

TÉCNICO UNIVERSITARIO EN PROCESAMIENTO DE MINERALES
INGENIERÍA DE MINAS
2020

PROCESAMIENTO DE MINERALES I
TEMA: MOLINO DE BOLAS

TEORÍAS DE LA CONMINUCIÓN

MÉTODOS DE LABORATORIO PARA DETERMINAR LA APTITUD A LA MOLIENDA Y EL CONSUMO ESPECIFICO DE ENERGÍA

Los métodos en uso se pueden dividir, fundamentalmente, en tres grupos:

- a) métodos basados en la "ley de trituración" de Bond;
- b) métodos que, independientemente de Bond, trabajan también con molinos de bolas de laboratorio como aparatos de análisis
- c) métodos que trabajan con otras instalaciones de molienda como aparatos de análisis.

TEORÍAS DE LA CONMINUCIÓN

EL CONCEPTO DE EFICIENCIA PARA EL RESPONSABLE DE LA CONMINUCIÓN

- Número de toneladas que se pueden moler hasta el límite deseado en determinado equipo
- Kws/hora consumidos por tonelada molida

Por ej. Si en una instalación de molienda en circuito cerrado, se aumenta la carga de circulación, el consumo de energía por tonelada de producto puede disminuir, esto es un aumento de la eficiencia práctica de la operación, pero no significa necesariamente un aumento en la eficiencia absoluta de la molienda, ya que lo más probable es que el aumento de la circulación haya producido un cambio en la distribución del producto final, en otras palabras, manteniendo el tamaño límite superior, se ha reducido la sobremolienda

Uno de los métodos que se utiliza para velar la eficiencia del proceso de molienda es llevar un control estadístico del consumo específico de energía.

TEORÍAS DE LA CONMINUCIÓN

Fred Bond: El trabajo útil total que ha sido aplicado a un determinado peso de material homogéneo fracturado, es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del diámetro de las partículas. Expresa la resistencia del material a la trituración y a la molienda

$$W = 10 w_i \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right)$$

W = Consumo energético específico, para reducir desde cualquier tamaño hasta las 100 μm

D y d = Tamaños que dan un pasante del 80% en alimentación y pasante respectivamente, μm

w_i = Índice de trabajo o índice de Bond, kWh/t

La determinación del índice de trabajo se realice lo más cerca posible del tamaño requerido en la molienda industrial

Categorización del mineral, según el índice de Bond

Denominación	Límite W_i (kWh/t métricas)
Muy blando	hasta 8
Blando	8 a 12
Medio	12 a 16
Duro	16 a 20
Muy duro	20 a 24
Extremadamente duro	más de 24

VALORES TÍPICOS DE Wi

Denominación	Límite Wi (kWh/t métricas)
Baritina	6,86
Vidrio	3,39
Yeso	6,73
Arcilla	7,81
Fluorita	8,91
calcita	9,58
Magnetita	9,97
Galena	10,68
Roca fosfatada	11,14
Dolomita	12,44
Carbón mineral	12,51
Mineral de plomo	12,54

Denominación	Límite Wi (kWh/t métricas)
Caliza	12,77
Feldespato	12,84
Cuarzo	14,05
Mineral de cobre	14,44
Clinker de cemento	14,84
Todos los materiales	15,19
Granito	15,83
Mineral de oro	16,31
Taconita	16,36
Lutita petrolífera	19,91
Basalto	22,45
Esmeril	64,00

TEORÍAS DE LA CONMINUCIÓN

- Según Bond, si el material se comportase de manera homogénea ante la reducción de tamaño (caso muy poco habitual, por otra parte), el valor de su índice de trabajo se mantendrá constante en las sucesivas etapas de conminución.
- Pero la realidad es que los materiales frecuentemente son heterogéneos en su estructura
- A tamaños de molienda superiores, el índice nos daría valores del índice de trabajo inferiores que en el caso de realizar la molienda a un tamaño inferior, ya que en el primer caso, los esfuerzos sobre las partículas generados por la acción de la molienda se dirigirán en principio, preferentemente, hacia las superficies intergranulares, que normalmente presentarán una resistencia inferior a la presentada por la red del grano monocristalino, y por tanto, el consumo energético de la operación será menor

