

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 2: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. INTRODUCCIÓN.

TEMA 2: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. INTRODUCCIÓN

2.1. 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, por lo que será necesario procesarlo por medios físicos.

Uno de estos procesos previos es la fragmentación:

Fragmentación o Conminución: Es la acción de fragmentar o disminuir el tamaño de un determinado material, y agrupa a un conjunto de operaciones cuyo objetivo es realizar la división de cuerpos sólidos por medio de acciones físicas externas.

Lo anterior se refiere a la reducción de un cuerpo o varios cuerpos en fragmentos de dimensión previamente establecida; o bien a la reducción de un conjunto sólido, ya fragmentado, a elementos de volumen más pequeños.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 2: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. INTRODUCCIÓN.

Finalidad de las Operaciones de Fragmentación:

Los objetivos de la fragmentación serán principalmente los siguientes:

- ⇒ **Liberación de especies** (mena y ganga).
- ⇒ **Obtener una reducción final del material que facilite el transporte y/o el tratamiento** (p.e.: manejo del material a través de cintas transportadoras).
- ⇒ **Facilitar operaciones puramente físicas** (distribución, dosificación, mezcla, aglomeración, etc.).
- ⇒ **Facilitar 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).
- ⇒ **Concentración del mineral** (p.e.: a través de la clasificación directa).

El conocimiento de lo anterior nos permitirá decidir sobre la maquinaria y el tipo de proceso más idóneos.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 2: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. INTRODUCCIÓN.

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.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 2: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. INTRODUCCIÓN.

2.2. Antecedentes históricos.

- **Tiempos prehistóricos** (origen de la civilización): ya existían este tipo de técnicas (p.e.: muela para aplastar el grano).
- **Siglo XV-XVI:** Aparecen las **baterías de pilones** o **bocartes** movidos por ejes de levas y accionados por energía hidráulica, así como el **molino chileno**.
- **A mediados del siglo XIX:** Aparece la máquina de vapor y da lugar a la aparición de las máquinas de romper piedras (máquinas de martillos móviles o de percusión) de forma simultánea tanto en EEUU como en Europa.
- **Hasta 1925:** Evoluciona sólo el machaqueo primario, construyéndose máquinas cada vez más grandes.
- **A partir de 1925:** Comienzan a desarrollarse equipos para trituración secundaria, molienda, etc. A través de los conos Symos y los molinos.
- **En la actualidad:** El proceso es totalmente continuo, disponiendo de una gran variedad de equipos, muy desarrollados técnicamente, y que iremos viendo en sucesivos temas (molinos autógenos, molinos verticales, etc.).

2.3. Consideraciones previas.

Para poder entender lo que sigue, se debe recordar lo siguiente:

- ❑ Las máquinas de fragmentación pueden reducir todo el mineral por debajo de una dimensión establecida previamente. Pero debido a que estos equipos producen una amplia gama de tamaños por debajo del tamaño máximo establecido, obtendremos gran cantidad de fragmentos finos (**sobremolienda**).

En la fragmentación, el consumo de energía por tonelada de mineral tratado, aumenta enormemente a medida que disminuye el tamaño del mineral a fragmentar. Como norma se deberá evitar la producción de finos y diseñar bien los equipos y circuitos para reducirlo.

- ❑ **Definición del coeficiente de reducción de una determinada máquina:** Que nos indica el grado de reducción que sufre un material bajo la acción de una máquina. Se puede expresar de varias formas:

⇒ La relación entre la dimensión del mayor elemento presente en la alimentación y la dimensión del mayor elemento presente en el producto de la máquina.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 2: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. INTRODUCCIÓN.

- ⇒ La relación entre las dimensiones medias del producto a la entrada y del producto a la salida.
- ⇒ La relación entre la dimensión de abertura de la 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 en la máquina. Esta relación denominada también **razón de reducción**, es la más utilizada y se expresa:

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

- El coeficiente de reducción máximo que puede obtenerse en una determinada máquina es limitado.
- En las **máquinas de fragmentación gruesa (máquinas de presión)**, la razón de reducción varía entre **3/1 – 8/1**.
- En las **máquinas de impacto** la razón de reducción puede llegar hasta **30/1**.
- En las **máquinas autógenas** se llegan a razones de **1000/1**.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 2: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. INTRODUCCIÓN.

Nota: 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).

2.4. Terminología.

A las primeras etapas se les denomina **TRITURACIÓN**.

A las últimas etapas se les denomina **MOLIENDA** o **PULVERIZACIÓN**.

