



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

# TECNOLOGÍA MINERALÚRGICA



TEMA 5: REDUCCIÓN DE  
TAMAÑO - MOLIENDA

MOLIENDA - II



# 5

## REDUCCIÓN DE TAMAÑO: MOLIENDA (II)



### Reducción de Tamaño. Molienda (II)

- 5.1. Molinos de barras.
- 5.2. Molinos de bolas.
- 5.3. Molinos autógenos.
- 5.4. Accionamiento de los molinos.
- 5.5. Tipos de circuitos de molienda.
- 5.6. Molinos de agitado.
- 5.7. Molinos vibrantes.
- 5.8. Molinos verticales



# 5.1. Molinos de barras

5.1. Molinos de barras

- El desarrollo de los molinos se debió a la influencia ejercida por tres procesos:
  - La molienda del Clinker en la industria cementera (1900).
  - El proceso “cyanide”, desarrollado para recuperar el oro a partir del mineral finamente molido (1900-1910).
  - El proceso de flotación que se desarrolló para extraer los sulfuros minerales (blenda, pirita, galena, etc.) del resto de la ganga.





## ***Parámetros que caracterizan a un molino de barras***

- **Los parámetros principales que definen la operación de un molino de barras son:**
  - **Velocidad crítica**
  - **Volumen de la carga (V.C.)**
  - **Tamaño de alimentación**
  - **Tamaño del producto**
  - **Cociente de reducción**
  - **Relación entre el diámetro (D) y la longitud (L)**
  - **Longitud de las barras**
  - **Número de elevadores**



## 1. Velocidad crítica

- Velocidad de giro mínima del molino para que las partículas queden adheridas a la pared interna del molino y no se produzca molienda.
- La expresión que nos proporciona esta velocidad crítica es la siguiente:

$$V_{crítica} = \frac{42.3}{\sqrt{D_M}}$$

Donde:

$V$  = Velocidad crítica, *r.p.m.*

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



- La expresión anterior se ha obtenido a través del estudio de la trayectoria seguida por una partícula en el interior de un molino de barras.

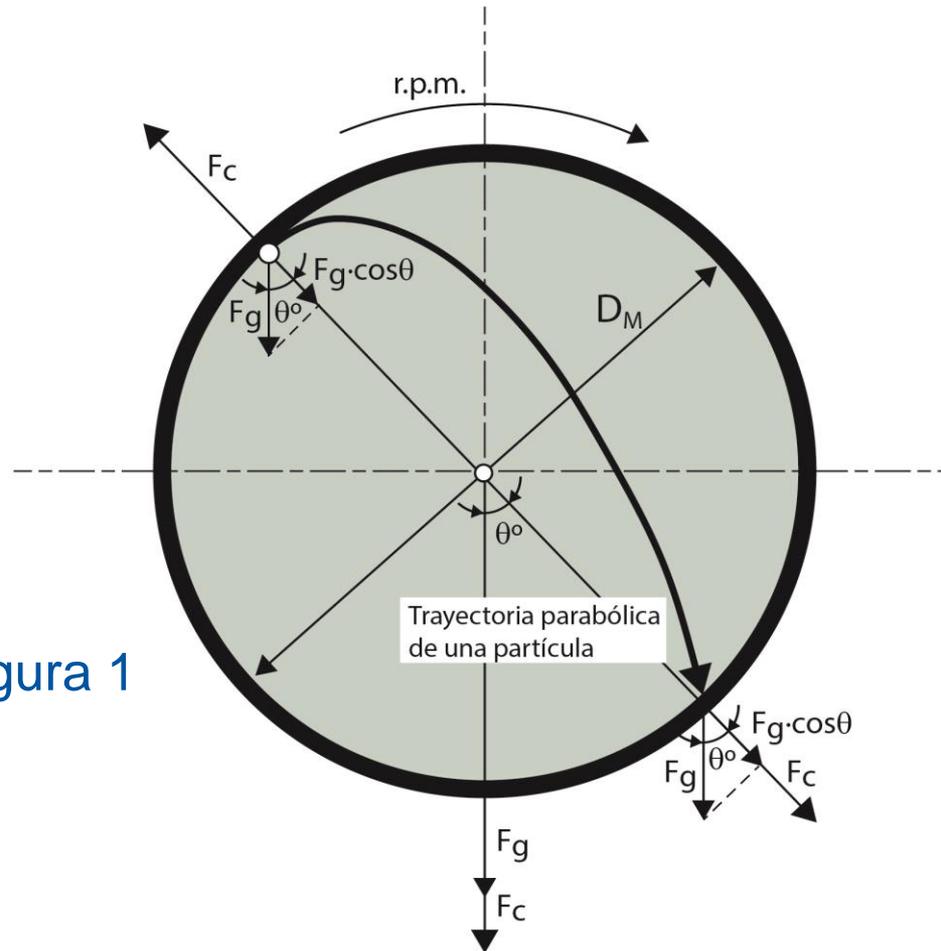


Figura 1

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



## 2. Volumen de la carga (V.C.)

- Nos indica el volumen que ocupa la carga de barras en el interior del molino, considerando también los huecos vacíos existentes entre las barras.
- El volumen de llenado con el molino en reposo (en vacío) es menor que cuando el molino está girando (en carga) con la misma carga de barras.
- La relación que nos da el volumen de la carga en vacío es la siguiente:

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

Donde:

$H_c$  = Distancia interior máxima entre la parte superior del revestimiento y la parte superior de la carga en reposo.

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



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

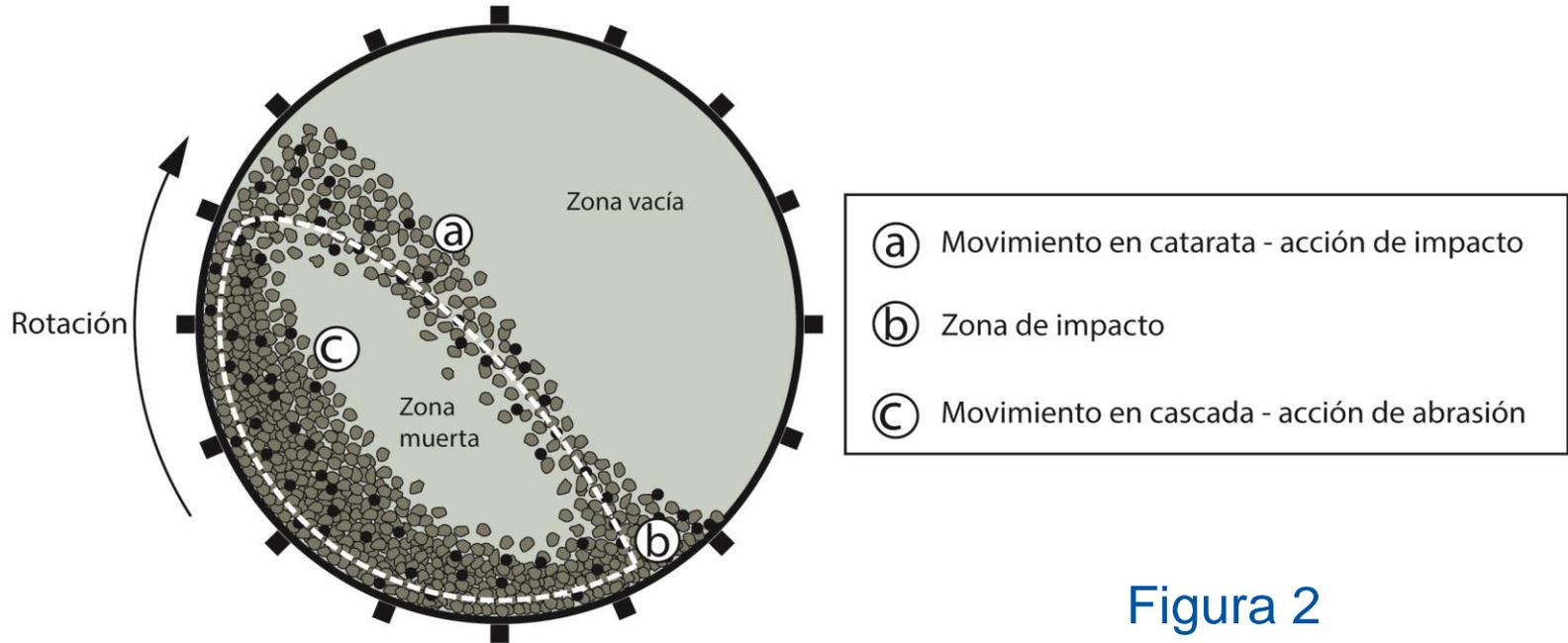


Figura 2

Movimiento de la carga dentro de un molino



### 3. Tamaño de alimentación

- El tamaño de alimentación según Allis-Chalmers, se puede obtener a través de la siguiente expresión:

$$D_{80} = 16000 \cdot \sqrt{\frac{13}{w_i}}$$

Donde:

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

$w_i$  = índice de Bond.



## 4. *Tamaño del producto*

- **Según Nordberg:**
  - **Tamaño máximo producido = 4.7 mm.**
  - **Tamaño mínimo producido = 0.5 mm.**
- **Según SIM:**
  - **Tamaño normal producido = entre 1 y 2 mm.**
  - **Tamaño mínimo producido = 0.5 mm (c.a.).**
  - **Tamaño mínimo producido = 0.3 mm (c.c.).**



## ***5. Cociente de reducción***

- **Según Bond:**
  - **Límites entre 12:1 y 20:1.**
  - **Lo normal es 16:1.**
- **Según SIM:**
  - **Para circuito abierto (c.a.) entre 20:1 y 25:1.**
  - **Para circuito cerrado (c.c.) entre 40:1 y 50:1.**



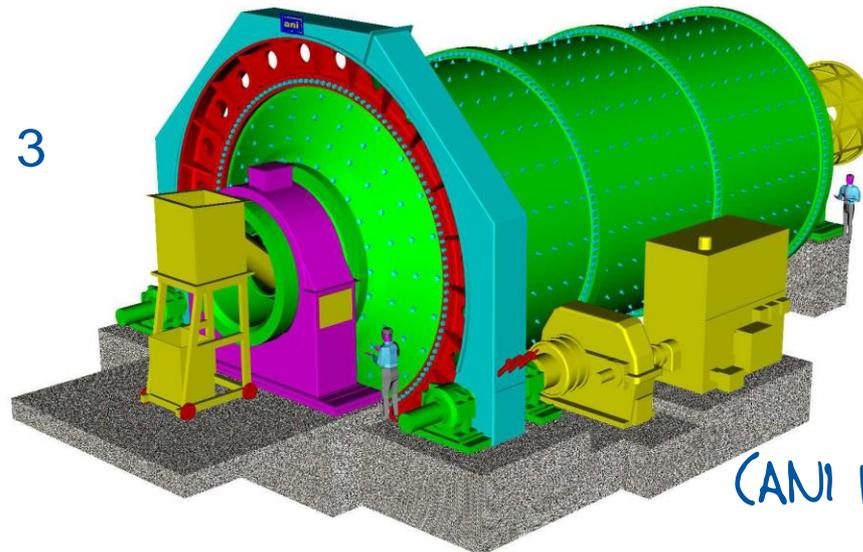
## 6. Relación entre el diámetro y la longitud

- Para impedir que las barras se crucen, los molinos de barras se fabrican de tal forma que la relación entre el diámetro ( $D_M$ ) y la longitud (L) del molino sea inferior a 1.25:

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

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

Figura 3



(ANI Mineral Processing)



## 7. Longitud de las barras

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



Figura 4

([www.aiaengineering.com](http://www.aiaengineering.com))



## 8. Número de elevadores

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

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



Figura 4

([www.aiaengineering.com](http://www.aiaengineering.com))



## *Clasificación en función de las descarga*

### Molino de descarga por rebose

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

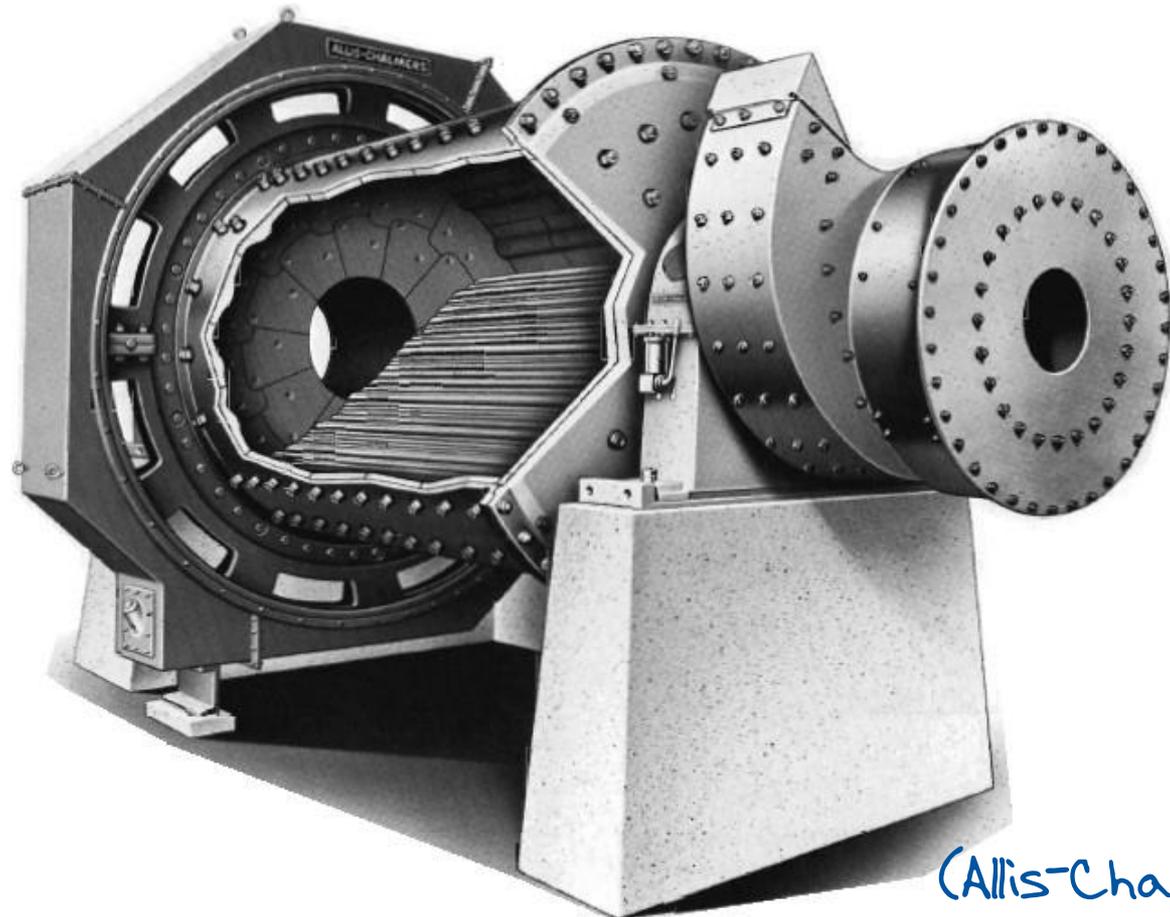


Figura 5

(Allis-Chalmers)



## Molino de descarga por rebose

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

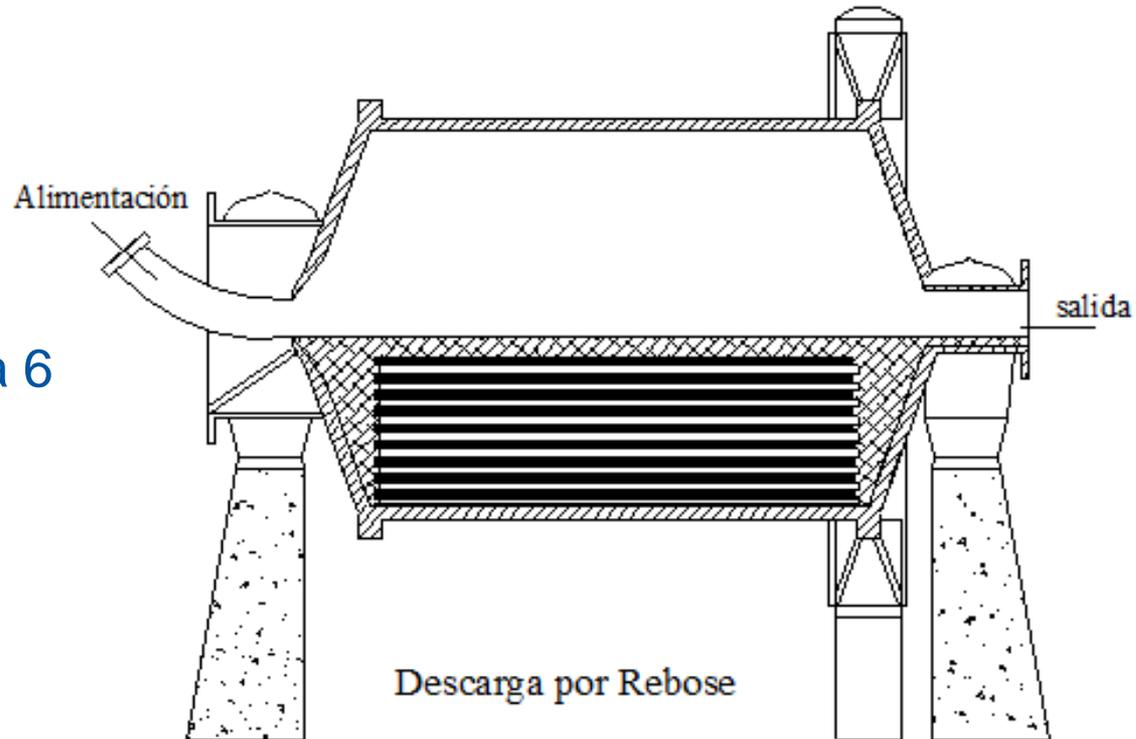
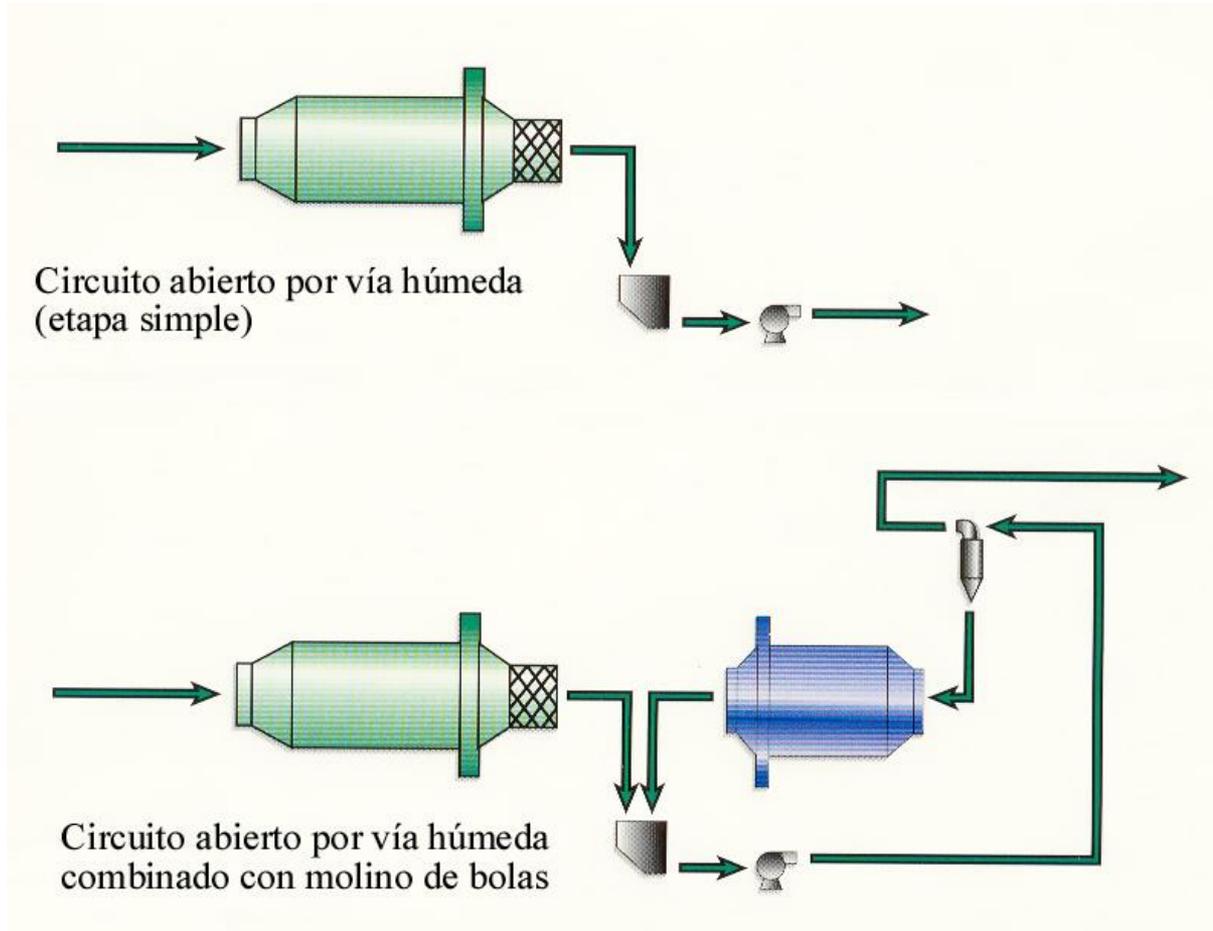


Figura 6



Figura 7

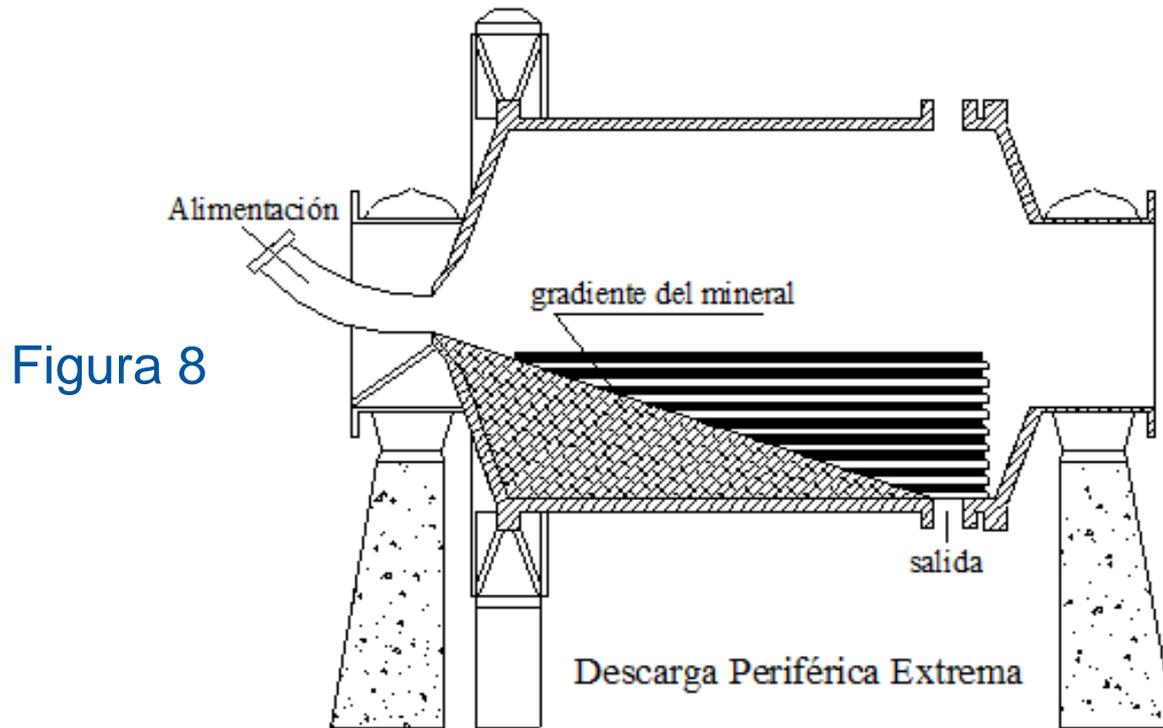


- Circuitos típicos de molinos de barras por rebose.



