.1)

Siendo:

D_{80} = Dimensión de la malla (% paso) en **pulgadas**.

D_M = Diámetro interior del molino en **pies**.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 5: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENTA (II).

Según E. C. Blanc: $D_M \geq 20 \cdot D_{80}$ (5.2)

D_{80} = Dimensión de la malla (% paso).

D_M = Diámetro interior del molino.

En molienda secundaria y donde se utiliza el propio mineral como medio de molienda, la relación entre el tamaño de los fragmentos moledores y el propio material a moler debe cumplir los siguientes valores (E. C. Blanc):

7:1 Molienda Intermedia.

35:1 Molienda Final.

El porcentaje de los fragmentos moledores está en torno al 1.5-5 % de la alimentación.

Grado de Llenado.

El grado de llenado en molienda primaria es del 20-35 % del volumen del molino.

En molienda secundaria es del 45-50 %.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 5: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENTA (II).

Velocidad de Giro.

La velocidad óptima es próxima al 75 % de la velocidad crítica. Pero normalmente se gira entre el 85 y el 88 %.

Potencia.

Para molienda en húmedo (E. C. Blanc):

$$kW = L \cdot D_M^{2.62} \quad (5.3)$$

L = Longitud del molino, m.

D_M = Diámetro interior del molino, m.

Para molienda en seco con Aerofall (Mular):

$$kW = 1.74 \cdot 10^{-4} \cdot W \cdot D_M^{2.8} \cdot L \quad (5.4)$$

W = Densidad aparente de la carga, libras/pie³.

L = Longitud del molino, pies.

D_M = Diámetro interior, pies.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 5: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLIENDA (II).

Para molienda con molinos SAG, AG o molinos de pebbles según Nordberg:

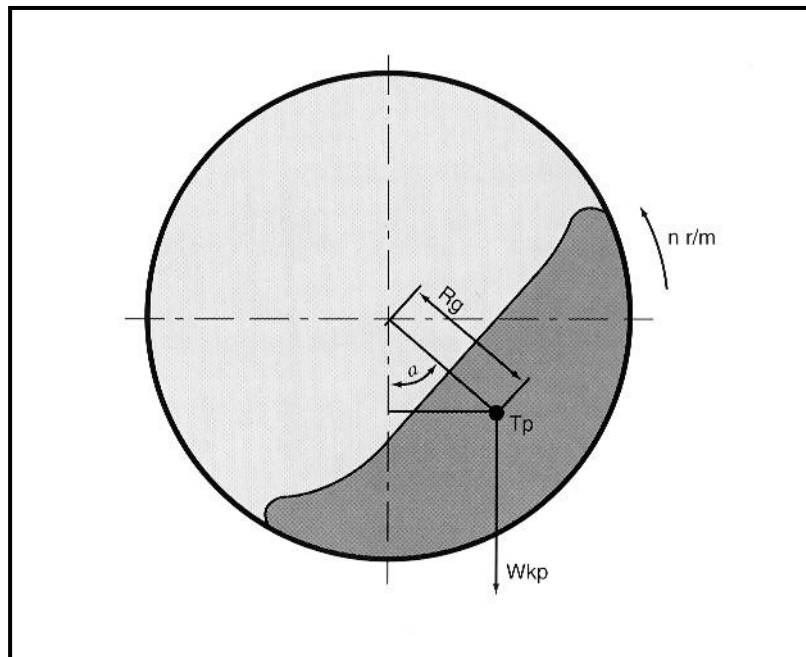


Fig. 5.10: Esquema de funcionamiento de un molino autógeno (cortesía de Nordberg).

$$N = c \cdot W \cdot R_g \cdot n \quad (5.5)$$

Siendo:

N = Potencia bruta del molino, en kW.

c = Constante cuyo valor es de 1/1200 para SAG, AG y molinos de pebbles.

W = Peso de la carga, en kg.

R_g = Distancia del c.d.g. al eje del molino, en m.

n = Velocidad del molino, en r.p.m.