CÁLCULO DE CAPACIDAD DE MOLIENDA

a) Si nuestro sistema de molienda tiene una pérdida de potencia del 10%, y está funcionando procesando un mix equilibrado de productos de basalto y granito. Las mediciones de potencia real consumida por el molino, promedian los 715,63 kW, en tanto que el análisis granulométrico indica que:

$$\sqrt{F_{80}} = 0,5'' = 12700 \mu$$

$$\sqrt{P_{80}} = 120 \mu$$

Determine aproximadamente, el máximo tonelaje posible de procesar en el molino

Ec. Bond



$$W = P_{\text{carga}} = 10 w_i \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) m$$

P_{carga} es la potencia de carga

$$P_{\text{t}} = P_{\text{total}} = P_{\text{carga}} \times (1 + fp)$$

$$W = P_{\text{t}} = \text{Potencia real consumida} = 715,63 \text{ kW}$$

fp = factor de pérdidas $\approx 10\%$

$$P_{\text{carga}} = 715,63 / 1,10 = 651,48 \text{ kW}$$

$$w_i = 19,14 \text{ kWh/t}$$

Despejamos m (el máximo tonelaje que se puede procesar)

CAPACIDAD DE MOLIENDA

$$W = P_{\text{carga}} = 10 w_i \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) m$$

$$m = \frac{651,48}{10 \times 19,14 \times (1/\sqrt{120} - 1/\sqrt{12700})}$$

$$m = 46,70 \text{ t/h}$$

b) También se nos informa que para el mes entrante, la proporción de basalto /granito será de 2 a 1, y se nos pide calcular cuanto se puede moler en ese molino

$$m = 43,9 \text{ t/h}$$

c) Luego también se nos indaga respecto de la capacidad teórica de la molienda, si se tratara el mineral de otro yacimiento de la misma empresa (contiene una proporción de magnetita/granito de 9 a 5).

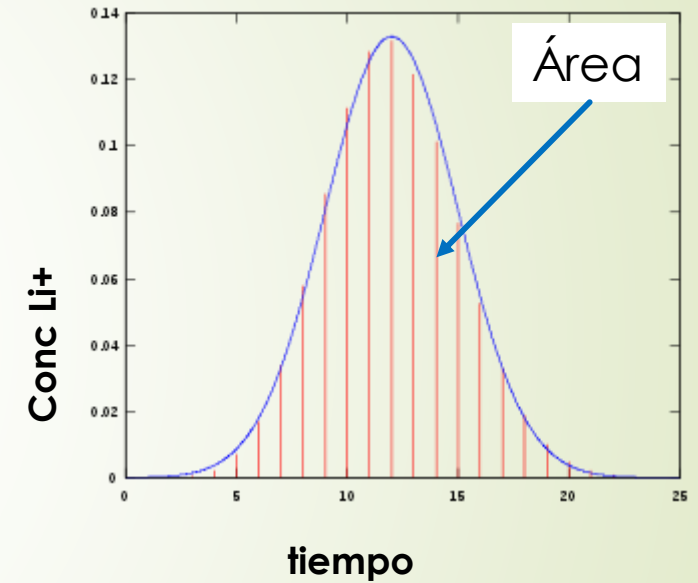
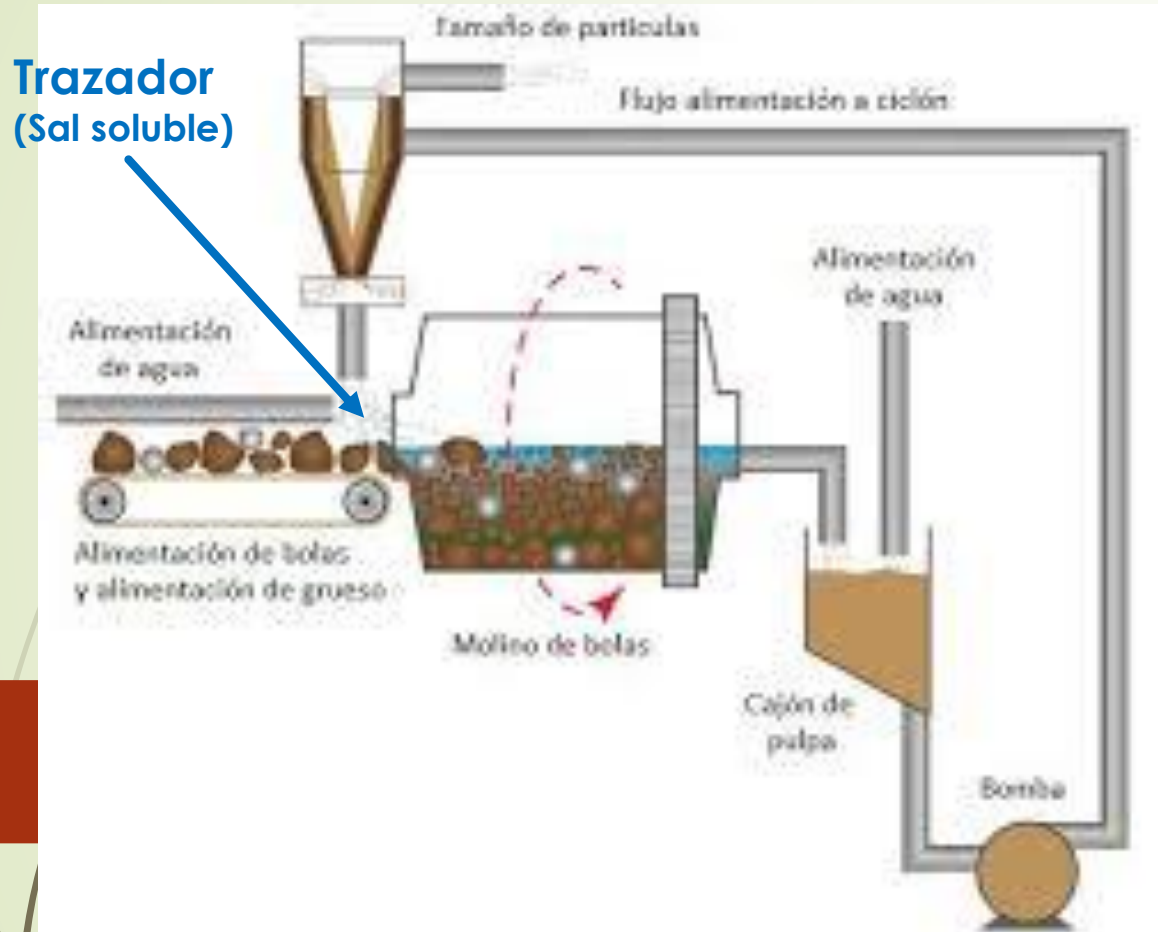
$$m = 65,88 \text{ t/h}$$