## Molino de descarga periférica extrema

- Trabajo en circuito abierto para producir tamaños máximos comprendidos entre 1 y 3 mm y en circuito cerrado para obtener tamaños máximos de entre 0.4 y 1 mm.

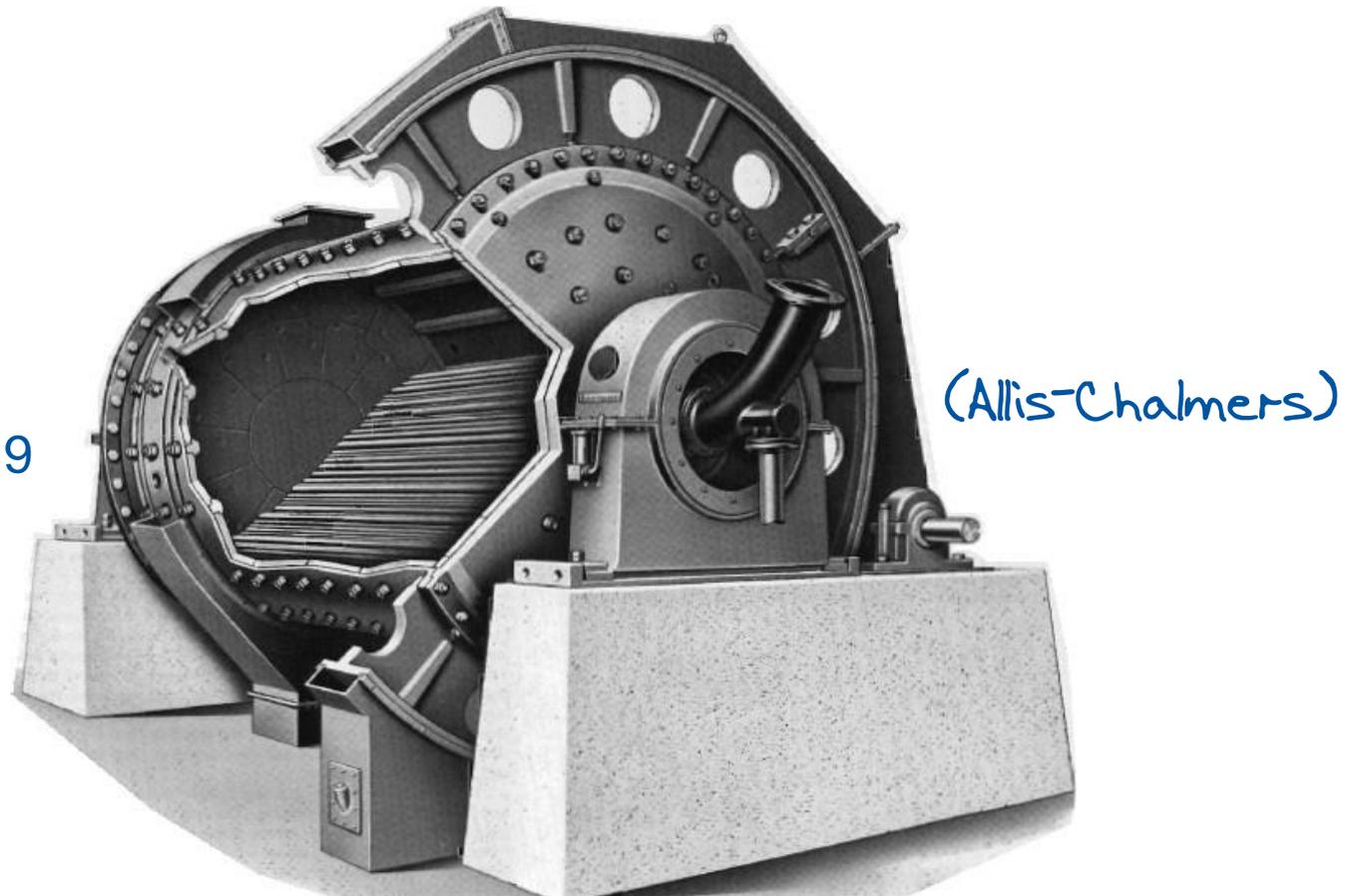




## Molino de descarga periférica extrema

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

Figura 9

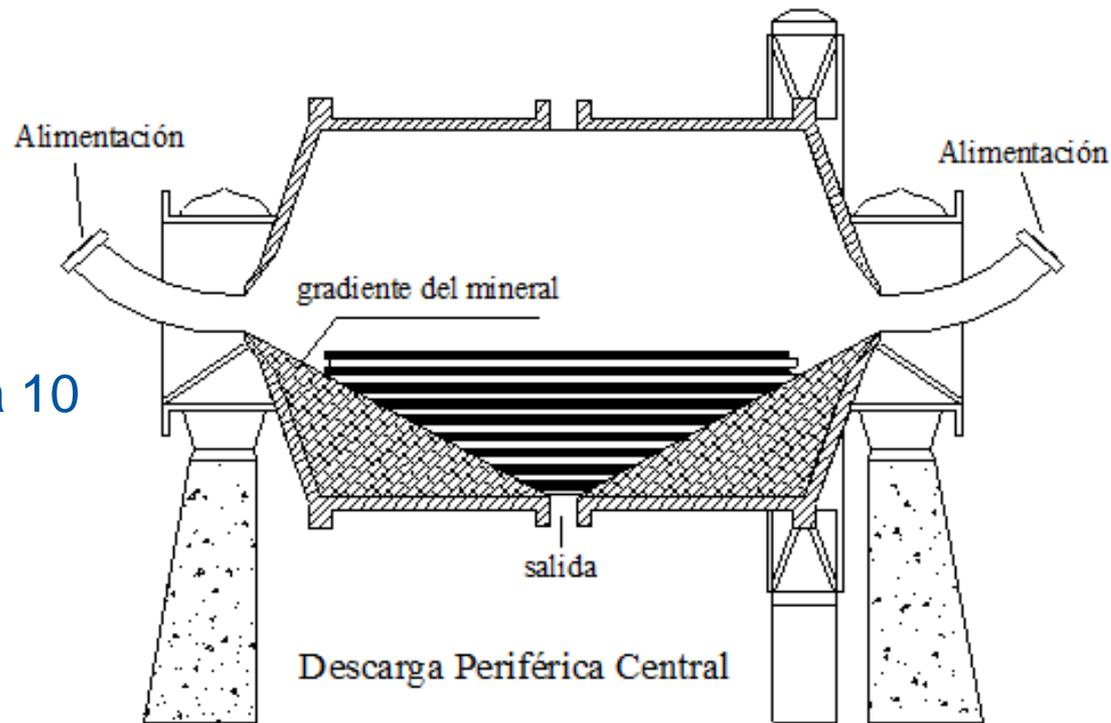




## Molino de descarga periférica central

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

Figura 10



- Se emplean para la molienda de carbón y coque, fabricación de arena artificial para hormigón, molienda de Clinker para cemento, sinterización de minerales de hierro, etc.



## ***Dimensionado de un Molino de Barras***

- **Para dimensionar un molino hay que obtener los siguientes parámetros:**
  - **Diámetro y longitud del molino.**
  - **Granulometría obtenida para el producto.**
  - **Potencia absorbida.**



## Diámetro y Longitud

- El diámetro y la longitud de un molino están relacionado como se ha expuesto anteriormente, es decir:

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

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



## Potencia

- **La potencia de un molino es el principal parámetro que va a determinar sus dimensiones. Se puede obtener mediante:**
  - **Fórmulas empíricas.**
  - **Ábacos.**
  - **Tablas que facilitan los catálogos de los fabricantes de equipos.**



## Potencia mediante fórmulas empíricas

- Según Nordberg, la potencia útil de un molino de barras por vía húmeda viene dada por:

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

Donde:

$M_c$  = Peso de la carga de barras (ton.).

$D$  = Diámetro interior entre revestimiento (m.).

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

$C_s$  = Porcentaje de la velocidad crítica.



- Según Bond, la potencia absorbida por un molino de barras viene dada por:

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

Donde:

$P_a$  = Potencia absorbida (kW).

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

$w_i$  = Índice de Bond (kWh/sht).

**Nota:** si  $w_i$  se da en kWh/t, no hace falta dividir por 0.907.

- Al valor obtenido con la expresión anterior habrá que multiplicarle una serie de factores ( $EF_i$ ), para obtener la potencia útil, según las condiciones de trabajo del molino de barras, quedando la expresión:

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



## Factores de Corrección ( $EF_i$ )

**$EF_1$**  (Molienda en Seco)

Molienda en húmedo:  $EF_1 = 1$

Molienda en seco:  $EF_1 = 1.3$

**$EF_2$**  (Molienda en Circuito Abierto)

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



## $EF_3$ (Factor de Eficiencia del Diámetro)

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

Donde:

$D_M$  = Diámetro interior entre revestimientos (m).

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



## $EF_4$ (Factor de sobretamaño de la alimentación)

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

Donde:

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

$w_i$  = Índice de Bond (kWh/sht).

$F_o$  = Tamaño óptimo de alimentación:

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



## **EF<sub>5</sub>** (Factor de molienda fina)

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

$$EF_5 = \frac{d_{80} + 10.3}{1.145 \cdot d_{80}}$$

## **EF<sub>6</sub>** (Alto/Bajo ratio de reducción)

- Este factor debe aplicarse cuando el valor de  $R_r$  no esté comprendido entre  $(R_{ro}-2)$  y  $(R_{ro}+2)$ , y su valor viene dado como:

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



Donde:

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

Siendo,  $L$  = Longitud de las barras.

**EF<sub>7</sub>** (Este factor se aplica en el caso de molino de bolas).



## **EF<sub>8</sub>** (Molienda de barras)

### Circuito de molienda formado sólo molino de barras:

- Alimentación al molino procedente de una trituración en circuito abierto: **EF<sub>8</sub> = 1.4.**
- Alimentación al molino procedente de una trituración en circuito cerrado: **EF<sub>8</sub> = 1.2.**

### Circuito de molienda formado por molino de barras + molino de bolas:

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

- Alimentación al molino procedente de una trituración en circuito abierto: **EF<sub>8</sub> = 1.2.**
- Alimentación al molino procedente de una trituración en circuito cerrado: **EF<sub>8</sub> = 1.**

**EF<sub>9</sub>** (Factor por revestimiento de caucho). (**EF<sub>9</sub>=1.07**)



## Tamaño de las barras (diámetro máximo)

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

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

Donde:

$D_{barra}$  = Diámetro máximo de las barras (mm).

$D_{80}$  = Dimensión de la abertura de malla para un 80% de paso de la alimentación ( $\mu\text{m}$ ).

$w_i$  = Índice de Bond (kWh/sht).

$S_g$  = Peso específico del mineral ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ).

$C_s$  = Porcentaje de la velocidad crítica.

$D_M$  = Diámetro interior de los revestimientos (m).



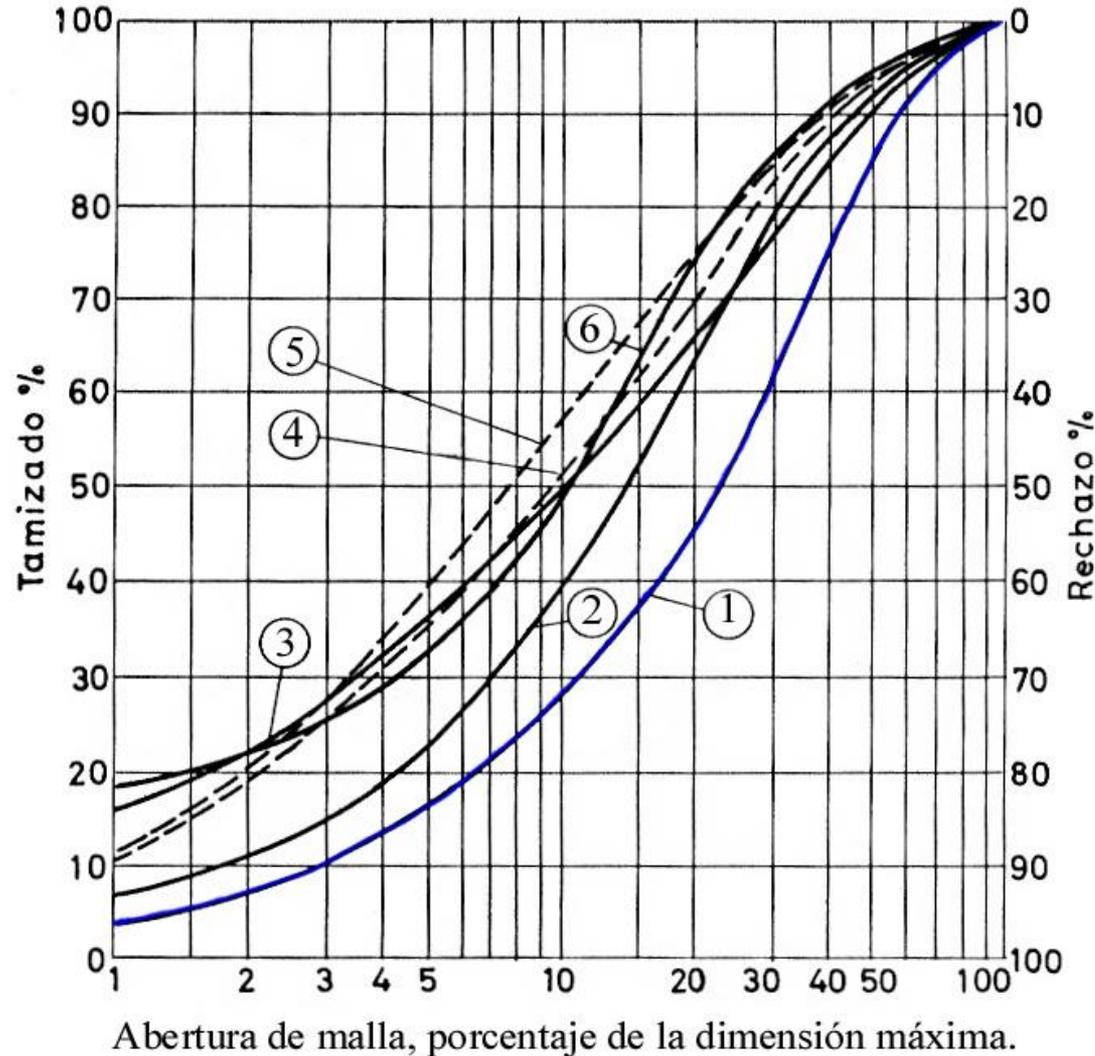
- Las barras de un molino van siguiendo una **distribución de tamaños** de una manera equilibrada y que se obtiene por medio de tablas como la siguiente:

**Tabla para la distribución de la carga de barras. Porcentaje en peso.**

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



## Granulometría de salida de un molino de barras



Granulometría de salida de un molino de barras en c.a. (para minerales tipo medios) (curva 1). Según TAGGART.



## Granulometría de salida de un molino de barras

Tamaños del producto obtenido en un molino de barras (según TAGGART).

Tipo de mineral	Circuito Abierto		Circuito Cerrado	
	Abertura de malla (80 % paso)	Abertura de malla (50 % paso)	Abertura de malla (80 % paso)	Abertura de malla (50 % paso)
Blando	30	12	30	10
Medio	42 (curva 1)	22 (curva 1)	39	15
Duro	52	32	56	25

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



## 5.2. Molinos de bolas

- Los molinos de bolas presentan características comunes con los molinos de barras pero las diferencias son mayores que las semejanzas.
  - Se emplean para obtener granulometrías de mineral comprendidas entre 0-30 micras y 0-200 micras.
  - Los cuerpos moledores serán de forma esférica (bolas) o de formas cilíndricas, cónicas o irregulares.

([www.ballmilliners.com](http://www.ballmilliners.com))



Figura 11

([www.goldproballs.com](http://www.goldproballs.com))



Figura 12



## ***Parámetros que caracterizan a un molino de bolas***

- **Los parámetros principales que definen la operación de un molino de bolas son:**
  - **Velocidad crítica**
  - **Volumen de la carga (V.C.)**
  - **Tamaño de alimentación**
  - **Tamaño del producto**
  - **Cociente de reducción**
  - **Relación entre el diámetro (D) y la longitud (L)**
  - **Tipo de alimentador**



## 1. Velocidad crítica

- Velocidad de giro mínima del molino para que las partículas queden adheridas a la pared interna del molino y no se produzca molienda.
- La expresión que nos proporciona esta velocidad crítica es la siguiente:

$$V_{crítica} = \frac{42.3}{\sqrt{D_M}}$$

Donde:

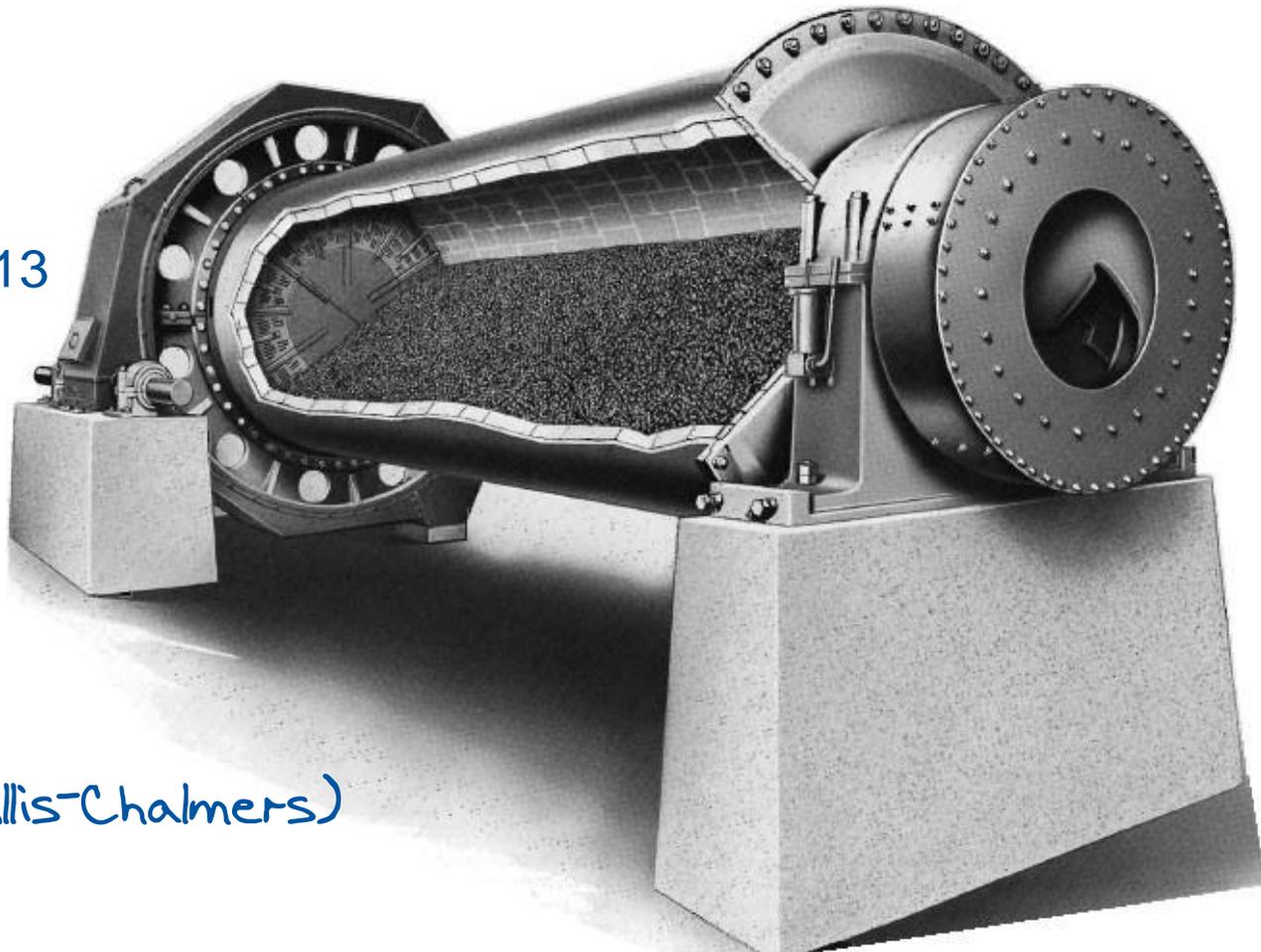
$V$  = Velocidad crítica, *r.p.m.*

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



- La expresión anterior se ha obtenido a través del estudio de la trayectoria seguida por una partícula en el interior de un molino de bolas.

