

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA



“REDUCCION DE TAMAÑO”

Angel Fernando Martínez Garza y Morelos

202

INGENIERO QUIMICO

1974



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

| | | |
|--------------------------------|---------------|------------------------------|
| | Presidente | Prof. Alberto Obregón Pérez |
| | Vocal | " Cutberto Ramírez Castillo |
| Jurado designado originalmente | Secretario | " Fernando Maldonado Mendoza |
| según el tema: | 1er. Suplente | " Arturo López Torres |
| | 2º Suplente | " Lucía Arciniega Carrillo |

| | |
|---------------------------|----------------------|
| Sitio donde se desarrolló | |
| el tema: | Facultad de Química. |

| | |
|-----------------------------|--|
| Nombre completo y firma del | |
| sustentante: | Angel Fernando Martínez Garza y Morelos. |

| | |
|-----------------------------|----------------------------|
| Nombre completo y firma del | |
| asesor del tema: | Ing. Alberto Obregón Pérez |

*Quiero dedicar este trabajo, culminación
de un ideal que me llena de satisfacción,
a quienes comparten estos sentimientos -
conmigo.*

A MIS PADRES, con cariño y
agradecimiento, por su
paciencia y confianza en mí.

A MARISA

amiga, compañera y novia.

A MIS HERMANAS, con cariño, por el
apoyo que siempre me han brindado.

*Con agradecimiento, por su dirección
y ayuda, a los señores:*

ING. ALBERTO OBREGON LOPEZ

e

ING. ARTURO LOPEZ TORRES

I N D I C E

| | <i>Página</i> |
|---|---------------|
| INTRODUCCION | |
| 1.- PRINCIPIOS DE LA TRITURACION Y LA MOLIENDA | 2 |
| 1.1. Finalidades | 2 |
| 1.2. Formas de reducción de tamaño | 2 |
| 2.- ESPECIFICACIONES GENERALES DE LOS MATERIALES SUSCEPTIBLES DE REDUCIR SU TAMAÑO | 3 |
| 2.1. Propiedades | 3 |
| 2.2. Molibilidad | 5 |
| 2.3. Relación de reducción | 6 |
| 3.- ESPECIFICACIONES SOBRE EL PRODUCTO DE LA MO- LIENDA | 7 |
| 3.1. Curvas de distribución de tamaño | 8 |
| 4.- LEYES QUE RIGEN LA MOLIENDA | 10 |
| 5.- POTENCIA REQUERIDA EN LA MOLIENDA | 13 |
| 6.- SISTEMAS DE MOLIENDA | 15 |
| 7.- CLASIFICADORES DE TAMAÑO | 16 |
| 8.- MOLIENDA HUMEDA Y SECA | 18 |
| 9.- AYUDAS Y AGENTES PARA LA MOLIENDA | 18 |
| 10.- CLASIFICACION DEL EQUIPO | 20 |

| | Página |
|--|--------|
| 11.- DESCRIPCION DEL EQUIPO | 22 |
| 11.1. Trituradores preliminares | 22 |
| 11.2. Trituradores secundarios | 29 |
| 11.3. Molinos pulverizadores | 39 |
| 11.4. Molinos para molienda fina | 64 |
| 11.5. Cortadores rotatorios | 75 |
| 12.- MATERIALES DE CONSTRUCCION DEL EQUIPO | 77 |
| 12.1. Desgaste | 77 |
| 12.2. Materiales resistentes al desgaste | 78 |
| 13.- SELECCION DEL EQUIPO | 80 |
| 14.- CONCLUSIONES | 83 |
| BIBLIOGRAFIA | 85 |

I N T R O D U C C I O N

La reducción de tamaño es una operación unitaria de la Ingeniería Química, la cual no se estudia muy a fondo en las escuelas superiores que imparten esta carrera, pero no por esto deja de ser importante puesto que tiene gran aplicación en la industria.

La reducción de tamaño es una operación antigua si se ve desde el punto de vista de que el hombre siempre ha tenido la necesidad de reducir el tamaño de los alimentos y de los materiales que le han sido indispensables.

La actividad del hombre primitivo fue proveerse de alimentos y refugio y en estas actividades, antes y ahora, ha empleado la reducción de tamaño de los materiales brutos, ya sea cortándolos o tajándolos y, en general, rompiéndolos hasta tamaños más manejables. Rompieron piedras para construir sus casas; a su vez, alguna de las piedras más duras se les - encontró utilidad como herramientas para cortar materiales blandos, tales como: madera, vegetación, carne, etc.; desde los tiempos remotos - el hombre ha estado interesado en la reducción de tamaño. Nuestros ancestrales hombres de la edad de piedra usaban gran parte de su energía en operaciones de reducción de tamaño y, actualmente, gran proporción - de las actividades del hombre moderno están dedicadas al mismo propósito. Como ejemplo, tenemos que la producción mundial de cemento portland en 1928 fue de aproximadamente 90 millones de toneladas.

Para lograr esto, se tuvieron que moler 250 millones de toneladas de escoria de fierro fundido y carbón, para lo cual se estima se consumió un total de 10,000 millones de K Wh.

1.- PRINCIPIOS DE LA TRITURACION Y LA

MOLIENDA

1.1. FINALIDADES

Lo primero que hay que ver es: ¿Por qué es necesario reducir el tamaño de los materiales?. Es necesario reducir el tamaño de piezas sólidas o semisólidas por muchas razones. Los objetivos más importantes son:

- 1) Liberar un constituyente deseado de una mezcla con componentes indeseables, tal como sería separar un mineral de una roca.
- 2) Crear una superficie grande por unidad de masa para mejorar la utilización del mineral; este sería el caso de la pulverización del -- carbón para combustión.
- 3) Producir un material en un tamaño deseado para un propósito dado, - como el cemento, fertilizantes y pigmentos para pinturas. }

1.2. FORMAS DE REDUCCION DE

TAMAÑO

En la reducción de tamaño se tienen operaciones generales, tales como - la trituración y la molienda. La primera implica una reducción de tama- ño que se le podría llamar tosca o preliminar, ya que no es muy fina; y la segunda se refiere a un tamaño definitivamente fino. La trituración se aplica generalmente al rompimiento de trozos relativamente grandes - de piezas sólidas, que van desde varios pies hasta menos de una pulgada de diámetro, por medio de una acción de compresión lenta concentrada, - principalmente, en las piezas individuales. La molienda denota reduc-- ción a tamaño fino e implica las acciones de rozamiento y cortado entre

el material. Además de éstas existe la pulverización, término que se emplea ampliamente en la descripción de cualquier actividad que sirva para producir polvos.

Sin embargo, el término "molienda" es genérico para todas las operaciones que tienen que ver con reducción de tamaño: trituración, quebrantamiento, pulverización, desintegración, escamación y reducción con máquinas herramientas. Dentro de la molienda existen sólo cuatro formas para la reducción de tamaño que son las usadas por las máquinas comerciales. Estas formas son: compresión, impacto, rozamiento y cortado o razgado.

En general, la compresión se usa para reducción tosca de sólidos duros, dando relativamente poca cantidad de finos. El impacto produce material tosco, medio o fino. El rozamiento produce material muy fino de materiales blandos y no abrasivos. El cortado produce piezas con tamaño de finido y a veces también con forma definida, con poco o nada de finos.

2.- ESPECIFICACIONES GENERALES DE LOS MATERIALES SUSCEPTIBLES DE REDUCIR SU TAMAÑO

2.1. PROPIEDADES

Un factor muy importante en la operación de todos los equipos para reducción de tamaño es el material que se vaya a alimentar, ya que las propiedades de estos influyen en la selección y modo de operación del equipo de reducción de tamaño. Las principales propiedades que se deben de tener en cuenta son: superficie, dureza y estructura. La dimensión

es fácil determinarla, siempre y cuando se trate de un cuerpo regular, pero si no es así, su dimensión se tomaría como una medida lineal de -- la pieza, como sucede generalmente en la operación de reducción de tamaño.

Dimensión de partículas.- Existen varios métodos para medir las partículas, entre los que se encuentran: el tamizado, el examen microscópico, la elutriación, la sedimentación (por gravedad, centrífuga y ultracentrífuga). La turbidimetría, la adsorción, la permeabilidad, los rayos X y el conteo electrónico. En la tabla de la siguiente página se encuentran los métodos citados anteriormente con los intervalos de tamaño de partícula dentro de los cuales se aplican, así como la propiedad que miden.

Dureza.- La dureza se mide basándose en el criterio de la facilidad de rayado del material y puede ser evaluada en términos de la escala de -- Moho, que dispuestos en orden ascendente de dureza es: 1, talco; 2, yeso; 3, calcita; 4, fluorita; 5, apatita; 6, feldespato; 7, cuarzo; 8, topacio; 9, corindón; 10, diamante. Para fines más prácticos pueden -- agrandarse los intervalos de la tabla anterior y los materiales con dureza de 1 a 4 inclusive, pueden clasificarse como blandos y los otros -- como duros.

Una clasificación norteamericana de dureza de los materiales, basada en la resistencia a la compresión de cubos de 1 pulgada es:

Para cargas en Kg/cm^2 .

Muy blandos, 700; blandos, 1055; dureza media, 1410; duros, 1760; y muy

TABLA NO. 1

en Terminado

MÉTODOS DE MEDICION DE PARTICULAS

| <u>Método</u> | <u>Intervalo comprendido</u> | <u>Propiedad medida</u> |
|--------------------------|--|---|
| Tamizado ✓ | Desde unas cuantas pulgadas hasta 50 micras. μ | Distribución de las partículas por pesos en intervalos de tamices; la abertura del tamiz controla el paso de la partícula. ✓ |
| Microscopio luz visible | 100 - 0.3 μ | Distribución de las partículas midiendo cada una de ellas, cualquier diámetro medido-usualmente no es el más chico. |
| Ultravioleta Electrónico | 100 - 0.05 μ 100 - 0.005 | |
| Elutriación | 100 - 5 μ | Distribución de las partículas separándolas de acuerdo a su velocidad de sedimentación en un fluido. Algunas fracciones que se recuperan - se pueden medir por su tamaño. |
| Sedimentación | | |
| Regular | 50 - 1 μ | Distribución basada en la sedimentación en un medio fluido. |
| Centrífuga | 50 - 0.5 μ | No se recupera ninguna fracción diámetros basados en la ley de Stocks de esferas equivalentes o en una -- composición de fuerzas en la ultracentrífuga. |
| Ultracentrífuga | Molecular | |
| Turbidimetría | 50 - 0.3 μ | Función directa de la superficie - con la sedimentación produce la distribución basada en la velocidad de sedimentación superficial. |
| Adsorción | de 50 μ a tamaños finos | Superficie por medición directa. |
| Permeabilidad | de centésimos de μ a fracciones de μ | Superficie o diámetro calculado a partir de los espacios libres. |
| Rayos X | de 1 - 2 μ a varios centésimos de micra | Un promedio de diámetros de cristales medidos por difracción de rayos X |
| Conteo electrónico | 50 μ a fracciones de micra | Distribución de partículas en fracciones como función de la sección transversal. |

duros, 2110.

Superficie.- De la misma forma que la dimensión, la superficie se calcula fácilmente para formas regulares de partículas, pero no así para formas irregulares en las que se estima sólo aproximadamente; en la tabla de la página anterior también se encuentran métodos para medir la superficie (adsorción y permeabilidad).

2.2. M O L I B I L I D A D

Existe una prueba en la cual cualquier molino estandarizado se hace operar en un período definido; el producto final tendrá algunas características de finura por medio de las cuales podría ser comparado con otras substancias probadas bajo condiciones iguales. A esta prueba se le llama molibilidad y se mide como índice que sirve, junto con la dureza, para la mejor selección del equipo de reducción de tamaño.

Se conocen dos métodos para medir la molibilidad, los cuales tienen una aplicación especial para el carbón. Uno es el método del molino de bolas y el otro el método del molino Hardgrove. En el primero se determinan las cantidades relativas de energía necesarias para pulverizar diferentes tipos de carbón, poniendo una muestra de uno de estos en un molino de bolas de tamaño específico y contando el número de revoluciones necesarias para pulverizar la muestra, de modo que el 80% de ellas pase por un tamiz de malla No. 200. El índice de molibilidad en por ciento será igual al cociente de 50,000 dividido entre el promedio del número de revoluciones necesarias en dos ensayos.

El método Hardgrove se aplica a una muestra preparada con una cantidad definida de energía de molienda en un pulverizador miniatura; esta muestra se compara con un carbón elegido como de molibilidad 100. El índice Hardgrove es igual a $13 + 6.93 W$, siendo W el peso de material que pasa por una malla de 200.

La aplicación de estos métodos no se ha generalizado a otros materiales debido a que se usan máquinas distintas y a la diferencia en las propiedades en los diversos materiales probados. Sin embargo, se han podido calcular valores de molibilidad para muchos materiales por estos métodos.

Existen otros métodos en los cuales la molibilidad de la mezcla es el número de granos netos producidos por cada revolución del molino; también se considera como índice de molibilidad el trabajo neto en caballos por hora necesarios para pulverizar una tonelada de material hasta un tamaño límite máximo en un pulverizador de rodillos acanalados.

El fin principal de los ensayos normalizados de molibilidad es poder calcular lo mejor posible el tamaño de un molino necesario para producir un tonelaje determinado y para poder calcular también la potencia necesaria para la molienda.

2.3. RELACION DE REDUCCION

La relación de reducción es el cociente que resulta de la división del tamaño de partícula de la alimentación entre el del producto obtenido.

Con una relación de reducción grande se tendrá entonces una gran pro--

ducción de polvos y a la inversa con una relación pequeña se tendrá poca producción de polvos.]