d) Ocasionalmente, el proceso de molienda se cargará con un mineral de cuarcita, cuyo $W_i = 26$. ¿cuánto podrá moler ese molino?

$$m = 30,41 \text{ t/h}$$

Se puede aumentar la potencia del molino, por ejemplo, aumentando la carga moledora o girar el molino a más rpm

TIEMPO DE RESIDENCIA EN REACTORES (Molinos y tanques de agitación)



$$\zeta = \frac{\sum \Delta \text{tiempo} \times \Delta [Li^+]}{C_o [Li^+]}$$

Tiempo de residencia promedio (o de paso) ζ : tiempo de permanencia de la pulpa, en el molino

TIEMPO DE RESIDENCIA EN REACTORES (Molinos y tanques de agitación)

$$\zeta = \frac{\text{Volumen del reactor (m}^3\text{)}}{\text{Flujo volumétrico (m}^3\text{/h)}}$$

A nivel operacional, el grado en que se alimenta las cargas de los medios de molienda y de mineral, está definida por el **nivel de llenado** (J). Este se va entender como la fracción de volumen útil del molino ocupado por el lecho de bolas y mineral

e) Suponga que dispone de un molino de bolas de rebalse (tipo cilíndrico, diámetro de 3,5 m por una longitud de 4,8 m) que trabaja con un volumen de llenado del 40%, recibe un volumen de pulpa de 220m³/h. Calcule el tiempo de residencia

$$J = \text{Volumen de llenado} = \frac{\pi d^2}{4} L \left(\frac{40}{100}\right) = 18,472 \text{ m}^3$$

$$\zeta = \frac{18,472 \text{ m}^3}{220 \text{ m}^3\text{/h}} = 0,084\text{h} = 5,04 \text{ min}$$

TIEMPO DE RESIDENCIA EN REACTORES (Molinos y tanques de agitación)

f)Cuál será el tiempo de residencia en el mismo molino, que antes era del 200%, ahora pasa a ser del 300%