Figura 13



(Allis-Chalmers)

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



## 2. Volumen de la carga (V.C.)

- Nos indica el volumen que ocupa la carga de bolas en el interior del molino, considerando también los huecos vacíos existentes entre las bolas.
- El volumen de llenado con el molino en reposo (en vacío) es menor que cuando el molino está girando (en carga) con la misma carga de bolas.
- La relación que nos da el volumen de la carga en vacío es la siguiente:

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

Donde:

$H_c$  = Distancia interior máxima entre la parte superior del revestimiento y la parte superior de la carga en reposo.

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



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

Figura 14



(www.arabic.alibaba.com)

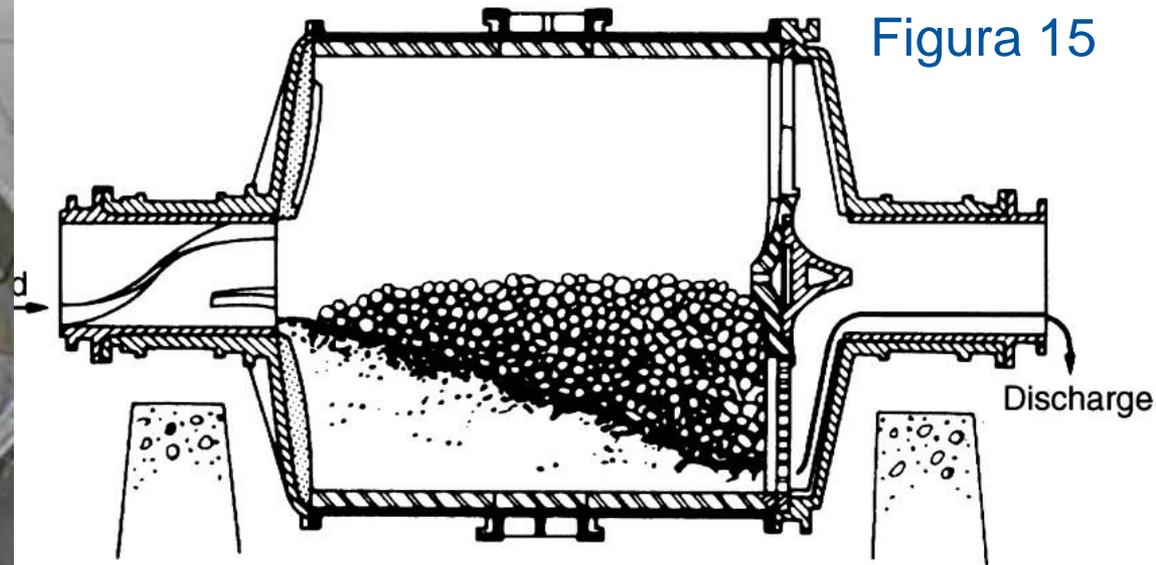


Figura 15

Wills' Mineral Processing Technology (2006)



### 3. *Tamaño de alimentación*

- El tamaño de alimentación según Allis-Chalmers, se puede obtener a través de la siguiente expresión:

$$D_{80} = 4000 \cdot \sqrt{\frac{13}{w_i}}$$

**Donde:**

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

$w_i$  = índice de Bond (kWh/t).



## ***4. Tamaño del producto***

- **Según Nordberg:**
  - **Tamaño máximo producido = 0.420 mm.**
  - **Tamaño mínimo producido = 10 micras.**
- **Según SIM:**
  - **Tamaño de salida  $D_{95} = 30$  micras.**



## ***5. Cociente de reducción***

- **Según Blanc:**
  - **La razón de reducción máxima es de 500:1.**
- **Según SIM:**
  - **Para circuito cerrado (razón óptima) 5-40:1.**
  - **Para circuito cerrado (razón máxima) 100:1.**



## ***6. Relación entre el diámetro y la longitud***

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

**Relaciones ligeramente inferiores a 1:1;  $L = 0.9 \cdot D$**

**Relaciones superiores a 1:1;  $L = 2 \cdot D$**



## ***7. Tipo de alimentador***

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

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

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



## *Clasificación en función de las descarga*

### Molino de descarga por rebose

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

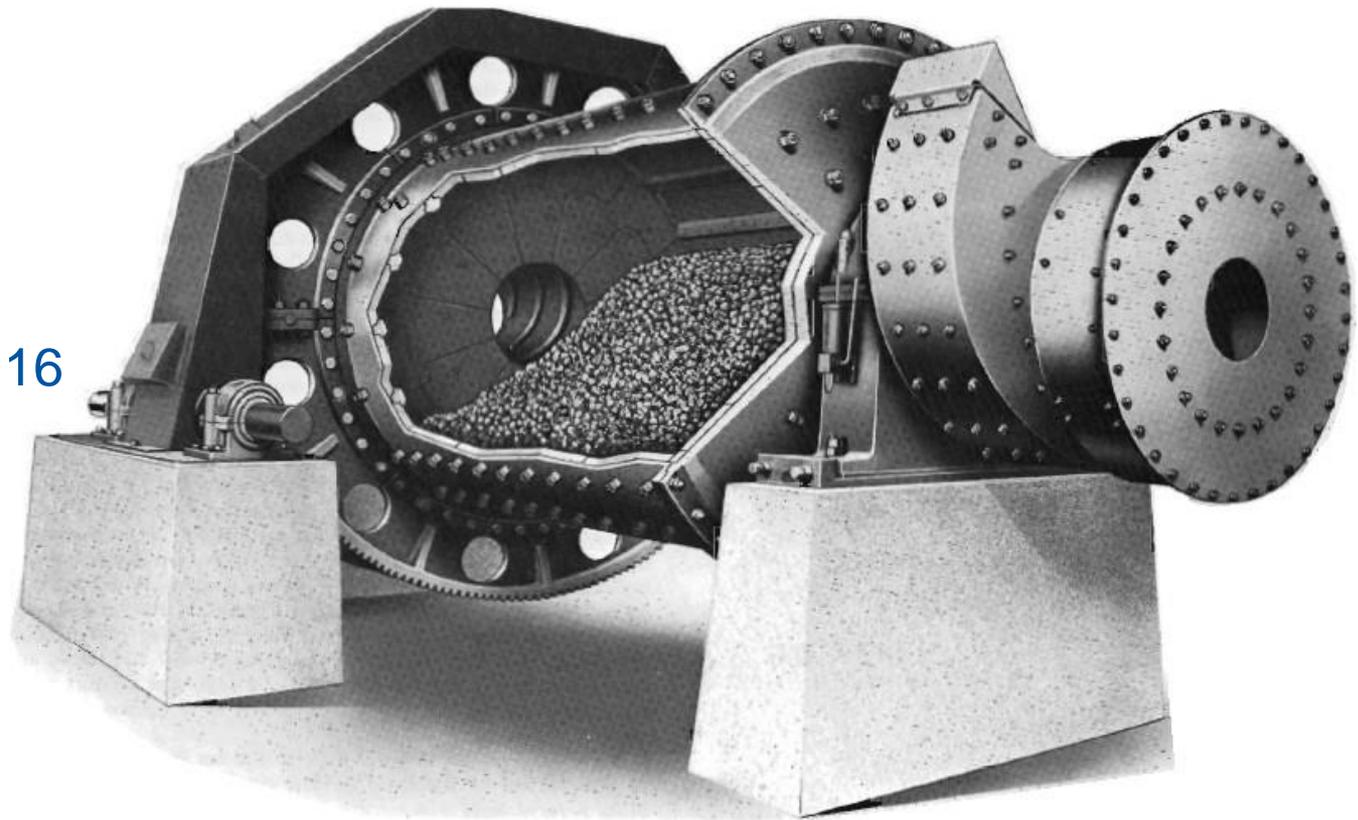


Figura 16

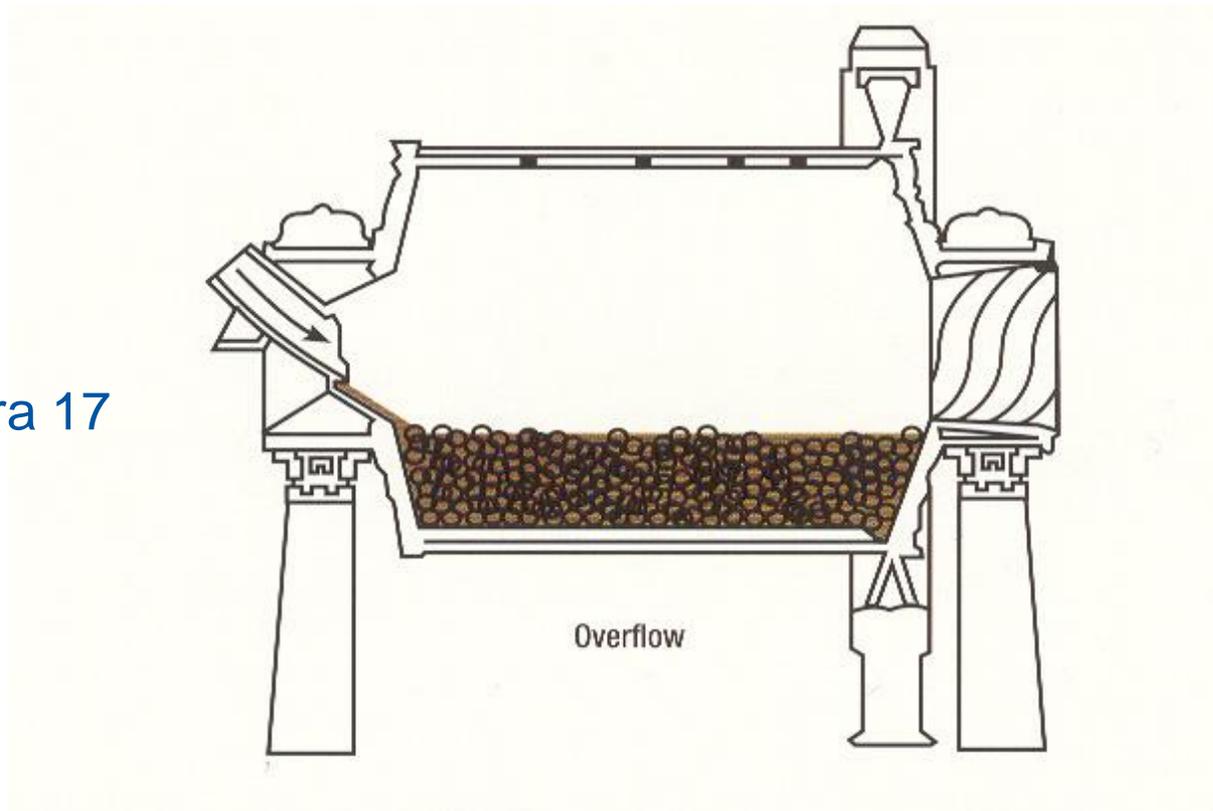
(Allis-Chalmers)



## Molino de descarga por rebose

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

Figura 17





## Molino de descarga por rejilla

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

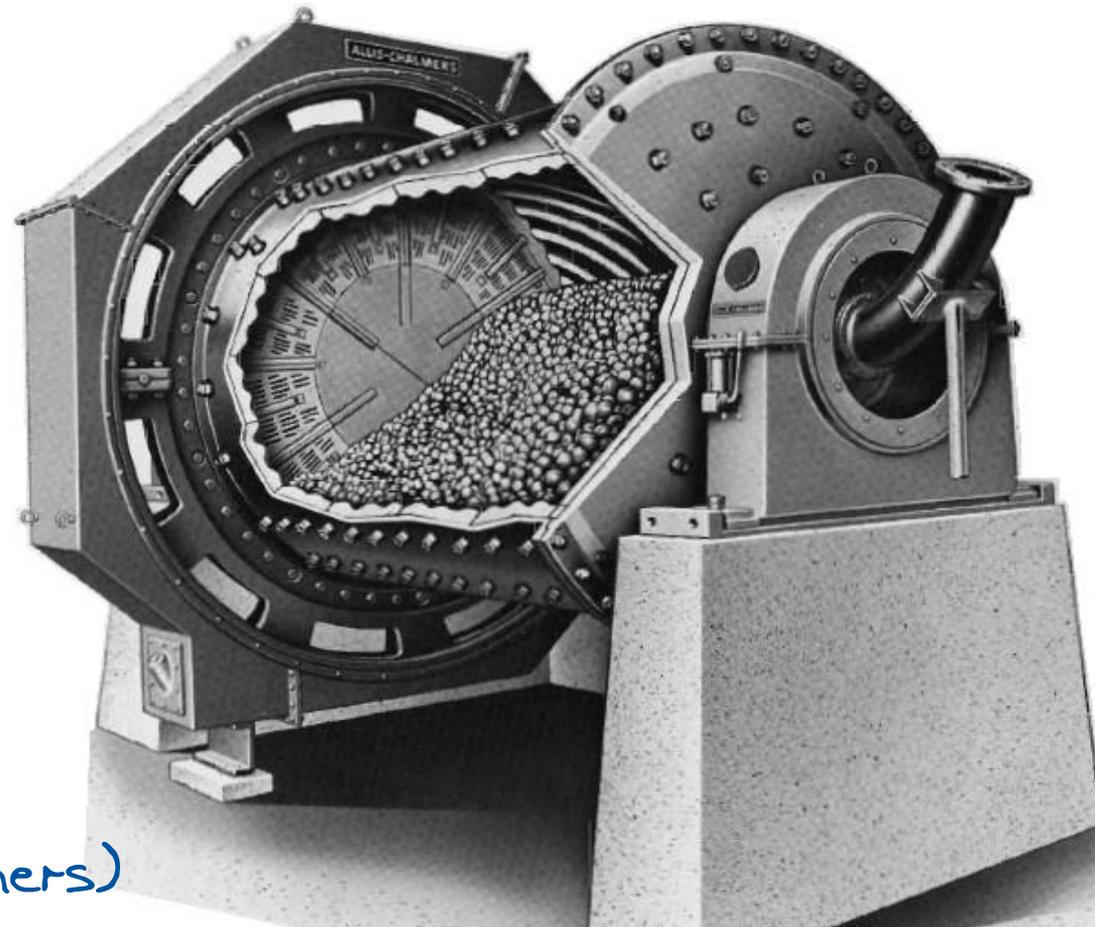


Figura 18

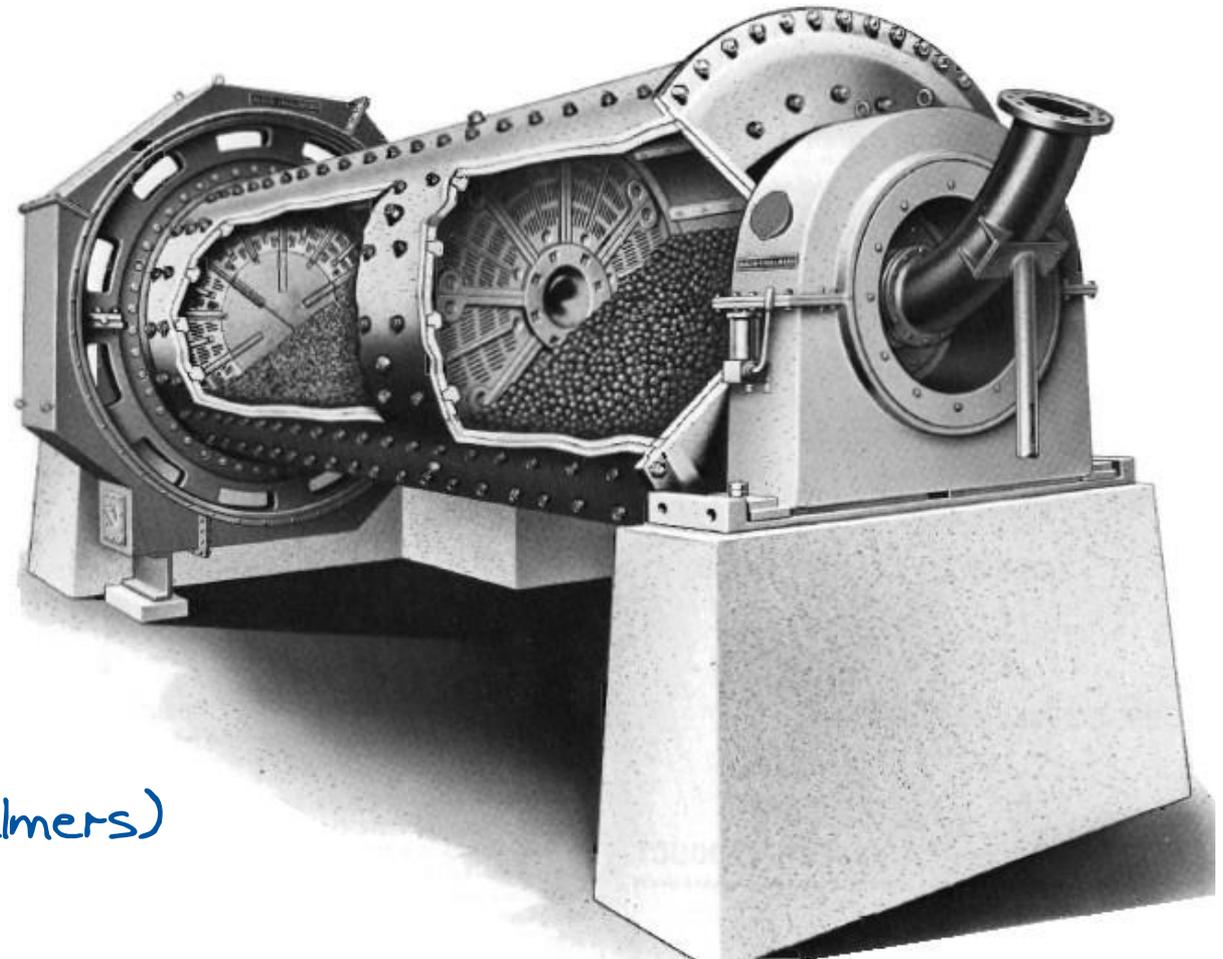
(Allis-Chalmers)



## Molino de descarga por rejilla

- Estos molinos son adecuados para molienda en seco.

Figura 19



(Allis-Chalmers)



## Molino de descarga por rejilla

- Molino de bolas compartimentado para la molienda en seco de materias primas en la industria cementera. Descarga periférica.

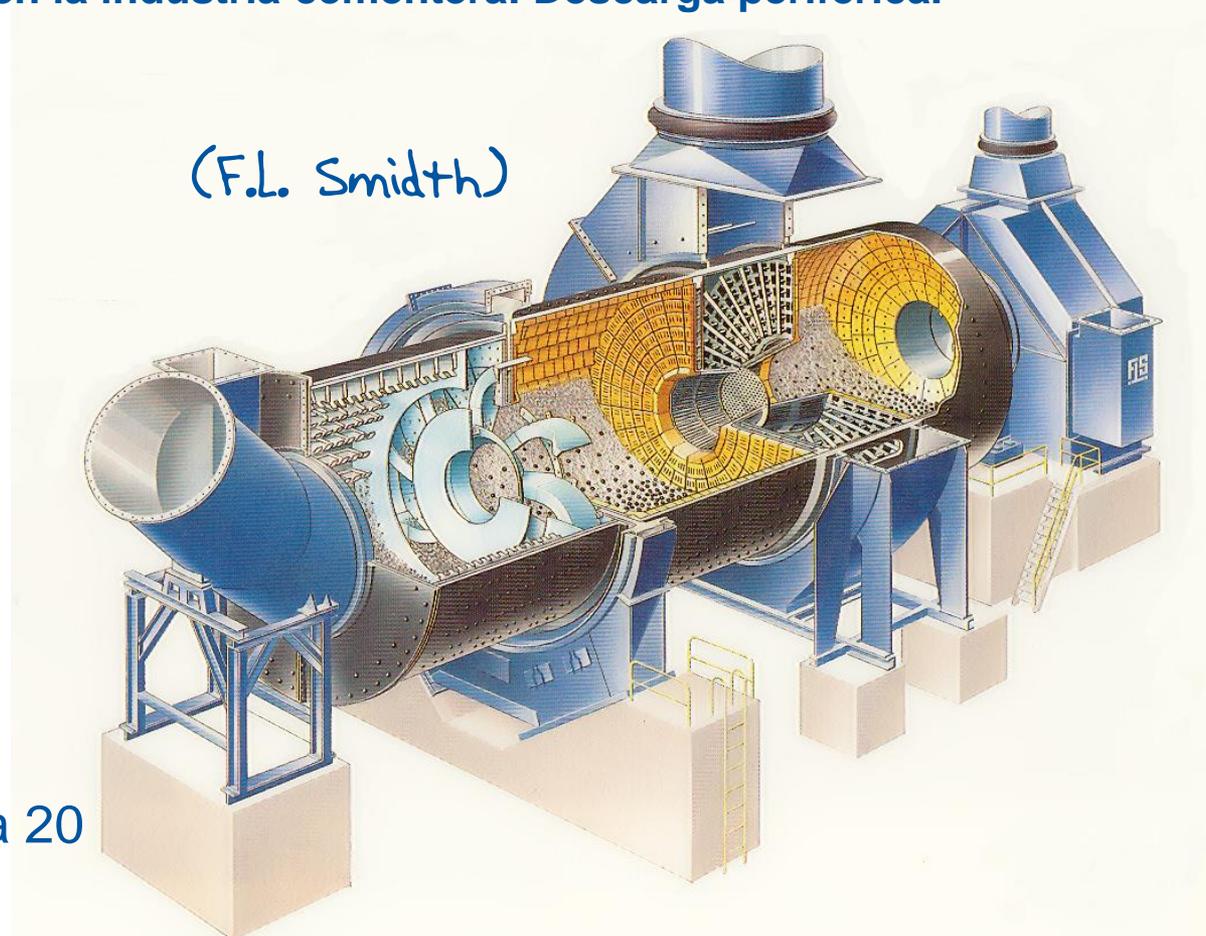


Figura 20



## ***Dimensionado de un Molino de Bolas***

- **Para dimensionar un molino de bolas hay que obtener los siguientes parámetros:**
  - **Diámetro y longitud del molino.**
  - **Granulometría obtenida para el producto.**
  - **Potencia absorbida y tamaño de las bolas.**



## Diámetro y Longitud

- El diámetro y la longitud de un molino están relacionado como se ha expuesto anteriormente, es decir:

**Relaciones ligeramente inferiores a 1:1;  $L = 0.9 \cdot D$**

**Relaciones superiores a 1:1;  $L = 2 \cdot D$**



## Potencia

- **La potencia de un molino es el principal parámetro que va a determinar sus dimensiones. Se puede obtener mediante:**
  - **Fórmulas empíricas.**
  - **Ábacos.**
  - **Tablas que facilitan los catálogos de los fabricantes de equipos.**



## Potencia mediante fórmulas empíricas

- Según Nordberg, la potencia útil de un molino de bolas por vía húmeda viene dada por:

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

Donde:

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

$D_M$  = Diámetro interior entre revestimiento (m).

