Universidad Politécnica de Cartagena

TECNOLOGÍA MINERALÚRGICA

TEMA 2: REDUCCIÓN DE TAMAÑO - INTRODUCCIÓN

Universidad Politécnica de Cartagena

2 REDUCCIÓN DE TAMAÑO: INTRODUCCIÓN

2.1. Fragmentación de los Sólidos
2.2. Antecedentes Históricos
2.3. Consideraciones Previas
2.4. Terminología
2.5. Problemas Teóricos
2.6. Leyes de la Distribución Granulométrica
2.7. Leyes Energéticas
2.8. Máquinas de Fragmentación. Clasificación

Fragmentación de los Sólidos:

- **No hay ningún mineral prácticamente, que tal como se extrae de la explotación (mina, cantera, etc.), sea adecuado para su transformación en un producto final = procesamiento de minerales.**

Fragmentación de los Sólidos:

Cuando se produce el arranque por perforación y voladura, el producto que se obtiene presenta un tamaño heterogéneo, que en algunos casos, lo hace inapropiado para su transporte (p.e.: por cinta transportadora), haciendo necesaria una primera fragmentación en el frente.

Noción de Fragmentación o Conminución:

- **Es la acción de disminuir el tamaño de un determinado material.**
- **Agrupa a un conjunto de operaciones cuyo objetivo es realizar la división de cuerpos sólidos por medios de acciones físicas externas.**

Finalidad de las Operaciones de Fragmentación:

- **Liberación de las especies con valor económico.**
- **Obtener un reducción del material que facilite su transporte/tratamiento.**
- **Facilitar operaciones puramente físicas (distribución, dosificación, mezcla, aglomeración, etc.).**
- **Favorecer la producción de reacciones químicas o físico-químicas (lixiviación, flotación, etc.).**
- **Obtener un tamaño de material que se ajuste a las especificaciones de venta del producto (áridos).**
- **Promover la concentración del mineral (operaciones de clasificación directa).**

Finalidad de las Operaciones de Fragmentación:

Finalidad de las Operaciones de Fragmentación:

Campos de aplicación de la fragmentación

Minería y Obras Públicas

- Tratamiento de combustibles minerales sólidos.
- Tratamiento de minerales.
- Preparación de áridos.
- Plantas de aglomerados.
- Plantas de cemento.
- Otros.

Industria Química y Farmacéutica

- Fabricación de pinturas.
- Fabricación de barnices.
- Fabricación de pigmentos.
- Tratamiento de residuos.
- Otros.

Industrias Agrícolas y Alimenticias

- Industrias harineras.
- Industrias arroceras.
- Fabricas de piensos.
- Otros.

Antecedentes Históricos:

- **<u>Tiempos prehistóricos</u>: ya existen ciertas técnicas muy rudimentarias que permiten moler los granos.**

- **<u>Siglo XV-XVI</u>: Aparecen las batería de pilones o bocartes ("*stamp mill*") movidos por ejes de levas y accionados por energía hidráulica. También es la época del molino chileno (ver figuras en las siguientes diapositivas).**

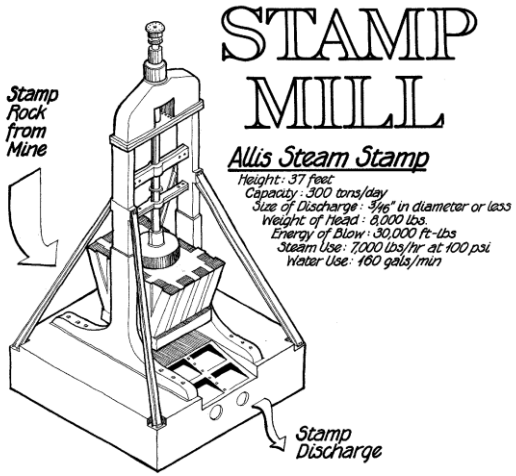
- **<u>A mediados del siglo XIX</u>: Con la producción de energía mecánica a través del uso de calderas de vapor, se da paso a equipos trituradores (martillos móviles o de percusión), aparecen tanto en EEUU como en Europa.**

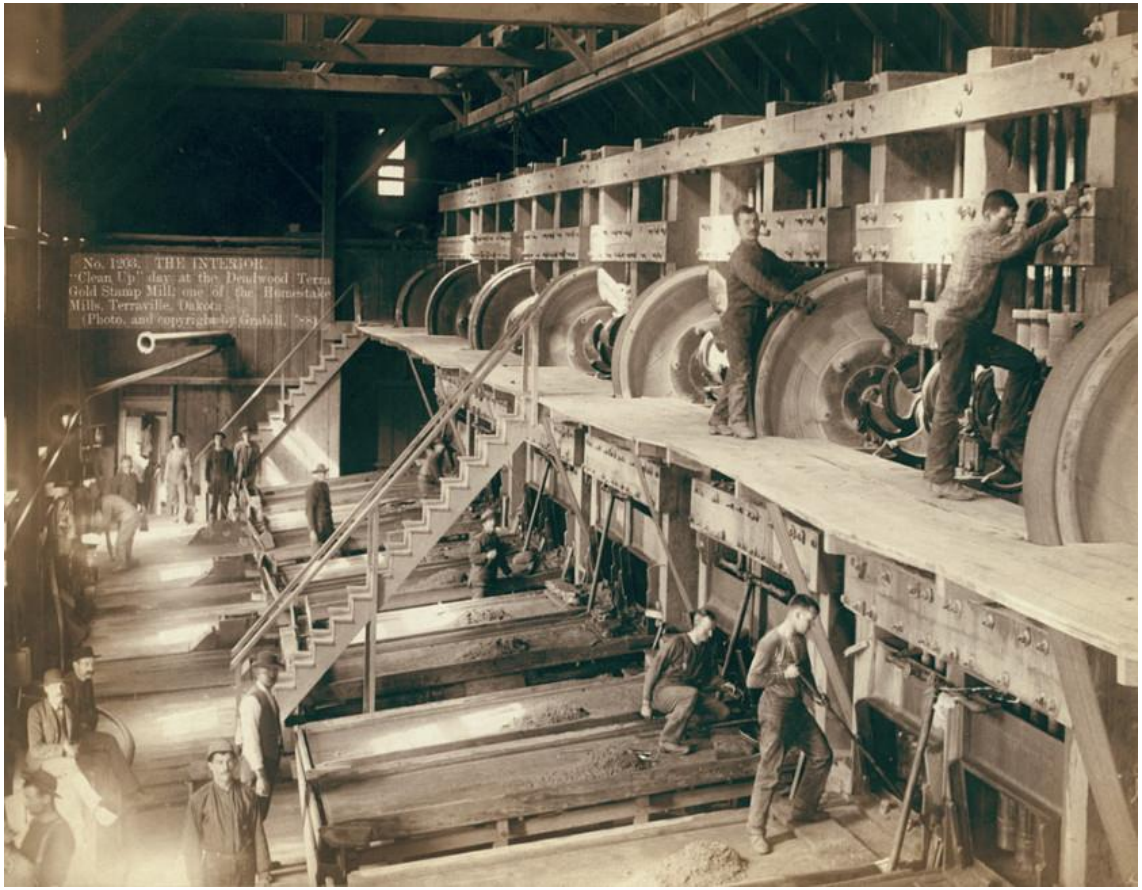
- **<u>Hasta 1925</u>: Evoluciona sólo el machaqueo ("chancado") primario, fabricándose equipos cada vez mas grandes.**

- **<u>A partir de 1925</u>: Comienzan a desarrollarse equipos de trituración secundaria, molienda, etc. Aparición de los primeros conos Symons.**

- **<u>En la actualidad</u>: Proceso totalmente continuo. Se dispone de una gran variedad de equipos (modelo, tamaño, capacidad, automatización, etc.) muy desarrollados buscando la eficiencia energética, reducción de costes, minimización de tiempos muertos, etc.**

Antecedentes Históricos:



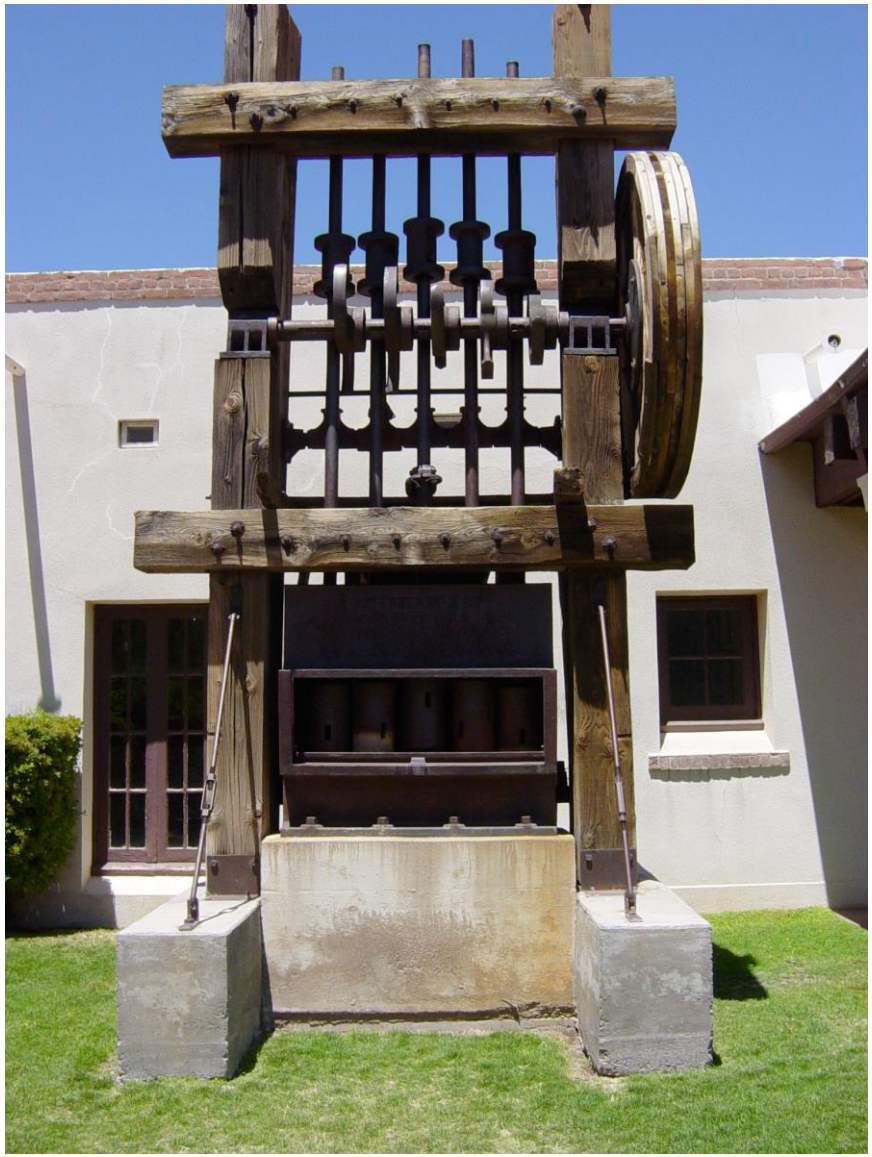


Batería de bocartes

Antecedentes Históricos:

Eje de levas de un equipo de pilones

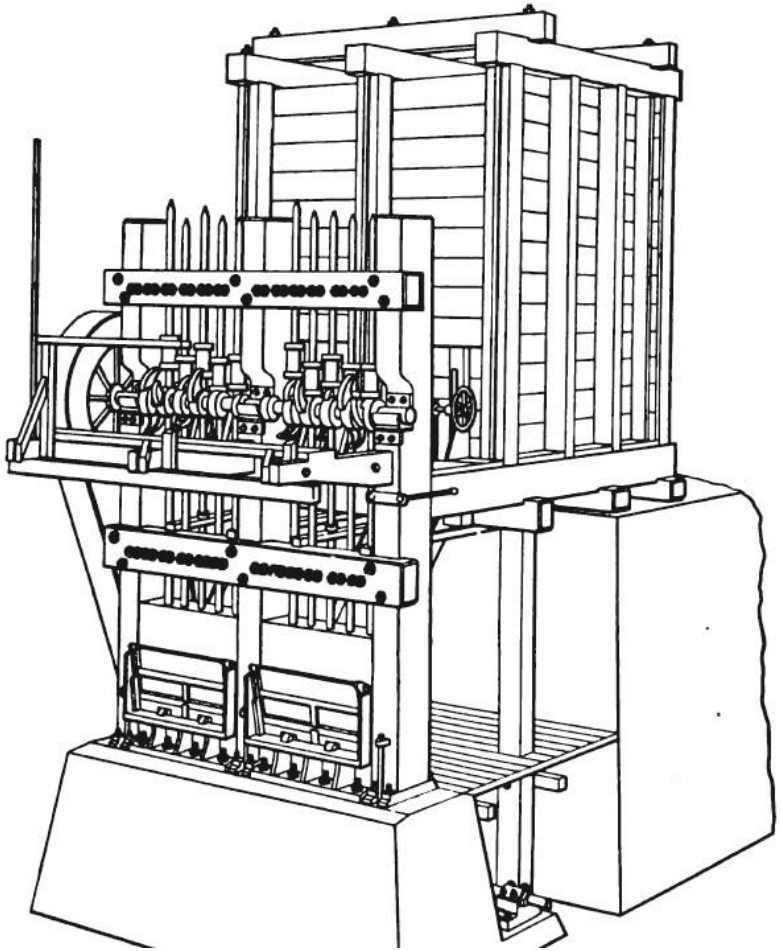
Antecedentes Históricos:

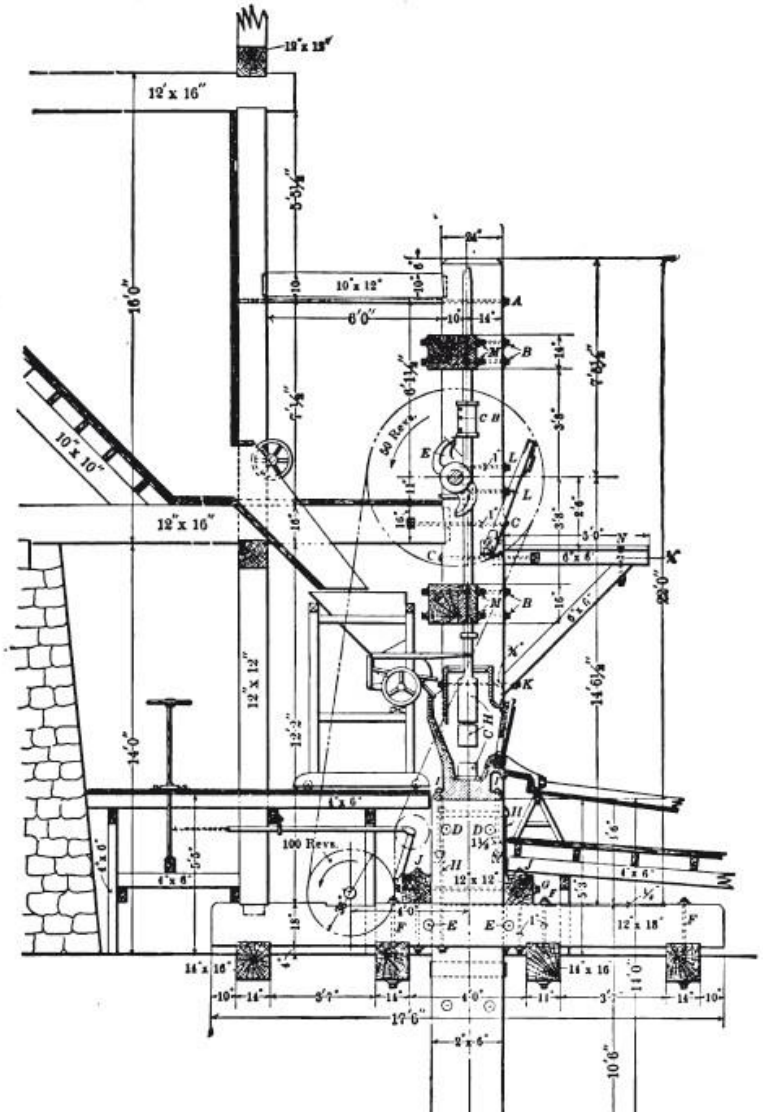


eag1750 www.fotosearch.com

Equipo de pilones

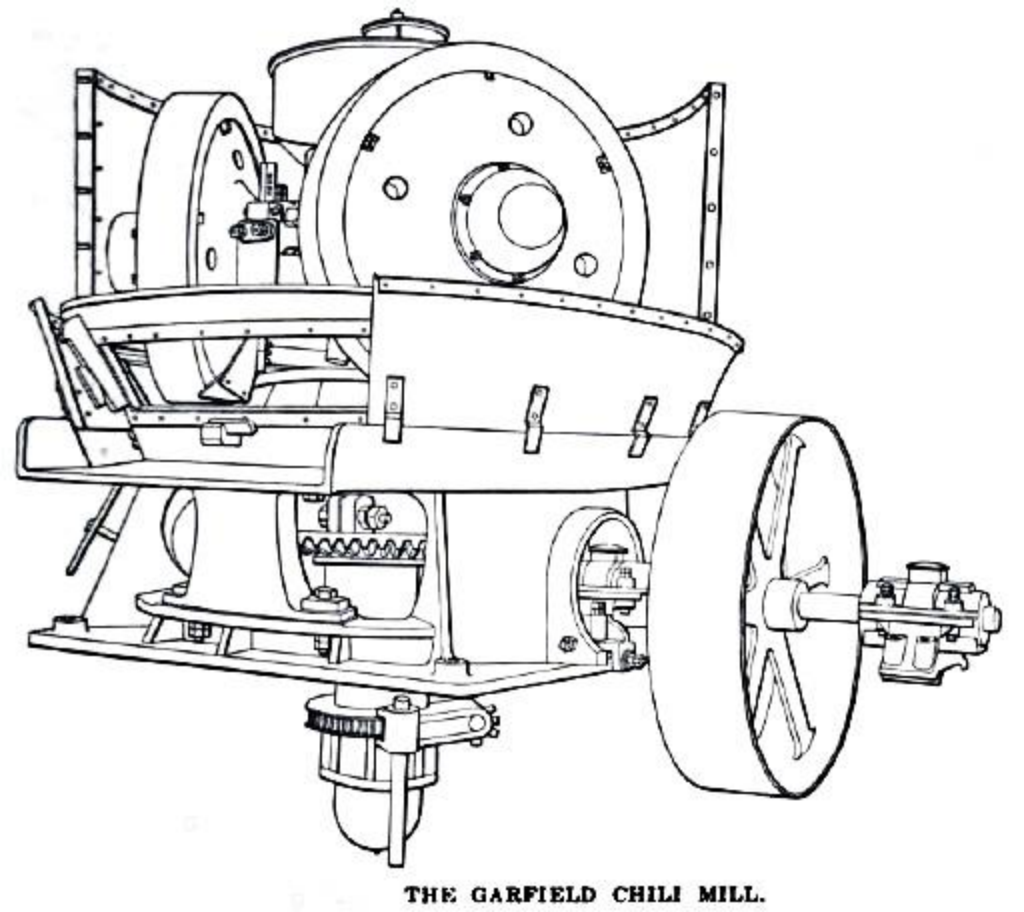
Antecedentes Históricos:





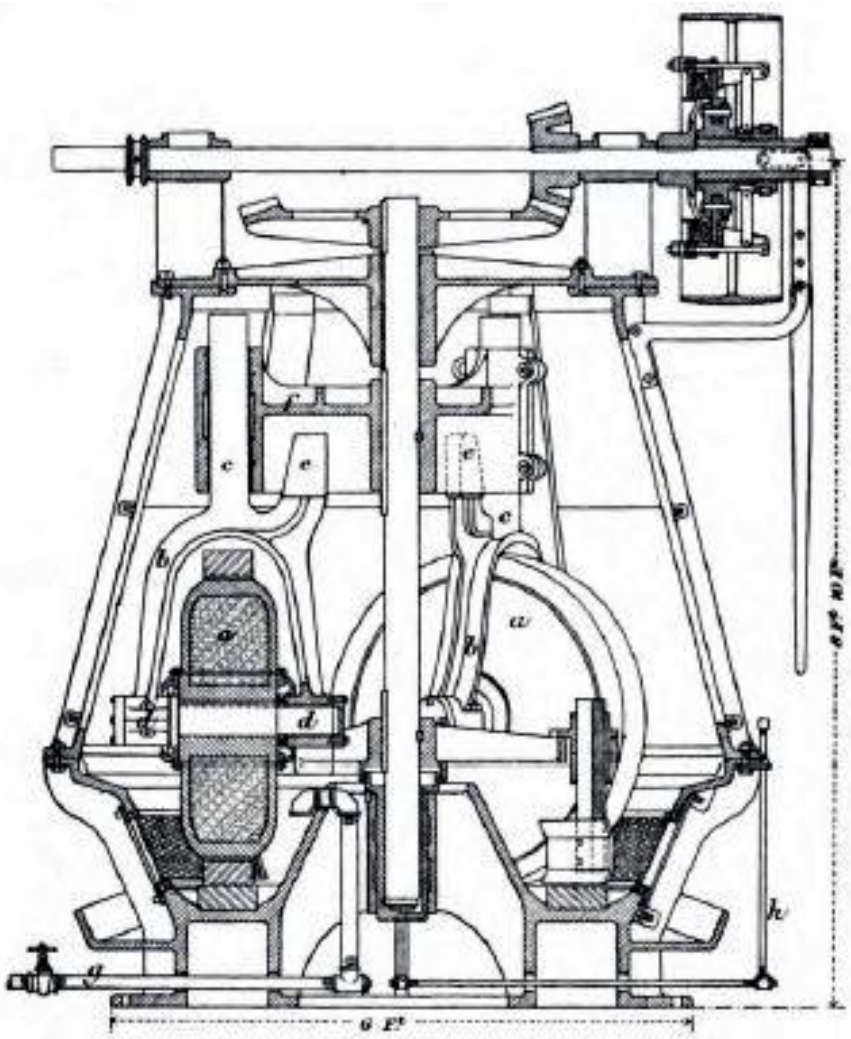
Equipo de pilones

Antecedentes Históricos:



Molino Chileno - Garfield

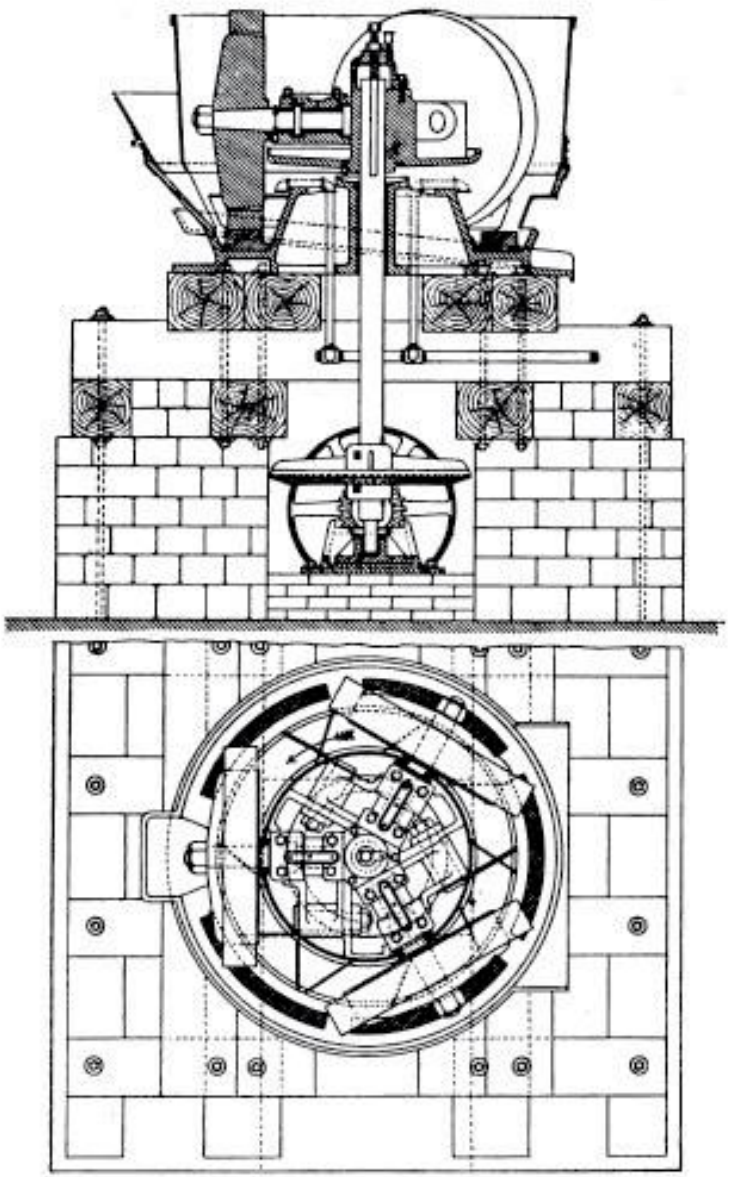
Antecedentes Históricos:



REYNOLDS CHILIAN MILL.