[Existen otras características de los materiales susceptibles de molerse, que también deben de tomarse en cuenta para la molienda; éstas son, por ejemplo: el agua de combinación de estos materiales, la higroscopiedad, la tendencia a la floculación y a la aglomeración, su combustibilidad, la sensibilidad a los cambios de temperatura y a la humedad.]

[El contenido de humedad de los materiales, por ejemplo, afecta al funcionamiento de la máquina empleada para molerlos. Se ha demostrado, --prácticamente, que las cantidades pequeñas de humedad afectan a tal punto a un molino que éste llega a ser inefectivo. Si el contenido de humedad es superior a 4-5%, el material generalmente se vuelve pegajoso o pastoso y, en tales condiciones, es sumamente difícil mantener la molienda; por otro lado, si el contenido de humedad es superior al 50%, el material es muy fluido y de este modo el agua puede usarse para facilitar la trituración o la molienda.]

3.- ESPECIFICACIONES SOBRE EL PRODUCTO

Existen propiedades como son la distribución de tamaño de las partículas y la superficie específica que se determinan en el caso de una mezcla --de partículas, como sería un polvo, en el que las propiedades se encuentran distribuidas; otra propiedad que se determina en éstos es el límite máximo y mínimo de tamaño de las partículas.

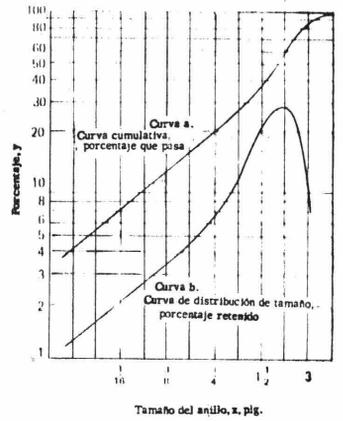
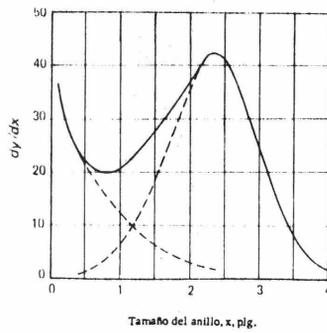
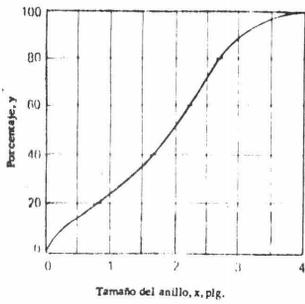
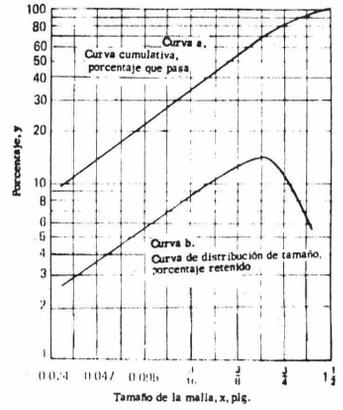
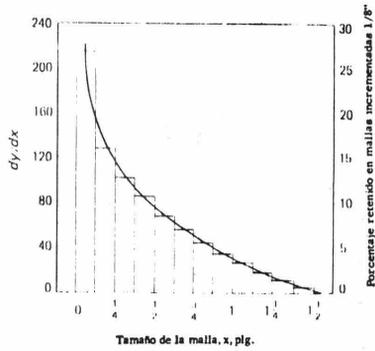
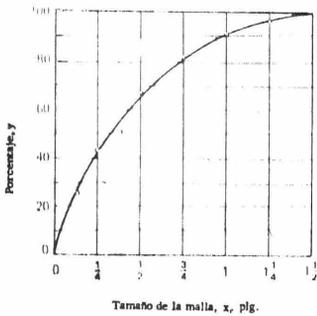
La distribución de tamaño de partículas es una relación funcional de la distribución con respecto al número de partículas de cada tamaño que forman el polvo.

La superficie es la suma de las superficies de las diferentes partículas y la superficie específica es igual a la superficie de las partículas - que forman una unidad de peso o de volumen.

El tamaño medio de las partículas de un polvo se obtiene partiendo de la relación de su distribución y puede tener diversos valores, según sea la propiedad que se desea acentuar; peso, volumen, superficie o superficie específica. El valor medio del volumen de la superficie específica se expresan respectivamente por $\sqrt{\frac{\sum \Delta W}{\sum \Delta W D_m^3}}$ y $\frac{\sum \Delta W}{\sum \Delta W D_m^3}$ tomando como base el peso y por $\sqrt{\frac{\sum \Delta n D_m^3}{\Delta n}}$ y $\frac{\sum \Delta n D_m^3}{\sum \Delta n D_m^2}$, tomando como base el número de partículas, siendo ΔW y Δn el incremento de peso y de número de partículas respectivamente y D_m el tamaño medio del incremento. El tamaño medio en peso de un material corresponde al número ordinal obtenido partiendo de la suma de los productos de los pesos incrementados multiplicados por los números ordinales de los incrementos y dividiéndola por el peso total del material.

3.1. CURVAS DE DISTRIBUCION

Una descripción más completa de un polvo se hace indicando la distribución de sus partículas por tamaño, que puede ser transportada a una gráfica. Las curvas de distribución de tamaño se representan en varias formas, dependiendo del método de medición y del uso que se les vaya a dar.



Distribución del tamaño de partícula, basado en análisis de tamizado, se muestran relaciones de tamaño-peso en productos molidos

Gráficas cumulativas.- Se ha hecho una costumbre representar los datos de tamíz en términos de porcentaje retenido, de gruesos o de finos, contra la abertura de cada tamíz en una serie de estos. Dependiendo del tamíz usado, las curvas para un mismo material son idénticas, dependiendo solamente de que el material sea debidamente tamizado y de que se use un número de tamices suficiente para definir la curva. La gráfica de porcentaje retenido de gruesos contra el recíproco del tamaño constituye el diagrama Gates. El área bajo esta curva representa la superficie del material. Se puede usar para comparar materiales y para estimar comparativamente las cantidades de energía consumidas durante la molienda.

Porcentaje en el tamíz.- Una gráfica más sensible que la de porcentaje retenido es la de porcentaje en el tamíz. Esta depende, sin embargo, de la exactitud de los tamices usados. Se usa comúnmente una serie standard de tamices, tal como la de la American Standard, la cual cubre las series A.S.T.U. y Tyler, las aberturas de la cual se incrementan sucesivamente por $2\sqrt{2}$ ó $\sqrt{2}$. La que se usa más comúnmente es la de raíz cuadrada de dos, y la de raíz cuarta de dos tiene error considerable si no se usa con cuidado. Esta gráfica se puede usar como una base para medir la exactitud de cada tamíz y para asignar a ellos un nuevo diámetro, el cual producirá una curva plana.

Porcentaje en peso por unidad de diámetro.- Este se expresa comúnmente por micra graficado contra el diámetro en micras. Este se puede derivar de cualquier fuente de datos adecuada, por el porcentaje en peso -

aproximadamente entre dos diámetros y dividiendo entre la diferencia entre estos dos diámetros. Así se establece un porcentaje para cada uno y todos los diámetros entre dos valores y con valores para otros intervalos diametrales, puede graficarse como un histograma o una gráfica de bloques. Una curva plana dibujada por medio de estos bloques representa la distribución de finos. Esta curva es independiente del diámetro, de la misma manera que como lo es la gráfica acumulativa y es sensible - de la misma forma que lo es la de por ciento en el tamíz. Roller demostró que si esta gráfica se hace contra el logaritmo del diámetro, el área bajo la curva es una función de la superficie.

Esta forma de datos se ha modificado y presentado como porcentaje de frecuencia y como porcentaje de superficie. Work ha desarrollado una relación para molienda basada en frecuencia de distribuciones. Se han desarrollado otras leyes de molienda para formas estadísticas de curvas de distribución, pero la aplicación de estas leyes es compleja para uso general.

4.- LEYES QUE RIGEN LA MOLIENDA

La molienda ha sido estudiada desde que se propusieron las teorías de Rittinger y Kick en el siglo XIX, con el fin de establecer qué ley es la que rige esta operación.

La ley de Rittinger establece que el trabajo consumido para reducir el tamaño de las partículas es directamente proporcional a la nueva superficie producida, mientras que la de Kick dice que el trabajo para triturar una cantidad dada de material es constante para una misma relación

de reducción cualesquiera que sea el tamaño original, es decir, la energía por unidad de volumen es constante.

Estas teorías no están de acuerdo entre sí y mientras unos autores apoyan a una, otros lo hacen con la otra. Ahora que, si bien a primera vista las dos teorías parecen razonables, en ninguna se toman en cuenta, - entre otras cosas, las condiciones de operación y el tipo de máquina -- usada para la reducción, lo que las hace dudosas.

Estas leyes actualmente siguen siendo un tema de controversia, pero la teoría que más se acepta actualmente es la de Bond, que es considerada como la relación más real entre el tamaño de la partícula y la energía de molienda.

Como se establece en muchos textos, las dos leyes originales se pueden expresar a partir de la siguiente ecuación básica:

$$dE = -Cdx/x^n \quad (1)$$

en donde E es la energía de molienda, x el tamaño de la partícula y C - una constante. Cuando $n=1$, la integración de esta ecuación básica nos da la expresión matemática de la ley de Kick.

$$E = C \log x_1/x_2 \quad (2)$$

Cuando $n=2$ nos da la expresión de la ley de Rittinger.

$$E = C (1/x_2 - 1/x_1) \quad (3)$$

La tercera teoría de la molienda, la de Bond, se obtiene a partir de esta ecuación básica, sustituyendo $n=1.5$ en la ecuación (1).

$$E = 2K(1/x_2 - 1/x_1) \quad (4)$$

Esta expresión nos indica que toda la energía útil aplicada en el rompimiento debe ser inversamente proporcional a la raíz cuadrada del diáme-

tro de las partículas, lo cual en general coincide con muchos datos de molienda. Prácticamente la ecuación (4) se puede escribir como:

$$W = W_i (\sqrt{100/P} - \sqrt{100/F}) \quad (5)$$

en donde F y P son respectivamente el tamaño de partícula de la alimentación y del producto determinados en tamices por los cuales pasen el 80% en peso del producto y del material alimentado, W_i es un índice de trabajo representando teóricamente el trabajo requerido para moler desde un tamaño infinito hasta uno tal que el 80% pase por un tamiz con -- abertura de 100 $W_i = K / \sqrt{100}$ (6)

y W es el trabajo requerido para moler desde el tamaño F hasta el P en las mismas unidades de W_i .

Antes de que apareciera la ley de Bond, se aplicaba la ley de Rittinger a la molienda de partículas relativamente pequeñas y la ley de Kick generalmente se aplicaba a partículas grandes. El índice de trabajo sería una verdadera constante si las características de rompimiento de los materiales permanecieran constantes para un determinado rango de tamaño y si la eficiencia de todos los molinos fueran iguales. Desafortunadamente a menudo este no es el caso. El valor de W_i está sujeto a cambios - de acuerdo a la distribución de tamaños de las partículas y a las características estructurales de los materiales que se van a moler. Los valores de W_i para molienda, en seco, son aproximadamente 1.3 veces mayores que para molienda húmeda.

Si en la ecuación (1) hacemos $n=(1+n)$ y la integramos, el resultado es una ecuación en términos definidos por la ecuación (5):

$$W = W_i \left[1 - (1/F/P)^n (100/P)^n \right] \quad (7)$$

y en donde tanto W_i como n se determinan experimentalmente para que -- sean esencialmente constantes para un material dentro de un intervalo -

Tabla No. 2

INDICES DE TRABAJO PARA MOLIENDA EN SECO* O EN HUMEDO

| <u>MATERIAL</u> | <u>SP. GR.</u> | <u>INDICE DE TRABAJO, Wi</u> |
|------------------|----------------|------------------------------|
| BAUXITA | 2.20 | 8.78 |
| CEMENTO | 3.15 | 13.45 |
| CEMENTO EN BRUTO | 2.67 | 10.51 |
| ARCILLA | 2.51 | 6.30 |
| CARBON | 1.40 | 13.00 |
| COQUE | 1.31 | 15.13 |
| GRANITO | 2.66 | 15.13 |
| GRAVA | 2.66 | 16.06 |
| YESO | 2.69 | 6.73 |
| HEMATITA | 3.53 | 12.84 |
| CALIZA | 2.66 | 12.74 |
| ROCA FOSFORICA | 2.74 | 9.92 |
| QUARZO | 2.65 | 13.57 |
| ARCILLA LAMINOSA | 2.63 | 15.87 |
| PIZARRA | 2.57 | 14.30 |
| ROCA VOLCANICA | 2.87 | 19.32 |

*PARA MOLIENDA EN SECO SE MULTIPLICA POR 4/3

de tamaño considerable. Existen tablas en donde se dan valores de W_i - de algunos materiales. n varía de 0.25 a 0.73, dependiendo del material. W_i se puede considerar como una verdadera constante en la ecuación (7), mientras que n viene a ser un exponente de desviación que expresa la variación en la resistencia a la molienda con cambios en el tamaño de la partícula y en la eficiencia del molino, el cual también está influenciado por el tamaño de la partícula.

5.- P O T E N C I A

La potencia requerida para moler una cierta cantidad de un material puede estimarse por una fórmula derivada de la ley de Bond, que también es la ley más realista para estimar los requerimientos de potencia. Según Bond, la potencia requerida para formar partículas de tamaño D_p (de productos con tamaño grande) es proporcional a la raíz cuadrada de la relación superficie volumen del producto.

$$P/T = K_b / \sqrt{D_p} \quad (8)$$

en donde K_b es una constante la cual depende del tipo de máquina usada y del tipo de material molido, T es la velocidad de alimentación en ton/min. y P es la potencia en HP.