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

$C_s$  = Porcentaje de la velocidad crítica.

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



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

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

Donde:

$B$  = Tamaño de las bolas (mm).

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



- Según Bond, la potencia absorbida por un molino de bolas viene dada por:

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

Donde:

$P_a$  = Potencia absorbida (kW).

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

$w_i$  = Índice de Bond (kWh/sht).

**Nota:** si  $w_i$  se da en kWh/t, no hace falta dividir por 0.907.

- Al valor obtenido con la expresión anterior habrá que multiplicarle una serie de factores ( $EF_i$ ), para obtener la potencia útil, según las condiciones de trabajo del molino de bolas, quedando la expresión:

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



## Factores de Corrección ( $EF_i$ )

**$EF_1$**  (Molienda en Seco)

Molienda en húmedo:  $EF_1 = 1$

Molienda en seco:  $EF_1 = 1.3$

**$EF_2$**  (Molienda en Circuito Abierto)

Circuito cerrado:  $EF_2 = 1$

Cuando la molienda es en circuito abierto,  $EF_2$ , se obtiene de la siguiente tabla:



## **EF<sub>2</sub>** (Molienda en Circuito Abierto)

<b>Control sobre el tamaño del producto (% paso)</b>	<b>EF<sub>2</sub></b>
<b>50</b>	<b>1.04</b>
<b>60</b>	<b>1.05</b>
<b>70</b>	<b>1.10</b>
<b>80</b>	<b>1.20</b>
<b>90</b>	<b>1.40</b>
<b>92</b>	<b>1.46</b>
<b>95</b>	<b>1.57</b>
<b>98</b>	<b>1.70</b>



## $EF_3$ (Factor de Eficiencia del Diámetro)

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

Donde:

$D_M$  = Diámetro interior entre revestimientos (m).

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



## $EF_4$ (Factor de sobretamaño de la alimentación)

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

Donde:

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

$w_i$  = Índice de Bond (kWh/sht).

$F_o$  = Tamaño óptimo de alimentación:

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



## **EF<sub>5</sub>** (Factor de molienda fina)

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

$$EF_5 = \frac{d_{80} + 10.3}{1.145 \cdot d_{80}}$$

## **EF<sub>6</sub>** (Alto/Bajo ratio de reducción)

- En el caso de molinos de bolas su valor es 1:



**EF<sub>7</sub>** (Bajo ratio de reducción).

- Se aplica cuando la relación de reducción  $R_r$  es menor que 6.
- El valor de  $EF_7$ , valdrá entonces:

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

**EF<sub>8</sub>** (sólo para molinos de barras).

**EF<sub>9</sub>** (Factor por revestimiento de caucho). (**EF<sub>9</sub>=1.07**)



## Tamaño de las bolas (diámetro máximo)

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

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

Donde:

$D_{bola}$  = Diámetro máximo de las bolas (mm).

$D_{80}$  = Dimensión de la abertura de malla para un 80% de paso de la alimentación ( $\mu\text{m}$ ).

$w_i$  = Índice de Bond (kWh/sht).

$S_g$  = Peso específico del mineral ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ).

$C_s$  = Porcentaje de la velocidad crítica.

$D_M$  = Diámetro interior de los revestimientos (m).

$K$  = Coeficiente que viene dado por la tabla siguiente:



## Obtención del coeficiente $K$

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



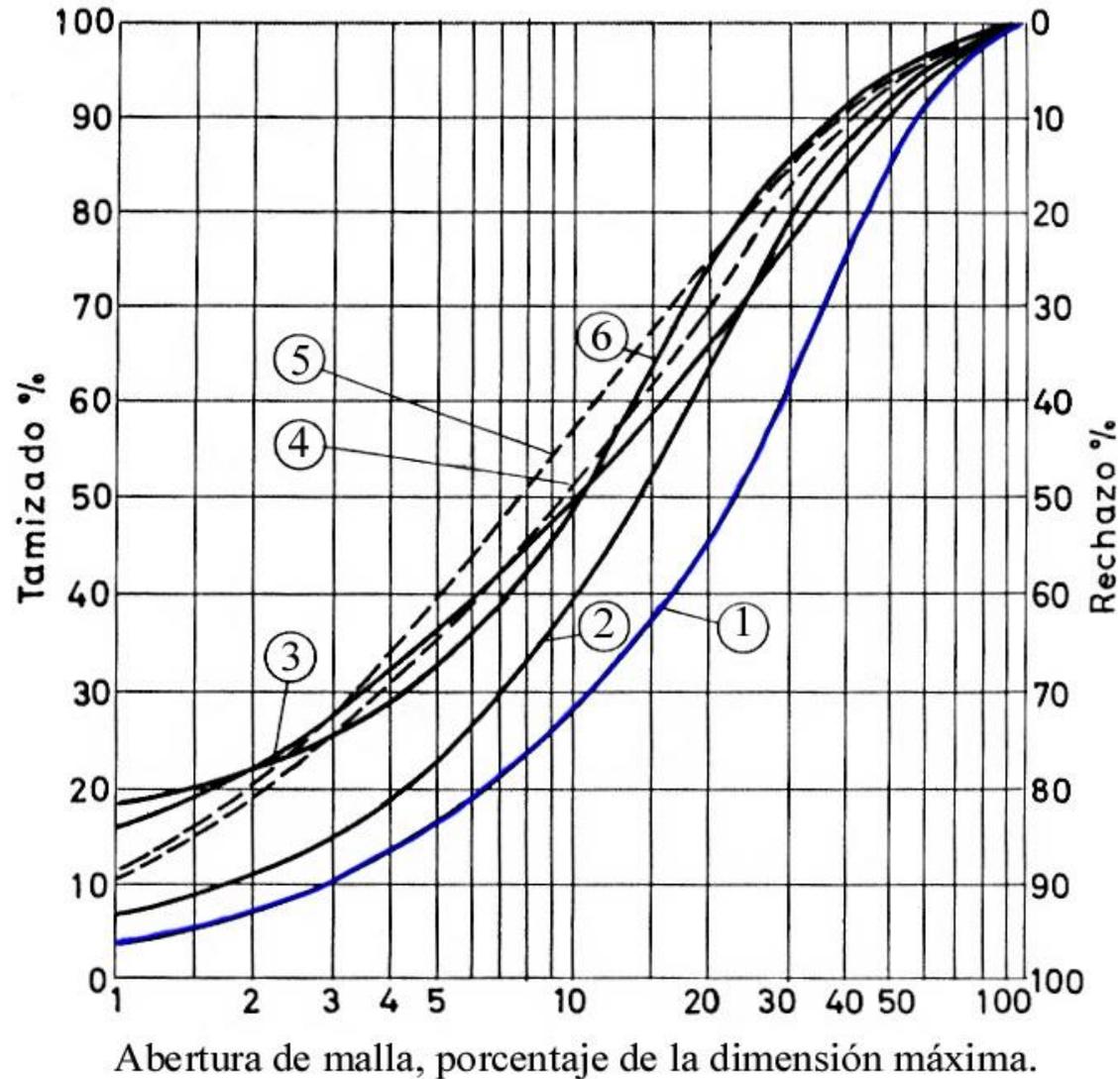
- Las bolas de un molino van siguiendo una **distribución de tamaños** de una manera equilibrada y que se obtiene por medio de tablas como la siguiente:

**Tabla para la distribución de la carga de bolas. Porcentaje en peso.**

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



## Granulometría de salida de un molino de bolas



Abertura de malla, porcentaje de la dimensión máxima.

(Según TAGGART)



## Granulometría de salida de un molino de bolas

Curva 2: Molino de bolas de descarga por rebose (c.c)

Curva 3: Molino de bolas de descarga por rejilla (c.c)

Curva 4: Molino de bolas bicónico (c.c)

Curva 5: Molino de bolas bicónico (c.a)

Curva 6: Molino de bolas de descarga por rebose (c.a)

**Tamaños del producto obtenido en un molino de bolas (Taggart).**

Tipo de mineral	Circuito Abierto		Circuito Cerrado	
	Abertura de malla* dejando pasar el 80 %	Abertura de malla* dejando pasar el 50 %	Abertura de malla* dejando pasar el 80 %	Abertura de malla* dejando pasar el 50 %
<b>Molino de bolas de descarga por rebose</b>				
Blando			20% $d_{max}$	7% $d_{max}$
Medio	25% $d_{max}$	12% $d_{max}$	30% $d_{max}$	13% $d_{max}$
Duro			40% $d_{max}$	25% $d_{max}$
<b>Molino de bolas de descarga por rejilla</b>				
Blando			25% $d_{max}$	8% $d_{max}$
Medio			34% $d_{max}$	14% $d_{max}$
Duro			52% $d_{max}$	25% $d_{max}$
<b>Molino de bolas bicónico</b>				
Blando	12% $d_{max}$	3% $d_{max}$	23% $d_{max}$	7% $d_{max}$
Medio	24% $d_{max}$	8% $d_{max}$	27% $d_{max}$	9% $d_{max}$
Duro	28% $d_{max}$	12% $d_{max}$	37% $d_{max}$	17% $d_{max}$

(\*) Nota: la abertura de malla está expresada en porcentaje de la dimensión máxima del producto.

 Valores obtenidos también con la gráfica anterior



## 5.3. Molienda autógena

5.3. Molienda autógena

- En este tipo de molienda la fragmentación del mineral se realiza por medio del propio mineral y, en algunos casos también con un pequeño porcentaje de bolas de acero.
- Las acciones que se desarrollan para la fragmentación serán de percusión y atrición.



Figura 21

(molino SAG)

([www.e-mj.com](http://www.e-mj.com))



- En función de los cuerpos de molienda empleados para realizar la fragmentación del mineral surgen las siguientes definiciones:
- **Molienda Autógena (AG):** El mineral se fragmenta en 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 proveniente de una trituración primaria.
- **Molienda Semiautógena (SAG):** Se provocará la fragmentación del mineral por el efecto combinado del propio mineral y de un pequeño porcentaje de bolas de acero.
- **Molino de pebbles o guijarros:** Emplea como medio de molienda el propio mineral con un determinado tamaño previamente clasificado mediante la intercalación de cribas en el circuito, u obtenido del molino autógeno primario. Pueden ser naturales (mineral, gravas, roca, etc.) o fabricados (cerámica).
- La molienda autógena (AG) o Semiautógena (SAG), es empleada como molienda primaria. La molienda de pebbles es normalmente empleada en molienda secundaria sustituyendo a los molinos de bolas, como etapa siguiente a un molino AG primario.

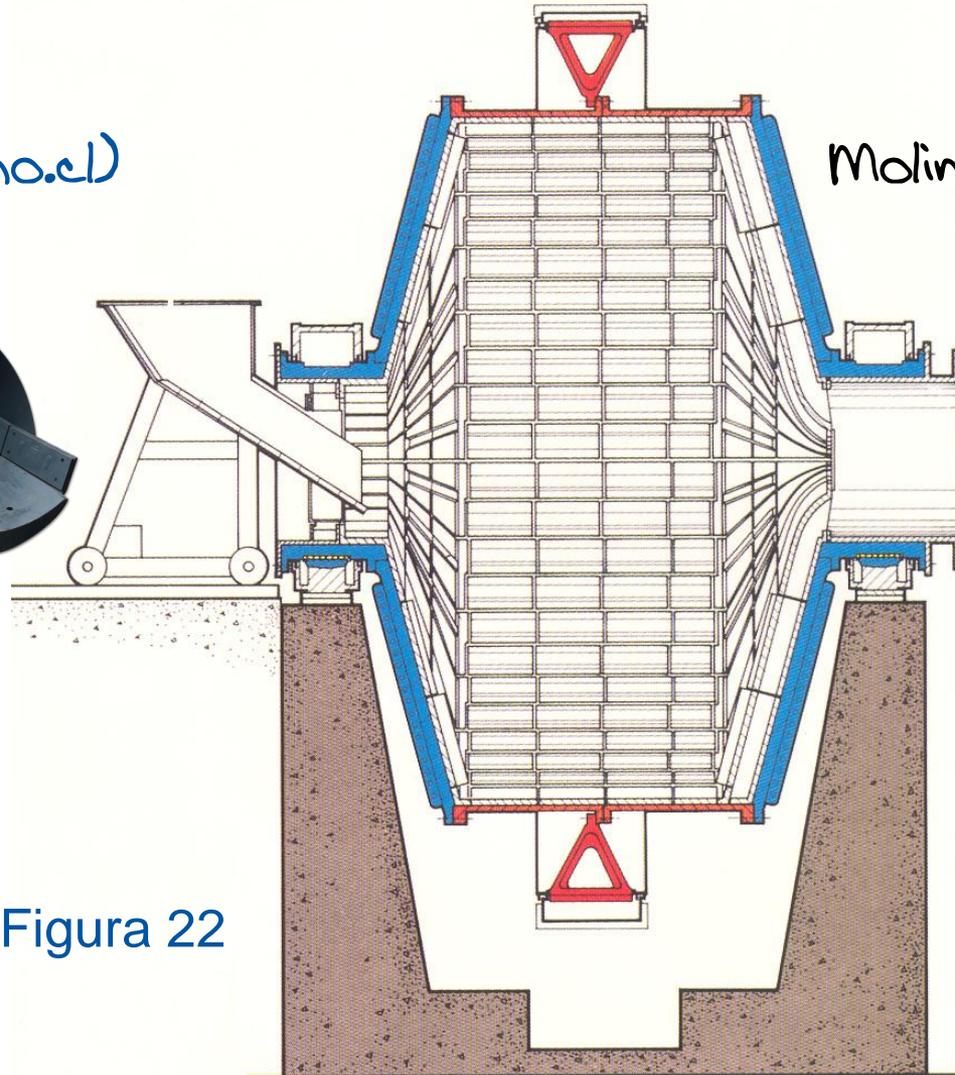


- El primer molino autógeno apareció a principios de los años 30 a través de Alvah Hadsel, denominado molino Hadsel el cual fue mejorado por la Hardinge Company y pasó a llamarse molino Hardinge Hadsel.
- La instalación inicial de los molinos autógenos obedece a la necesidad de obtener grandes cantidades de mineral de hierro a finales de los años 50.
- La alta densidad que caracteriza al mineral de hierro lo hacen apropiado como medio de molienda en los molinos autógenos (densidad 4 frente a 2.6 de la ganga).
- Con minerales no ferrosos (p.e. mineral de cobre) la molienda autógena no es tan favorable por lo que su extensión ha sido menor.
- Para el tratamiento de minerales no ferrosos el comportamiento de la molienda semiautógena ha sido mejor.
- Los molinos SAG instalados en Chile exceden las 100000 toneladas por día tratadas en una sola línea de molinos.
- Actualmente, la molienda AG/SAG reemplaza las dos etapas finales de trituración (secundaria y terciaria) y la de los molinos de barras de un circuito tradicional.



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

(www.neptuno.cl)



Molino semiautógeno

(Fuller-Traylor)

Figura 22



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



(www.lsgold.com)

Figura 23

Molino semiautógeno



- **Los molinos autógenos y semiautógenos que trabajan por vía húmeda pueden presentarse con tres tipos de diseño de tambor en relación al ratio L/D (Longitud/Diámetro):**
- **Estilo norteamericano o australiano: El diámetro de los molinos AG/SAG es de 1.5 a 3 veces superior a la longitud del tambor.**
- **Molinos de estilo cuadrado: El diámetro de los molinos AG/SAG es aproximadamente igual a la longitud del tambor.**
- **Estilo sudafricano o escandinavo: La longitud de los molinos AG/SAG es de 1.5 a 3 veces superior al diámetro del tambor (aspecto parecido a los molinos tradicionales de molienda).**



## Molino AG estilo norteamericano o australiano

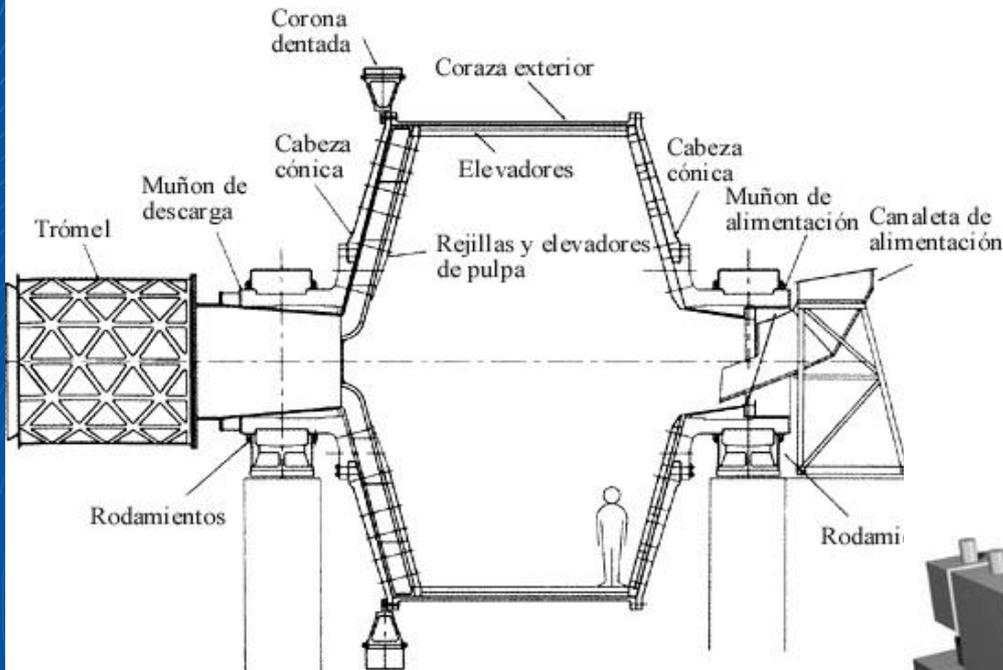
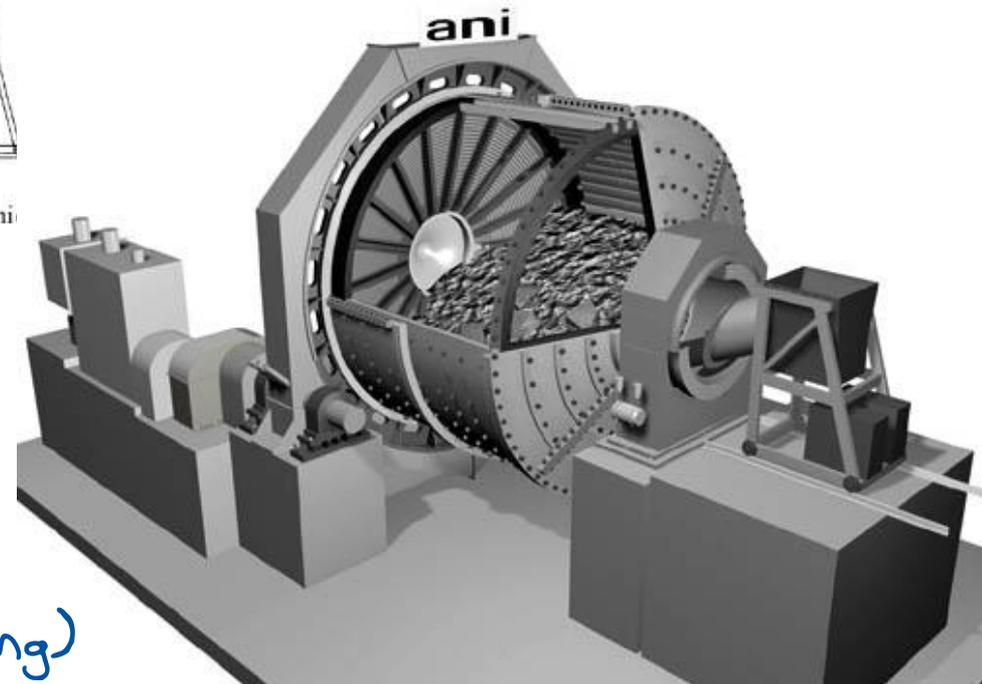


Figura 24

Molino tipo "Cascade"



(ANI-Grinding)



## Molino SAG estilo sudafricano



Figura 25

([www.lsgold.com](http://www.lsgold.com))



## ***Ventajas de los molinos autógenos integrales***

- **Las principales ventajas que aporta el empleo de molinos AG/SAG son:**
  - **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 g/t tratada).**
  - **Baja contaminación de la carga.**



## ***Molinos de pebbles (guijarros)***

- Relación  $L/D \leq 2$ .
- Son similares a los molinos de bolas. Los cuerpos moledores están constituidos por fragmentos del propio mineral previamente calibrado.
- Por lo general el molino de pebbles reemplaza al molino de bolas en algunos circuitos y se suele utilizar en molienda secundaria después de un molino AG primario de lumps (terrones).
- Se emplean para obtener un producto fino a partir de una alimentación (0-3 mm) que procede de un molino autógeno primario.
- Dan un producto más fino que el que se conseguiría con un molino de bolas de idénticas características como consecuencia de los efectos de la atrición.