Molino Chileno - Reynolds

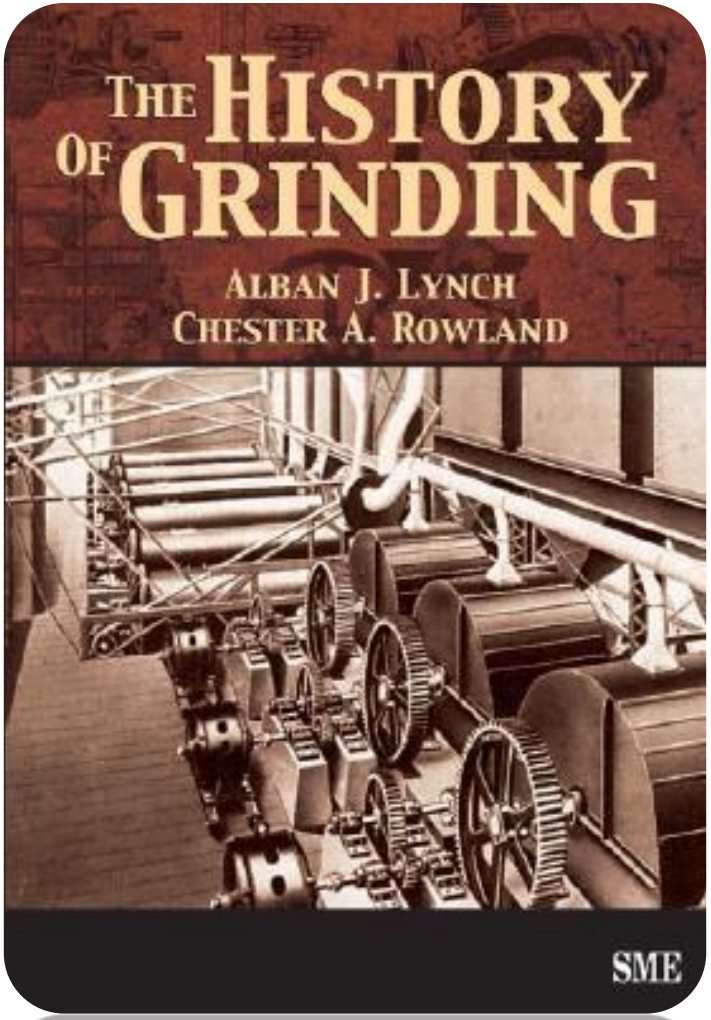
Antecedentes Históricos:



Molino Chileno – Reliance
(vista lateral y superior)

Antecedentes Históricos:

Para saber más……



Consideraciones Previas:

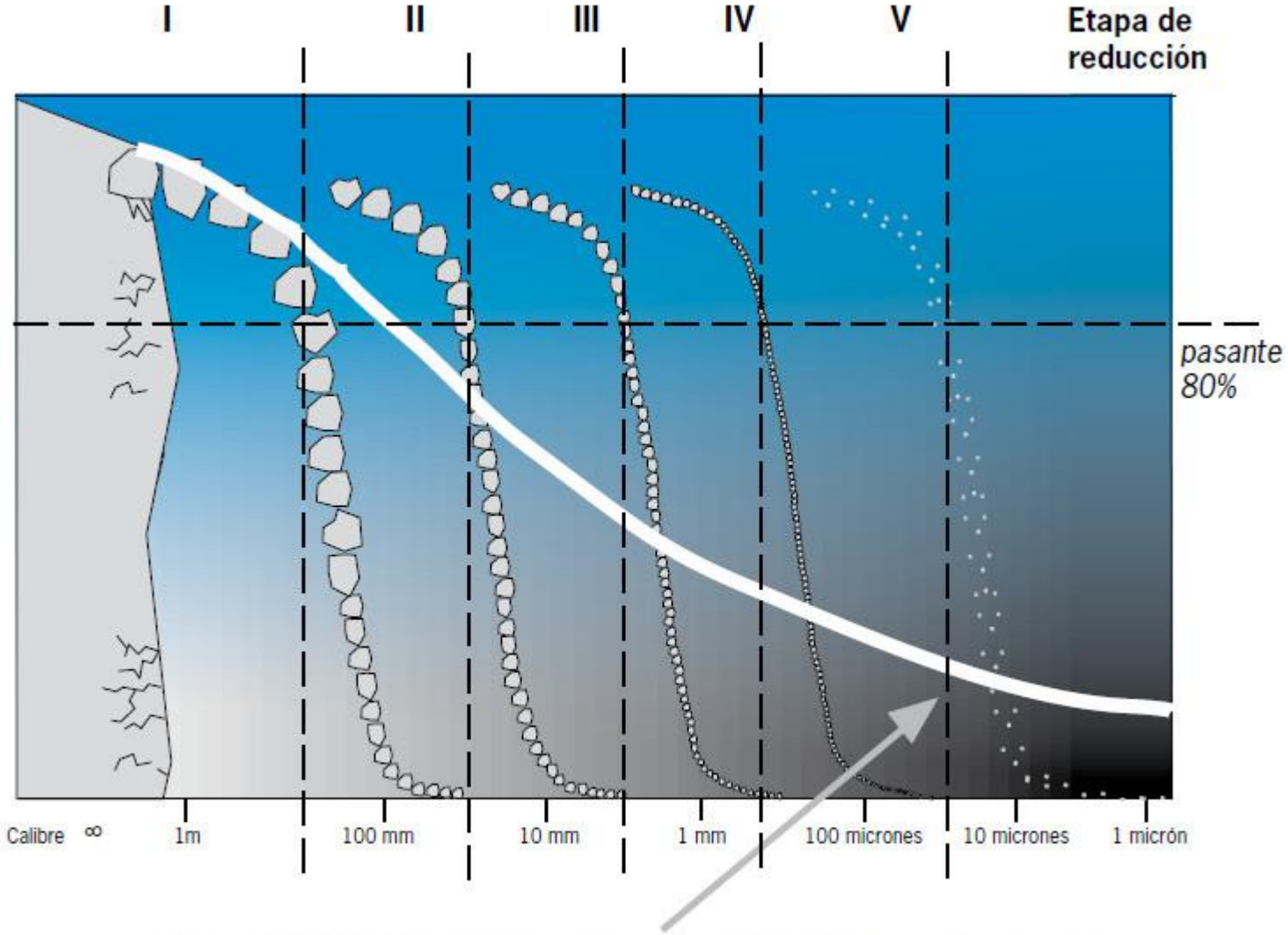
- **Las máquinas de fragmentación pueden reducir todo el material por debajo de una dimensión establecida previamente.**

- **Habrá que prestar atención a las condiciones de trabajo normales de los equipos para evitar la producción de sobremolienda.**

- **En fragmentación el consumo de energía por tonelada tratada aumenta significativamente a medida que disminuye el tamaño de partícula a fragmentar.**

Consideraciones Previas:

Control adecuado del tamaño a través de sucesivas etapas de fragmentación



Comportamiento de minerales en la reducción de tamaño – por naturaleza

Consideraciones Previas:

Coeficiente de Reducción:

- **Indicará el grado de reducción que sufre mineral bajo la acción de una máquina.**

- **Este coeficiente se suele expresar como la relación entre la dimensión de abertura de malla cuadrada que permite el paso del 80% de la alimentación y la dimensión de la malla cuadrada que permite el paso del 80% del producto obtenido por dicha máquina. También se denomina RAZÓN DE REDUCCIÓN del equipo.**

$$\text{Razón de reducción} = \frac{D_{80}}{d_{80}}$$

- **El porcentaje de finos aumenta a medida que aumenta la razón de reducción, por lo que varias trituraciones sucesivas producen menos finos que la trituración en una sola etapa (instalaciones de áridos de cantera). Sin embargo en instalaciones pequeñas se aumenta la razón de reducción de una máquina con el fin de reducir etapas (ahorro en equipos).**

Coeficiente de Reducción:

Etapa de trituración empleando un cono

Coeficiente de Reducción:

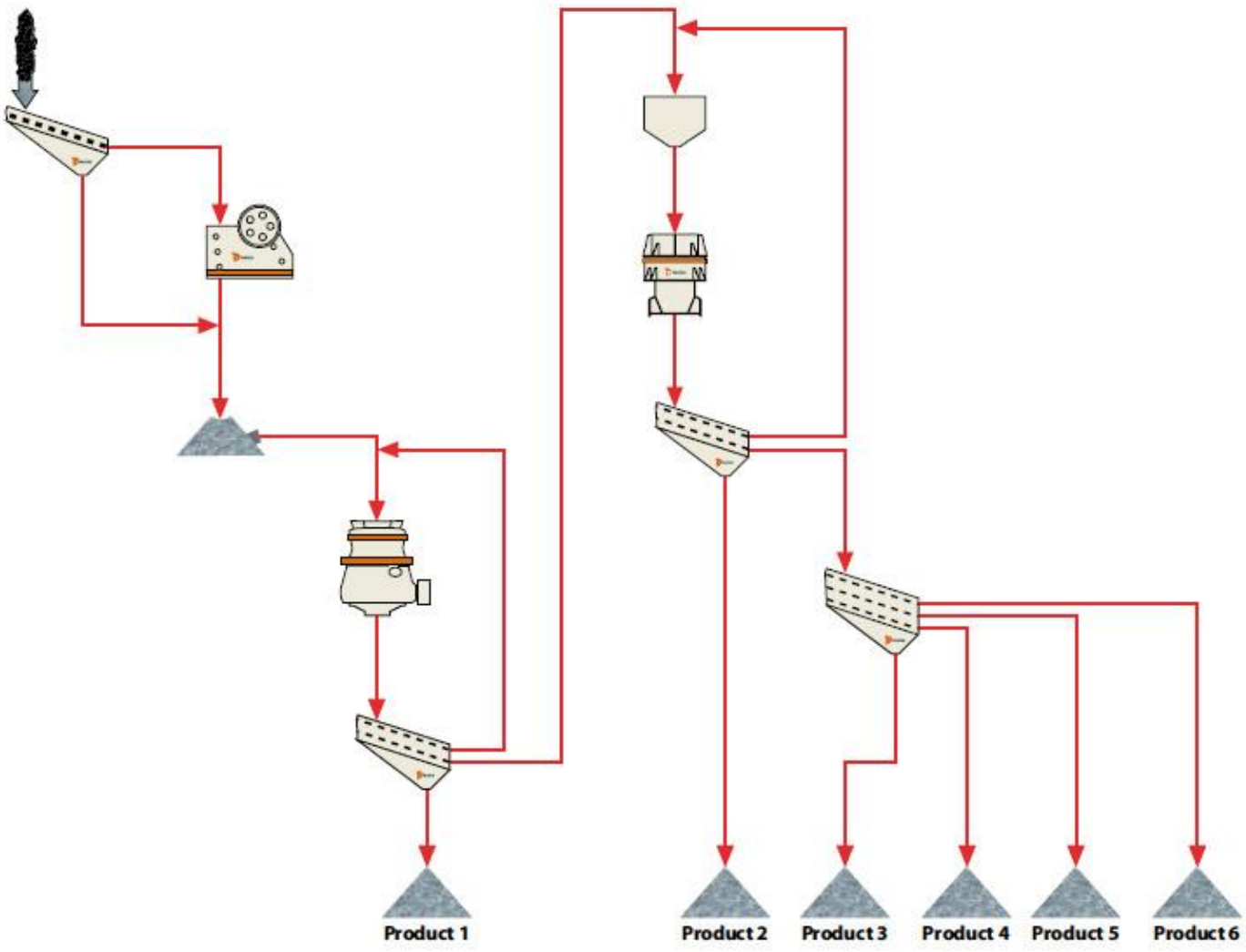


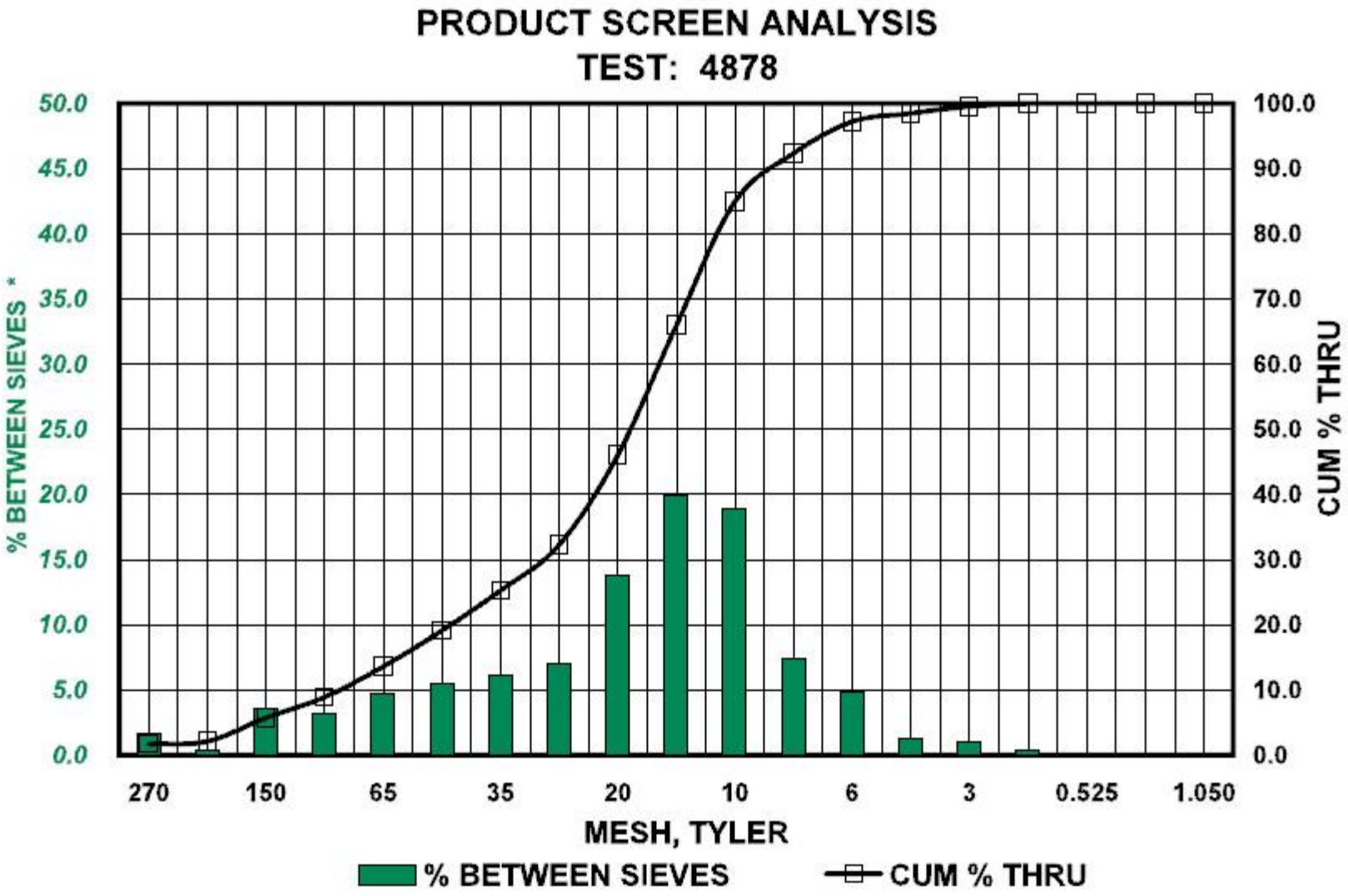
Diagrama de flujo mostrando varias etapas

Coeficiente de Reducción:

¿Cómo se obtiene el D_{80} y el d_{80}?

Coeficiente de Reducción:

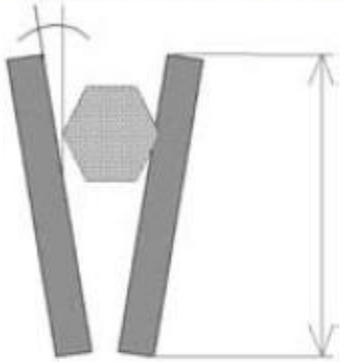
¿Cómo se obtiene el D_{80} y el d_{80}?



Coeficiente de Reducción:

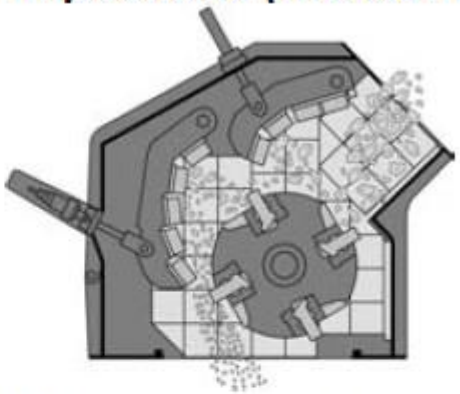
Principales razones de reducción para algunos equipos

Chancadores de compresión



Mandíbula 3-4
Giratorio 3-4
De cono 4-5

Impactores (modelo horizontal)

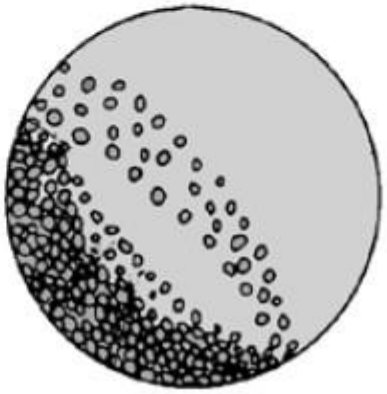


10-15

Impactores (modelo vertical)

3-8

Molinos de (modelo tambor)



Barra 100
Bola 1000
AG & SAG 5000

Nota: chancadores: término sudamericano para designar a los trituradores

Coeficiente de Reducción:

Ejemplo de cálculo de la razón de reducción total para varias etapas

Tamaño de Material de Alimentación:

F_{80} = 400 mm

Roca de voladura, 80% menor tamaño que 400 mm

Tamaño de Producto: P80 = 16 mm

Agregados para camino o alimentación de molino de barra, 80% menor calibre que 16 mm

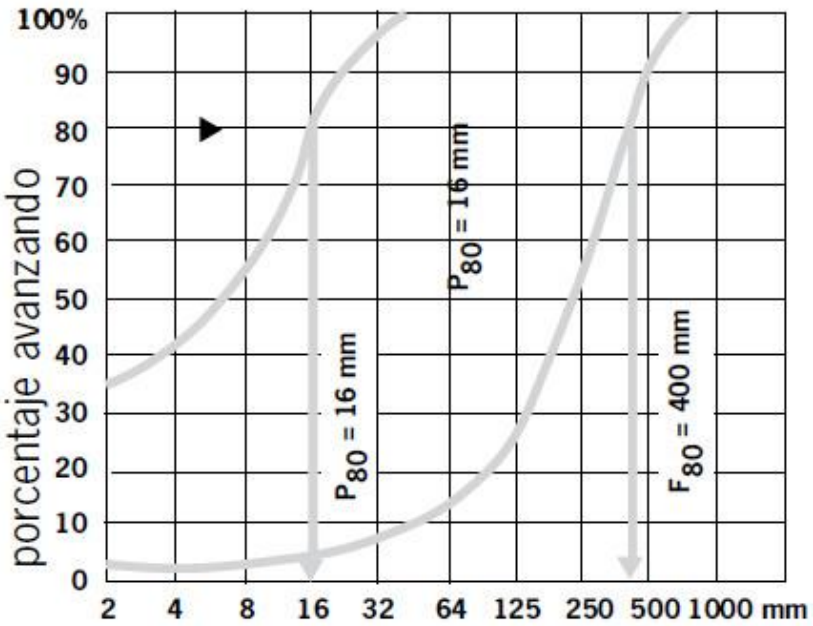
Tasa total de reducción (R) $F_{80}/P/_{80}$ 400/16 = **25**

Tasa de reducción en etapa de reducción primaria R1 = **3**

Tasa de reducción en etapa de reducción secundaria R2 = **4**

El total en 2 etapas de chancado da R1xR2 = 3x4 = **12**

Esto no es suficiente. Necesitamos una tercera etapa de chancado*



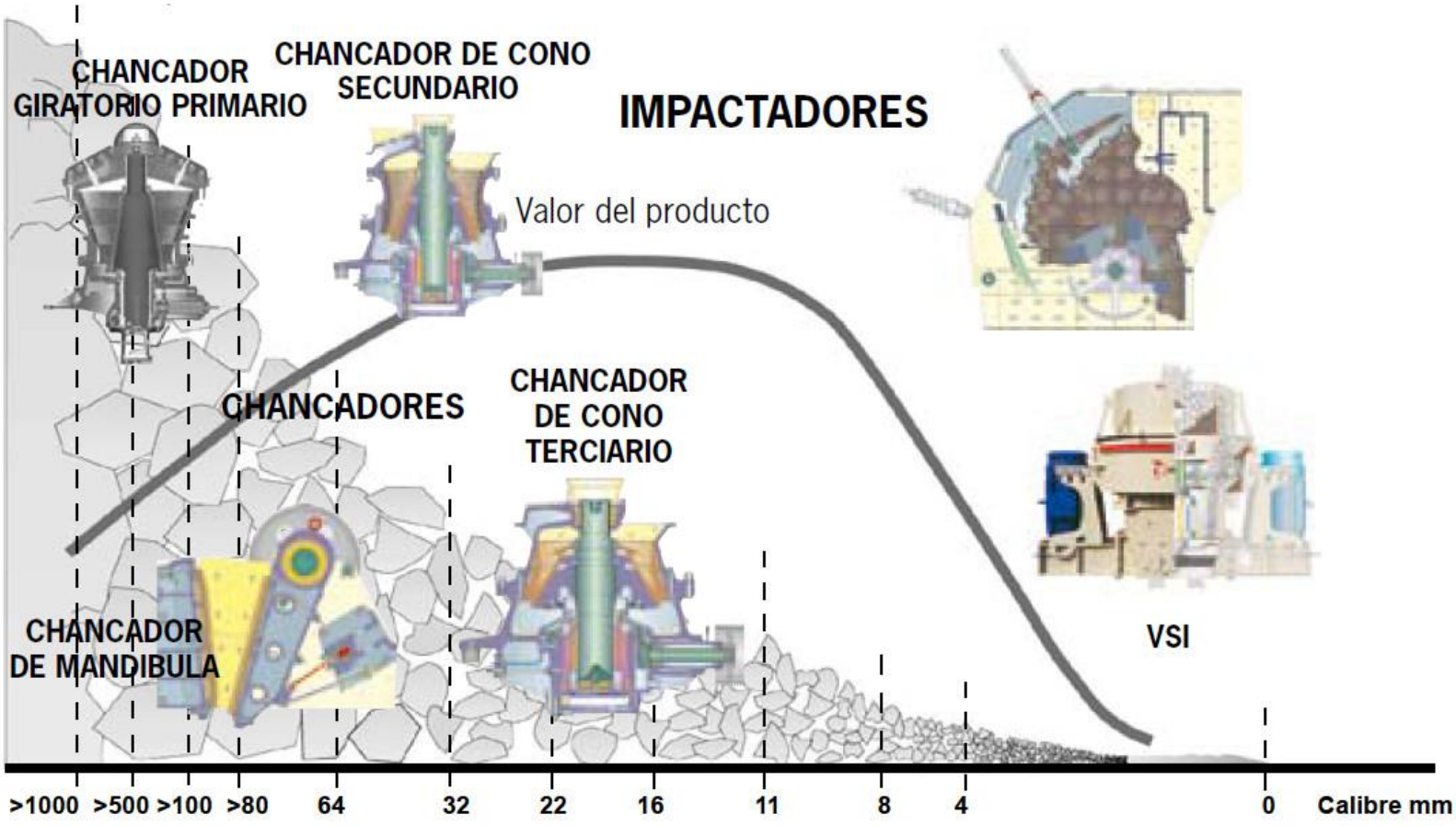
** Ya que debemos usar tres etapas, podemos disminuir un poco la tasa de reducción en cada etapa, dando mayor flexibilidad al circuito!*

Por ejemplo:	Reducción primera etapa	R1 = 3
	Reducción segunda etapa	R2 = 3
	Reducción tercera etapa	R3 = 3

Juntas, estas tres etapas dan R1xR2xR3 =3X3X3= **27** = reducción suficiente

Coeficiente de Reducción:

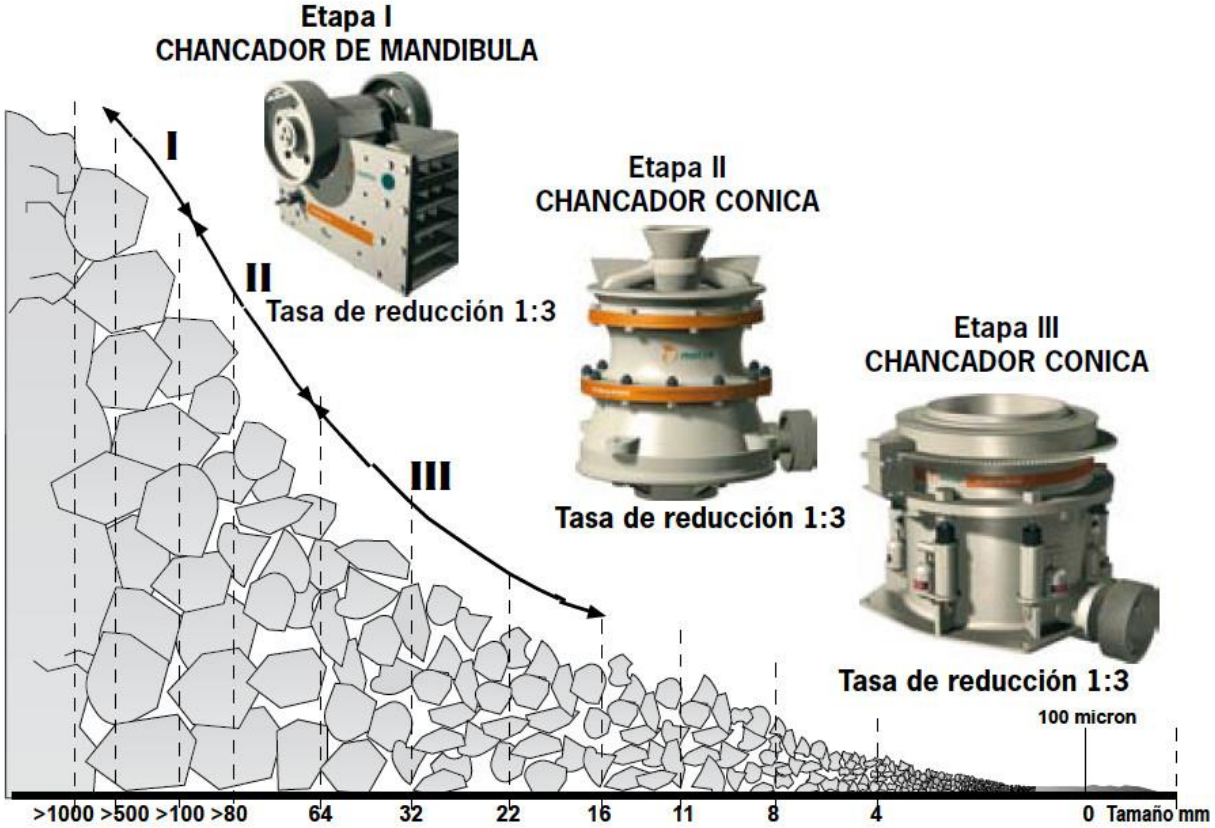
Etapas de fragmentación en relación al tamaño de partícula



Chancador: término sudamericano para designar a los trituradores

Terminología:

- **TRITURACIÓN: Denominación de las primeras etapas de fragmentación.**
- **MOLIENDA o PULVERIZACIÓN: Denominación de las últimas etapas de fragmentación.**
- **FRAGMENTACIÓN O CONMINUCIÓN: Denominación al conjunto de etapas de reducción de tamaño.**



Terminología:

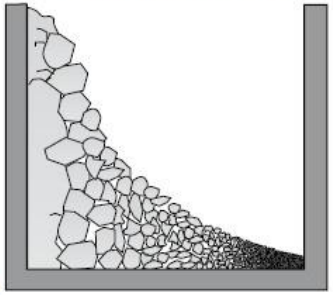
TAMAÑO (1MM = 10^3 μM)		TERMINOLOGÍA		
INICIAL	FINAL	INGLESA	ESPAÑOLA	FRANCESA
∞	1 m ≥	Explosive shattering	Arranque con explosivo	Abattage
1 m	100 mm	Primary Crushing	Trituración Primaria Quebrantado Machaqueo	Concassage Grossier Debitage
100 mm	10 mm	Secondary Crushing	Trituración Secundaria Gravillado	Concassage Fin Granulation
10 mm	1 mm	Coarse Grinding	Molienda Gruesa	Broyage Grossier
1 mm	100 μm	Fine Grinding	Molienda Fina	Broyage Fin (< 500 μm Pulverisation)
100 μm	10 μm	Very Fine Grinding	Molienda Ultrafina (en seco Pulverizado)	Broyage Ultrafin (Pulverization)
10 μm	1 μm	Superfine Grinding	Micronización	Micronization

Terminología:

Tipos de molienda en función del porcentaje de agua contenida en el producto:

- **Molienda por vía seca: Contenido en agua inferior al 2%.**
- **Molienda semi-húmeda: Contenido en agua entre el 2 y el 20%.**
- **Molienda por vía húmeda: Contenido en agua entre el 30 y el 300%.**

Operación – en seco o húmedo?



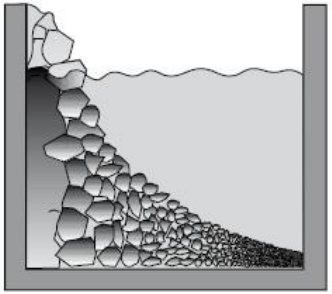
Procesamiento en seco

- Cuando no se necesita agua para procesar
- Cuando no se acepta el agua para procesar

Procesamiento en húmedo

En todos los demás casos debido a:

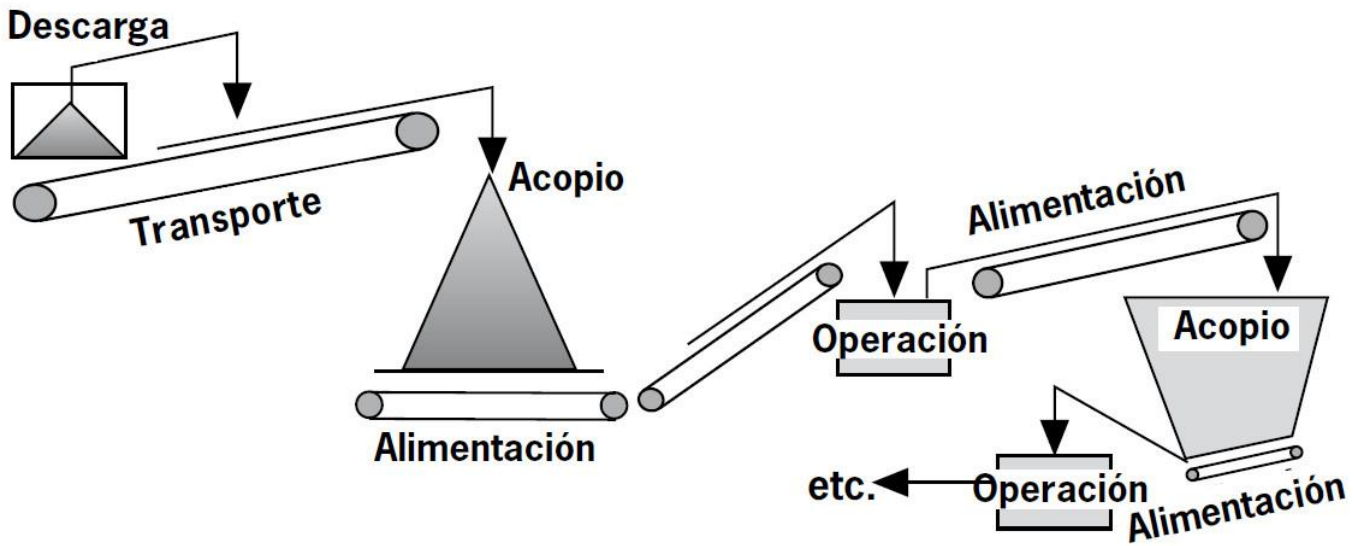
- Mayor eficiencia
- Instalación más compacta
- No hay emisión de polvo



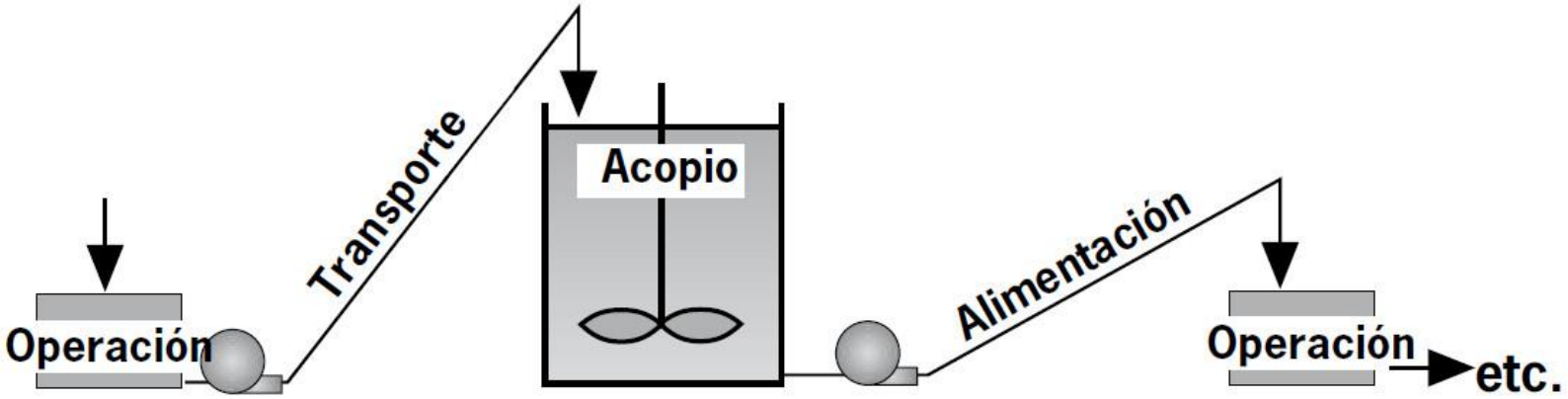
Nota! La tasa de desgaste es generalmente mayor en procesamiento en húmedo

Terminología:

Esquema de una instalación por vía seca:



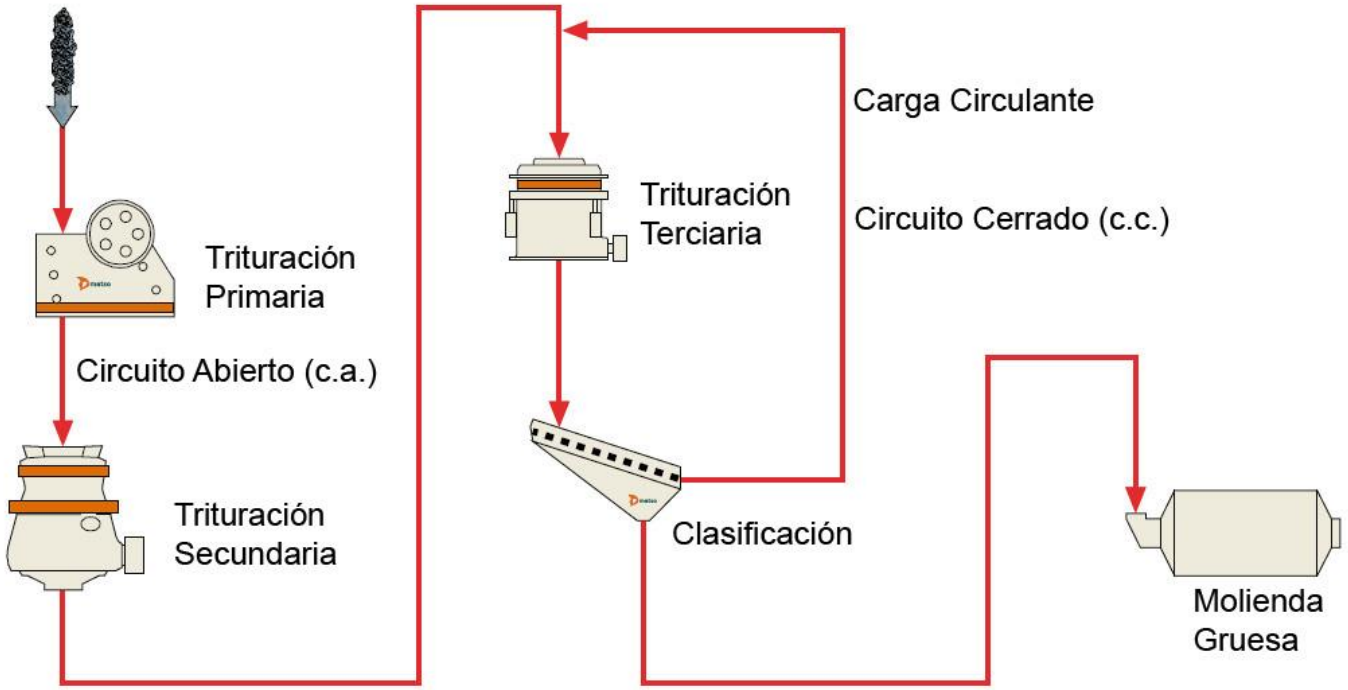
Esquema de una instalación por vía húmeda:



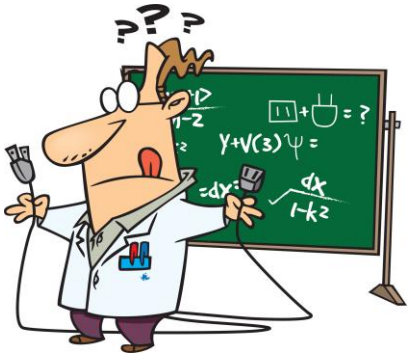
Terminología:

Fragmentación definida en función del tipo de circuito empleado:

- **Circuito abierto: El material pasará una sola vez por el equipo de fragmentación.**
- **Circuito cerrado: Existe un control sobre el tamaño del producto, por lo tanto, aquellos tamaños que no cumplan las exigencias de diámetro serán enviados nuevamente al mismo equipo de fragmentación.**
- **El c.c. tiene mayor capacidad de forzar el aumento de la razón de reducción de un equipo sin la producción excesiva de finos.**



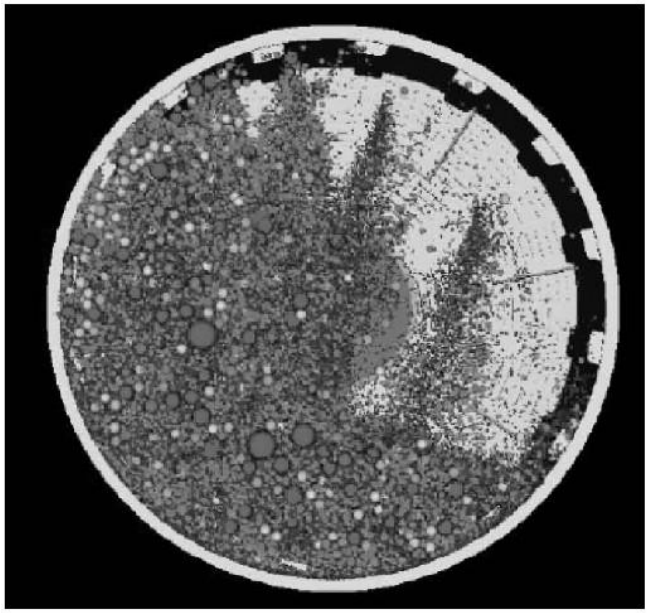
Problemas Teóricos:

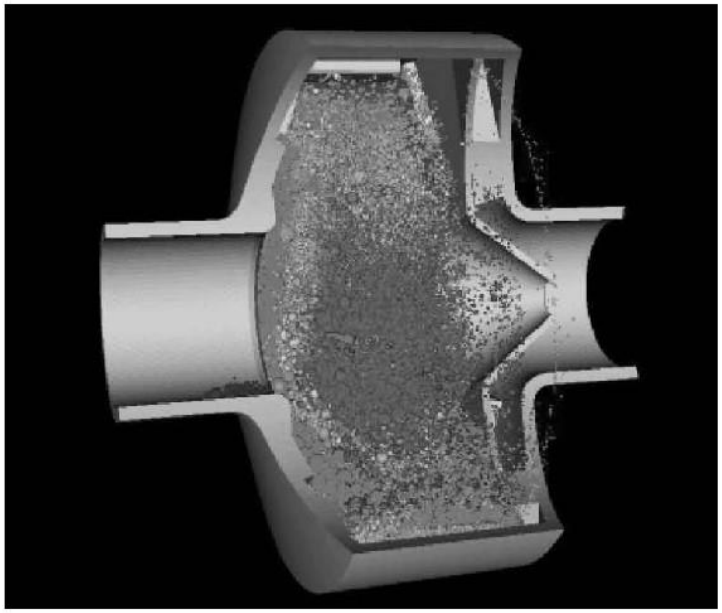


- **Investigadores en diferentes disciplinas llevan conjuntamente más de un siglo estudiando los mecanismos que regulan el fenómeno de la fragmentación.**

- **En los primeros estudios se tenía en cuenta el concepto de energía de superficie, base de las teorías clásicas de fragmentación.**

- **Actualmente, se hacen intervenir otras variables como el tiempo, la temperatura, el estado físico-químico, etc. La fragmentación se trata como un proceso cinético.**





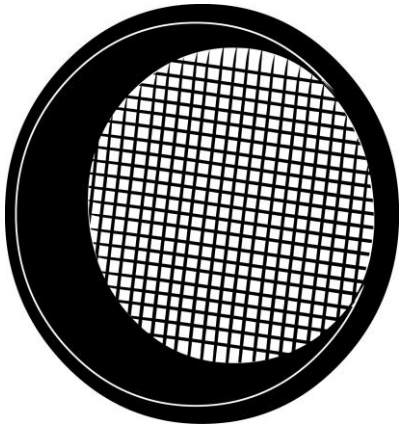
Leyes de la Distribución Granulométrica:

A través de experimentación se ha llegado a algunas conclusiones, que por otro lado son obvias:

- **Es imposible obtener partículas con tamaños iguales y uniformes por medio de la trituración.**

- **La trituración permitirá obtener un producto cuya dimensión máxima no sobrepase un tamaño previamente establecido. No obstante, el producto se caracterizará por una amplia gama de tamaños por debajo de dicho tamaño pre-establecido.**

- **El análisis granulométrico nos va a proporcionar la dimensión media geométrica, a través de la cual se obtiene la razón de reducción de la unidad de trituración.**



Curvas Granulométricas:

- **Las curvas granulométricas son gráficas donde en ordenadas se representan los valores de los porcentajes acumulados de paso (o de rechazo) de un material cuyas partículas tienen una dimensión mayor (o menor) a la dimensión dada en abscisa para ese porcentaje.**

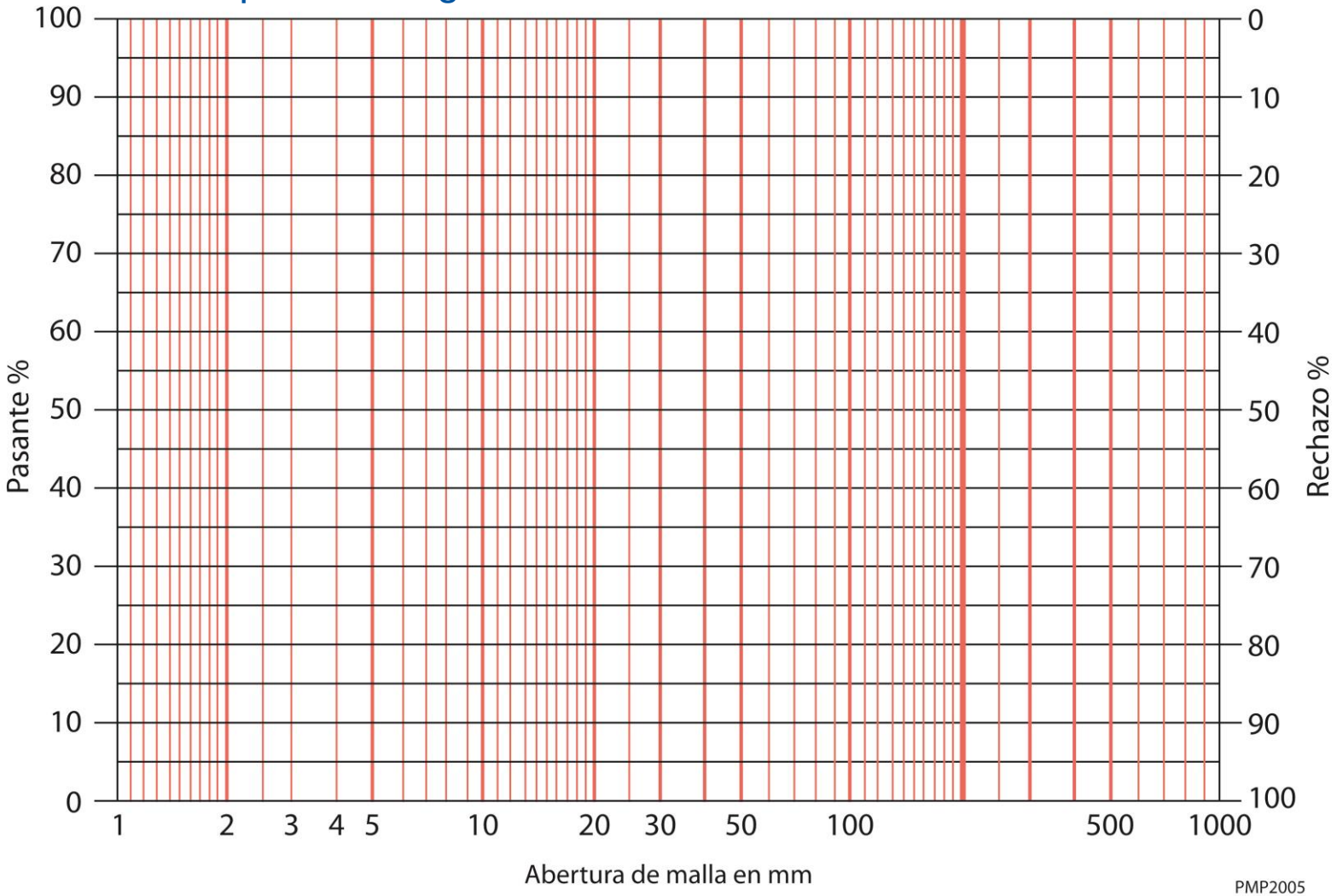
- **Las curvas granulométricas se aproximan a un recta, que pasa por el origen, sobre todo en el tramo comprendido entre 0 y 85%.**

Resultados típicos obtenidos en un ensayo granulométrico

(1) *Sieve size range* (μm)	(2) *Sieve fractions*	(3)	(4) *Nominal aperture size* (μm)	(5) *Cumulative %*	(6)
	wt (g)	*wt %*		*undersize*	*oversize*
+250	0.02	0.1	250	99.9	0.1
−250 to +180	1.32	2.9	180	97.0	3.0
−180 to +125	4.23	9.5	125	87.5	12.5
−125 to +90	9.44	21.2	90	66.3	33.7
−90 to +63	13.10	29.4	63	36.9	63.1
−63 to +45	11.56	26.0	45	10.9	89.1
−45	4.87	10.9			

Curvas Granulométricas:

Papel semi-logarítmico:

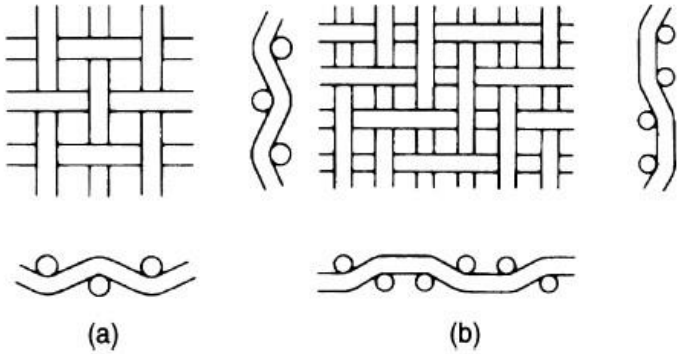


Ejemplo de hoja para representación de una distribución granulométrica

Curvas Granulométricas:

BSS 1796 wire-mesh sieves

Mesh number	*Nominal aperture size* (μm)	*Mesh number*	*Nominal aperture size* (μm)
3	5600	36	425
3.5	4750	44	355
4	4000	52	300
5	3350	60	250
6	2800	72	212
7	2360	85	180
8	2000	100	150
10	1700	120	125
12	1400	150	106
14	1180	170	90
16	1000	200	75
18	850	240	63
22	710	300	53
25	600	350	45
30	500	400	38



Weaves of wire cloth: (a) plain weave, (b) twilled weave

Números de malla para diferentes tamices empleados en ensayos granulométricos (British Standard Series)

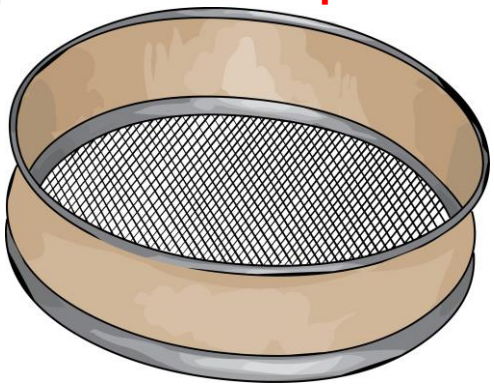
Curvas Granulométricas:

A.M. Gaudin, a través de una serie de estudios llegó a las siguientes conclusiones, reflejadas en las curvas granulométricas:

- **El porcentaje de finos aumenta a medida que aumenta la razón de reducción. Varias trituraciones sucesivas darán en total menos sobremolienda que trituración equivalente de una sola etapa de trituración.**

- **La trituración de fragmentos planos da lugar proporcionalmente a más finos que la trituración de fragmentos regulares.**

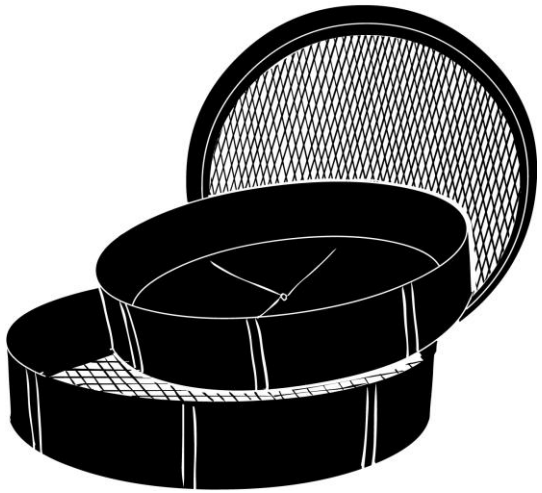
- **La forma media de las partículas trituradas varía con su situación en la escala de tamizado. Así, las partículas más gruesas presentan formas alargadas, las partículas de dimensión intermedia presentan formas cúbicas, y las partículas finas presentan formas alargadas y planas.**



Curvas Granulométricas:

- **La trituración de rocas homogéneas en equipos con excesiva razón de reducción dará un producto con un porcentaje elevado de partículas gruesas con ángulos redondeados y un cierto porcentaje de partículas finas, sin embargo, habrá una ausencia de partículas de tamaños intermedios.**

- **Por otro lado, la trituración de rocas con comportamiento heterogéneo favorece la producción de un mayor porcentaje de tamaños intermedios, en relación al producto obtenido, bajo las mismas condiciones, para una roca homogénea.**



Leyes Granulométricas:

Analizando las curvas granulométrica de los materiales fragmentados, se observan ciertas analogías entre ellas:

Se establecen leyes granulométricas que representen, de la forma más adecuada posible, los tamaños obtenidos durante los procesos de trituración y molienda.

Generalmente las curvas de porcentajes acumulados de paso (o de retenido), presentan una forma en S (escala lineal), generándose una acumulación muy próxima de datos en los extremos; esto hace difícil llevar un análisis claro en estos extremos.

Hay dos métodos principales de representar la distribución de tamaños de partícula de una manera no uniforme mediante el empleo de ecuaciones

Estos métodos intentan expandir ciertas regiones de la curva granulométrica y contraer otras.

Método Gates-Gaudin-Schuhmann:

Emplea papel log-log para representar los datos de porcentajes acumulados de paso frente a tamaño de partícula.

La curva que produce este método se aproxima a una línea recta en la mayor parte de la gráfica. Principalmente en la región de los tamaños más finos.

Este método permite la interpolación de los valores de una manera más fácil, que en el caso de gráficas en forma de curva (escala aritmética): Necesidad de menos tamices para los ensayos granulométricos.

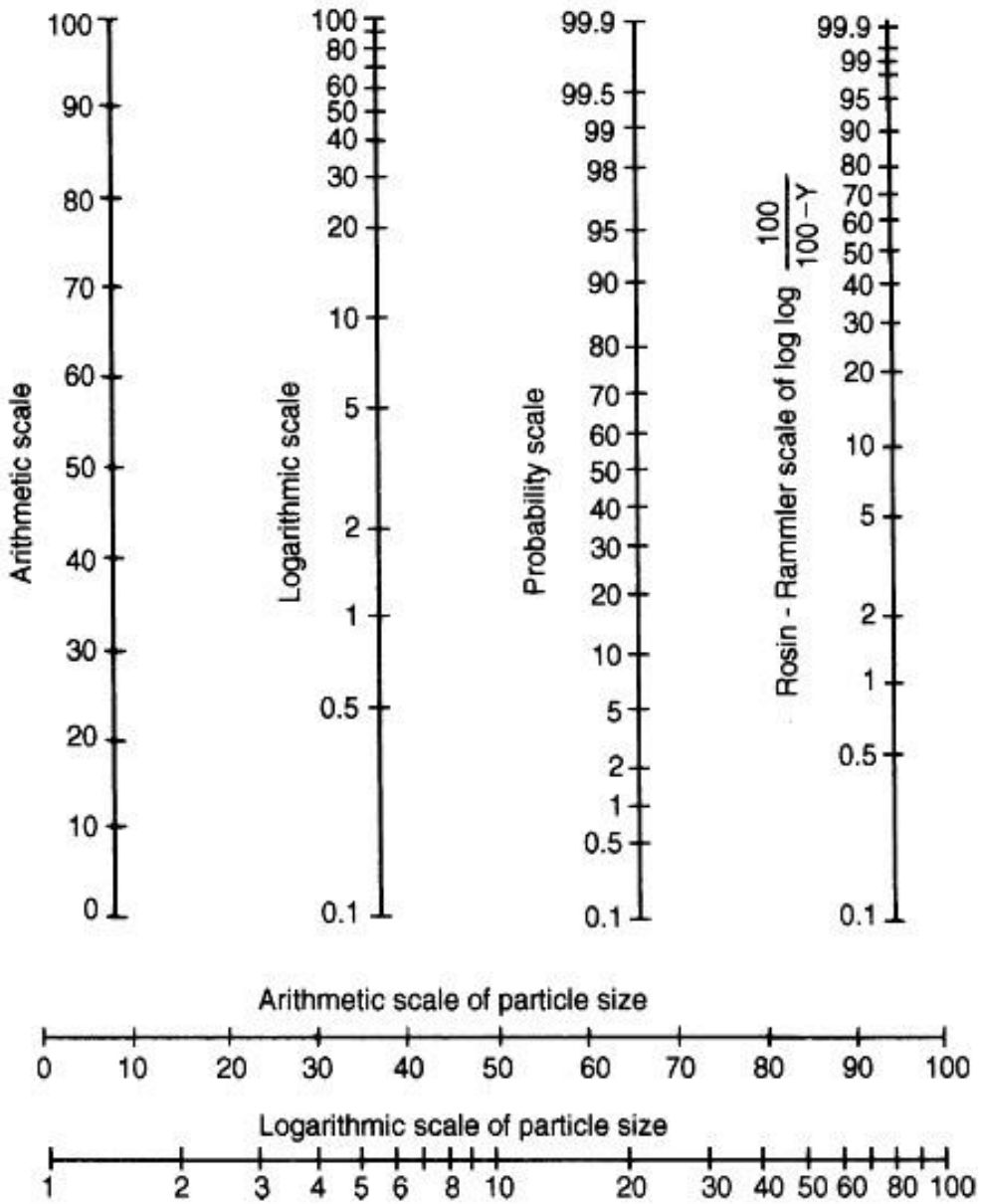
Este método expande de forma significativa la región por debajo del 50% de paso, y especialmente por debajo del 25%.

Por otro lado, la región por encima del 50% la contrae de forma importante (especialmente, a partir del 75%). (ver siguiente Figura)

Lo anterior es su principal desventaja.

Este método es el preferido en aplicaciones relacionadas con el procesamiento de minerales.

Método Gates-Gaudin-Schuhmann:



Comparación de escalas

Método Gates-Gaudin-Schuhmann:

Ecuación empleada en este método:

$$W_d = 100 \cdot \left(\frac{d}{k_{100}} \right)^{\alpha}$$

Siendo:

W_d = El porcentaje de material que pasa por la malla de abertura d (mm).

k_{100} = D_{100} = Abertura de la malla por la que pasa el 100 % del material.

Pendiente α de la recta

Método Rosin-Rammler:

Emplea papel log-log para representar los datos de porcentajes acumulados de paso frente a tamaño de partícula.

Este método se emplea sobre todo para representar los productos obtenidos en molinos de bolas, ya que obedecen a la siguiente ecuación:

$$100 - P = 100 \exp(bd^n)$$

Donde, *P* el porcentaje de paso, *b* y *n* son constantes, y *d* es el tamaño de partícula.

Lo anterior puede ser reescrito como:

$$\log\left[\ln \frac{100}{100 - P}\right] = \log b + n \log d$$

Así, la gráfica tendría en ordenadas valores de ln[100/(*P*-100)] frente a los valores de tamaño de partículas en abscisas.

Método Rosin-Rammler:

Este método expande la región por debajo del 25% y por encima del 75% y contrae la región entre el 30% y el 60%.

Es un método tedioso cuando la escala de los ejes se tiene que realizar a mano. Sin embargo con el uso de hojas de cálculo se facilita esta tarea.

Es un método que se adapta bien para el seguimiento de las operaciones de molienda y es el mejor método para las operaciones de procesamiento de minerales.

Otras técnicas:

El tamizado raramente se realiza de manera rutinaria para tamaños inferiores a 38 µm.

Para tamaños inferiores al anterior valor se emplean otros métodos de ensayo granulométrico como: sedimentación, elutriación, uso del microscopio y difracción por laser.

Method	*Wet or dry*	*Fractionated sample?*	*Approx. useful size range* (microns)*
Test sieving	Both	Yes	5–100,000
Laser diffraction	Both	No	0.1–2,000
Optical microscopy	Dry	No	0.2–50
Electron microscopy	Dry	No	0.005–100
Elutriation (cyclosizer)	Wet	Yes	5–45
Sedimentation (gravity)	Wet	Yes	1–40
Sedimentation (centrifuge)	Wet	Yes	0.05–5

* A micron (µm) is 10^{-6} m

Principales métodos de análisis de partículas

Leyes Energéticas:

LEY DE RITTINGER

Según esta ley, "**El área de la nueva superficie producida por el nuevo machaqueo o molienda es directamente proporcional al trabajo útil consumido**", es decir el trabajo de fragmentación es proporcional a la suma de las nuevas superficies producidas.

Matemáticamente se expresa:

$$W = K \cdot \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right)$$

W = Energía consumida en la operación.

d (D) = Dimensión de las partículas después (antes) de la reducción.

K = Coeficiente.

Esta ley <u>sólo</u> es aplicable a la fragmentación de partículas **<u>Finas</u>** ($D < 74\ \mu m$).

Leyes Energéticas:

LEY DE KICK.

Esta ley dice que "**El trabajo requerido es directamente proporcional a la reducción de volumen entre las partículas antes y después de la operación de fragmentación o molienda**", es decir proporcional a la variación de volumen de las partículas.

Matemáticamente se expresa:

$$W = K' \cdot \log\left(\frac{D_{80}}{d_{80}}\right)$$

W = Energía consumida en la operación.
d_{80} = Dimensión de abertura de malla por la que pasa el 80 % del material fragmentado.
D_{80} = Dimensión de abertura de malla por la que pasa el 80 % del material de alimentación.

Esta ley <u>sólo</u> es aplicable a la fragmentación de partículas **<u>Gruesas</u>** (d_{80} > 10 cm).

Leyes Energéticas:

LEY DE BOND (1951)

Esta ley dice que "**El trabajo consumido es proporcional a la nueva longitud de fisura producida por la rotura de las partículas**", ya que una vez creada la fisura la roca parte.

La expresión matemática de dicha ley es:

$$W = 10 \cdot w_i \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right) \quad \left(\frac{kW-h}{sht}\right)$$

W = Trabajo consumido en la operación.
w_i = Índice de Bond (work-index).
d_{80}, D_{80} = (μm)
1 sht = 0.907 ton

Índice de Bond: Se define como el nº de kW/h, por tonelada corta, necesarios para reducir un material de dimensión infinita (teóricamente) a un tamaño d_{80} de 100 μm. Este índice nos indica la capacidad de los materiales de ser fragmentados y se obtiene a través de ensayos sobre muestras.

Esta ley cubre de forma adecuada el vacío de las otras leyes (d > 74 μm, D < 10 cm).

Indice de Trabajo de Impacto W_i

Material	Valor W_i
Basalto	20 ± 4
Diabasa	19 ± 4
Dolomita	12 ± 3
Min. de Hierro Hematita	11 ± 3
Min. de Hierro Magnetita	8 ± 3
Gabro	20 ± 3
Gneiss	16 ± 4
Granito	16 ± 6
Vacía gris	18 ± 3
Caliza	12 ± 3
Cuarcita	16 ± 3
Porfirio	18 ± 3
Arenisca	10 ± 3
Sienita	19 ± 4

Nota: si w_i se da en kWh/t, no hace falta dividir por 0.907 para obtener W en KWh/t.