De esta ecuación se puede obtener una relación entre K_b y W_i (índice de trabajo)

$$60 W_i / 0.746 = K_b \sqrt{30.48 / 100 \times 10^{-4}}$$

$$\text{simplificando} \quad K_b = 1.46 W_i \quad (9)$$

Si el 80% de la alimentación pasa por un tamíz con aberturas de tamaño D_{pa} y el 80% del producto pasa por un tamíz con aberturas de tamaño D_{pb} , los dos en pies, se deduce de las ecuaciones (8) y (9)

$$P/T = 1.46 W_i \left(\frac{1}{\sqrt{D_{pb}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{pa}}} \right)$$

El índice de trabajo incluye la fricción en el molino.

Existen fórmulas aplicables a ciertas clases de molinos como por ejemplo los molinos de bolas. Los HP netos H_n para un molino de bolas de longitud L (pies) y diámetro D (pies) está dado por:

$$H_n = 2.5 \left[\frac{L}{2} - 1 \right]^{K+1} (D/2)^{2.5} (S/S_c)$$

en donde K es igual a 0.90 para molinos menores de 5 pies de longitud y 0.85 para molinos mayores de 5 pies, S es la velocidad del molino y S_c la velocidad crítica del molino.

6.- SISTEMAS DE MOLIENDA

Los sistemas de molienda pueden ser intermitentes o continuos. Casi todas las operaciones son continuas, siendo las excepciones más notables las que emplean molinos intermitentes de bolas o de guijarros. En trabajo continuo los molinos pueden operar en circuito abierto o cerrado; para explicar lo anterior, diremos que existen dos procedimientos generales de trituración y molienda, o sea, los procedimientos de circuito abierto y de circuito cerrado con diferentes cargas de recirculación. Se llama carga circulante al material grueso retornado al molino por un clasificador. El porcentaje de carga circulante se define como el peso de material regresado del separador, o clasificador, al molino dividido por el peso total de material alimentado al molino y multiplicado por cien, se emplean a menudo cargas circulantes del 50%. Una operación de molienda usualmente procede más económicamente cuando el material -- con el tamaño requerido se elimina del circuito y el material grueso se recircula de nuevo al molino para que alcance el tamaño requerido. Pero esto representa una inversión inicial considerable, ya que se requiere de equipo extra, como son los clasificadores de tamaño. A esto se llama operación en circuito cerrado. En circuito abierto pasa lo contrario, ya que la inversión inicial es baja, pero el costo de energía por tonelada de descarga es alto. En esta operación no existe clasifi-

gador que regrese el material grueso y elimine el material de tamaño de seado, sino que se carga el molino, se somete al material a la molienda y se descarga después de cierto tiempo y se vuelve a cargar con material nuevo. En la operación en circuito cerrado se obtiene una distribución de tamaño más uniforme que la que se obtendría en circuito abierto, hasta obtener el mismo tamaño máximo. El cálculo de circuitos cerrados implican la solución de numerosas ecuaciones simultáneas y generalmente se resuelven por álgebra a base de matrices o con la ayuda de tablas, ya que son sistemas de ecuaciones simultáneas muy complicadas.

7. CLASIFICADORES

Los clasificadores se dividen en dos tipos: por gravedad y centrífugos. Para la clasificación en trituradores, se emplean cribas, tamices y parrillas. Las cribas pueden usarse en la molienda húmeda, pero el aparato que se usa comúnmente es de tipo hidráulico que clasifica a las partículas de acuerdo a su tamaño y densidad. Los clasificadores centrífugos de aire se emplean para tamaños de partícula tan fino que resultan inútiles los tamices secos. El tamizado en seco no es práctico entre los límites de malla No. 35 a No. 100, según la naturaleza del material y producción requerida.

Separación de Polvos.- Un molino en operación en circuito cerrado para producir polvos, requiere de un medio de separación de partículas por su tamaño, en el circuito. A partir de malla No. 60, se usa comúnmente la separación con aire, en lugar de usar cribas para obtener una mejor selección, la separación se efectúa en una corriente ciclónica de aire,

para acentuar el cambio de la relación tamaño-peso con el tamaño de la partícula. El clasificador de aire, de doble cono, está diseñado para recibir material de un molino y retornar las partículas de tamaño más grande que el requerido, por gravedad a través de la corriente ascendente. La corriente ascendente de aire pasa a través de un orificio entre dos conos. La separación de tamaño se controla ajustando el ángulo de las aletas de las puertecillas colocadas arriba del cono de entrada. Se puede obtener un intervalo del tamaño del producto, más amplio, usando el separador de hojas (o palos) revolventes.

Este no necesita del cono interior, por lo que es posible manejar materiales pegajosos. Algunos molinos integran un separador de este tipo en una unidad. Por otro lado, los productos, virtualmente de cualquier tipo de molino, se pueden entregar mecánicamente a un clasificador.

Los detalles varían, pero esta máquina está equipada con discos múltiples y conos deflectores de tal manera que una corriente de material --desciende en zig-zag; un ventilador arriba de la máquina induce una --corriente ascendente que recoge el producto molido, depositándolo en el cono exterior para descarga.

Para clasificación en el tamaño fino, intervalo de subtamiz, el separador de aire Microsplit ha sido diseñado para trabajar en circuito cerrado con casi todos los tipos de molinos, para producir polvos de excepcional finura y uniformidad.

8.- MOLIENDA HUMEDA Y SECA

Ya se vió que la influencia de la humedad en la molienda puede ser perjudicial, ya que el material se tornaría pegajoso. Pero también la humedad puede beneficiar a la molienda, porque si el material está mojado p^oe. con agua de asociación, se puede moler como una pulpa fluida, especialmente si se requiere un producto finamente dividido. De aquí que se considere la molienda en seco y la molienda en húmedo. En la molienda en húmedo, las partículas permanecen dispersas en tamaños finos y la energía de molienda se aplica más eficientemente; esto evidentemente es debido a los índices de trabajo bajos. En muchas ocasiones es imposible usar la molienda en húmedo, debido a la floculación de las partículas, sobre todo de las de tamaño inferior a los 10 μ .

9.- AYUDA Y AGENTES PARA LA MOLIENDA

Existen sustancias que se conocen como ayudas ó aditivos para la molienda, también agentes y cuya función es parecida a la de los catalizadores porque mejoran la molienda en diversas formas, como por ejemplo: permitiendo tanto una molienda más rápida como para obtener un tamaño de partícula pequeño, derivando esto en menos consumo de energía; o en un menor desgaste en las partes del equipo usado.

En la molienda húmeda se usan algunas de estas sustancias para dispersar las partículas, con el objeto de no permitir que se aglomeren; algunas de ellas son: los silicatos, fosfatos y ácidos sulfónicos de arjilo y alkilo (tipo "Daxad") entre otros. Se emplea menos de 1 gramo de agente por 100 de material en base sólida.

Los electrolitos y los agentes surfactivos aparentemente nulifican las fuerzas eléctricas creadas cuando las ligaduras se rompen formándose roturas incipientes; con estos agentes se prevee que ocurra una nueva - - unión de estas roturas.

El vapor de agua, posiblemente con el oxígeno de la atmósfera, tiene la misma función en la molienda en seco. Entre los aditivos usados en la molienda en seco están: los sulfatos, cloruros y carbonatos inorgánicos, el ácido oleico y las sales de trietanolamina de los ácidos lignosulfónicos. Las sales que tienen cationes multivalentes y complejos -- son específicamente efectivos con los materiales metálicos.

Cuando se calienta un material antes de la molienda, se reduce el consumo de energía; esto es porque decrece la energía de unión de la partícula, más que por un aumento de la plasticidad del material al aumentar la temperatura. La eficiencia mecánica absoluta para la molienda húmeda de la piedra caliza, cuarzo y varios minerales a temperaturas entre 32 y 132 F se ve incrementada, aparentemente, cerca de 1% por cada 10°F de aumento, debido a un decremento en la viscosidad. Si se calienta la roca a 1000°C antes de la trituración nos produce tanto una marcada reducción en la energía de molienda requerida, como una mejor uniformidad de la distribución de tamaños de la partícula en el producto. El calor generado en la reducción de tamaño de ciertos materiales, algunas veces hace que se eleve la temperatura más allá de los límites tolerables; es por eso necesario el enfriamiento antes y durante la molienda en estos casos. Se encuentran en esta situación los plásticos e insecticidas. -

Una solución común es la de meter junto con el material hielo seco al molino; los dos se muelen a la vez, pero el hielo seco se evapora rápidamente quedando sólo el producto deseado; o bien se pudiera poner el material en un medio frío a base de gas de enfriamiento, tal como nitrógeno y luego bombearlo a través de una tubería hasta el molino; aquí -- hay que tener en cuenta que el molino estuviera hecho de un material -- que resista las bajas temperaturas como el acero inoxidable. Por otro lado, se tienen ventajas al calentar cierto tipo de materiales como alimentos, ceras y perfumes, productos que se manejan más fácilmente en caliente dentro del molino como líquidos y en los cuales las partículas sólidas se mantienen suspendidas para ser molidas y/o dispersadas. -- Ciertos molinos está provistos de enchaquetamientos para circulación de vapor o de agua caliente o también de agua fría para cuando se desee enfriar el contenido. Finalmente, algunos materiales pirofóricos se oxidan fácilmente, o están sujetos a otra clase de reacciones si se exponen al medio ambiente, lo que lleva a introducir una atmósfera inerte dentro del molino para solucionar el problema.

10.- CLASIFICACION Y DESCRIPCION DEL EQUIPO

Clasificación.- En una forma general se puede clasificar al equipo para reducción de tamaño, como: trituradores y molinos. Considerando a los primeros como aquéllos que se utilizan para reducir hasta tamaños que de ninguna manera se pueden considerar finos y a los molinos que si se puede decir que reducen hasta un tamaño fino o por lo menos intermedio.

Tabla No. 3

| CARACTERISTICAS DEL EQUIPO USADO PARA LA REDUCCION DE TAMAÑO | | | | | | | | |
|--|------------------------------------|---------------------------|---------------------|------------------|---------------------|--|-------------------------------------|--|
| TIPO | ACCION | TAMAÑO DE LA ALIMENTACION | TAMAÑO DEL PRODUCTO | CAPACIDAD TON/HR | POTENCIA HP-HR./TON | USO | MATERIALES CON LOS QUE NO SE APLICA | NOTAS |
| Triturador de quijada | Compresión | 6-72" | 4-11" | 10-1000 | 0,3-1 | Roca dura y semidura | Blandos y viscosos | |
| Trituradores giratorios | | | | | | | | |
| Grande | Compresión | 6-72" | 1-11" | 35-3500 | 0,2-0,7 | Roca dura y semidura | Blandos y viscosos | |
| Chico | Compresión e Impacto | 1-10" | 1/4-1-1/2" | 10- 600 | 0,5-3 | | | |
| Trituradores de rodillos | | | | | | | | |
| Liso | Compresión | 1/4-3" | 1/4-5/8" | 3-150 | 1-1-1/2 | Duros e Intermedios Abrasivos | Muy lisos | Produce muy pocos finos Rel. de reducción 4:1 |
| Dentado | Impacto, rozamiento y esquilado | 3-20" | 2-8" | 5-1000 | 0,2-0,5 | Desmenzables | Roca dura | Produce pocos finos rel. de reducción 8:1 |
| Molinos revolventes | | | | | | Molienda fina de materiales abrasivos | Blandos | Se utiliza también para mezclado |
| De bolas, guijarros, tubulares, y de compartimento | Rozamiento e Impacto | mall 30-1" | mall 20- mall 200 | 0,5-75 | 10-20 | | | |
| De varillas | Rozamiento (Impacto) | 1/2-1" | mall 4-mall 28 | 3-120 | 0,5-4 | Abrasivos premolidos | Muy finos | |
| Molinos de martillos | | | | | | | | |
| Impactores | Impacto | mall 10-10" | mall 48-1/8" | 0,2-600 | 0,5-10 | Abrasivos | Molienda fina | Maneja materiales húmedos |
| Vibradores | Rozamiento e Impacto | mall 20-40" | mall 325-2" | 0,05-400 | 1-200 | No abrasivos | Abrasivos | Utilizado para reducción ultrafina |
| Cortadores y desgarradores | Corte | 1-12" bolas anchas | mall 4- mall-100 | 0,1-10 | 10-25 | Blandos bales fibrosos y plásticos | Duros | |
| Molinos de anillos y de cubeta | Rolado y Compresión | mall 20-1" | mall 325-mall 20 | 0,02-20 | 5-200 | Blandos y ligeramente duros | Abrasivos | Gran cantidad de finos Arrastre con aire |
| Molinos de rozamiento (discos) | Rozamiento | 3/8-1" | mall 200- mall 20 | 0,2-5 | 15-200 | Blandos y fibrosos | Abrasivos y duros | |
| Molinos de energía fluida | Impacto y Rozamiento | mall 100-1/2" | 1- 30 micras | 0,1-10 | * | Moderadamente fibrosos y duros | Blandos y pegajosos | Reducción ultrafina. |

* De 1 a 4 lb. de vapor o de 6 a 9 lb. de aire comprimido por libra de producto

Una clasificación más completa basada en el tamaño del material que se alimenta y en el tamaño del producto es la que a continuación se presenta.

- 1.- Trituradores preliminares, los cuales trituran piezas cuya máxima longitud es de 2 a 60 pulgadas.
- 2.- Trituradores secundarios, que se alimentan con cargas aproximada--mente de 1 1/2 pulgadas y producen materiales que atraviesan a un tamiz de malla No. 10.
- 3.- Pulverizadores, a los que pueden suministrarse cargas desde 1/2 a 1/4 de pulgada y dan lugar a productos de finura, tal como malla - No. 200.
- 4.- Molinos para molienda muy fina, los cuales pueden cargarse con ma--terial de aproximadamente malla No. 80 y obtenerse productos tan - finos como 0.5 micras.