## ***Molinos de pebbles (guijarros)***

- **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 la velocidad crítica.**
- **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.**
- **La descarga se efectúa a través de parrillas fabricadas con Ni-hard, cromo-molibdeno, goma o de plástico.**
- **Presentan un menor desgaste de acero.**



## *Aplicaciones de los molinos AG, SAG y de pebbles*

- El campo principal de aplicación de este tipo de molienda es el tratamiento de minerales de Cu, Pb, Zn, Fe, baritina, fosfatos y amianto.
- También hay molinos de este tipo trabajando en el tratamiento de materias primas para la fabricación de cemento, fabricación de arena artificial, etc.

([www.sine.ni.com](http://www.sine.ni.com))



Figura 26

Molino SAG



## ***Dimensionado de molinos autógenos AG/SAG***

- **Para dimensionar un molino AG/SAG hay que conocer los siguientes parámetros:**
  - **Tamaño óptimo de alimentación.**
  - **Grado de llenado.**
  - **Velocidad de giro.**
  - **Potencia.**



## Tamaño óptimo de alimentación

- En **molinos primarios** se aplican los criterios de Allis-Chalmers o de E.C. Blanc, siendo estos:
  - **Criterio de Allis-Chalmers:**

$$D_{80} = 0.95 \cdot D_M^{2/3}$$

$D_{80}$  = Porcentaje de paso en pulgadas .

$D_M$  = Diámetro interior del molino en pies.

- **Criterio de E.C. Blanc:**

$$D_M \geq 20 \cdot D_{80}$$

$D_{80}$  = Porcentaje de paso.

$D_M$  = Diámetro interior del molino.



- En **molinos secundarios** se aplica el criterio de E.C. Blanc, siendo éste:
- Relación que se debe cumplir entre el tamaño de los fragmentos moledores formados por mineral y el propio mineral a moler

**Molienda intermedia, 7:1**

**Molienda final, 35:1**

- El porcentaje de los fragmentos moledores se mueve entre un 1.5% y un 5% del total de alimentación



## Grado de llenado

- El grado de llenado en **molienda primaria** es del 20-35% del volumen del molino.
- El grado de llenado en **molienda secundaria** es del 45-50% del volumen del molino.

## Velocidad de giro

- La velocidad óptima es próxima al 75% de la velocidad crítica. Aunque normalmente se gira entre un 85% y un 88%.



## Potencia

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

$$kW = L \cdot D_M^{2.62}$$

Siendo:

$D_M$  = Diámetro interior del molino, m.

$L$  = Longitud del molino, m.

- Para molienda en seco con molino Aerofall (según Mullar):

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

Siendo:

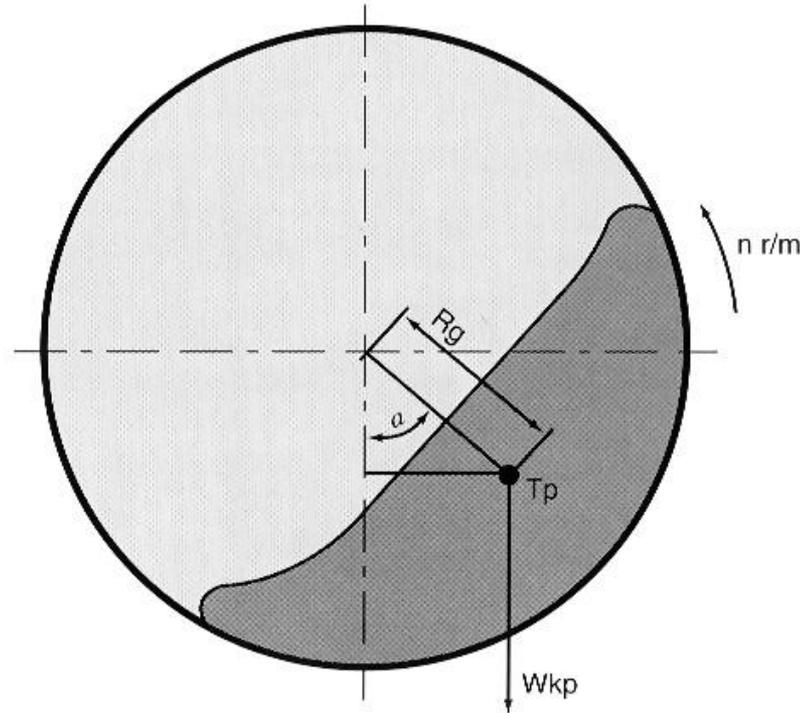
$D_M$  = Diámetro interior del molino, pies.

$L$  = Longitud del molino, pies.

$W$  = Densidad aparente de la carga, libras/pie<sup>3</sup>.



- Para molinos AG, SAG o pebbles (según Nordberg):



$$N = c \cdot W \cdot R_g \cdot n$$

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

$N$  = Potencia bruta del molino, kW.

$W$  = Peso de la carga, kg.

$c$  = Constante (1/1200).

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



## 5.4. Accionamiento de los molinos

5.4. Accionamiento de los molinos

- **Accionamiento lateral por piñón-corona y motor rápido con transmisión por polea.**
  - La corona dentada que engrana con el piñón de ataque está fijada contra uno de los fondos del molino o alrededor de éste. El eje del piñón es accionado por un motor de velocidad normal a través de una transmisión de poleas. Este sistema de accionamiento se emplea en molinos con potencias máximas de hasta 150 kW (ver Figura 27(a)).
- **Accionamiento lateral por motor de velocidad normal y reductor.**
  - Son molinos convencionales y por lo tanto los más usados para potencias bajas. Se utilizan motores asíncronos de velocidad normal acoplados directamente con reductores de velocidad, cuyo eje se une directamente al eje que soporta el piñón de ataque del molino. Se utiliza en molinos con potencias de hasta 500 kW (ver Figura 27(b)).



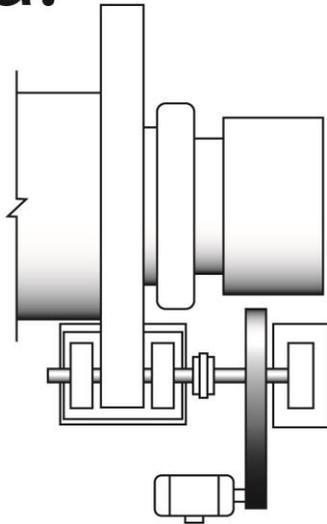
- **Accionamiento lateral por piñón-corona y motor de velocidad lenta.**
  - Consiste en el ataque directo de la corona dentada por un piñón acoplado directamente en el extremo del eje de un motor eléctrico de velocidad lenta. Este accionamiento se emplea en molinos con potencias comprendidas entre los 300 kW y los 9000 kW (ver Figura 27(c)). Es el accionamiento más empleado para potencias elevadas. Los molinos de accionamiento lateral por piñón-corona y motor tanto de velocidad rápida como velocidad lenta pueden montar un accionamiento dual formado por un piñón a cada lado del molino accionado por un motor reductor. Este accionamiento está disponible en molinos que van desde los 6 MW hasta los 18 MW.
- **Accionamiento sin engranajes o “Gearless”.**
  - Son los molinos más grandes con potencias por encima de los 12 MW que pueden alcanzar los 30 MW y donde el accionamiento es por un motor eléctrico de velocidad lenta, cuyo rotor es el propio molino (Figuras 28 y 29).



Figura 27

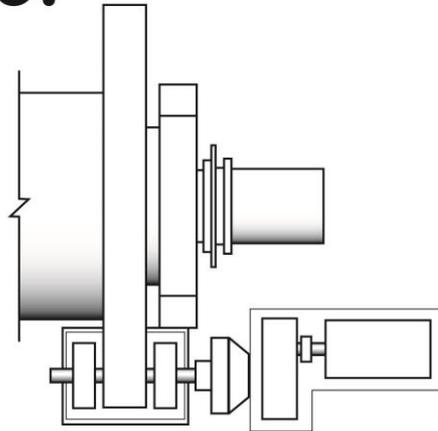
Tipos de accionamiento en molinos

a.



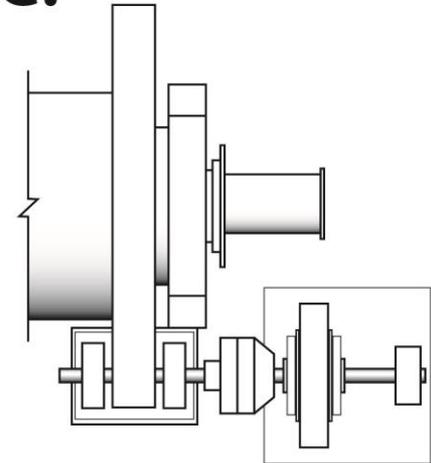
Accionamiento lateral por piñón-corona y motor rápido con transmisión por polea.

b.



Accionamiento lateral por motor de velocidad normal y reductor.

c.



Accionamiento lateral por piñón-corona y motor de velocidad lenta.



(www.metso.com)

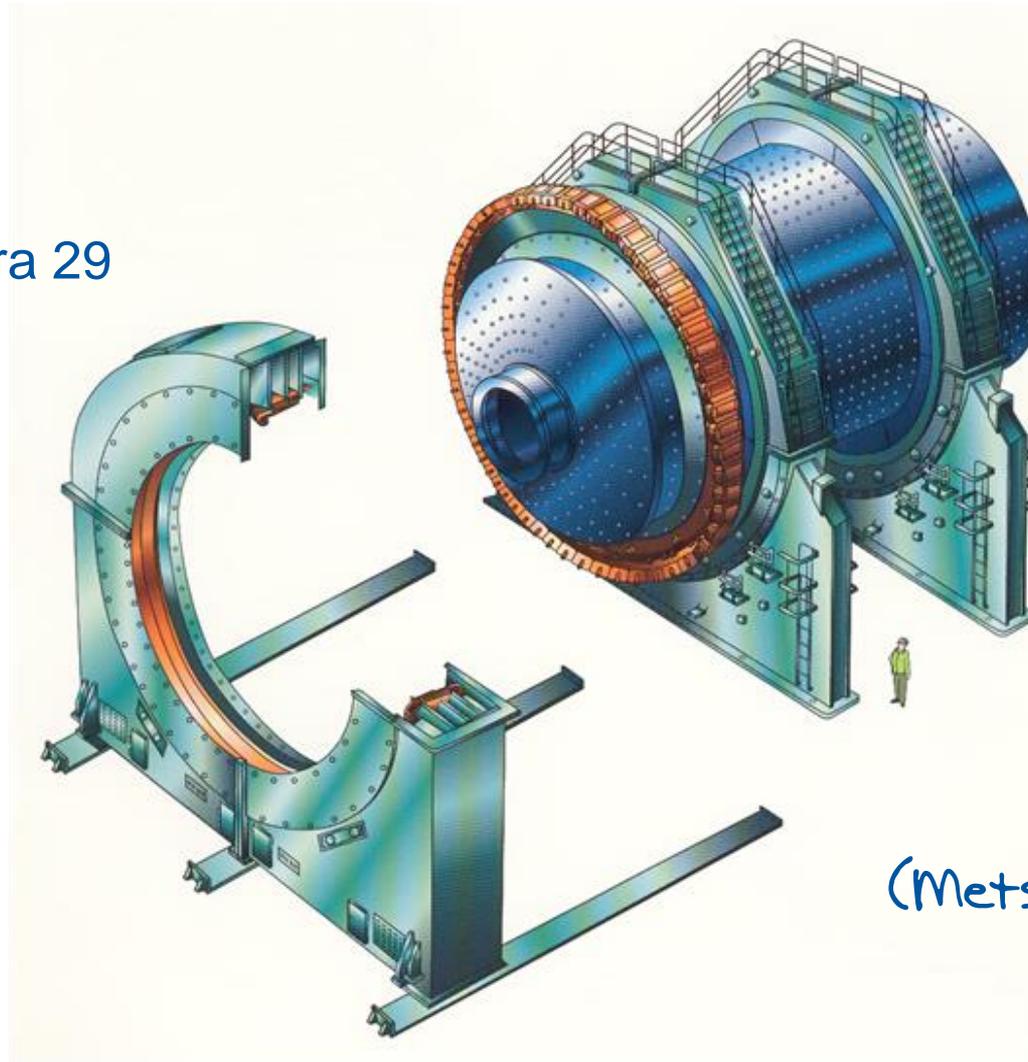
Figura 28



Molino SAG (Gearless) de 11 x 5.7 m, 12 MW procesando mineral de cobre en los EEUU.



Figura 29



(Metso Minerals)

Molino SAG (*Gearless*) de 6.5 m diámetro y 9.7 m de longitud  
(8.1 MW)



## 5.5. Tipos de circuitos de molienda

5.5. Tipos de circuitos de molienda

A continuación se describen los principales circuitos de molienda con sus características y aplicabilidad:

- **Circuito con etapa de trituración secundaria, terciaria y molinos de bolas**
- **Este circuito (Figura 30) y el siguiente (Figura 31) con molino de barras y bolas han sido los circuitos convencionales anteriores a 1975 y que fueron de uso universal en la industria mineral.**

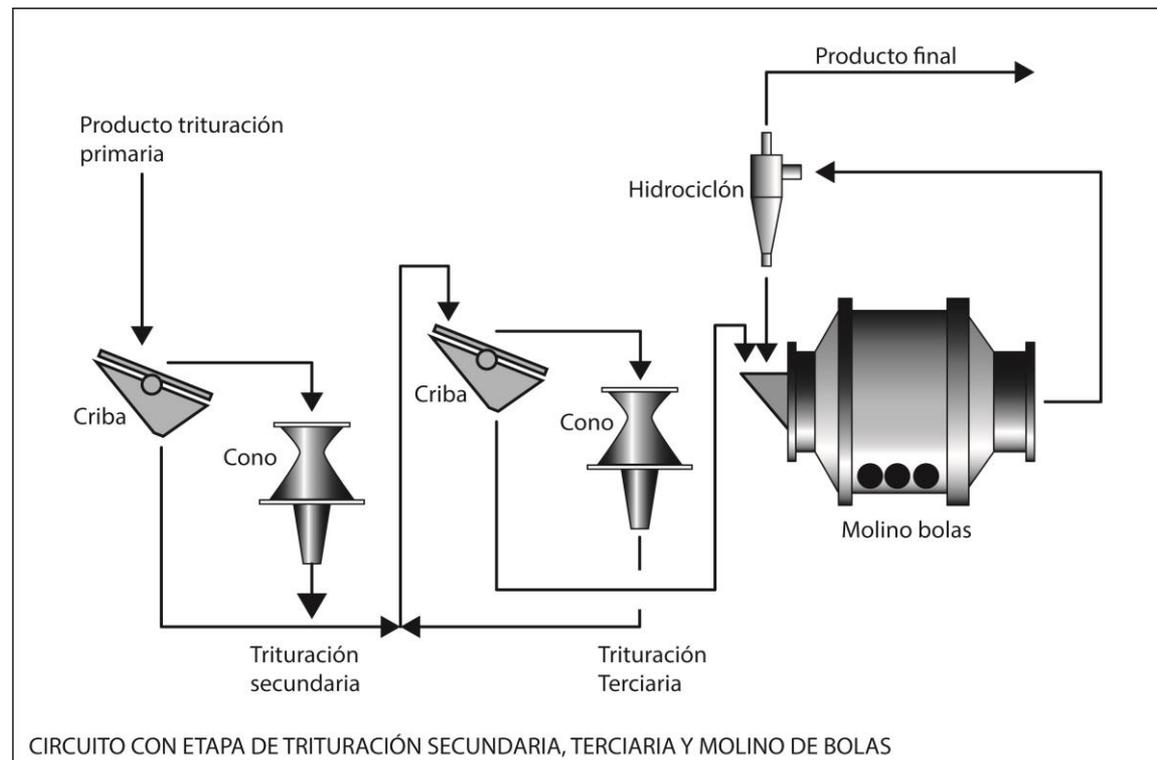
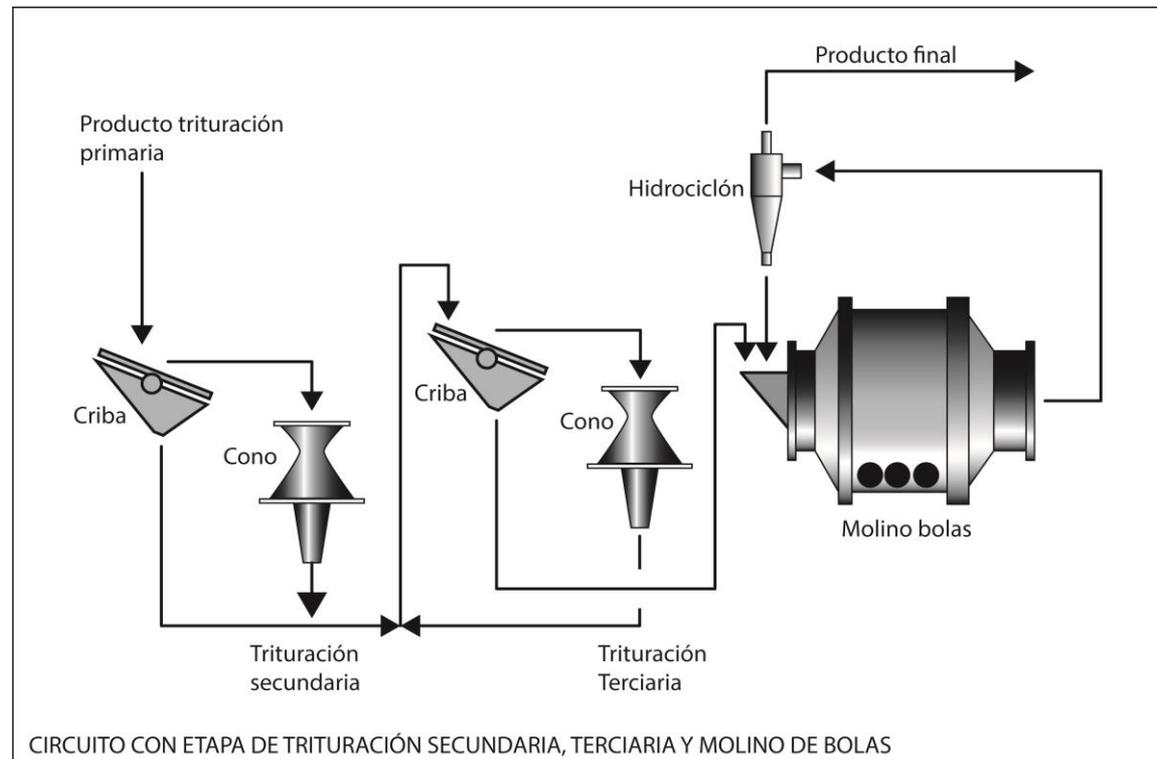


Figura 30



- Algunas variaciones incluyen la sustitución del molino de bolas por uno de pebbles y la eliminación de la etapa terciaria cuando se manejan minerales blandos o en operaciones de baja capacidad de tratamiento.
- Este circuito permanece como el circuito de mayor eficiencia energética comparado a los circuitos de molinos autógenos y semiautógenos. Sin embargo, el dimensionado de los trituradores no alcanza con los requerimientos que actualmente se exigen y por ello hoy en día se ha descartado.