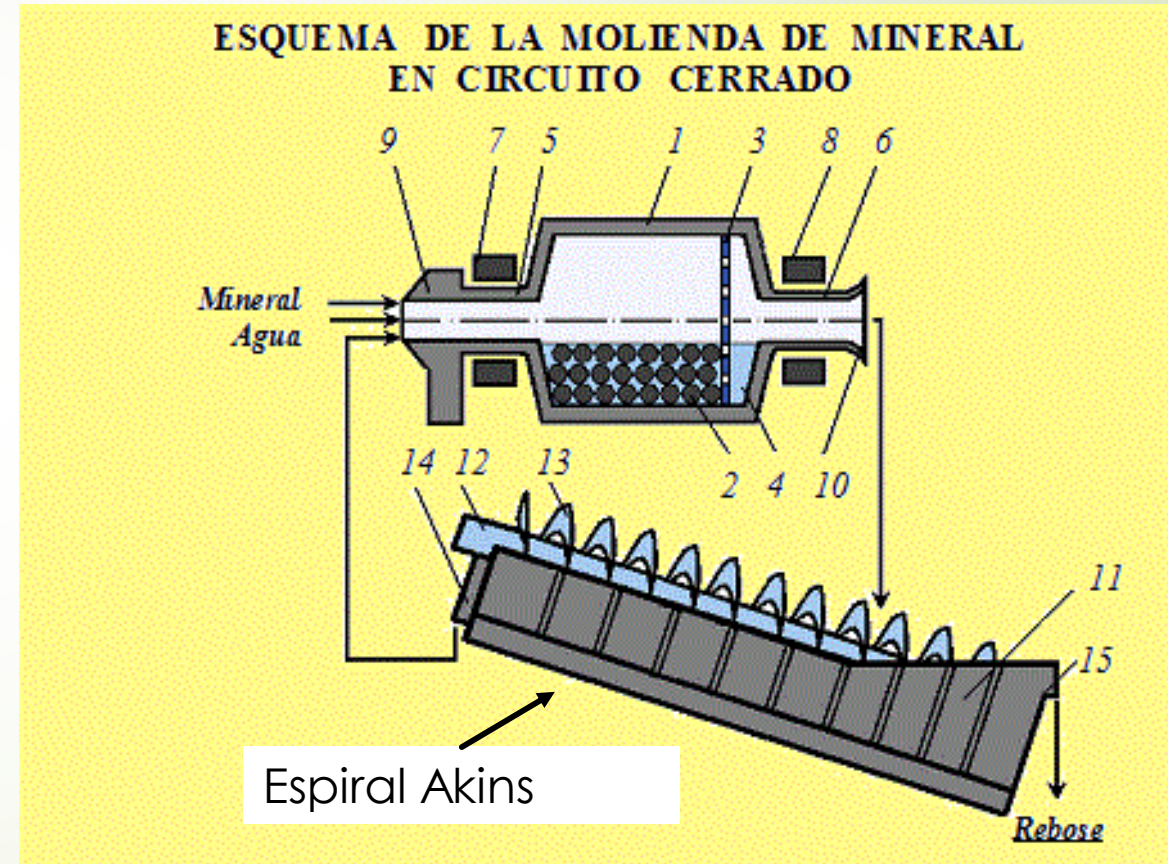
$$J = \text{Volumen de llenado} = \frac{\pi d^2}{4} L \left(\frac{40}{100}\right) = 18,472 \text{ m}^3$$

$$\zeta = \frac{18,472 \text{ m}^3}{293,3 \text{ m}^3/\text{h}} = 0,063\text{h} = 3.78 \text{ min}$$

TIEMPO DE RESIDENCIA EN REACTORES (Molinos y tanques de agitación)

g) Para el volumen de pulpa del ejercicio anterior, ¿Cuál será el tiempo de residencia en un clasificador de espiral Akins, sabiendo que el volumen útil es de 2 m³