En la tabla 3 se dan algunas caracterfsticas del equipo típico usado en las operaciones de reducción de tamaño.

1.- Trituradores preliminares.

1. Trituradores de mandíbula

- a) Blake
- b) Dodge

1.2. Trituradores giratorios

- a) Primarios
- b) Secundarios

2.- Trituradores Secundarios

2.1. Trituradores de rodillo

- a) Lisos
- b) Corrugados o dentados

2.2. Trituradores de Cono

2.3. Trituradores de Disco

2.4. Molinos tipo jaula de ardilla

2.5. Trituradores de martillos

- a) Velocidad baja
- b) Velocidad media

2.6. Molinos de martinetes

2.7. Cortadores rotatorios de dados

2.8. Trituradores de cubeta o paila

3.- Molinos pulverizadores

3.1. Molinos de bolas

3.2. Molinos de guijarros

3.3. Molinos de tubo

3.4. Molinos de compartimentos

3.5. Molinos de varillas

3.6. Molinos de rodillo centrífugo

3.7. Molinos de martillos de alta velocidad

3.8. Molinos de rozamiento (de discos)

4.- Molinos para molienda fina

4.1. Molinos de energía fluida

4.2. Molinos coloidales.

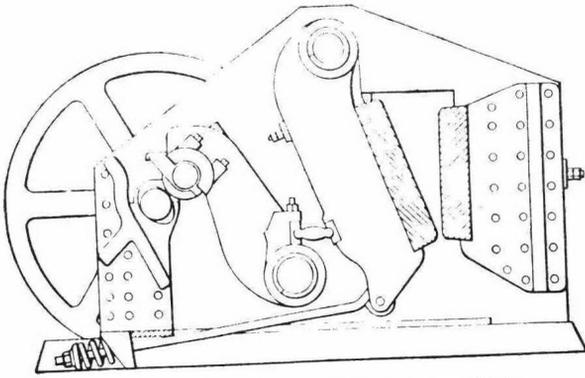
11.1. TRITURADORES PRELIMINARES

Trituradores de mandíbula.- Para la trituración de materiales duros, - tales como la roca, se usa la compresión simple. El tipo más antiguo y en muchas formas el más simple modelo de trituradores, es el de mandíbu la, el cual aplica grandes cargas compresivas sobre materiales cogidos entre dos mandíbulas, una fija y la otra movable, manejadas por una - - excéntrica. Estos trituradores son toscos, pero dentro de sus limita-- ciones hacen un excelente trabajo.

Mientras que el principio de operación de todos los trituradores es el mismo, las características y modo de operación difieren considerablente de un modelo a otro.

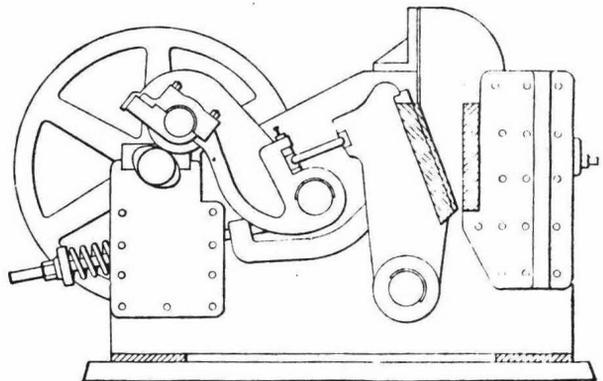
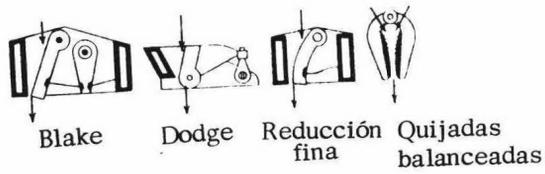
Los trituradores de mandíbula pueden considerarse como de tres tipos, - de acuerdo con el movimiento de la mandíbula: primero el Blake, cuya - mandíbula móvil pivota en la parte superior y que, por lo tanto, tiene su mayor movimiento en el punto de salida, proporcionando el máximo mo-- vimiento a los trozos más pequeños; segundo, el Dodge, en el cual la -- mandíbula móvil pivota en el fondo y que, en consecuencia, posee mayor movimiento en el punto de entrada proporcionando el mayor movimiento a los trozos grandes y, tercero, aquellos cuyo movimiento es relativamen-- te uniforme a lo largo de la superficie de la mandíbula; a este tipo -- pertenecen los trituradores Kue-Ken.

El trituradores Blake(fig.) consiste de un bastidor de acero fundido, sobre el cual van montadas las mandíbulas; ambas son de acero revesti--



Triturador de mandibula tipo Blake

Diseños de trituradores de mandibula



Triturador de mandibula tipo Dodge

das de un metal tenaz resistente al desgaste por rozamiento, tales como acero al cromo o al manganeso. La mandíbula móvil se apoya en su parte superior y la acciona una excéntrica, una biela de tracción (o una leva elíptica) y unas rótulas. La biela de tracción recibe de la excéntrica un movimiento casi vertical y como una de las rótulas está montada sobre un apoyo fijo en un extremo del armazón del triturador, el movimiento - de vaivén de la biela provoca sobre la otra rótula igual movimiento de balanceo. Las rótulas son la parte más frágil del triturador y en caso de que un material duro, como fierro, caiga entre las mandíbulas, éstas se rompen, con lo que se protege el resto de la máquina.

La mandíbula se mantiene firme contra la rótula, por medio de un resorte. La trituración se produce sólo cuando la rótula móvil avanza hacia la - fija, lo que significa un consumo intermitente de energía.

De esta forma, el material que quiere triturarse entra por la parte superior para caer entre las mandíbulas; se va triturando por compresión continua cada vez más a medida que desciende y, finalmente, cae ya triturado, por su propio peso, al fondo. Usualmente, las mandíbulas se cierran de 250 a 300 veces por minuto, lo que nos da una idea de la velocidad a la que trabajan estos equipos.

Esta máquina es útil en la trituración de material con tendencia a aglomerarse, debido a que su punto de descarga tiene mucho movimiento, eliminando así el peligro de obturación y, por lo tanto, puede manejar sin dificultad casi toda clase de materiales conteniendo de 5 a 10% de agua. Debido al amplio intervalo de movimiento entre las mandíbulas en el punto de descarga, el triturador Blake produce un producto irregular en ta

maño, aunque como generalmente es triturador preliminar, es decir, se usa para reducir hasta un tamaño que pueda alimentarse a otro molino para reducción más fina, esta desventaja no es de importancia. La mandíbula fija generalmente es vertical, plana, y la mandíbula móvil es inclinada y en ocasiones tiene superficie curva, tal como los trituradores H y HB de Traylor. La placa es curva en el fondo para reducir las tendencias al choque. Es común también en los trituradores Blake que las placas puedan voltearse, punta con punta, para que tengan un desgaste parejo, ya que el mayor desgaste se efectúa en la parte de la descarga y al invertirse la parte superior, menos desgastada, queda en la descarga.

Triturador Dodge.- El triturador Dodge es el más limitado de los trituradores de mandíbula; está sometido a esfuerzos desiguales debido a su propio diseño y por esto sólo se construye en modelos pequeños. Difiere del triturador Blake en que la mandíbula móvil pivota en la parte inferior, ya que el mínimo movimiento se tiene en el punto de descarga -- del material, el triturador suministra un producto de mayor uniformidad que el Blake, pero no se desatasca por sí solo cuando se obtura. El triturador Dodge tiene su mejor aplicación en tonelajes pequeños de materiales secos, en donde se requiera una considerable cantidad de finos debido a que este triturador es capaz de alcanzar relaciones de reducción excepcionalmente altas.

El triturador Dodge no lleva rótulas y la mandíbula se mueve por medio de una excéntrica a través de una biela de tracción. La energía llega por medio de una palanca y si el triturador se atasca, sus piezas resis

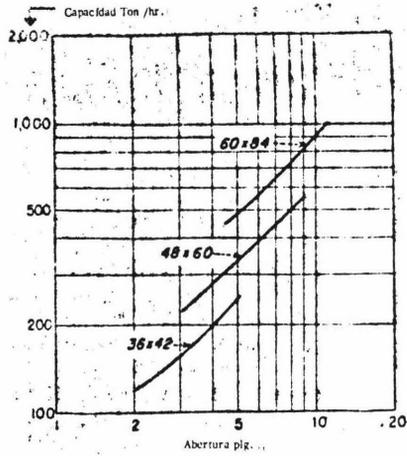
ten enormes esfuerzos por la inercia del volante.

Aplicación de los trituradores de mandíbula.

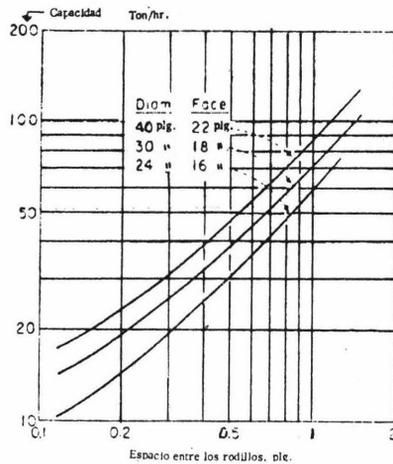
| Abertura de Alimentación. | Capacidad | | Potencia (HP) | Velocidad (r.p.m.) |
|---------------------------|---|---|---------------|--------------------|
| | Tamaño del producto 2.5 plg. o menos (ton/hr) | Tamaño del producto 1.5 plg. o menos (ton/hr) | | |
| 8 x 14 | 6 a 10 | 4 a 6 | 15 a 20 | 325 |
| 14 x 24 | 18 a 24 | 12 a 18 | 60 a 75 | 280 |
| 15 x 30 | 30 a 50 | 20 a 30 | 90 a 100 | 270 |

Otros trituradores.- Tritrador de mandíbula cilíndrica.- Debido a -- que su construcción es complicada y su campo de aplicación limitado, es te tipo de triturador es poco conocido. En este tipo de triturador la superficie de la mandíbula es cilíndrica, actuando de tal forma que gira sobre la superficie de la mandíbula fija. La mandíbula móvil pivota en la parte superior y el movimiento se le imparte desde un punto situado a la mitad de la mandíbula mediante un pivote movable. Este triturador no se obtura con tanta facilidad como el Dodge; suministra un producto de mayor uniformidad en comparación con el Blake; sin embargo, no tiene la capacidad y bajo costo de energía del Blake, o la uniformidad del producto del Dodge.

Tritrador Universal de Mandíbulas.- Es una combinación de los principios de los de los trituradores Blake y Dodge. Una excéntrica colocada encima de la tolva de alimentación y la acción de una placa radial de articulación en el fondo producen movimientos horizontales y verticales



Trituradores de mandíbula. - Capacidad a varias aberturas para tres diferentes aberturas de alimentación



Trituradores de rodillos lisos. - Efecto del espacio entre rodillos sobre la capacidad para tres tamaños diferentes.

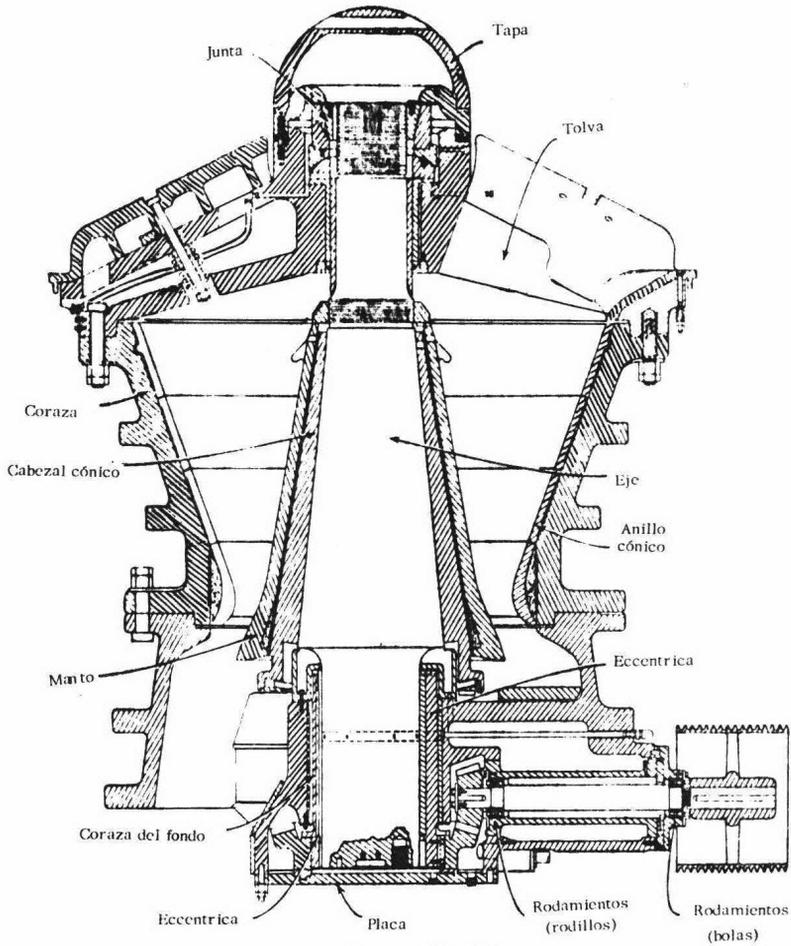
de la mandíbula. Cada revolución del eje proporciona dos carreras trituradoras, debido a que el pivote está en la parte inferior de la mandíbula, lo que hace que dicho extremo de la mandíbula se mueva hacia adelante mientras el otro retrocede.