Al conjunto de estas etapas se las denomina **FRAGMENTACIÓN** o **CONMINUCIÓN**.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 2: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. INTRODUCCIÓN.

Tabla 2.1: Clasificación y denominación de las etapas de fragmentación (Hukki)

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

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 2: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. INTRODUCCIÓN.

Clasificación de las operaciones de fragmentación, **en función de los condicionantes** que debe cumplir el producto:

Fragmentación Simple: Cuando la totalidad del producto obtenido, debe ser inferior a un tamaño prefijado.

Fragmentación Forzada: El producto fragmentado debe tener una proporción de finos superior a un tamaño determinado.

Fragmentación Condicionada: Se exige que aparezca la menor cantidad posible de productos sobretritados (finos).

Fragmentación Diferencial o Selectiva: Se aplica a productos estructuralmente heterogéneos (mayor reducción de los componentes blandos).

Fragmentación Formal: Cuando se intenta conseguir una determinada forma en los productos de salida.

Automolienda: Llamada también molienda autógena, donde se produce la reducción por medio de la percusión o fricción entre las propias partículas constituyentes de la alimentación.

Molienda Criógena: Molienda de productos, favorecida a través del enfriamiento de los mismos a muy bajas temperaturas (Hidrógeno líquido).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 2: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. INTRODUCCIÓN.

Clasificación en **función del porcentaje de agua** contenida en el producto de la molienda:

- **Molienda en seco** (o por vía seca): **< 2 %** de agua.
- **Molienda semi-húmeda**: **2-20 %** de agua.
- **Molienda por vía húmeda**: **30-300 %** de agua.

La fragmentación se puede clasificar en **función del circuito trituración** que se ha dispuesto, pudiendo ser éste de dos tipos:

- **Circuito abierto**: Aquel en el que el material sólo pasa una vez por una máquina determinada.
- **Circuito cerrado**: Existe un control sobre el tamaño de los materiales a la salida de la máquina, retornando a la misma aquellos tamaños que sobrepasan un valor fijado previamente.

El circuito cerrado (c.c.) permite aumentar la razón de reducción de un equipo sin producir excesivos finos y ofrece un mayor control sobre el tamaño del producto de salida que en circuito abierto (c.a.).

En las clasificaciones anteriores el término molienda, se refiere a su significado amplio (fragmentación), no al significado que ofrece Hukki (tabla 2.1).

2.5. Problemas teóricos.

Aunque se lleva más de un siglo investigando los mecanismos de la fragmentación mecánica, sin embargo en la actualidad se sabe que la realidad es mucho más compleja.

Las investigaciones actuales se dirigen a un nuevo estudio de los conceptos del mecanismo de la fragmentación ayudadas por la mejora en los medios de apreciación.

Se ha reconsiderado la noción de energía de superficie, base de las teorías clásicas de fragmentación.

Se tienen en cuenta factores como el tiempo y la temperatura, el estado fisico-químico, etc. No se estudia a la fragmentación como un proceso sólo mecánico, sino también cinético.

Aunque las primeras teorías han sido superadas por las investigaciones actuales, aún conservan todo su valor para comprender los fenómenos de la fragmentación, a la espera de que surja una teoría general plenamente satisfactoria.

2.6. Leyes de la distribución granulométrica.

Es imposible obtener granos, por medio de la trituración, que en su totalidad sean de un tamaño igual y uniforme.

La trituración nos va a permitir obtener un producto cuya dimensión no sobrepase una dimensión previamente establecida, pero dicho producto va a tener una gama de tamaños entre dicha dimensión máxima y la infinitamente pequeña.

Como ya hemos mencionado anteriormente, aquel material fragmentado, cuyo tamaño es ampliamente inferior a la dimensión máxima impuesta se denomina **supertriturados o sobremolienda**.

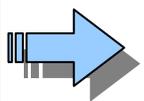
Del análisis granulométrico, vamos a obtener la dimensión media geométrica y a partir de ésta, antes y después de la trituración, vamos a definir el **coeficiente de reducción**.

Curvas Granulométricas:

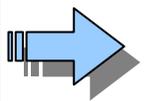
Se denominan curvas granulométricas, a aquellas curvas que nos proporcionan en ordenadas los porcentajes acumulados de paso (o de rechazo) de un material cuyos granos tienen una dimensión menor (o mayor) a la dimensión dada en abscisa para ese porcentaje.