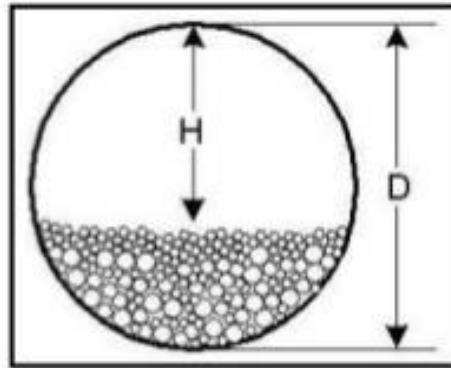
$$\zeta = \frac{2 \text{ m}^3}{293,3 \text{ m}^3/\text{h}} = 0,0068 \text{ h} = 0,41 \text{ min}$$



NIVEL DE CARGA EN MOLINOS ROTATORIOS

El nivel de llenado J se determina a través de la siguiente ecuación:

$$J = 1.13 - 1.23\left(\frac{H}{D}\right)$$



J = Porcentaje de carga (en volumen)

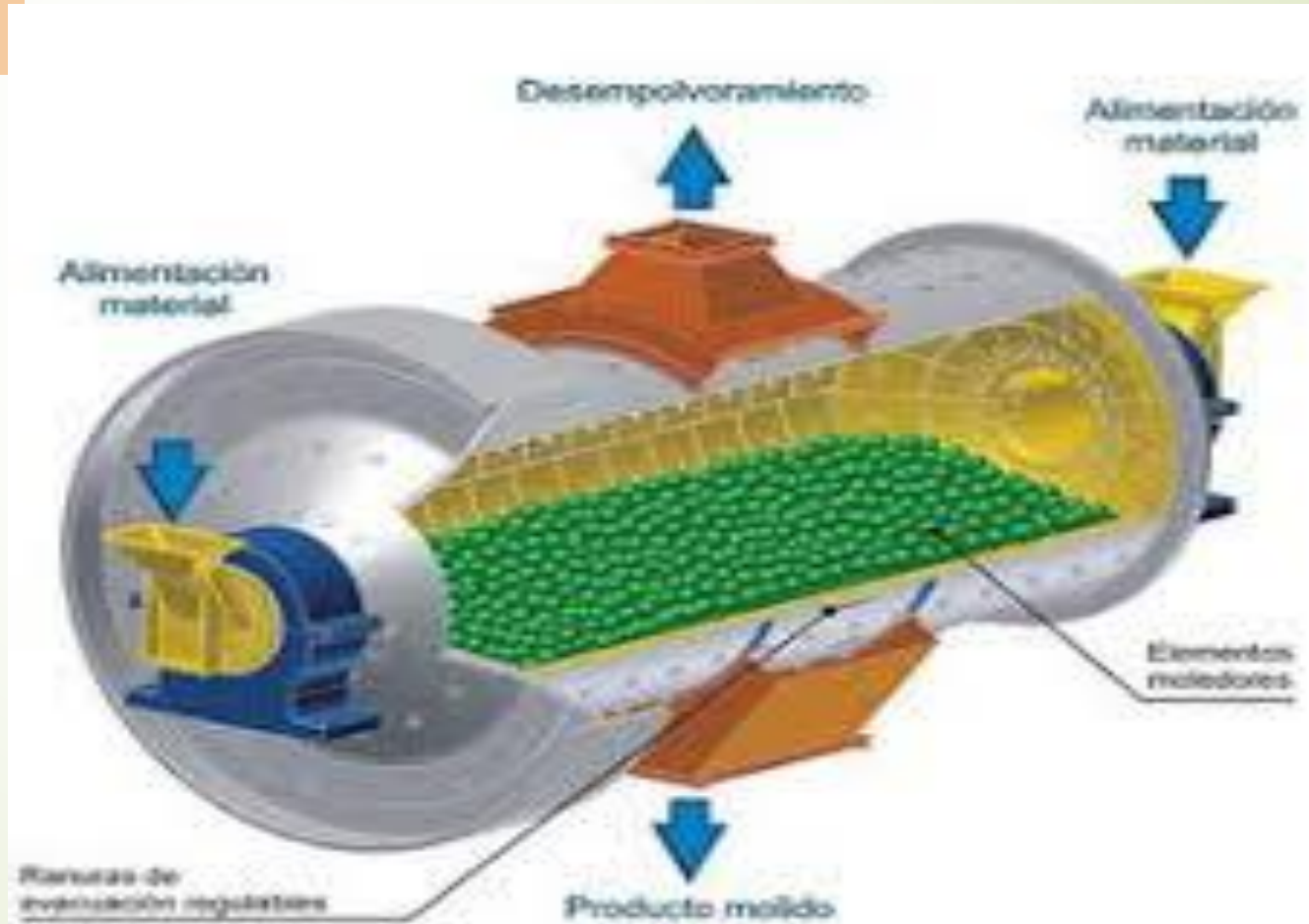
H = altura libre de la superficie de la carga al techo del molino