Triturador Kue-Ken.- Tiene dos mandíbulas opuestas equilibradas, oscilando libremente como péndulos. El material se tritura, sin rozamiento, cuando las mandíbulas se mueven la una hacia la otra. Tienen gran aplicación para triturar roca grande; opera a grandes velocidades (350 a -- 425 golpes por minuto) y tiene gran capacidad con menos desgaste en las mandíbulas que otros trituradores.

Trituradores giratorios.- Son máquinas usadas para reducción preliminar y secundaria (o intermedia), tal como los trituradores de mandíbula, con velocidades que van desde la moderada hasta velocidades extremadamente altas.

Los trituradores giratorios llegan a ser unas máquinas enormes en donde, en algunas, la pura cabeza de trituración llega a pesar 90 toneladas, - pero estos no son de la concernencia de los Ingenieros Químicos. Los trituradores giratorios pequeños para la reducción de tamaño secundaria o intermedia son los más usuales en el campo de la aplicación de la Ingeniería Química.

El triturador giratorio quiebra al material por medio de la rotación -- excéntrica de un cabezal cónico truncado, cuyo extremo chico se encuentra hacia arriba, dentro de un anillo cónico truncado, cuya terminal --



Triturador giratorio

pequeña queda hacia abajo. El cabezal está montado en un eje, el cual pivota en la parte superior sobre una junta semiuniversal. La terminal inferior del eje está montada excéntricamente en un engranaje, a fin de que, a medida que ésta gira, el eje no sólo reciba el movimiento de rotación, sino también el movimiento giratorio. A medida que gira el cabezal, primero se aleja del anillo en cualquier punto, permitiendo que caiga el material una cierta distancia; entonces se mueve hacia el anillo, comprimiendo el material hasta que lo fractura. Es de hacerse notar que el movimiento relativamente mayor entre el cabezal y el anillo se realiza en la terminal inferior o punto de descarga, con lo que se da a esta máquina muchas de las ventajas del triturador Blake.

En contraste con los trituradores de mandíbula, los trituradores giratorios tienen acción continua, la carga en el motor es uniforme, puede tener gran capacidad, necesita menos mantenimiento y la potencia requerida por tonelada triturada es pequeña.

El material que va a triturarse se alimenta por la tolva, se tritura entre el cabezal y el anillo por compresión continua a causa de avances sucesivos del cabezal y se descarga. El tamaño de las partículas que descarga esta máquina se regula subiendo o bajando el eje, al cual se encuentra asegurado el cabezal cónico truncado. Esto da lugar a una abertura mayor o menor entre el cabezal y el anillo, pero este método de regulación es dificultoso comparado con la facilidad de control en el triturador de mandíbula Blake.

La relación de reducción de estos trituradores es grande debido a que -

la entrada para la carga de alimentación es relativamente grande comparada con lo pequeño de la abertura de descarga. El triturador giratorio con gran abertura para la carga de alimentación tiene una capacidad sumamente alta; en consecuencia, estas máquinas sólo deben usarse cuando tal capacidad puede aplicarse, es decir, cuando se tenga una cantidad pequeña de roca es más conveniente, debido al costo, usar el triturador de mandíbula. No obstante, en caso de que se desee triturar gran cantidad de rocas de tamaño grande, entonces el triturador giratorio es la máquina de mayor conveniencia a causa de que la energía por tonelada de material triturado es mayor que para los trituradores de mandíbula. Taggart establece una regla empírica diciendo que si las toneladas por hora de material a triturar, dividido por el cuadrado de la abertura en cm. es menor de 0.00162, debe utilizarse el triturador de mandíbulas, en otro caso el giratorio.

Un diseño especial es el de Nordberg en donde el cabezal y el anillo son de forma acampanada, de tal forma que el choque en la abertura mínima es imposible. En el Giracone Kue-Ken se tiene trituración sin rozamiento, debido a una localización conveniente del centro de giro del cabezal y se tiene como resultado un desgaste reducido y menos requerimiento de potencia.

En otra unidad típica, Hidrocone de Allis-Chalmers, el cabezal está soportado hidráulicamente y cambiando la cantidad de aceite en la cámara abajo del cabezal, se puede cambiar el tamaño del producto. El soporte hidráulico también permite un relevo inmediato en el caso de que caigan

Tabla No. 4

TRITURADOR HYDROCONE GUIA PARA SELECCION

| TAMAÑO MAXIMO DE ALIMENTACION (Pig.) | INTERVALO DE CAPACIDAD (TPH)* | TAMAÑO DEL TRITURADOR | INTERVALO POTENCIA (HP) |
|--|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 3/4 x 3/4 x 1 | 10-13 | 122 | 30 |
| 1 x 1 x 2 | 7-20 | 222 | 20-30 |
| 2 x 2 x 3 | 95-36 | 322 | 20-30 |
| 1 x 1 x 1 1/2 | 14-31 | 1 1/2 30 | 50 |
| 1 1/2 x 2 x 3 | 11.5-41 | 330 | 30-50 |
| 3 x 3 x 4 | 20-68 | 530 | 30-50 |
| 1 1/2 x 1 1/2 x 2 | 22-70 | 236 | 60-125 |
| 2 x 2 x 3 | 38-105 | 436 | 60-125 |
| 4 x 4 x 6 | 67-198 | 736 | 60-125 |
| 2 x 2 x 3 | 29-130 | 345 | 100-200 |
| 3 x 3 x 5 | 70-198 | 645 | 100-200 |
| 6 x 6 x 8 | 98-310 | 945 | 100-200 |
| 2 1/2 x 2 1/2 x 3 | 38-160 | 3 1/2 51 | 75-200 |
| 3 x 3 x 5 | 70-255 | 651 | 75-200 |
| 6 x 6 x 9 | 90-340 | 1052 | 75-200 |
| 3 x 3 x 4 | 80-205 | 460 | 150-300 |
| 4 x 4 x 6 | 130-350 | 760 | 150-300 |
| 7 x 7 x 10 | 200-490 | 1260 | 150-300 |
| 4 x 4 x 5 | 120-408 | 584 | 250-500 |
| 5 x 5 x 8 | 180-735 | 1084 | 250-500 |
| 11 x 11 x 15 | 440-1005 | 1784 | 300-500 |

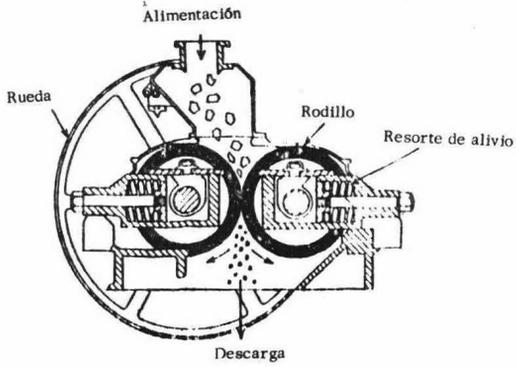
partículas de hierro dentro del triturador.

La capacidad de los trituradores de mandíbula y la de los giratorios -- con abertura de 4" a 24" pueden calcularse de modo aproximado mediante la fórmula de Taggart. $T=0.6LS.$

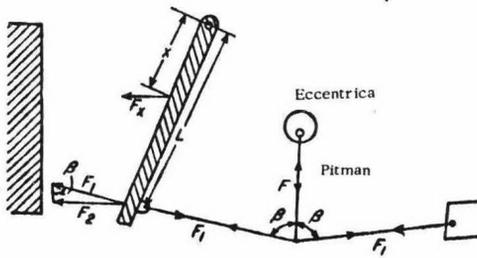
en donde T=capacidad (ton/hr), L=longitud de la boca de alimentación -- (plg.) y S=abertura de la descarga (plg.)

11.2. TRITURADORES SECUNDARIOS

Trituradores de rodillos.- Se pueden dividir estos en dos grupos: Uno el de rodillos lisos y otros el de rodillos dentados, corrugados o acanalados. La mayoría de los rodillos lisos actúan por compresión; los de rodillos corrugados combinan la compresión con el rozamiento; los dentados actúan por desgarramiento y algunas veces por estrellamiento. Los trituradores de rodillos lisos se usan para reducción secundaria, - esto es, con tamaños de alimentación de 1/2 a 2 1/2 ó 3 pulgadas y dan productos de 1/2 pulgada a un tamaño aproximado de malla No. 20. Estos trituradores trabajan de la siguiente manera: Dos rodillos o cilindros del mismo diámetro giran el uno hacia el otro con la misma velocidad. - Las superficies rotatorias sujetan los terrones de material y gradualmente los arrastran hacia adentro de ellas, en donde se trituran al tamaño determinado por la distancia que separa las superficies en su punto más cercano. En general, los rodillos son angostos y con diámetro grande; consisten de un núcleo central permanente de hierro blando embutido en ejes móviles y provistos de una superficie de desgaste de acero endurecido que puede reemplazarse. Los rodillos se mantienen separa



Triturador de rodillos lisos



Fuerzas en un triturador Blake

dos a una distancia constante por medio de bloques y se sostienen fijos mediante resortes resistentes que se flexionan cuando se introduce accidentalmente material que no puede triturarse protegiendo así a la máquina de desperfectos.

Los rodillos en trituradores pequeños giran a 300 r.p.m. y en los grandes de 85 a 100 r.p.m., pero la velocidad periférica de los rodillos -- grandes, aún así, es mayor que para los rodillos pequeños; ésta está -- comprendida entre los 200 y 1200 pies por minuto, llegando a veces a -- 1500 en ambos casos.

La presión entre los rodillos es grande; los valores típicos para trituradores de rodillo traylor son de 5500 libras por pulgada cuadrada lineal para rodillos pequeños y más de 40000 para rodillos grandes. El tamaño de la alimentación, además de ser función del espacio entre los rodillos, también lo es del diámetro de estos. La alimentación no debe contener trozos que no puedan ser mordidos por los rodillos. Es importante el poder ajustar con facilidad la abertura entre los rodillos a la distancia adecuada; también debe disponerse de los arreglos necesarios para que los rodillos puedan acercarse a medida que se efectúa el desgaste. Algunos rodillos se ajustan por medio de cuñas colocadas entre las chumuceras de los rodillos y los soportes fijos de la estructura del triturador; en otros tipos, la distancia se ajusta por medio de ruedas para tornillos sin fin, que mueven a las chumaceras hacia adelante y hacia atrás. Este último método es simple y puede controlarse con rapidez.

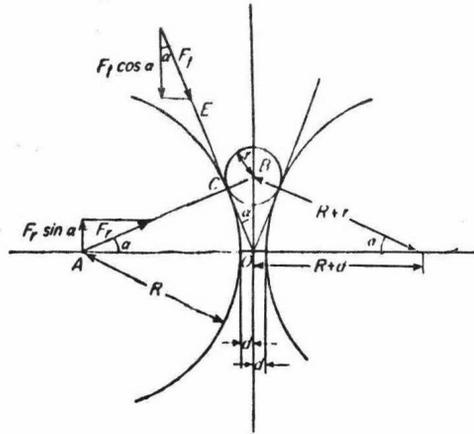
Es necesario que la distribución de la carga de alimentación sea uniforme a lo largo de las superficies de los rodillos; de otra manera, se --formarán canalizaciones que darán lugar a un producto que contenga gran cantidad de gruesos. Esto no sólo causa que la operación sea inadecuada, sino que también ocasiona un aumento en el mantenimiento, disminuye el volumen de descarga e incrementa el consumo de energía. Es por esto que se recomienda que los rodillos de trituración deben alimentarse con un sistema automático que disperse el material uniformemente a lo largo de las superficies.

El ángulo formado por las tangentes en el punto donde la pieza mayor del rodillo efectúa la "mordedura" y que se encuentra en la superficie de los rodillos, se denomina "ángulo máximo de mordedura", equivalente al doble del ángulo de fricción cinética entre el material y la superficie del rodillo:

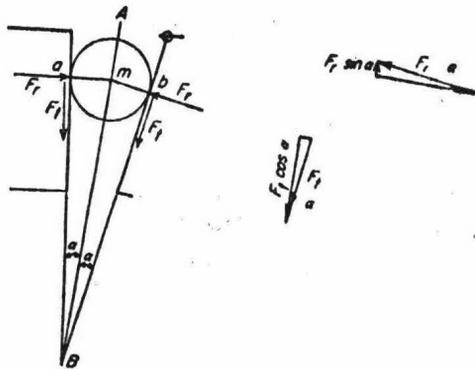
$$\frac{r+a}{r+b} = \frac{N}{\cos 2}$$

en donde r es el radio de los rodillos; a es la mitad del espacio entre los rodillos; b es el radio de las partículas que se trituran y N es el ángulo de mordedura en grados. El ángulo máximo de mordedura se obtiene de la ecuación anterior cuando b se toma como el radio de la partícula más grande que sería triturada por los rodillos de radio r y de claro 2a.