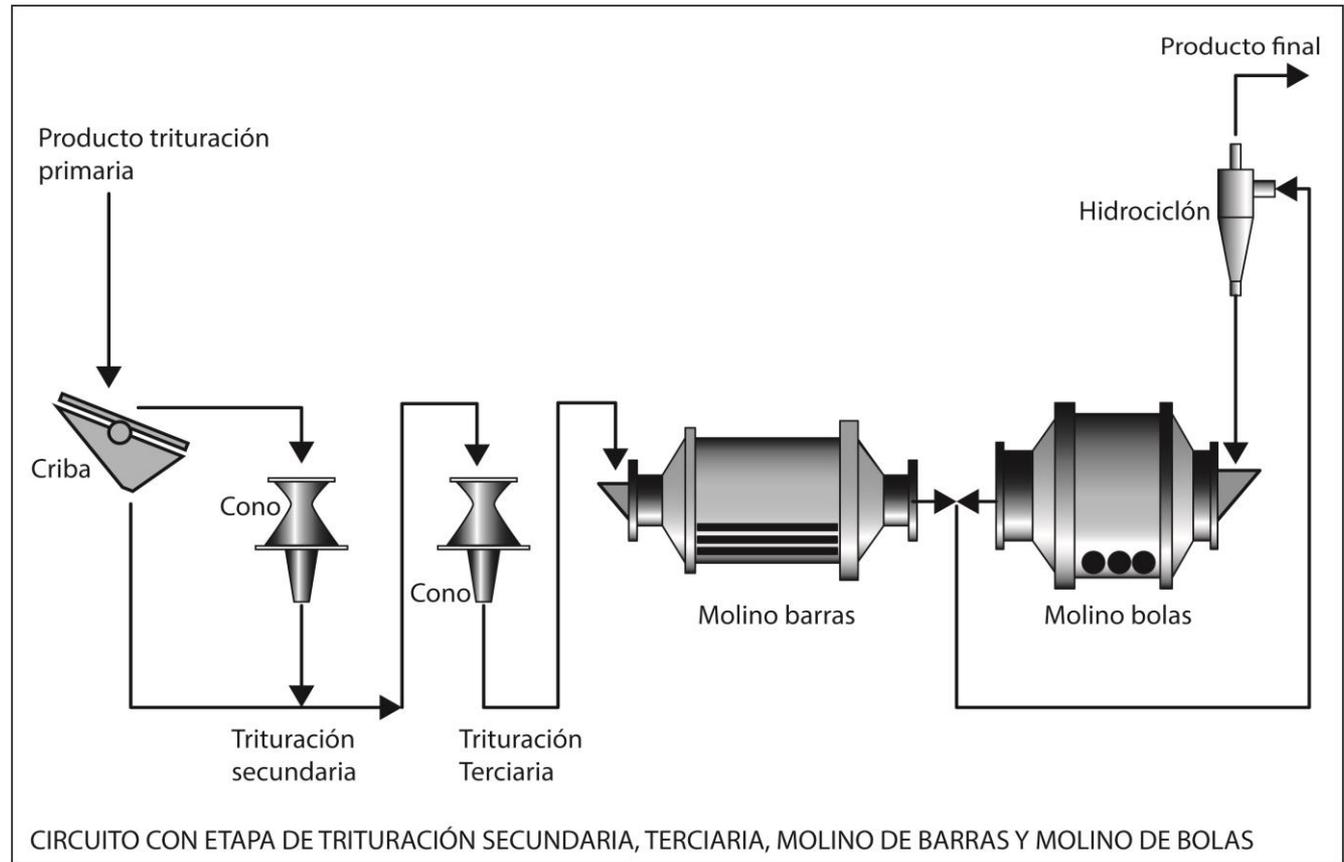
Figura 30





- **Circuito con etapa de trituración secundaria, terciaria, molino de barras y molinos de bolas**

Figura 31



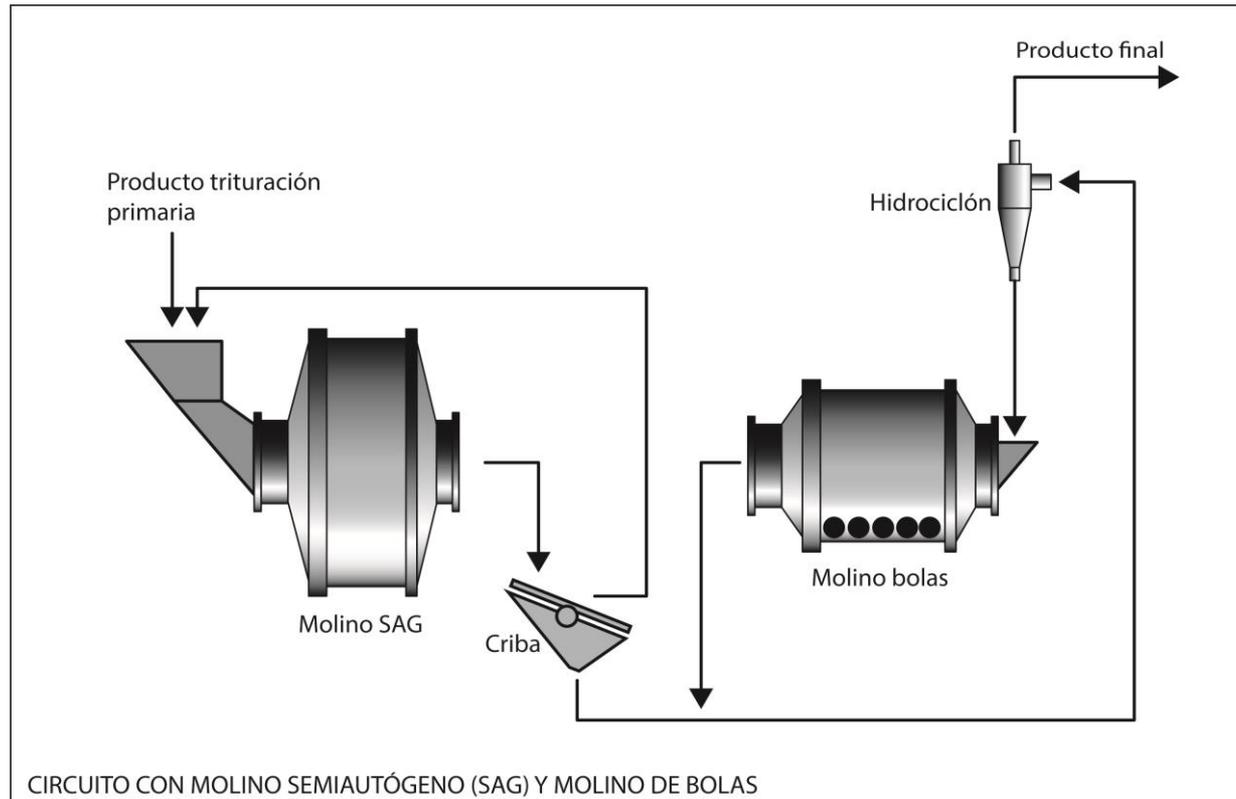


- **Circuito con una sola etapa formada por molinos autógenos**
- Las primeras instalaciones de este tipo de circuitos operaron exitosamente en el procesamiento de mineral de hierro. No lo fue tanto en el procesamiento de mineral de cobre, a excepción de la mina de cobre de Palabora (Sudáfrica) donde este tipo de circuito se mostró adecuado con la adición posterior de otra etapa de molinos de pebbles.
- **Circuito con una sola etapa formada por molinos semiautógenos**
- Hay instalaciones con este tipo de circuito trabajando muy bien como es el caso de la mina de molibdeno de Henderson (Colorado, EEUU) donde se opera desde hace veinte años. Este tipo de circuitos también se resuelve muy bien en el tratamiento de depósitos de areniscas para la obtención de uranio.



- **Circuito AG/SAG con molinos de bolas**
- Este circuito (Figura 32) o el mismo pero completado con la adición de un triturador de cono para la fabricación de pebbles (Figura 33) se ha convertido en el estándar de la industria mineral en los últimos 20 años.

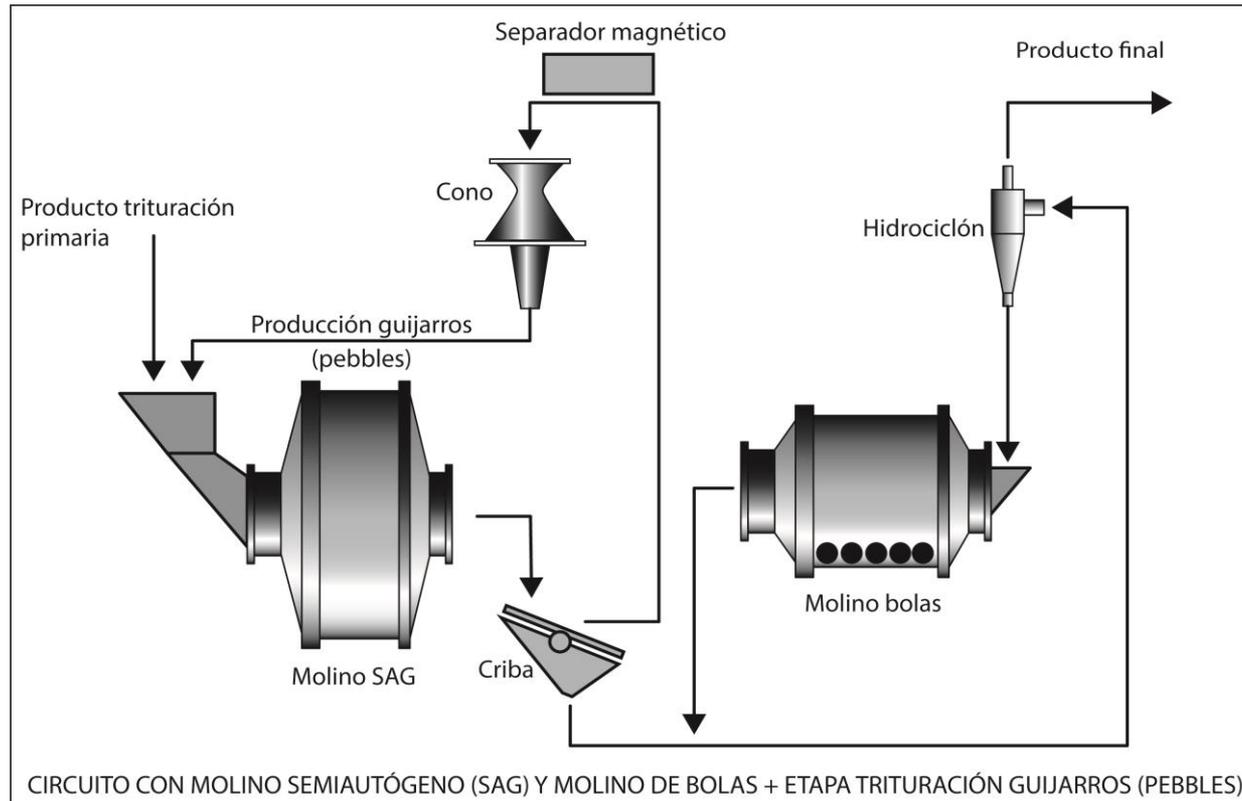
Figura 32





- **Circuito AG/SAG con molinos de bolas**
- **Este circuito (Figura 32) o el mismo pero completado con la adición de un triturador de cono para la fabricación de pebbles (Figura 33) se ha convertido en el estándar de la industria mineral en los últimos 20 años.**

Figura 33





### Introducción

- En la literatura inglesa se les denomina “*stirred mills*”.
- El concepto de agitación en molienda surge en 1928 a partir de la idea de usar un agitador y cuerpos molturantes esféricos.
- En 1948 DuPont introdujo el molino de arena para la molienda de pigmentos.
- Este tipo de molinos ha encontrado aplicaciones en las fases que van de una molienda fina a ultrafina.
- Desde hace algo más de dos décadas los molinos agitadores se están imponiendo en el tratamiento de minerales complejos que exigen mallas de liberación en torno a 10 micras o menores (actualmente la flotación permite el tratamiento de estos tamaños de forma eficiente).
- Los molinos de agitado se clasifican en dos tipos: aquellos que operan a bajas velocidades de agitación y donde la acción gravitatoria juega un papel importantes y los que operan a muy elevadas velocidades de agitación y que consiguen fluidificar la pulpa mineral.



# Introducción

- En la Figura 34 se muestra el incremento de la potencia instalada de los molinos agitadores en los últimos años para etapas de liberación ultrafina.
- En este tipo de molinos la acción de molienda se basa principalmente en acciones de atrición o cizalladura.
- La acción de cizalladura es más eficiente energéticamente que la de impacto cuando tenemos tamaños inferiores a las 100 micras.

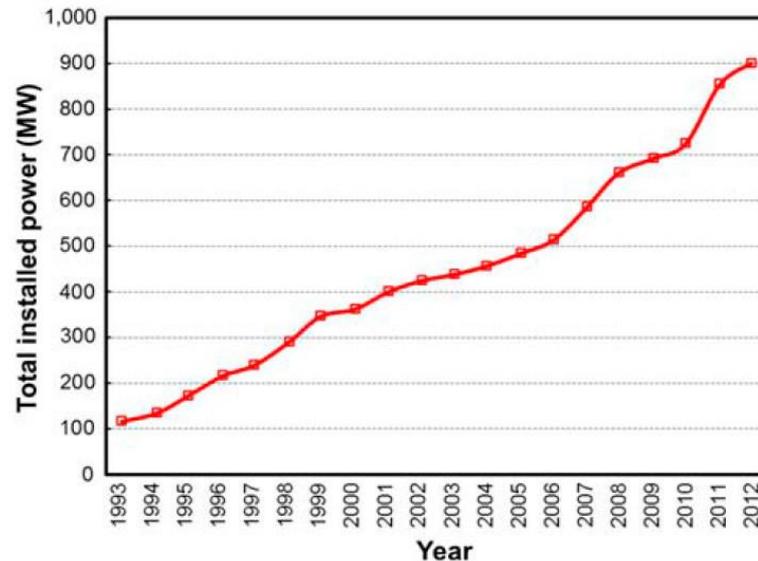


Figura 34

(tomado de Wills' Mineral Processing Technology)



## TowerMill/Vertimill

- El TowerMill es el predecesor del actual Vertimill, fue introducido en 1953 por la Nichitsu Mining Industry.
- Finalmente, en 1991 Svedala Industries (ahora Metso Minerals) obtuvo todos los derechos de la tecnología y hoy en día se le conoce como Vertimill.
- Se emplea en molienda fina y ultrafina en vía húmeda de todo tipo de minerales (en algunos casos podría trabajar por vía seca).
- Está diseñado para admitir tamaños inferiores a 6 mm (normalmente 0.1-0.3 mm) y reducirlos a tamaños inferiores a las 20 micras.
- Su capacidad está comprendida entre las 50 t/h y las 100 t/h.
- Como material molturador puede emplear bolas de acero, cerámica o pebbles naturales con tamaños comprendidos entre 30 mm y 2 mm.
- El material molturador es agitado a través del uso de una espiral o con un eje de pernos de rotación vertical y transmisión superior.



## Molino TowerMill

- El material es introducido por la parte superior mezclado con agua y su desplazamiento se debe a una bomba externa que produce el flujo de la pulpa.
- Las partículas más finas se desplazan hacia la parte superior por donde son evacuadas y las partículas más gruesas caen a la parte inferior donde se mezclan con el material molturante.

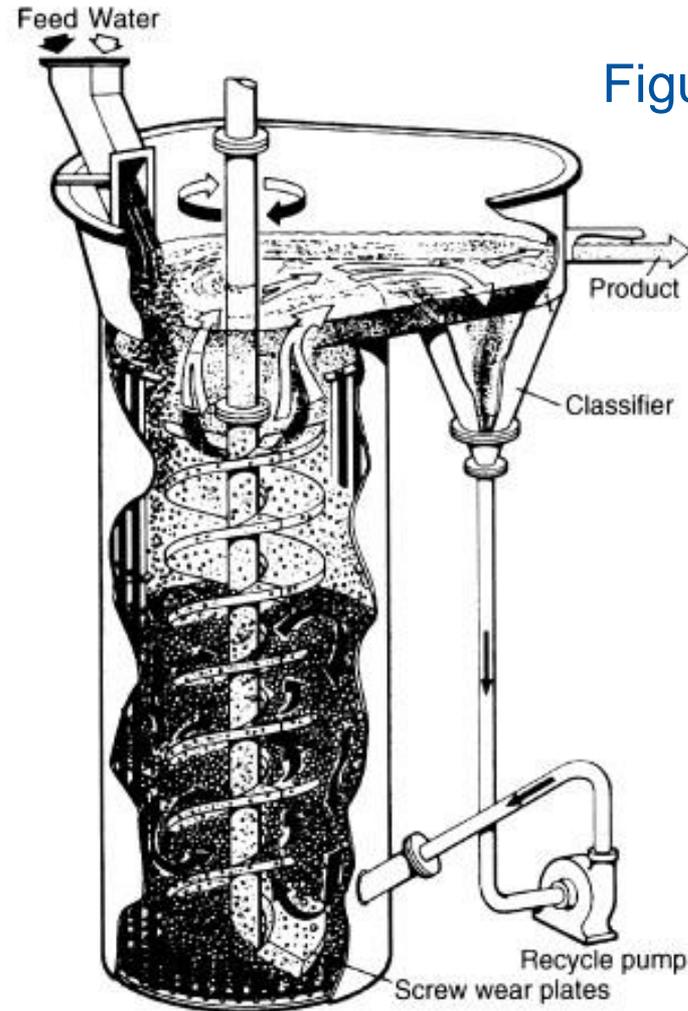


Figura 35

(Wills' Mineral Processing Technology)



# Molino Vertimill

- El material es introducido por la parte superior mezclado con agua y su desplazamiento se debe a una bomba externa que produce el flujo de la pulpa.
- Las partículas más finas se desplazan hacia la parte superior por donde son evacuadas y las partículas más gruesas caen a la parte inferior donde se mezclan con el material molturante.

Figura 36



(Metso Minerals)



## Molino Vertimill

- Más de 150 molinos Vertimill han sido colocados en distintas aplicaciones minerales a lo largo del mundo.
- Molinos de baja velocidad de agitación (2 m/s).
- Aplicaciones de molienda ultrafina para tratar minerales complejos que necesitan mallas de liberación ultrafinas (10 micras).

Figura 37



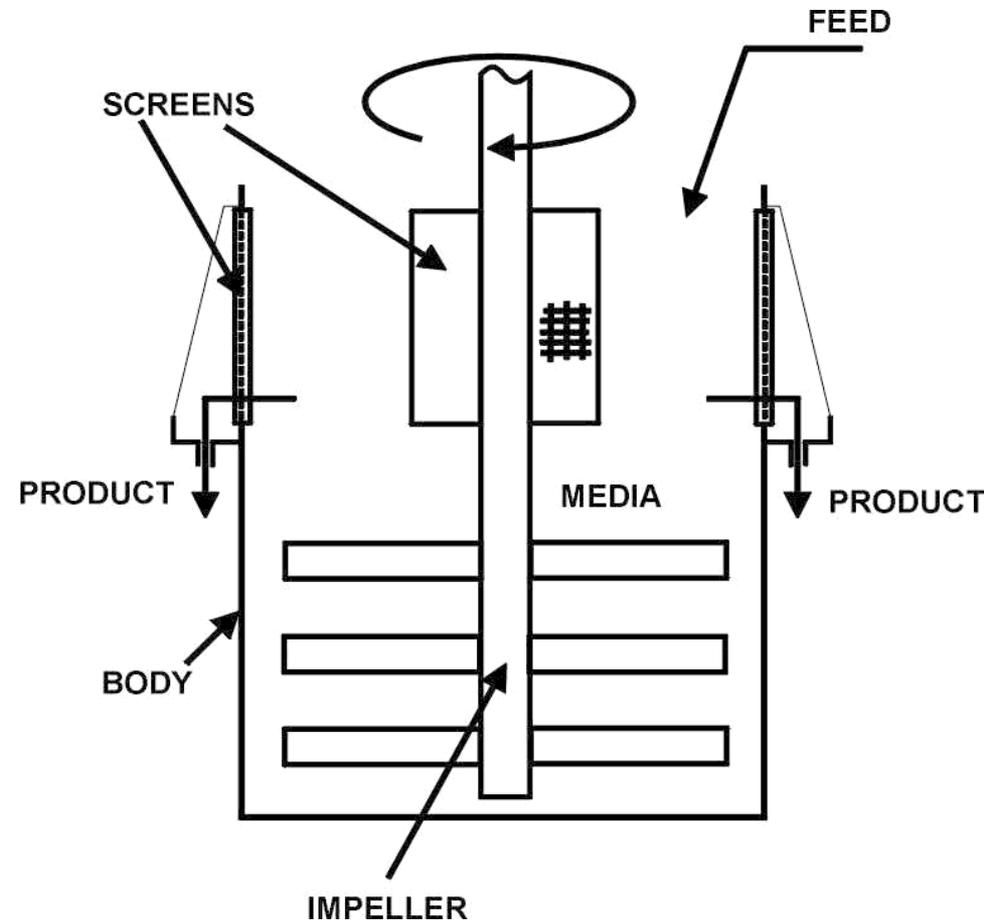
(Metso Minerals)



# Stirred Media Detritor

- Operan más de 200 equipos a lo largo del mundo para tratar caolín y carbonato cálcico.
- Normalmente se emplea arena de sílice natural o bolas de cerámica.
- Molienda en húmedo en circuito cerrado o abierto.
- Tamaño de alimentación inferior a 100 micras.
- Tamaño del producto de hasta 2 micras.
- Molinos de elevada velocidad de agitación.