Leyes Energéticas:

LEY DE CHARLES.

Charles intentó unificar las leyes descritas anteriormente en una ley cuya expresión matemática es la que exponemos a continuación:

$$dW = -C \cdot \frac{dx}{x^n}$$

Donde:

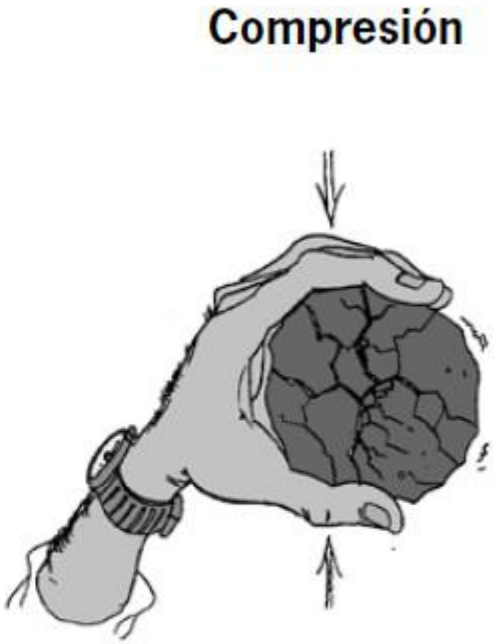
dW= Variación de energía consumida en la conminución.
C = Constante.
dx= Variación de dimensión que necesita un trabajo dW por unidad de volumen.
x = Dimensión del bloque.
n = Constante, función de la forma de machaqueo. ensayos sobre muestras.

Dando valores a ***n***, tenemos:

- n = 1 ⇒ Ley de Kick.
- n = 2 ⇒ Ley de Rittinger.
- n = 3/2 ⇒ Ley de Bond.

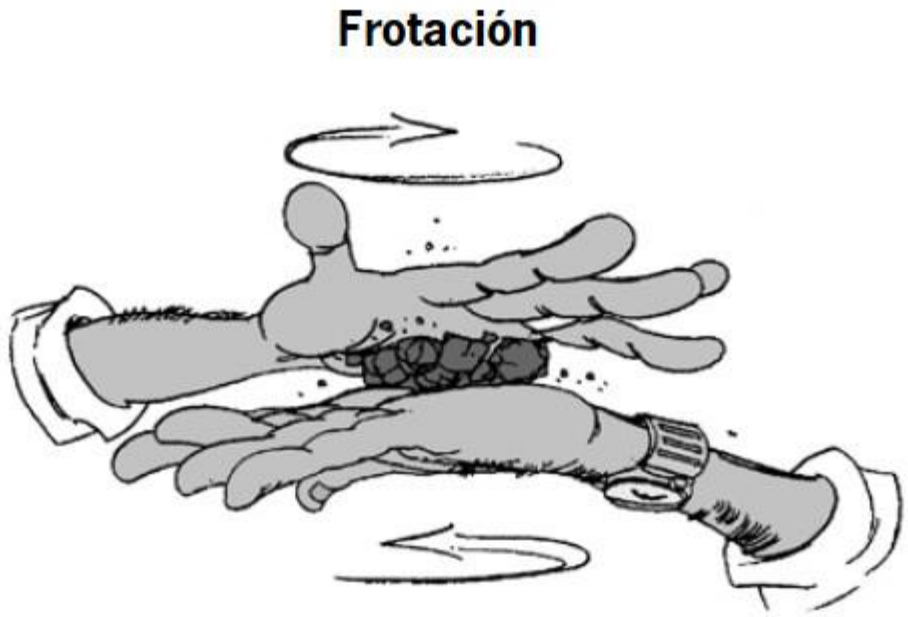
Máquinas de Fragmentación:

Equipos que actúan por compresión, o aplastamiento: Machacadoras de mandíbulas, Giratorios y Molinos de cilindros.



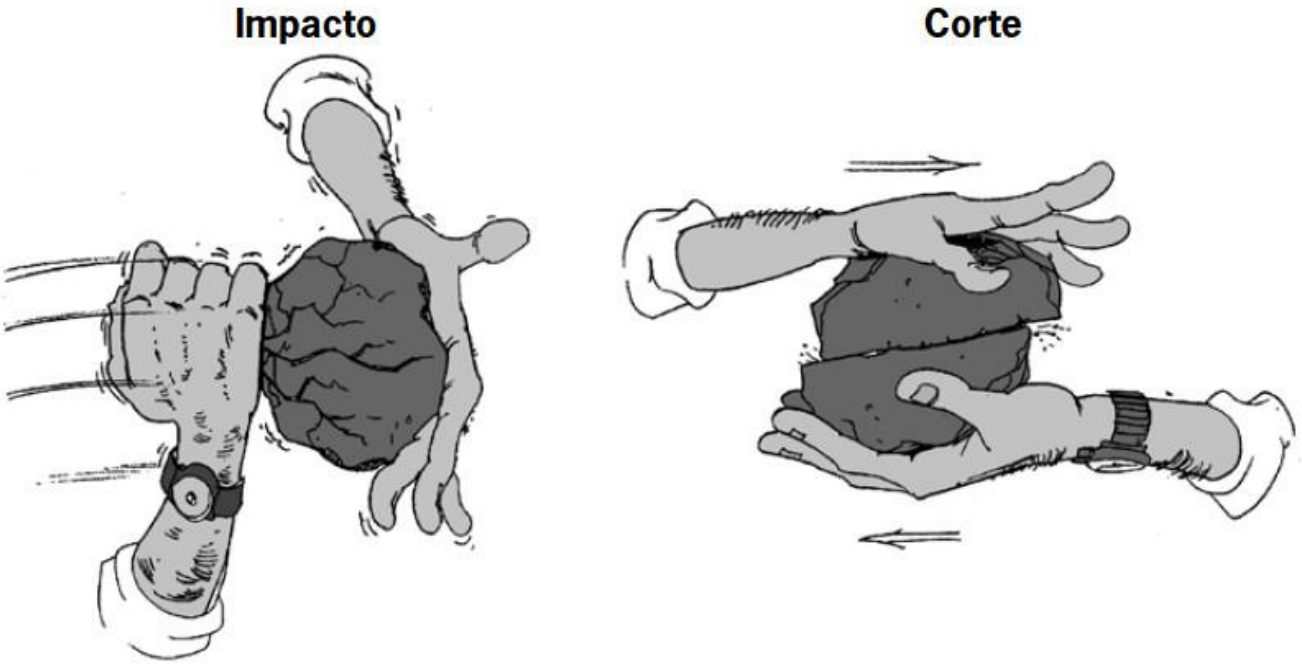
Máquinas de Fragmentación:

Equipos que actúan por fricción o frotamiento:
Molinos de muelas y vibrantes.

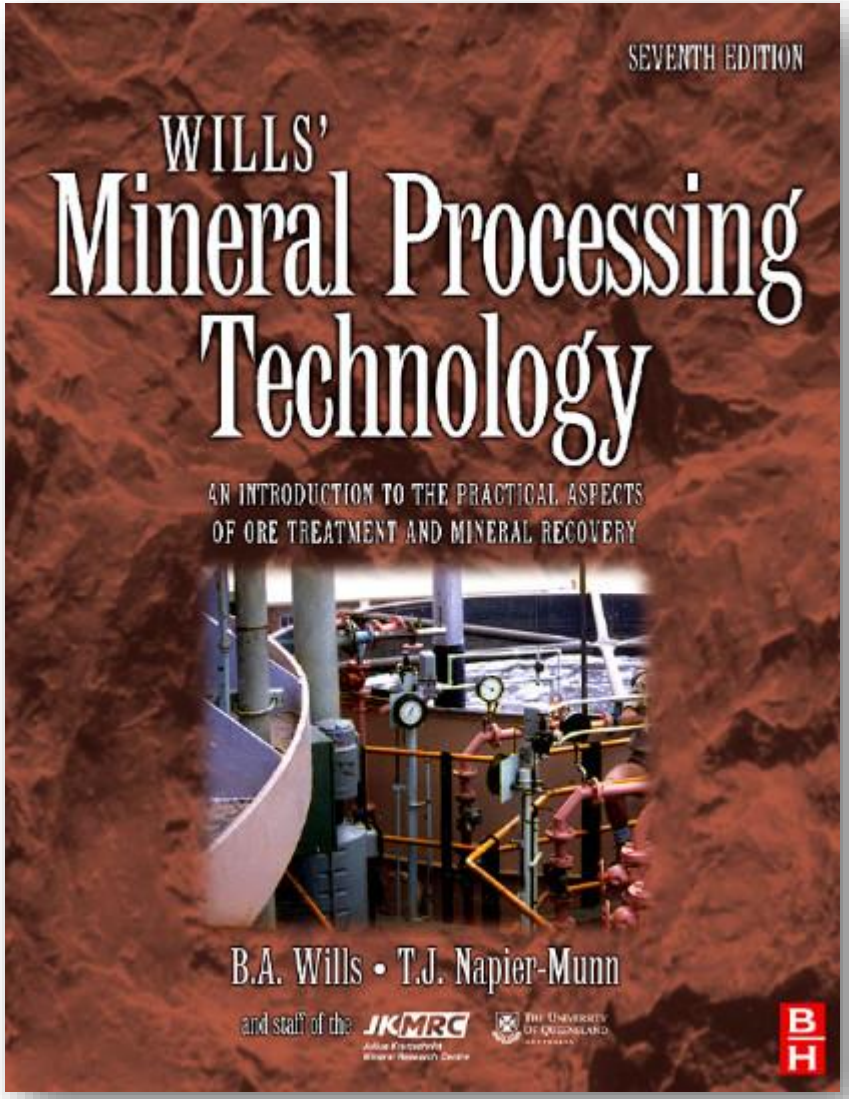
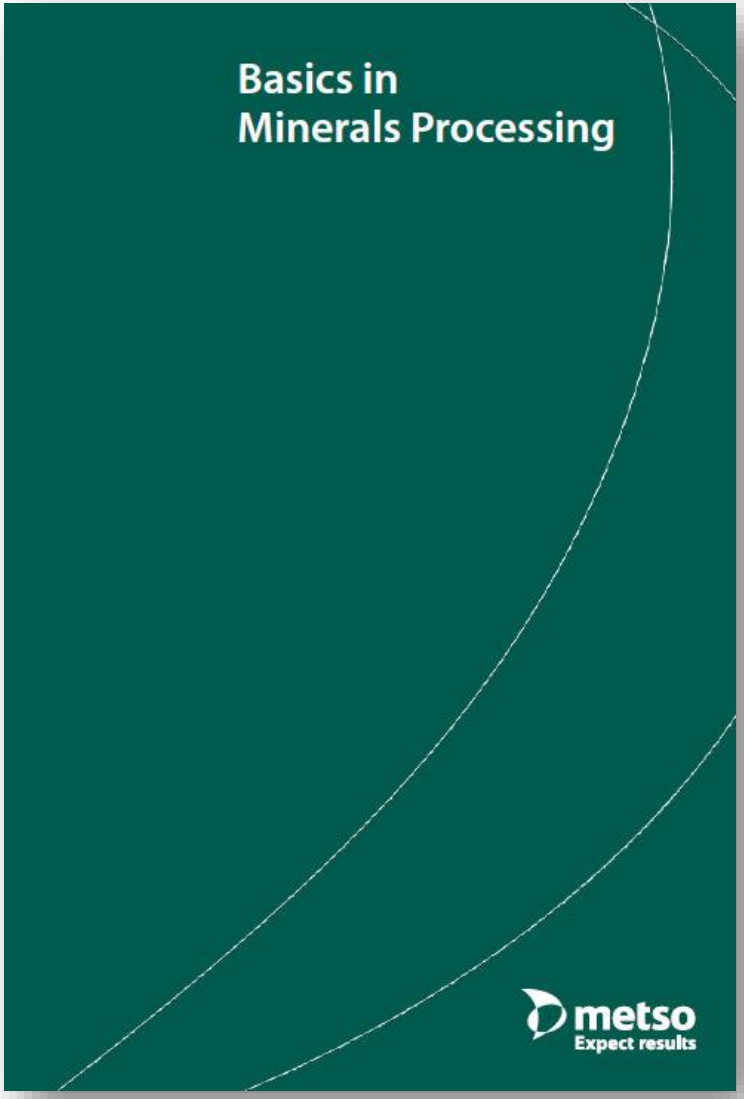


Máquinas de Fragmentación:

Equipos que actúan por percusión:
Molinos de impactos, de martillos y los de toberas.



Equipos mixtos:
Molinos de barras, autógenos, etc.

Referencias:

Para saber más....