D = diámetro interno del molino

NIVEL DE CARGA EN MOLINOS ROTATORIOS

g) Siendo que el diámetro del molino entre liner y liner es de 3,6 m, y cuando se hizo la última inspección del molino se midió que $H = 2,52$ m. Determine que nivel de carga en volumen tenía el molino al momento de la inspección

$$\%C = 113 - 126 \frac{(2,52)}{3,6} = 24,8\%$$



DESGASTE DE LOS MEDIOS DE MOLIENDA, EN HÚMEDO

$$\text{DESGASTE DE BOLAS} = \beta = 0,175 (A_i - 0,015)^{1/3} = (\text{kg}_{\text{acero}} / \text{kWh}_{\text{sistema}})$$

A_i = Índice de abrasión. Indica con que facilidad se desgasta en el molino el material de las bolas, en presencia del mineral


$$\text{DESGASTE DEL BLINDAJE} = \beta = 0,013 (A_i - 0,015)^{0,3} = (\text{kg} / \text{kWh})$$

DESGASTE DE LOS MEDIOS DE MOLIENDA, EN SECO

$$\text{DESGASTE DE BOLAS} = \beta = 0,023 \sqrt{A_i} = (\text{kg} / \text{kWh})$$

A_i = Índice de abrasión. Indica con que facilidad se desgasta en el molino el material de las bolas, en presencia del mineral

$$\text{DESGASTE DEL BLINDAJE} = \beta = 0,0023 \sqrt{A_i} = (\text{kg} / \text{kWh})$$


$$E = w_i \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right) m = (\text{Kwh/T})$$

DESGASTE DE LOS MEDIOS DE MOLIENDA, EN SECO

$$\text{DESGASTE DE BOLAS} = \beta = 0,023 \sqrt{A_i} = (\text{kg /kWh})$$

A_i = Índice de abrasión. Indica con que facilidad se desgasta en el molino el material de las bolas, en presencia del mineral

$$\text{DESGASTE DEL BLINDAJE} = \beta = 0,0023 \sqrt{A_i} = (\text{kg /kWh})$$

Energía específica

$$E = w_i \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right) = (\text{kWh/t})$$

CÁLCULO DEL CONSUMO (ϕ)

$$\phi = \beta * E = (\text{kg de acero /t de mineral})$$

Mineral	Índice de abrasión A_i
Mena de cobre	0,0950
Cal	0,0256
Clinker	0,0409
Carbón	11,37

h) Un mineral de cobre se procesa en un molino de bolas de rebalse de pulpa. El mineral tiene un $W_i = 18$ kWh/t, con un $F_{80} = 12400 \mu$, y un $P_{80} = 100 \mu$. El índice de abrasión del mineral es de 0,110. Determinar el consumo de bolas y blindaje.

$$\text{DESGASTE DE BOLAS} = \beta = 0,175 (0,11 - 0,015)^{1/3} = 0,07985 \text{kg}_{\text{acero}} / \text{kWh}_{\text{sistema}}$$

$$\text{DESGASTE DEL BLINDAJE} = \beta = 0,013 (0,11 - 0,015)^{0,3} = 0,006416 \text{ kg /kWh}$$

CÁLCULO DEL CONSUMO (ϕ)

$$\phi = \beta * E = (\text{kg de acero /t de mineral})$$

$$E = 18 \left(\frac{10}{\sqrt{100}} - \frac{10}{\sqrt{12400}} \right) = 16,3835 \text{ kWh/t}$$

$$\phi_{\text{bolas}} = 0,07985 * 16,3835 = 1,308 \text{ kg de acero /t de mineral}$$

$$\phi_{\text{blindaje}} = 0,006416 * 16,3835 = 0,105 \text{ kg de acero /t de mineral}$$

EN PLANTA:

$$\phi_{\text{bolas}} = \text{consumo de bolas /tonelaje de mineral molido}$$

CÁLCULO DEL CONSUMO (ϕ)

EN PLANTA:

Consumo de bolas (t/día)	Molenda (t / d)	ϕ (kg / t)
2088	3480,00	0,60
2900	3625,00	0,80
2589	2875,00	0,90
3150	4200,00	0,75
4464	4800,00	0,93
2686	3400,00	0,79
3822	4200,00	0,91
Promedio		0,81

$$\Phi_{\text{bolas}} = \text{consumo de bolas} / \text{tonelaje de mineral molido}$$

Si se muele 1265,7 t / turno

Carga de bolas por turno = 1265,7 x 0,81 = 1027, 13 kg

¡Controlar el nivel de bola!