Figura 37

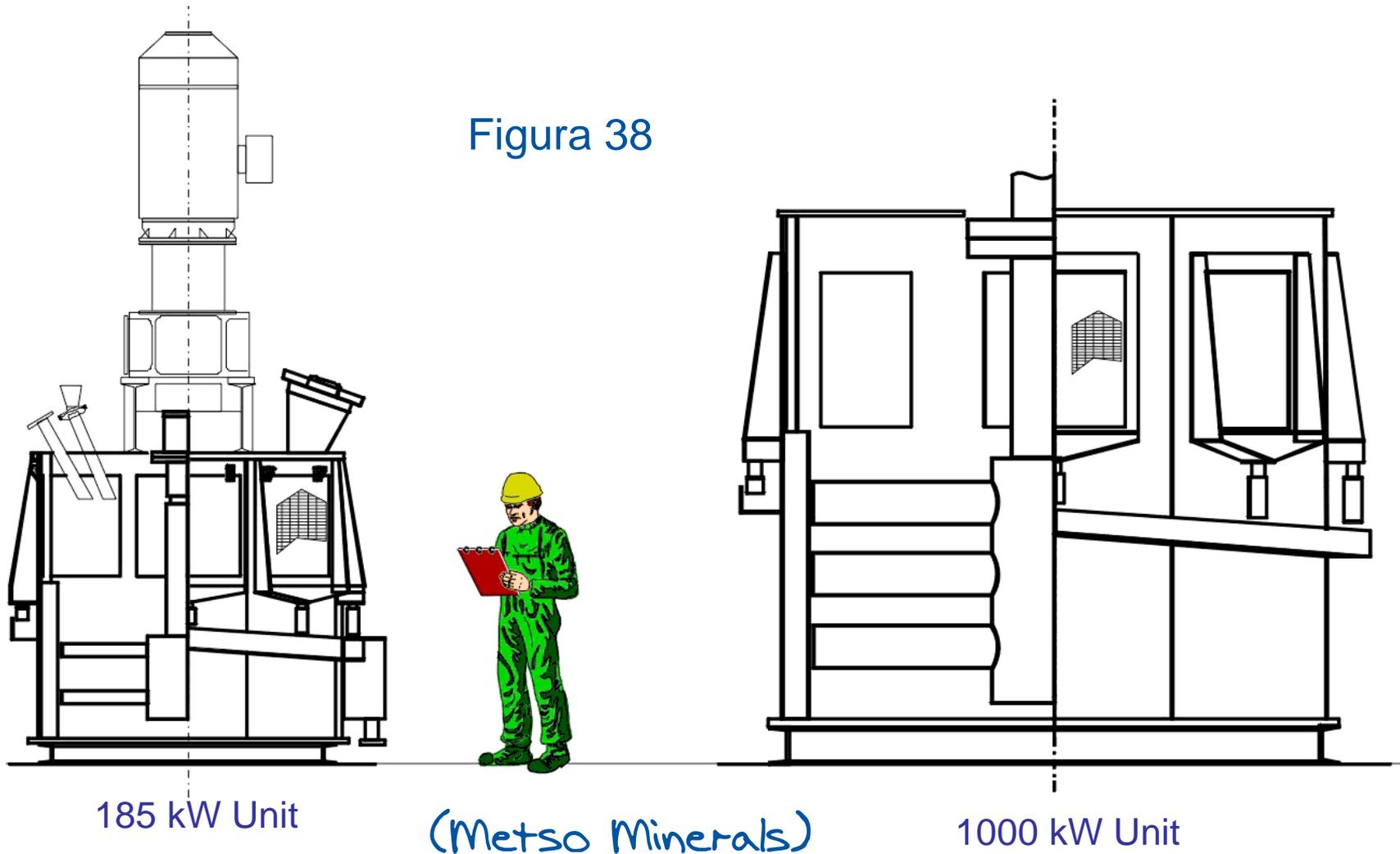


(Metso Minerals)



# Stirred Media Detritor

Figura 38



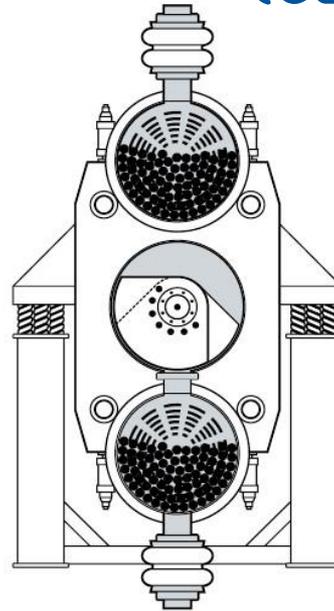


## 5.7. Molinos vibrantes

5.7. Molinos vibrantes

- Existen varias comercializadoras de este tipo de molinos, el más conocido es el molino PALLA desarrollado por la empresa alemana KHD Humboldt-Wedag, actualmente subsidiaria de la compañía india McNally Bharat Engineering Company Ltd. (MBE).
- Este tipo de molinos está formado por uno o varios cilindros vibrantes apoyados en bloques elásticos (amortiguadores) y sometidos a una vibración vertical.

Figura 39 (Cortesía MBE)



- La vibración es producida por un eje de contrapeso que se encuentra entre los cilindros moledores.
- Como cuerpos moledores se emplean bolas, barras, o cylpebs.



- El principio de molienda es similar al de los molinos de bolas y de barras clásicos frente a los que presenta las siguientes ventajas:

- Poco sitio requerido.
- Bajo consumo de energía.
- Mínimo desgaste.
- Reducidos costes de inversión.
- No necesita desempolvado.
- Gran versatilidad.

(Cortesía MBE)



Figura 40

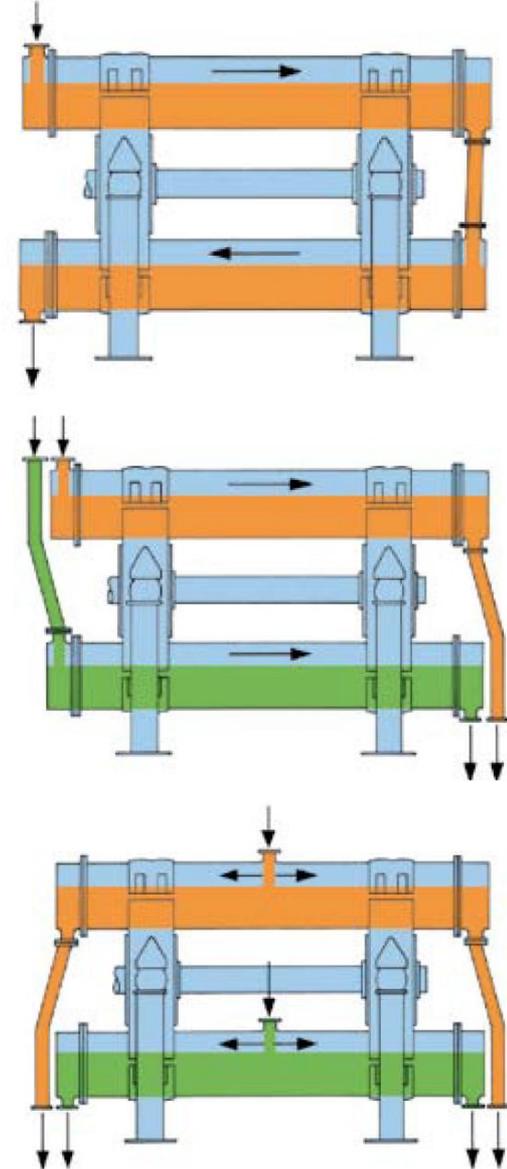
- Carga de cuerpo moledores entre el 60% y el 80% del volumen.



- **A continuación algunos datos de operación que los caracterizan:**
  - **Pueden trabajar tanto en vía húmeda como en vía seca.**
  - **Buena solución para producir finos y ultrafinos (hasta las 0 – 5 micras).**
  - **Alimentación de tamaños de hasta 30 mm.**
  - **Pueden moler materiales de cualquier dureza, aunque tienen una clara ventaja en el manejo de materiales muy duros y abrasivos (carburo de silicio).**
  - **Pueden trabajar al vacío o a sobrepresión, así como con atmósfera inerte con rendimientos entre los 20 kg/h y las 20t/h.**
  - **Se emplean en los campos del tratamiento de arenas silíceas, cerámica, refractarios, industria química, carbón, abrasivos, minería metálica, sector agroalimentario y de los fertilizantes.**



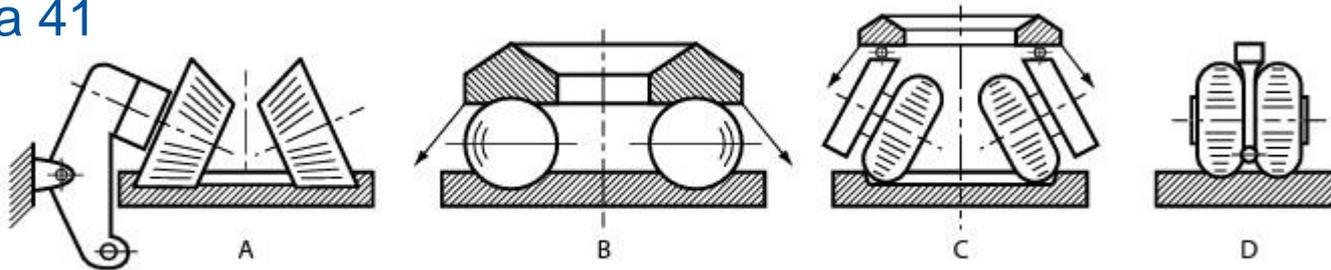
- A continuación diferentes tipos de conexión de los molinos vibrantes:
- **Conexión en serie:** La alimentación pasa por ambos cilindros, tiempos de residencia superiores a los 12 minutos. Para cuando se tratan materiales muy duros o de tamaño grueso y se quiere obtener un producto muy fino.
- **Conexión en paralelo:** Tiempos de retención bajos entre 3 y 12 minutos. Se emplea para materiales que facilitan su molienda, o mezclado. Este sistema permite el moler dos materiales diferentes simultáneamente y que después pueden ser mezclados o sometidos a procesos de disolución o de reacción química de corta duración.
- **Alimentación central:** Presenta los tiempos de retención más bajo y los mayores rendimientos. Adecuada para materiales blandos o que se necesita un producto de tamaño grueso para reacciones químicas rápidas o procesos de disolución posteriores.



## 5.8. Molinos Verticales

- Se les conoce como “*roller mills*” en la literatura inglesa.
- Realizan la molienda por vía seca.
- A la vez que producen la molienda generan el secado de partículas con humedades de hasta el 20% al entrar en contacto con los gases calientes durante el proceso de molienda y clasificación.
- Los molinos verticales serán de rodillos, pendulares o de bolas en función del sistema empleado para llevar a cabo la molienda (Figura 41).

Figura 41



(Tomado de History of Grinding Book's Lynch and Rowland)



- En la siguiente figura se muestra esquemáticamente los diferentes sistemas de molienda de molinos de rodillos según los diferentes tipos de fabricantes:
- (A) molino chileno, (B y C) molinos Loesche o Raymond de discos, (D) molinos Maxecon o Kent, (E) molinos Babcock & Wilcox o Fuller-Peters, (F y G) molinos Fuller o Sturtevant, (H) molinos Raymond o Bradley multipéndulo, (I) molino Griffin de péndulo simple.

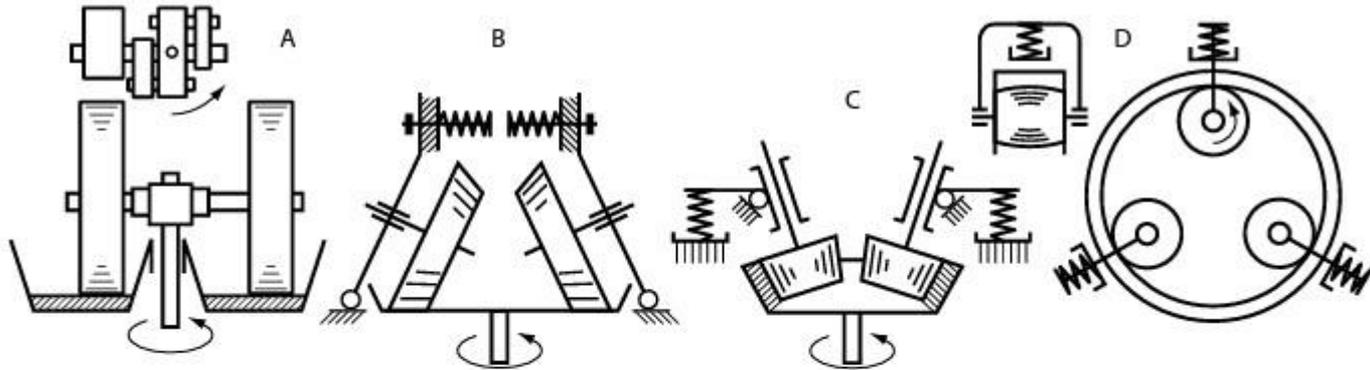
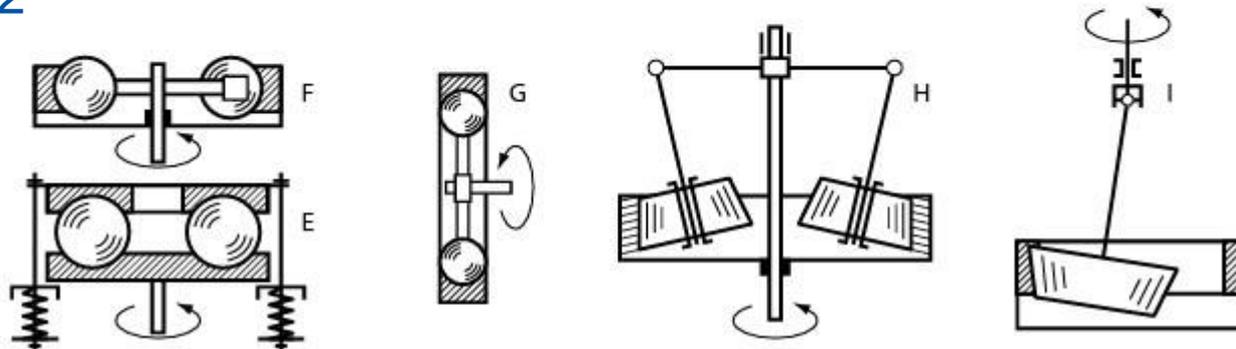


Figura 42



(Tomado de History of Grinding Book's Lynch and Rowland)



# Molinos verticales de rodillos

- Están formados por dos o más rodillos estacionarios (cilíndricos o cónicos) que ejercen una presión sobre el material a moler por medio de un sistema hidroneumático.
- El material cae sobre un plato o mesa rotativo que es el que provoca la molienda al obligar este giro a que el material sea atrapado entre los rodillos y el plato.
- Los rodillos se encuentran unidos en la parte central mediante ejes que permiten su giro por medio de rodamientos lubricados con aceite.
- La fuerza de molienda se transfiere a los ejes de los rodillos mediante barras de tensión conectadas a cilindros hidráulicos

Figura 43



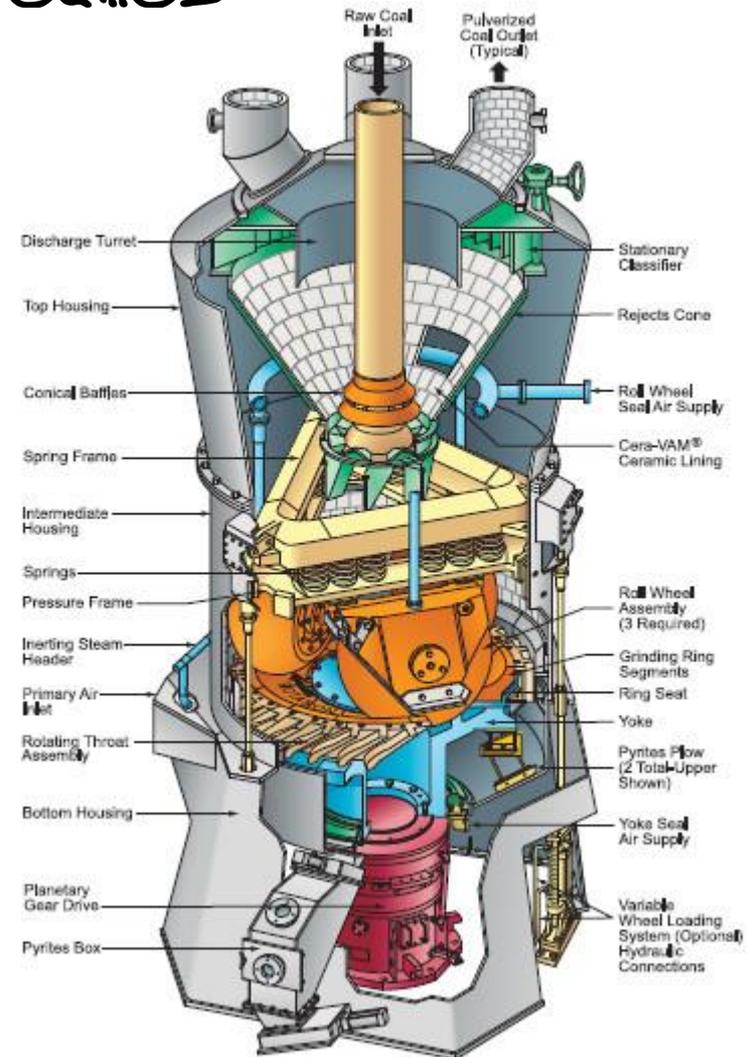
(Cortesía FLSmidth)



# Molinos verticales de rodillos

Figura 44

- Están formados por dos o más rodillos estacionarios (cilíndricos o cónicos) que ejercen una presión sobre el material a moler por medio de un sistema hidroneumático.
- El material cae sobre un plato o mesa rotativo que es el que provoca la molienda al obligar este giro a que el material sea atrapado entre los rodillos y el plato.
- Los rodillos se encuentran unidos en la parte central mediante ejes que permiten su giro por medio de rodamientos lubricados con aceite.
- La fuerza de molienda se transfiere a los ejes de los rodillos mediante barras de tensión conectadas a cilindros hidráulicos



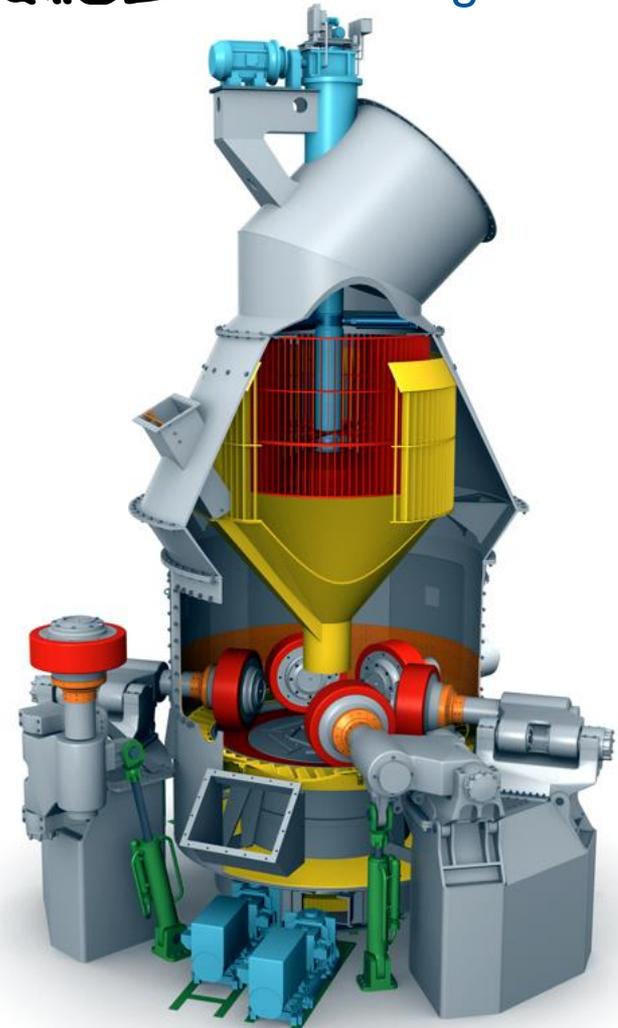
(Cortesia Babcock & Wilcox)



# Molinos verticales de rodillos

Figura 45

- Los revestimientos de los cilindros y de la mesa están hechos de materiales de alta resistencia.
- Estos revestimientos pueden ser lisos o con estrías transversales según el material a moler.
- La mesa de molienda está formada por segmentos de fundición Ni-Hard.
- El material molido es elevado a través de los flujos de gas caliente y llevado al clasificador superior donde las partículas finas son extraídas y las gruesas vuelven a caer para ser nuevamente molidas sobre la mesa.



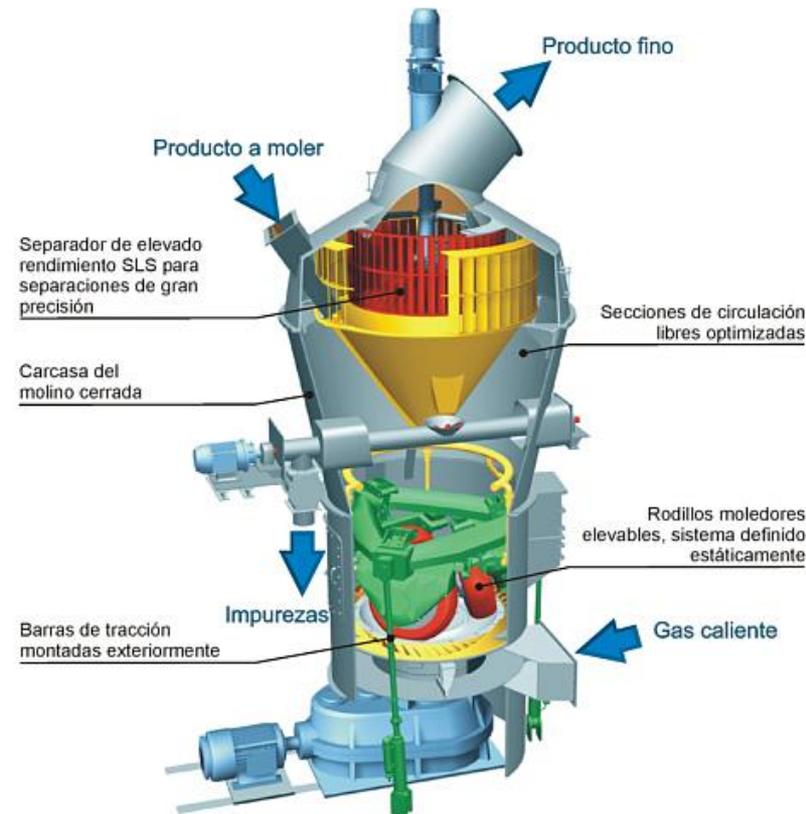
(www.gpse.de)



# Molinos verticales de rodillos

Figura 46

- Los revestimientos de los cilindros y de la mesa están hechos de materiales de alta resistencia.
- Estos revestimientos pueden ser lisos o con estrías transversales según el material a moler.
- La mesa de molienda está formada por segmentos de fundición Ni-Hard.
- El material molido es elevado a través de los flujos de gas caliente y llevado al clasificador superior donde las partículas finas son extraídas y las gruesas vuelven a caer para ser nuevamente molidas sobre la mesa.