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

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



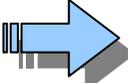
El porcentaje de finos aumenta a medida que aumenta el coeficiente de reducción; varias trituraciones sucesivas darán en total menos sobremolienda que la trituración equivalente de una sola etapa.

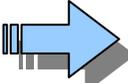


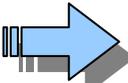
La trituración de fragmentos planos da lugar proporcionalmente a más finos que la trituración de fragmentos regulares.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 2: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. INTRODUCCIÓN.

 La forma media de los granos triturados varía con su emplazamiento en la escala de tamizado. Los **granos más gruesos** tienen una forma claramente alargada. Los **granos de tamaño medio** son los que más se acercan a la forma cúbica. Los **granos finos** son nuevamente en su mayoría planos y alargados.

 Si la operación de trituración de una **roca homogénea** tiene lugar en una máquina con una excesiva razón de reducción. La muestra a la salida de la máquina contendrá un porcentaje elevado de granos gruesos con los ángulos redondeados y cierto porcentaje de granos muy finos, con la falta casi total de elementos intermedios.

 La trituración de una **roca heterogénea** da lugar a un mayor porcentaje de partículas correspondientes a la dimensión media, que la correspondiente a una **roca homogénea** sometida a la misma reducción.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 2: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. INTRODUCCIÓN.

Leyes de la Granulometría:

Analizando las curvas granulométricas de los materiales en diferentes estados de fragmentación, se observa cierta analogía entre ellas. Es por ello que se han establecido unas leyes, que dan respuesta a estas analogías y nos permiten conocer de forma aproximada los resultados de una operación de fragmentación.

La ley más difundida es la de **Gaudin** y **Schumann**:

$$W_d = 100 \cdot \left(\frac{d}{k_{100}} \right)^\alpha \quad (2.1)$$

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.

La ecuación (2.1) si la representamos logarítmicamente viene dada por una recta de pendiente α .

La ecuación anterior se cumple para valores de W_d comprendidos entre 0 y 80 %.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 2: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. INTRODUCCIÓN.

La ley de **Rosin y Ramler**:

$$W_d = 100 \cdot e^{-\frac{d}{b}} \quad (2.2)$$

Donde **a** y **b** son parámetros, esta ley se cumple para dimensiones inferiores a **50 μm**.

2.7. Leyes energéticas.

Estas leyes son las clásicas y nos van a proporcionar la cantidad de energía necesaria para una operación de fragmentación determinada.

Las principales leyes son las siguientes:

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:

$$W = K \cdot \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) \quad (2.3)$$

W = Energía consumida en la operación.

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

K = Coeficiente.

Esta ley sólo es aplicable a la fragmentación de partículas **Finas** ($D < 74 \mu\text{m}$).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 2: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. INTRODUCCIÓN.

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:

$$W = K' \cdot \log \left(\frac{D_{80}}{d_{80}} \right) \quad (2.4)$$

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 sólo es aplicable a la fragmentación de partículas **Gruesas** ($d_{80} > 10 \text{ cm}$).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 2: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. INTRODUCCIÓN.

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:

$$W = 10 \cdot w_i \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right) \left(\frac{kW - h}{sht} \right) \quad (2.5)$$

W = Trabajo consumido en la operación.

w_i = Índice de Bond (work-index).

$d_{80}, D_{80} = (\mu\text{m})$

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 ($d > 74 \mu\text{m}$, $D < 10 \text{ cm}$).

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.
TEMA 2: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. INTRODUCCIÓN.

LEY DE CHARLES.

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

$$dW = -C \cdot \frac{dx}{x^n} \quad (2.6)$$

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:

- $n = 1 \quad \Rightarrow$ Ley de Kick.
- $n = 2 \quad \Rightarrow$ Ley de Rittinger.
- $n = 3/2 \quad \Rightarrow$ Ley de Bond.

BLOQUE 2: OPERACIONES DE PREPARACIÓN.

TEMA 2: REDUCCIÓN DE TAMAÑO. INTRODUCCIÓN.

2.8. Máquinas de fragmentación. Clasificación

En la actualidad se dispone de una gran variedad de equipos para hacer frente a la fragmentación mecánica.

Estos equipos se pueden clasificar según diferentes criterios:

- En función de la gama de tamaños que ha sido reducido el material.(p.e. clasificación de Hukki).
- En función del tipo de material que tratan dichos equipos (duros, abrasivos, friables, húmedos, pegajosos, etc.).
- En función de los tipos de fuerzas que utilizan los equipos para fragmentar el material:

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

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

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

Equipos mixtos: Molinos de barras, autógenos, etc.