Cuando la separación entre los rodillos se mantiene bien llena, la trituración no sólo se efectúa por medio de la compresión de estos, sino --que también por el rozamiento entre las mismas partículas. Esto se llama trituración por estrangulación. En la trituración libre se alimentan



Angulo de mordida en trituradores de rodillos



Angulo de mordida en un triturador Blake

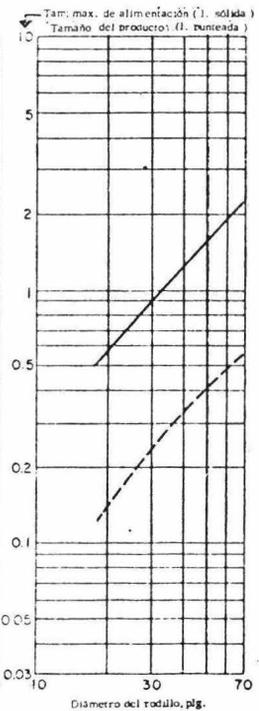
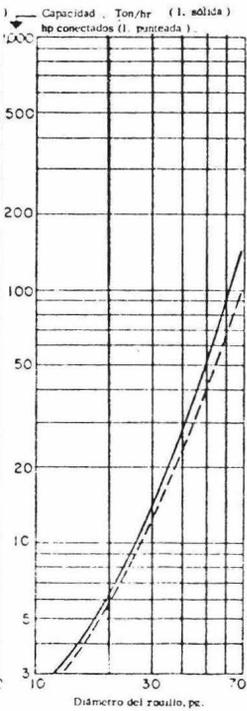
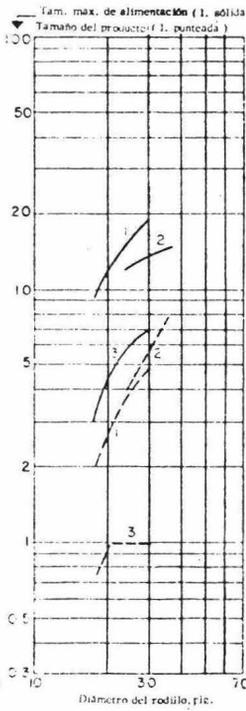
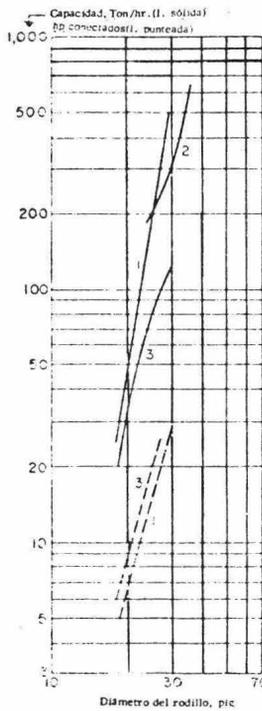
los rodillos con una rapidez tal, que una partícula es triturada y pasada antes de que sea mordida la siguiente. La trituración por estrangulación se emplea para trituración fina y la trituración libre para intermedia.

La capacidad teórica de estos trituradores se puede obtener por la fórmula $C = TWS/1782$, en donde C = capacidad (pies cúbicos por minuto), T = distancia entre los rodillos en pulgadas; W = ancho de los rodillos en pulgadas y S = velocidad periférica en pulgadas por minuto.

Debido a la irregularidad en el material alimentado, la capacidad real puede variar entre 25% y 35% con relación a la teórica.

Algunas veces se hace que uno de los rodillos gire ligeramente más rápido que el otro, como en el triturador de rodillos Internacional, lo que da una acción de desgarrar además de la compresión. La molienda fina de materiales blandos se hace a menudo con molinos de rodillos especiales de velocidad diferencial como el Allis-Chalmers Tir-set y los tres molinos de rodillos Ross. Para tal servicio, el diámetro del rodillo está entre 6 y 16 pulgadas. Los rodillos están generalmente huecos para poder enfriar con agua y algunas veces tienen corrugaciones poco profundas. Se montan de dos a tres pares de rodillos en una sola máquina.

Los desintegradores son molinos de rodillos de velocidad diferencial, - los cuales desgarran el material alimentado. Muchos de ellos, como el desintegrador, consisten de rodillos con un ligero ángulo respecto al eje. Los rodillos tienen velocidades entre 180 y 145 r.p.m. en desinte



Trituradores de rodillos dentados. (1) rodillo doble dentado, para carbón (2) rodillo simple, dentado para caliza (3) rodillo doble corrugado, velocidades diferenciales para carbón y poca salina

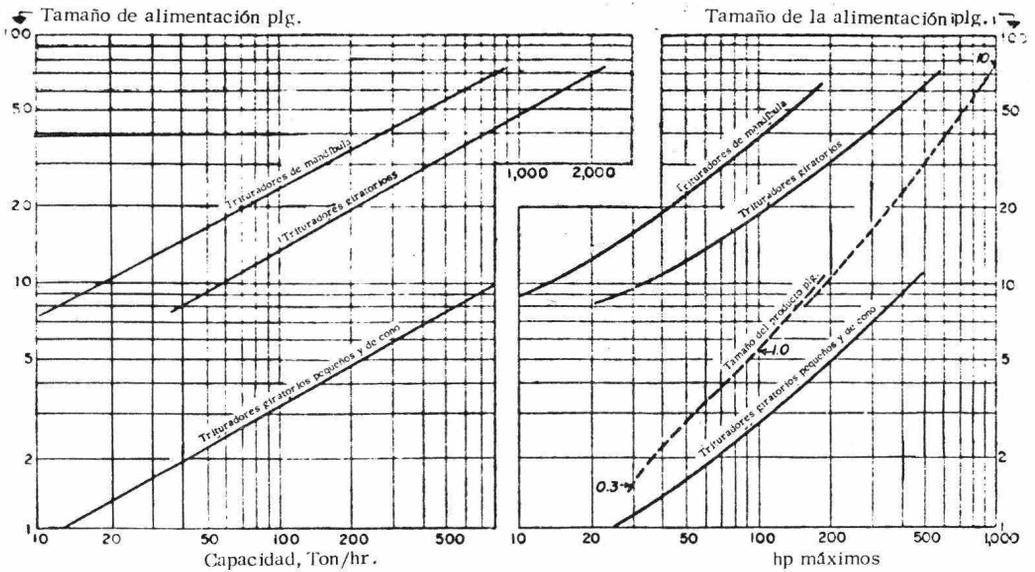
Trituradores de rodillos lisos. - basados en roca dura, densidad del producto 100 lb/ft³. El tamaño máximo de alimentación se refiere a la abertura entre los rodillos.

gradores grandes y de 300 a 230 r.p.m. en máquinas pequeñas. En otros modelos, tal como el de International Engineering, los rodillos grandes tienen superficies duras. Aquí el rodillo más pequeño está complementado con dos barras de acero tratado en caliente, para cortado y desgarrado. El rodillo lento gira a 150 r.p.m. y el rodillo de cortado a 900 r.p.m. Estas máquinas reducen no solamente por compresión y rozamiento, sino también por impacto.

Los trituradores de rodillos dentados consisten de uno o varios cilindros que giran en un plano horizontal. Los cilindros pueden girar con igual o diferentes velocidades. Los cilindros trituradores pueden estar provistos de camisas templadas de diseño variado, por ejemplo, corrugadas, ranuradas o lisas.

Los rodillos dentados no se limitan por el problema de mordedura como en el caso de los rodillos lisos y pueden manejar más material pudiendo llegar a tener capacidad de 500 ton/hr. y alimentarse con partículas de hasta 20 plg. de tamaño. En estas unidades los dientes son piramidales, pero en el quebrantamiento del coque se usan unidades similares con dientes en forma de hojas, paralelos al eje del rodillo o dientes en forma de sierra normales al eje.

El más común de los trituradores de rodillos dentados es aquel que actúa con un solo rodillo y el cual empuja al material sobre un yunque ó placa de quebrantamiento contra lo que lo quiebra, desgarró o tritura en piezas más pequeñas. Estos trituradores manejan materiales más blandos que los de doble rodillo.



Trituradores de mandíbula, giratorios y cónicos.

Las capacidades están basadas en **materiales duros** desmenuzables con una densidad del producto de 100 lb/ft^3

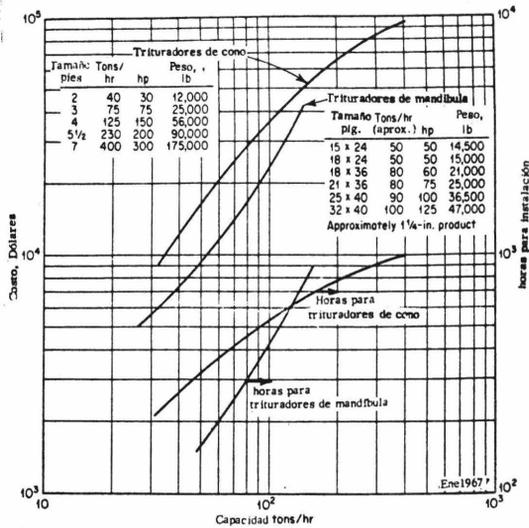
Potencia, está indicada por las curvas sólidas; el tamaño por las curvas punteadas. A la izquierda para trituradores pequeños y trituradores de cono; a la derecha para trituradores de mandíbula y trituradores grandes de cono.

El triturador Jeffrey de un solo rodillo tiene tanto dientes en forma de hoja como en forma de sierra, de diferentes tamaños, que tritura efectivamente substancias tales como: el carbón, el hueso y la alumina.

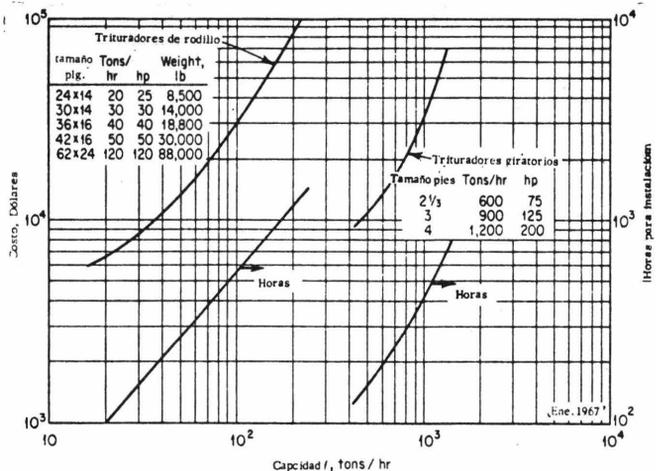
El triturador de dientes de sierra actúa más bien por desgarramiento -- que por compresión, lo que conduce a un mínimo de calentamiento, a producir menor número de finos y un menor consumo de energía, lo que no es característico en otro tipo de trituradores preliminares.

Triturador cónico.- Es esencialmente un triturador giratorio de alta velocidad. El cono o cabezal cónico, que gira por medio de una excéntrica impulsada por engranajes y una contramarcha, está soportado desde su base. Gruesos resortes mantienen fija la armazón superior; cuando la máquina se obstruye o estrangula por alimentación de tamaño excesivo o por la entrada de algún trozo de hierro, los resortes permiten que suba la armazón superior en el punto en que se produce la obstrucción de modo que el material pueda descargarse.

La concavidad de trituración es de tal forma, que la alimentación pasa a través de una zona final, en donde los lados de la concavidad y el cabezal de trituración son prácticamente paralelos y la velocidad de giro es lo suficientemente rápida (cerca de 500 r.p.m.) como para que cada partícula sea triturada entre el cabezal y la concavidad, obteniéndose un producto de uniformidad excepcional. Los trituradores cónicos pueden alimentarse con cargas de 1 5/8 a 14 plg. de diámetro y reducir las



Trituradores. El precio incluye motor y accionador, y resguardo.



Trituradores. - El precio incluye motor, accionador

de 1/8 a 2 1/8 plg., operando desde 14 hasta 900 ton/hr. La abertura de descarga del triturador cónico puede ajustarse mientras la máquina se encuentra en operación.

Los dos tipos comunes son: Symons (Nordeberg Mfg.Co.) y TelSmith (Smith Engineering Works). Este último es una variante del triturador de cono. La cabeza trituradora posee perfil esférico y la placa externa de trituración queda fija en su posición de trabajo mediante resortes de compresión. La esfericidad de la cabeza facilita la descarga del producto triturado.

Trituradores de disco.- El más conocido es el triturador de disco tipo Symons. Este triturador actúa con el principio consistente en que la fuerza centrífuga desplaza a las piezas de la zona de trituración, una vez que son lo suficientemente pequeñas como para escapar a través de las aberturas entre las superficies. La fuerza de trituración se aplica con dos discos en forma de platillo que giran en la misma dirección y con igual velocidad. El eje de uno de los discos está soportado en un cojinete excéntrico, el cual provoca que el disco siempre se encuentre en cierto ángulo con respecto al otro disco. La carga de la alimentación se introduce axialmente entre los discos; es desplazada hacia el interior, tomada por los discos en el punto de máxima abertura y finalmente es triturada por presión continua directa, a medida que los bordes de los discos se aproximan entre sí, debido a la excentricidad de sus ejes.

Molinos de jaulas múltiples.- (Molinos de jaula de ardilla).- Consis-

te de dos o más jaulas concéntricas que giran en sentidos opuestos y a gran velocidad. La alimentación llega a la jaula interior, en donde la fuerza centrífuga despiende al material hacia afuera triturándose éste -- por impacto con las demás jaulas. La operación de estos molinos es similar a la de los molinos de martillos, pero los de jaulas múltiples se usan con propósitos de desintegración. Se usan para triturar materiales que no tienen demasiada resistencia mecánica y que pudieran ser muy húmedos o pegajosos para manejarlos con otro tipo de maquinaria. También se usan para desgarrar materiales fibrosos, tales como trozos de madera y el amianto.

Trituradores de martillos.- Los molinos de martillos aquí mencionados están confinados exclusivamente a la trituración preliminar o intermedia, o sea son molinos de martillos de velocidad baja o velocidad media.

Molinos de martillos de velocidad baja o velocidad media.- El principio con el que opera este tipo de máquina es el de aplicar un impacto - mientras el material está suspendido en el aire. La partícula se somete al impacto con la fuerza necesaria como para triturarla o quebrarla y con una velocidad tal que no se adhiera a la parte móvil.

El molino de martillos viene a ser una máquina para cualquier trabajo - de reducción en la preparación de partículas de tamaño intermedio.