TAMAÑO DE BOLA ÓPTIMO

$$B_s = \left(\frac{F_{80}}{330} \right)^{0.5} \left[\frac{\rho_{ore} \frac{W_{iB}}{1.10229}}{\%N_c D^{0.5}} \right]^{\frac{1}{3}}$$

B_s = Tamaño de bola óptimo (in).

ρ_{ore} = Densidad de la mena. (t/m³)

W_{iB} = Índice de trabajo de Bond (kWh/t)

$\%N_c$ = Porcentaje de la velocidad crítica

D = Diámetro efectivo del molino (ft)

F_{80} = Diámetro 80 de la alimentación (micras)

TAMAÑO DE BOLA ÓPTIMO (MÁXIMO)

Si $D = 18,50 \text{ ft}$

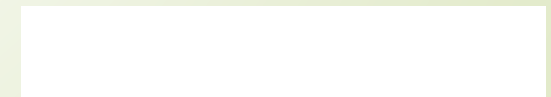
$F_{80} = 9795 \mu$

$\rho_{\text{ore}} = 2,80 \text{ t / m}^3$

$W_i = 13 \text{ kWh/t}$

$\% N_c = 72 \%$

$B_s = 2,58''$



TAMAÑO DE BOLA ÓPTIMO

Si $D = 18,50 \text{ ft}$

$F_{80} = 9795 \mu$

$\rho_{\text{ore}} = 2,80 \text{ t / m}^3$

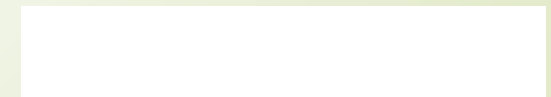
$W_i = 13 \text{ kWh/t}$

$\% N_c = 72 \%$

$B_s = 2,58''$

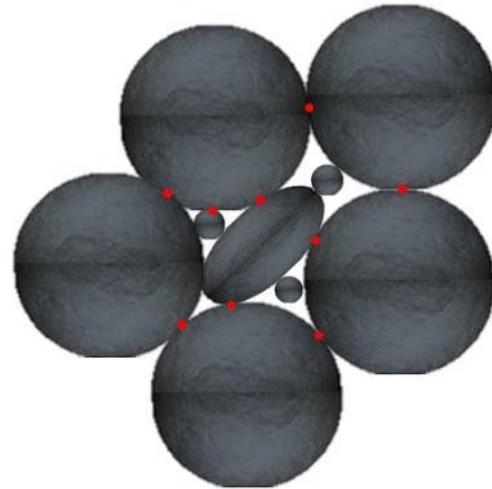
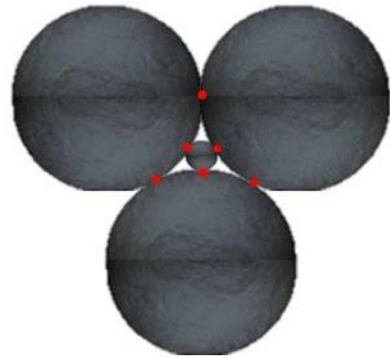
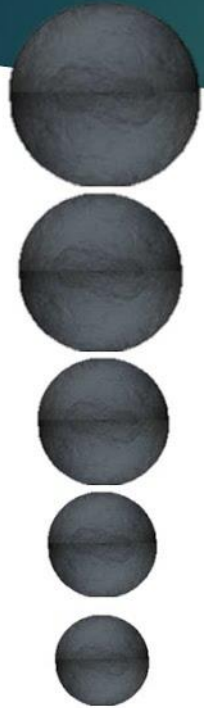


$B_s = 2,5''$



CÁLCULO DEL GRADIENTE DE BOLAS A AGREGAR

Gradiente de Bola en equilibrio



¿cuánto agregar de cada uno de los tamaños de bolas?