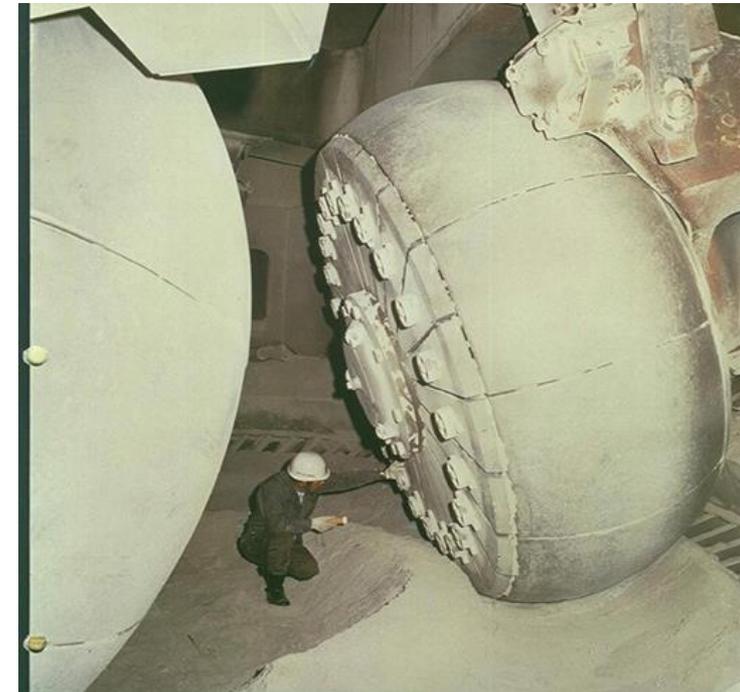
(www.gebr-pfeiffer.com)



# Molinos verticales de rodillos

- El grado de finura del producto molido se puede ajustar variando la presión de los rodillos sobre la mesa, el flujo del gas, la velocidad del rotor y cambiando el ángulo de los filtros.
- El consumo de energía total es inferior al consumo de energía empleado en cualquier otro sistema de molienda.
- Estos molinos se emplean en las cementeras para la molienda del clinker.

Figura 47



([www.interchopen.com](http://www.interchopen.com))



# Molinos verticales de rodillos

- Conocidos suministradores internacionales de este tipo de molinos son: Loesche, Raymond, FLSmidth, Gebr Pfeiffer, Krupp Polysus, Williams, Claudius-Peters y Babcock & Wilcox.

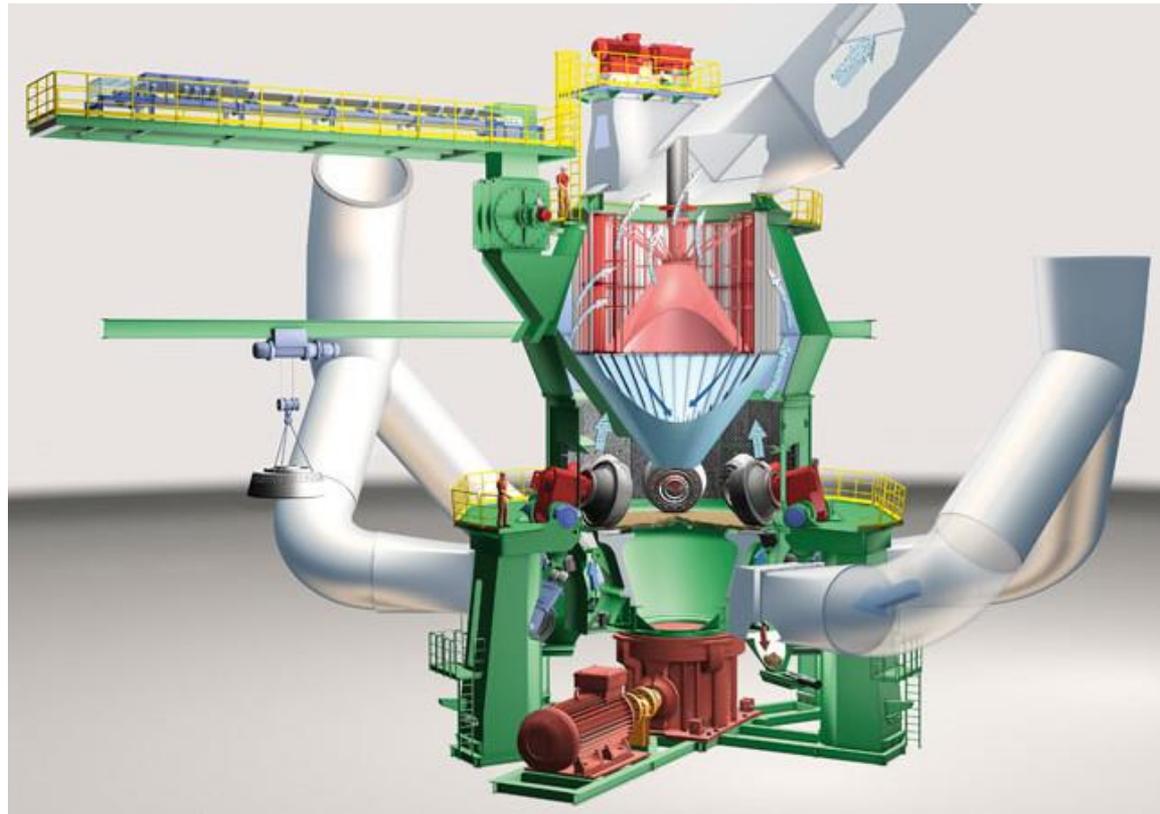


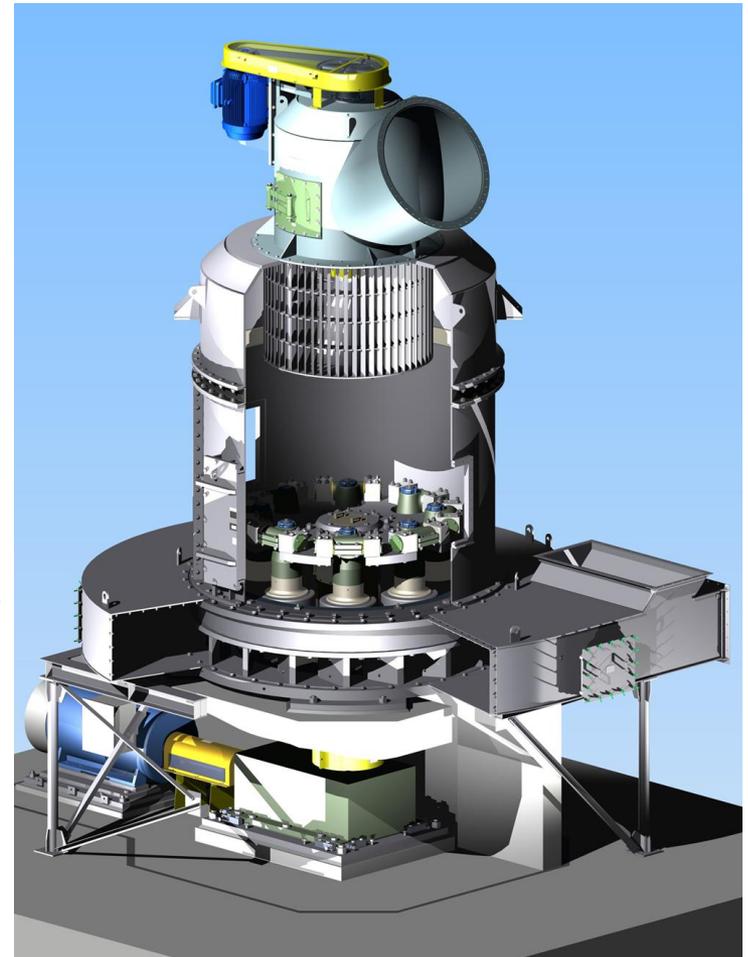
Figura 48



# Molinos de rodillos pendulares

Figura 49

- Se caracterizan por disponer de un conjunto de brazos o péndulos que están suspendidos de un eje vertical giratorio.
- Los péndulos tienen integrados los rodillos que al girar presionan contra la superficie interior de la zona de molienda aplastando las partículas a moler.
- El material de alimentación puede tener un tamaño de 25 mm y el producto obtenido puede alcanzar tamaños de 2 mm.
- Estos molinos son empleados para moler materiales poco abrasivos y dureza media: arcillas, yeso, caliza, barita, cal, talco, carbón para hornos, etc.



(Alstom-Raymond-pendulum-mill)



# Molinos de rodillos pendulares

Figura 50

- Se caracterizan por disponer de un conjunto de brazos o péndulos que están suspendidos de un eje vertical giratorio.
- Los péndulos tienen integrados los rodillos que al girar presionan contra la superficie interior de la zona de molienda aplastando las partículas a moler.
- El material de alimentación puede tener un tamaño de 25 mm y el producto obtenido puede alcanzar tamaños de 2 mm.
- Estos molinos son empleados para moler materiales poco abrasivos y dureza media: arcillas, yeso, caliza, barita, cal, talco, carbón para hornos, etc.



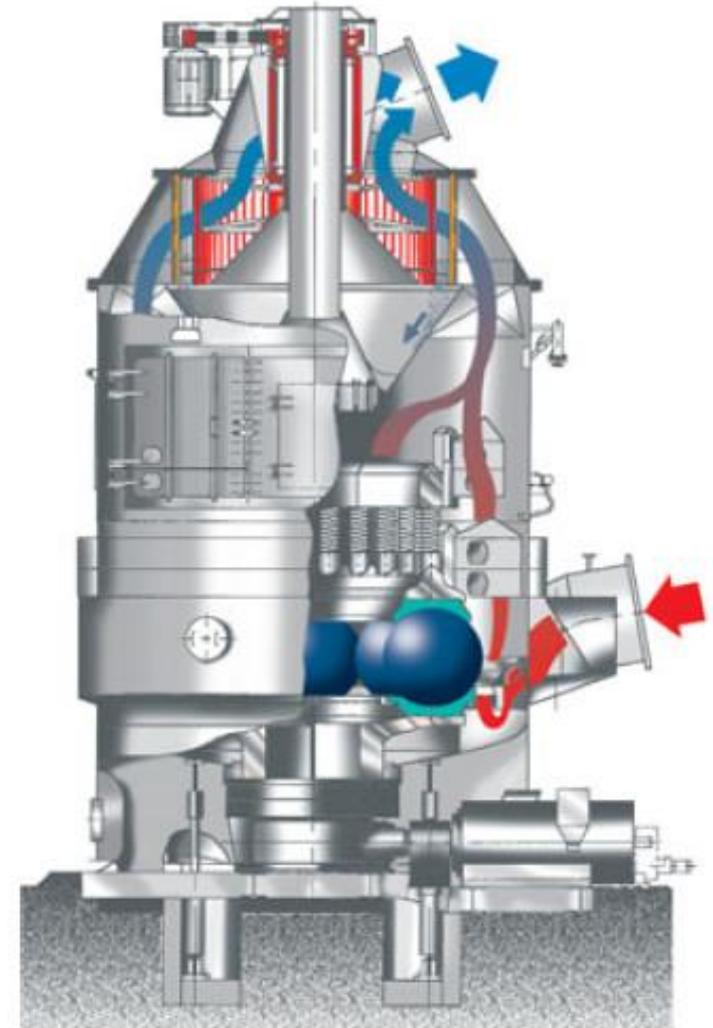
(Molino de péndulo Raymond)



## Molinos anulares de bolas

Figura 51

- Al igual que los anteriores trabajan por vía seca y además de la molienda se produce el secado, la clasificación y el transporte del material.
- Son similares a los molinos de rodillos, sin embargo en este tipo de molinos las bolas no son estacionarias sino que se mueven libremente conservando la forma esférica a pesar del desgaste.
- El material se alimenta a través de un cuello central que lo distribuye uniformemente bajo las bolas de molienda.
- Estas bolas se desplazan sobre los anillos de molienda gracias a un sistema de cilindros hidráulicos que aseguran la presión de molienda necesaria.



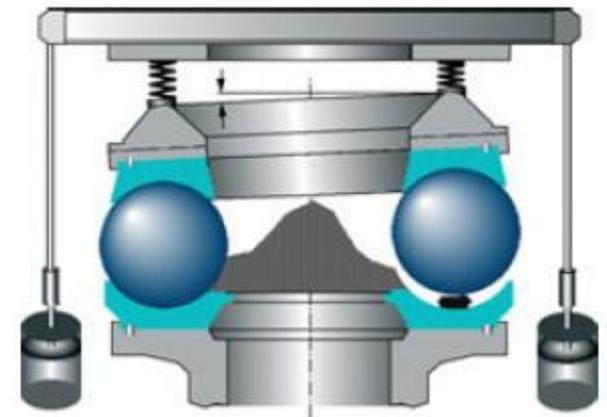
(Cortesía Claudius-Peters)



# Molinos anulares de bolas

Figura 52

- Al igual que los anteriores trabajan por vía seca y además de la molienda se produce el secado, la clasificación y el transporte del material.
- Son similares a los molinos de rodillos, sin embargo en este tipo de molinos las bolas no son estacionarias sino que se mueven libremente conservando la forma esférica a pesar del desgaste.
- El material se alimenta a través de un cuello central que lo distribuye uniformemente bajo las bolas de molienda.
- Estas bolas se desplazan sobre los anillos de molienda gracias a un sistema de cilindros hidráulicos que aseguran la presión de molienda necesaria.



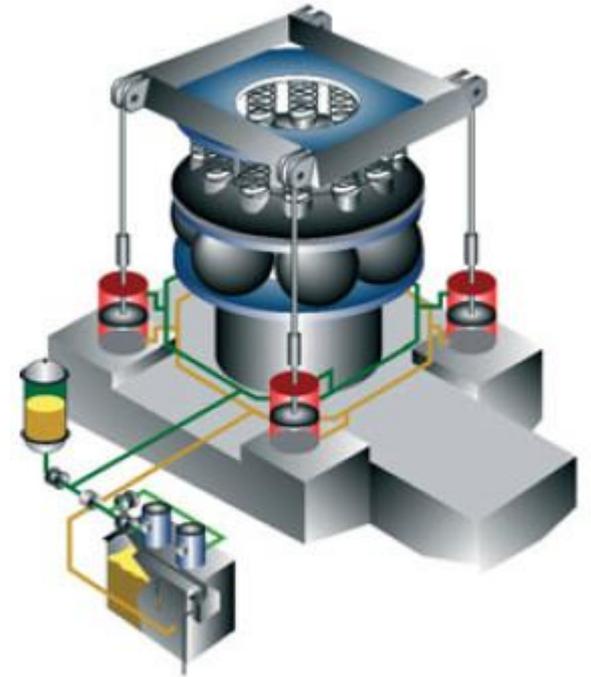
(Cortesía Claudius-Peters)



# Molinos anulares de bolas

- Al igual que los anteriores trabajan por vía seca y además de la molienda se produce el secado, la clasificación y el transporte del material.
- Son similares a los molinos de rodillos, sin embargo en este tipo de molinos las bolas no son estacionarias sino que se mueven libremente conservando la forma esférica a pesar del desgaste.
- El material se alimenta a través de un cuello central que lo distribuye uniformemente bajo las bolas de molienda.
- Estas bolas se desplazan sobre los anillos de molienda gracias a un sistema de cilindros hidráulicos que aseguran la presión de molienda necesaria.

Figura 53



(Cortesía Claudius-Peters)



## Molinos anulares de bolas

- Las partículas molidas se desplazan hacia el exterior del anillo de molienda donde son captadas por la corriente ascendente de gas caliente.
- En el clasificador las partículas gruesas vuelven a caer al anillo de molienda y las partículas finas extraídas al exterior.
- El clasificador puede ser estático o dinámico en función del tamaño final deseado.
- Este tipo de molinos es utilizado en fábricas de cemento, centrales térmicas y siderúrgicas para la molienda de carbones, además de otros minerales como yeso, caliza, bentonita, fosfatos, etc.

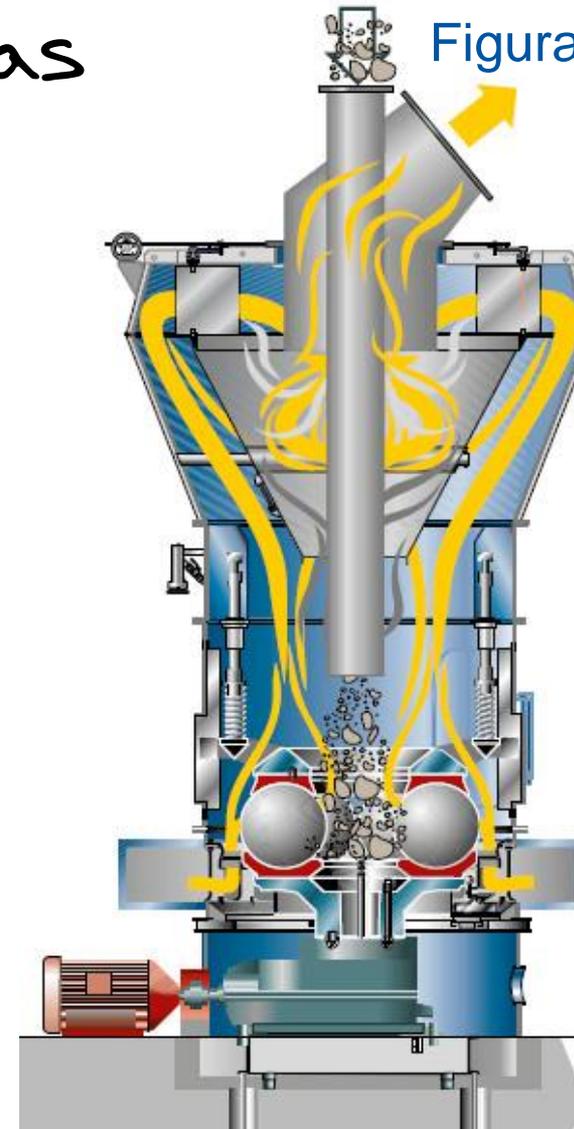
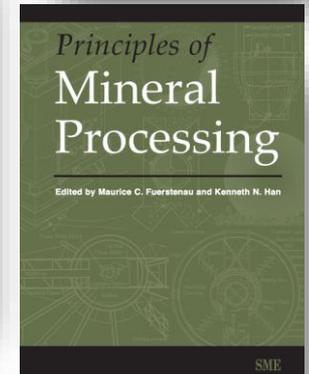
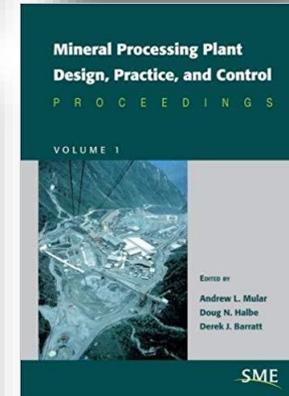
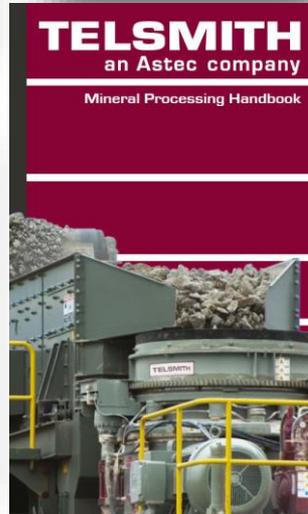
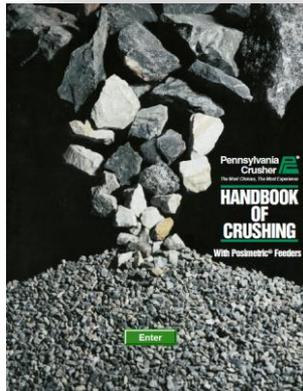
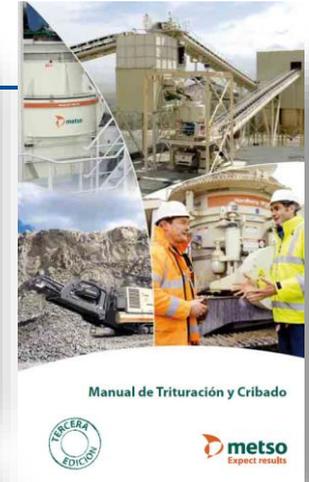
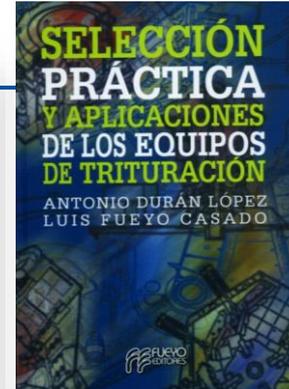
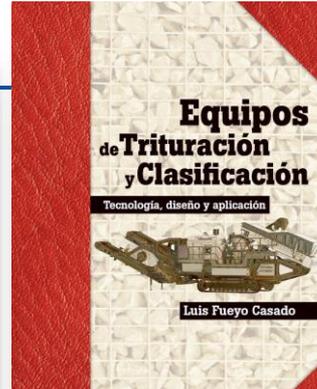
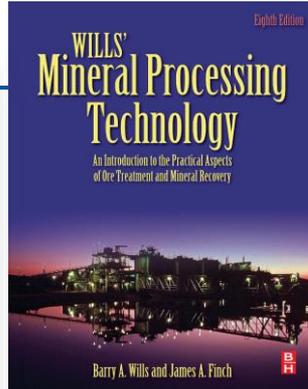
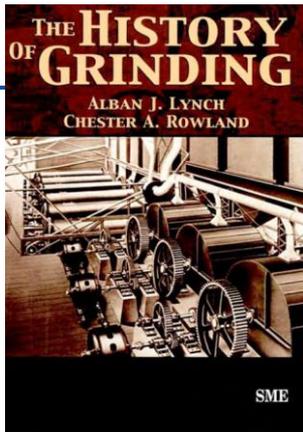


Figura 54

(Cortesía Claudius-Peters)

# Referencias:



## Coal Processing and Utilization

D.V. Subba Rao  
Formerly Head of the Department of Mineral Beneficiation, S.D.S Autonomous College, Andhra Pradesh, India

T. Gouricharan  
Senior Principal Scientist and Head, Coal Preparation, Central Institute of Mining and Fuel Research, Dhanbadi, Jharkhand, India