Consiste esencialmente de un eje horizontal o disco en el cual van montadas martillos que van articulados o pivotados sobre dicho eje o disco; tienen una gran entrada de alimentación que permite alimentaciones

con partículas de tamaño grande. En la descarga está provisto de una parrilla o de un tamiz con el cual se regula el tamaño del producto, ya que el material no sale por el tamiz o la parrilla, hasta que alcanza el tamaño requerido.

Algunas máquinas están construídas simétricamente para que se pueda invertir el sentido de rotación con el fin de que el desgaste de los martillos y las placas rompedoras sea uniforme.

Los molinos de martillos mencionados aquí, como ya dijimos, son utilizados para un intervalo de reducción entre primaria e intermedia de materiales quebradizos poco abrasivos. También tienen usos especiales como desintegradores cuando se requiere triturar material de naturaleza fibrosa mediante la aplicación del efecto de desgarre. Otro uso especializado es en la ruptura del material quebradizo susceptible al reblandecimiento cuando se calienta.

El tamaño de partícula en la alimentación varía de 12 a 20 plg. y en el producto en más o menos 1/4 plg. Los requerimientos de potencia varían desde 5 hasta 500 HP.

Para trabajo por impacto, los martillos son a menudo barras cuadradas o rectangulares, pero para desgarrar materiales fibrosos estos tienen formas especiales.

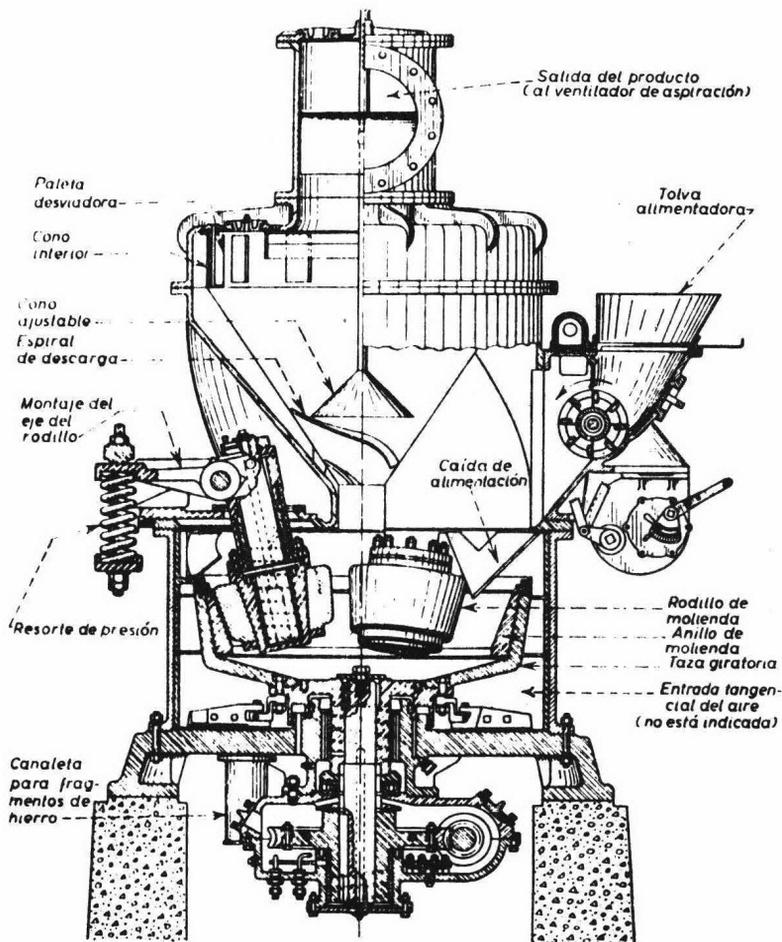
Algunos ejemplos de modelos de molinos de martillos, de velocidad baja, son: El impactor Pennsylvania que es un triturador reversible, el cual

tritadura arriba de 600 ton/hr de una alimentación con tamaño de partícula de 10 plg. y el triturador Jeffrey Miracle, el modelo más grande que existe de estos trituradores. Para triturar roca, el molino de martillos da un producto más cúbico que los que dan los trituradores de quijada o el giratorio.

Molinos de Martinetes.- Los martinetes o molinos de gravedad pueden usarse para triturar material con diámetro máximo de 1 1/2 plg. a material cuyo diámetro mínimo sea de malla No. 40 (standard de Tyler). El material que va a triturarse se alimenta en compartimentos o morteros y se subdivide mediante impacto con los martinetes o martillos que pesan cerca de 1000 lb. Estos martinetes se levantan por medio de levas y se dejan caer sobre el material que se tritura, con lo cual se reduce el tamaño por golpe o impacto. Los martinetes se usan mucho en la trituración de materiales húmedos (50% o más), pero su aplicación actual se limita casi exclusivamente a la industria minera del oro, en donde la trituración y la molienda se efectúan simultáneamente con la cianuración o amalgamación. El tamaño del producto se regula por medio de tamices que rodean a los recipientes o morteros, por medio del peso de los martillos y por la velocidad de la alimentación del agua y mineral.

Los martinetes se usan poco debido al alto costo de energía y al gran costo inicial por tonelada de descarga. Por otro lado, los martinetes producen mayor cantidad de finos del que normalmente se desea.

Trituradores de cubeta o paila.- También se conoce como molino "Chile-



Molino de cubeta

no". Consiste de uno o más rodillos o trituradores fijos que se hacen girar en una cubeta o paila; ésta puede permanecer fija mientras los rodillos ruedan sobre ella, o bien puede girar haciendo girar los rodillos por rozamiento. En algunos tipos los rodillos son de piedra, mientras que en otros, más recientes, los rodillos son de acero duro, de piedra o fierro provistos de llantas de acero. Puesto que la parte exterior del rodillo recorre una distancia mayor que la interna, existe un deslizamiento o esfuerzo cortante constante. La alimentación es arrastrada continuamente bajo los rodillos mediante rascadores de fierro o arados, colocados con una inclinación apropiada y, cuando la operación termina, el producto puede descargarse dejando caer la placa que soporta la rejilla en la base del rodillo.

En el triturador Bonnot de cubeta puede regularse la distancia entre los rodillos y el fondo de la cubeta. Esta máquina tiene un anillo central macizo triturador, además de otro exterior de planchas con perforaciones, que van de 1/6 a 1/2 plg. y que hacen las veces de cribas. Estas máquinas se usan cuando se desea triturar materiales blandos o de dureza media como arcillas, cenizas y minerales blandos. Se alimentan materiales de más o menos 3 plg., obteniéndose productos que pasan por los tamices No. 4 al No. 16. Es una característica de este equipo el tener una alta relación de reducción, bajo consumo de energía y gastos de mantenimiento pequeños.

11.3. MOLINOS PULVERIZADORES

Los molinos de bolas, de guijarros, de varillas o barras, los tubulares,

así como los de compartimento, son máquinas comunes en su diseño, en --
cuanto que todas consisten esencialmente de un recipiente cilíndrico -
montado sobre un eje horizontal sobre el cual giran. Estos equipos en }
operación continua, como en operación intermitente, son de las unidades }
más comunes y versátiles, aunque no son de las más bajas en costo ini--
cial y se emplean extensamente en la industria de la producción de pol- }
vos.

Existen muchas modificaciones del diseño básico. Los cilindros cortos
de diámetros grandes caracterizan a los molinos de bolas, a los de gui-
jarros y a los de varillas o barras, mientras que los cilíndricos lar--
gos de diámetro corto caracterizan a los molinos tubulares y de compar-
timientos.

En algunos molinos, la pared del cilindro está perforada, pero es más -
común que sea sólida. En los de pared sólida la descarga del material
molido es por uno de los extremos o por el centro.

Todas estas características son las que diferencian a estos molinos, pe-
ro también existe un punto determinante que es el medio de molienda uti-
lizado por cada uno de ellos, ya que unos utilizan bolas de acero; otros
de piedra o cerámica; otros, en lugar de bolas, usan varillas o barras y
otros más combinan estos medios de molienda.

Veamos ahora en detalle cuales son los que utilizan cada uno de estos -
medios, pero antes es necesario mencionar el triturador Bradford que es
un tipo de molino que queda dentro de esta clasificación, pero que se -

puede decir que es una excepción porque no utiliza medio de molienda y, al mismo tiempo, puede ejemplificar al molino con cilindro de pared perforada, la cual se utiliza como criba. Su funcionamiento es como a continuación se describe: El material que se alimenta, generalmente carbón, al girar el molino es levantado por medio de unas barras de retención - colocadas en las paredes del cilindro. Al llegar los trozos de carbón a la parte alta del cilindro caen libremente, lo que ocasiona que se -- trituren al impacto contra las placas perforadas y aún entre ellos mismos al caer unos sobre otros.

Después de que el material se ha sometido a suficiente reducción de tamaño, para que pueda pasar a través de las perforaciones en las placas, se descarga a través de éstas.

 Molino de bolas.- el molino de bolas tiene este nombre porque tiene bo las de acero como medio de molienda. Generalmente su diámetro es igual o mayor al de su largo; se alimenta por uno de sus extremos y se descar ga por el otro y se utiliza para molienda húmeda o en seco.

La velocidad del molino es tal que el material y las bolas son levantadas hasta lo alto del cilindro antes de caer. Al caer el material se -- tritura por impacto, entre las bolas. Si la velocidad es muy alta, el material y las bolas se centrifugalizan, esto es, giran sin despegarse de las paredes del cilindro no habiendo molienda. La velocidad a la -- cual sucede esto se le llama "velocidad crítica" que puede determinarse por medio de la siguiente fórmula:

TABLA No. 5

TAMAÑO DE MOLINOS
 (Molienda húmeda)
 (25-60% vol. total)

| T A M A Ñ O | | VOLUMEN TOTAL DEL CILINDRO (Galones) | |
|-------------|-------|---|----------------|
| DIAMETRO | LARGO | GUIJARROS | BOLAS DE ACERO |
| 15" | 21" | 9 | 16 |
| 18" | 24" | 16 | 21 |
| 21" | 28" | 28 | 42 |
| 24" | 30" | 40 | 59 |
| 24" | 36" | 49 | 70 |
| 32" | 24" | 60 | 83 |
| 32" | 36" | 94 | 125 |
| 37" | 48" | 166 | 223 |
| 42" | 48" | 220 | 287 |
| 45" | 48" | 251 | 330 |
| 54" | 48" | 389 | 476 |
| 54" | 60" | 494 | 594 |
| 60" | 48" | 470 | 587 |
| 60" | 60" | 597 | 734 |
| 60" | 72" | 726 | 883 |
| 62" | 72" | 778 | 944 |
| 72" | 60" | 853 | 1057 |
| 72" | 72" | 1035 | 1269 |
| 72" | 96" | 1405 | 1692 |
| 72" | 108" | 1585 | 1903 |
| 72" | 120" | 1765 | 2120 |
| 90" | 120" | 2850 | 3300 |

$$V_C = \frac{54.12}{R}$$

en donde V_C = velocidad crítica en r.p.m.

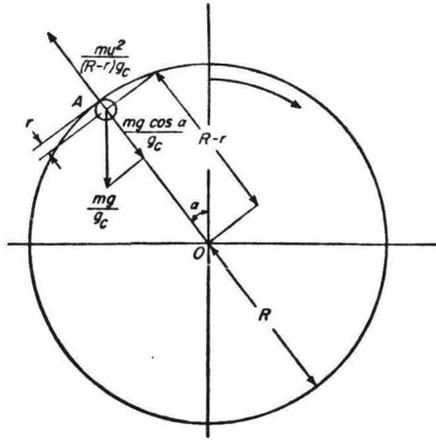
R = radio del cilindro en pies.

Para molienda en seco la velocidad óptima usual está entre 65 y 70% de V_C y para molienda húmeda entre 75 y 80% de V_C .

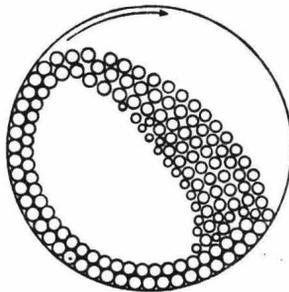
Se ha encontrado que en los molinos de diámetro pequeño, con un alto -- porcentaje de la velocidad crítica, son mejores para romper por impacto piezas grandes de material y porcentajes bajos favorecen el rozamiento para producir material fino. También se ha considerado que los molinos grandes (velocidad baja) son más económicos y que es mejor usar el 50% de la velocidad crítica.

En un molino de bolas la finura del producto puede regularse por los si guientes métodos, si se opera en circuito continuo:

- a.- Cambiando la velocidad de alimentación. Si se alimenta material grande no se obtendrán muchos finos si permanece la velocidad de alimentación constante.
- b.- Alterando el diámetro de la alimentación. Si se alimenta material grande no se obtendrá más finura si permanece la velocidad de alimentación constante.
- c.- Aumentando el peso total de las bolas. Al aumentar el peso total de las bolas de cierto tamaño, se logra el aumento del grado de fi nura del producto, siempre y cuando se mantenga constante la velocidad de alimentación.



Fuerzas a las que está sometida una bola en un molino de bolas



Acción en un molino de bolas

- d.- Alternando el diámetro de las bolas. Con bolas de diámetro pequeño se obtiene mayor finura en el producto; éstas se consideran de 1/2, 1 1/2 y 2 plg.
- e.- Cambiando la inclinación del molino. Al aumentar ésta o al bajar la abertura de descarga disminuye el grado de finura; también aumenta la capacidad del molino.
- f.- Aumentando la libertad de carga. En los molinos provistos con rejillas en la descarga, se puede reducir la finura colocando rejillas con aberturas más grandes.
- g.- Variando la velocidad de rotación. Con velocidad baja las bolas -- tienden a rodar sobre el recubrimiento ejerciendo una acción de rozamiento sobre las partículas más que de impacto, por lo que hay más reducción de las partículas pequeñas. A velocidades altas las bolas ya no ruedan, sino que vuelan dentro del molino chocando contra las paredes de éste y triturando el material por choque entre las mismas bolas y el choque de éstas contra las paredes del molino; esta velocidad es más bien para obtener un producto grueso.

Dentro de un molino de bolas, que ya ha estado en operación, se podrán encontrar bolas de diferentes tamaños debido al desgaste que sufren las mismas; es por esto que hay que surtir de vez en cuando bolas nuevas al molino para mantener la carga del medio de molien-
da constante. *

Existe un modelo de molino de bolas cónico mejor conocido como molino de Hardinge, cuya única característica es en cuanto a la orde

nación de las bolas de trituración, ya que las bolas grandes tienden a concentrarse en el punto de mayor diámetro y las bolas pequeñas en el de menor diámetro que está próximo a la descarga. Tiene una pendiente de bajada de 60° del punto de alimentación a la sección cilíndrica seguido de una subida de 30° que termina en un cono que se reduce hasta la descarga.

Las piezas de material grande se reducen por las bolas grandes en la parte cilíndrica del molino; cerca de la descarga, el material fino se muele por medio de las bolas pequeñas. Este método de repartir la energía en el molino incrementa marcadamente la eficiencia de la molienda.

El mayor punto de desgaste en los molinos de bolas es el recubrimiento interior. Algunos recubrimientos son de placas de acero al carbón fijadas con barras de retención que reducen al mínimo el deslizamiento de las bolas sobre la superficie del recubrimiento; pero, sin embargo, no se pueden usar las barras que sobresalgan mucho porque impiden el movimiento relativo de las bolas. Otros recubrimientos metálicos son los del tipo de ondas, con ondulaciones longitudinales en vez de barras de retención o con barras de retención en espiral.

Muchos molinos de bolas se operan como una unidad continua; se alimentan por uno de los extremos a velocidad uniforme y se descarga a través de una abertura ligeramente grande, en el otro extremo del molino, tal que permita el flujo del material molido.

En ocasiones, el producto molido sale a través de aberturas en el arma-

REQUERIMIENTOS DE POTENCIA Y CAPACIDAD DE LOS MOLINOS

| (Diám. x Largo) | CARGA Aproximada | RPM Aproximados | CAPACIDAD PROMEDIO, TON/24 HR. | | | Potencia HP. |
|--|---------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------|
| | | | 1/2 plg. a Malla No. 48 | 1/4 plg. Malla No. 65 | 1/4 plg. a Malla No. 100 | |
| <u>M O L I N O D E B O L A S</u> | | | | | | |
| 3 x 2 | 1,000 | 35 | 12 | 9 | 5 | 6-8 |
| 3 x 4 | 2,000 | 35 | 24 | 18 | 10 | 12-15 |
| 4 x 4 | 3,300 | 30 | 42 | 30 | 10 | 20-25 |
| 5 x 4 | 5,000 | 29 | 80 | 55 | 30 | 30-40 |
| 5 x 6 | 7,500 | 29 | 120 | 85 | 50 | 40-50 |
| 6 x 3 | 6,000 | 25 | 125 | 85 | 50 | 50-60 |
| 6 x 5 | 10,000 | 25 | 210 | 150 | 90 | 75-100 |
| 6 x 6 | 12,000 | 25 | 250 | 175 | 100 | 90-120 |
| 6 x 12 | 24,000 | 25 | 500 | 340 | 200 | 150-200 |
| 7 x 6 | 21,000 | 23 | 500 | 350 | 200 | 110-160 |
| 8 x 6 | 28,000 | 22 | 620 | 450 | 260 | 150-225 |
| 10 x 9 | 74,000 | 17 | 1,500 | 1,100 | 650 | 550-600 |
| <u>M O L I N O S C I L I N D R I C O S</u> | | | | | | |
| 2 x 2/3 | 600 | 40 | 4 | 3 | 2 | 2 |
| 3 x 2/3 | 1,100 | 35 | 12 | 10 | 9 | 5-8 |
| 3 x 2 | 2,000 | 35 | 17 | 15 | 13 | 10 |
| 5 x 3 | 9,500 | 28 | 100 | 80 | 60 | 40-50 |
| 6 x 3 | 15,000 | 24 | 180 | 120 | 90 | 60-75 |
| 7 x 4 | 27,000 | 23 | 300 | 220 | 150 | 125 |
| 8 x 4 | 38,000 | 21 | 480 | 350 | 270 | 175-200 |
| 12 x 6 | 110,000 | 16 | 1,800 | 1,800 | 1,000 | 700-800 |

zón del molino. A esto se llama descarga periférica y es más común en los molinos de rodillos y se puede llevar a cabo ya sea por el centro o por un extremo del armazón.

Los molinos de bolas en operación intermitente se cargan y descargan a través de una escotilla que se encuentra localizada en el armazón y la cual se cierra cuando el molino está en operación.

En la molienda húmeda la pulpa fluye por una de las bocas de cañón al alimentarse, pero en la molienda en seco es necesario poner el molino inclinado para lograr que el material fluya dentro del mismo. Para el flujo de salida, se coloca un diafragma aproximadamente 6 pulgadas antes de la descarga en el extremo del cilindro; la función del diafragma es detener el medio de molienda y permitir el paso de la pulpa para que fluya en el espacio entre el diafragma y la placa final del cilindro. Así también, en el molino de compartimientos se pueden usar diafragmas o rejillas en el final de cada sección, que permiten el paso del material molido de sección en sección, pero al mismo tiempo retienen las bolas en la sección deseada de la unidad. El método del diafragma se usa más en molienda húmeda porque el polvo en la molienda en seco es muy diffícil de controlar.

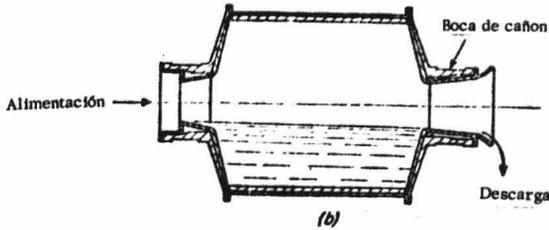
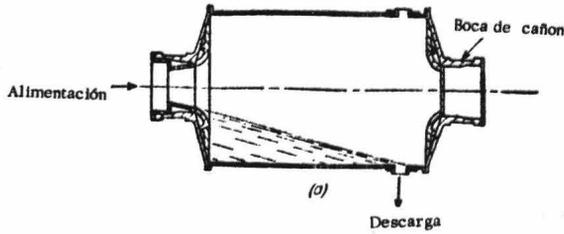
La descarga por la boca de cañón resulta en menor capacidad y deja el paso de más gruesos que los diafragmas, pero en cambio no permite que se aglomere el producto y reduce el desgaste en las varillas, en las bolas y en el recubrimiento. Como los costos de mantenimiento vienen a -

ser más y más significativos, muchos operadores prefieren el flujo por la boca de cañón, más que por los diafragmas, para la descarga.

En muchas instalaciones, los trabajadores "operan por el oído". El ruido proveniente de un molino de bolas en operación es muy buena indicación de cómo está trabajando. El molino debe ser ruidoso, pero no demasiado. Una operación de molienda sin ruido significa que hay sobrecarga en el molino, con el medio de molienda amortiguado por el exceso de material dentro del molino. En cambio una operación muy ruidosa significa que el molino no tiene carga suficiente. Para tener la carga adecuada, actualmente se usan oídos electrónicos para medir la intensidad del ruido y por medio de un controlador de alimentación ajustar la alimentación a un valor satisfactorio.

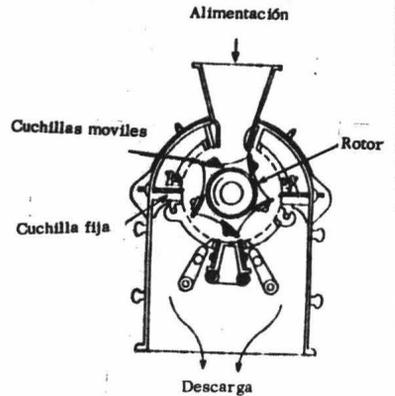
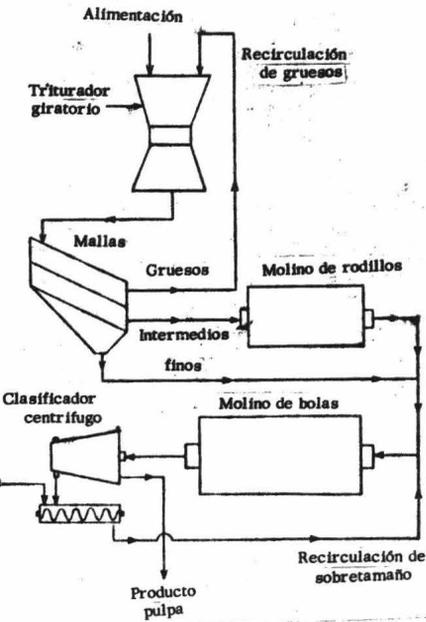
Los molinos revolventes pueden manejar material húmedo o seco. En la molienda seca se tiene menor desgaste en el recubrimiento y en el medio de molienda y produce un gran porcentaje de finos en el producto, pero es mucho más común la molienda húmeda, con la cual también se ahorra potencia, se tiene gran capacidad, permite la clasificación o tamizado húmedo, elimina problemas de polvos y simplifica el manejo.

En el caso del molino de bolas, éstos operan sólo con material relativamente húmedos (menos de 3-4% de agua) o cuando está muy húmedo (mayor del 50% de agua), pues el material poco húmedo se aglomera alrededor de las bolas y las somete al efecto de amotiguamiento; para este caso, el molino de varillas es el más indicado.



Metodos para descargar molinos revolventes.

(a) Descarga periferica (b) Descarga por la boca de cañon



Cortador rotatorio de cuchillas

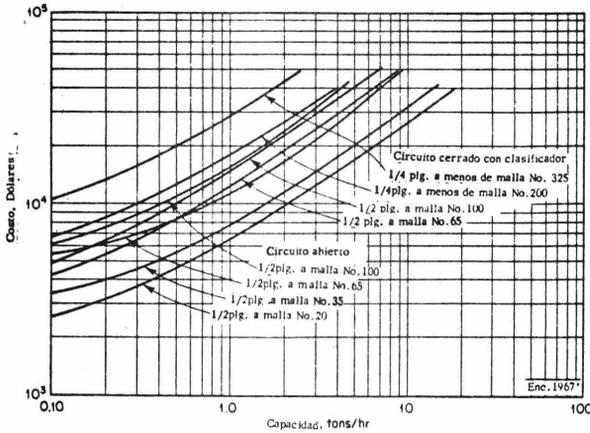
Diagrama de molienda en circuito cerrado

Ya sea que la molienda sea seca o húmeda, la operación debe prolongarse por muchas horas para obtener una finura satisfactoria dentro de los límites de tamaño de partícula. Frecuentemente se puede usar alguna forma de clasificación, retornando el material grueso al punto de alimentación del sistema (operación en circuito cerrado). Usando la clasificación, se puede reducir la cantidad de finos y también se puede obtener una gran capacidad por HP-Hr. En muchos casos la finura producida por estas técnicas está en el intervalo de malla No. 100 o más.

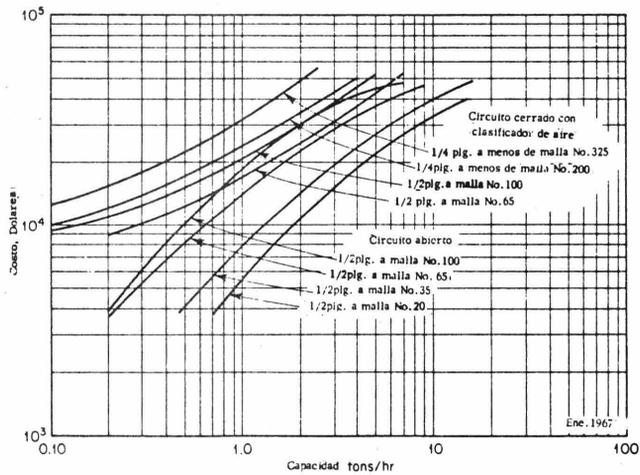
Para estos procesos se usa la clasificación centrífuga con aire para materiales secos y clasificación centrífuga continua o ciclones para materiales húmedos.

Molinos de guijarros.- Estos son simplemente variaciones del molino de bolas en los que el medio de molienda, o sea las bolas de acero, ha sido sustituido por bolas de roca dura, de porcelana, o de guijarros. El molino de guijarros generalmente se usa cuando se desea evitar la contaminación con fierro; por esto los molinos tienen recubrimiento de porcelana, de pedernal, de piedra de molino, de Silex y en ocasiones recubrimientos de hule y de plástico y no requiere de las barras de retención. Los molinos de guijarros se usan frecuentemente en operación intermitente para moler material a producto de mayor finura y uniformidad en comparación con el molino de bolas. Se usan en la manufactura de talco, arena para vidrio laminado, feldespato molido para porcelana, etc.

Molinos tubulares.- Este tipo de molino pertenece a la clase de los --



Molinos de guijarros en molienda húmeda. El precio incluye instalación, clasificador, motor, accionador y un promedio para cimentación y erección. No incluye flete, equipo auxiliar o equipo para manejar materiales.



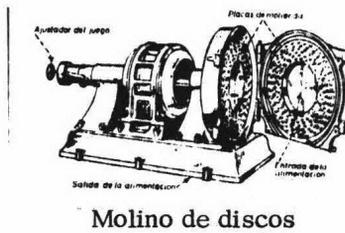
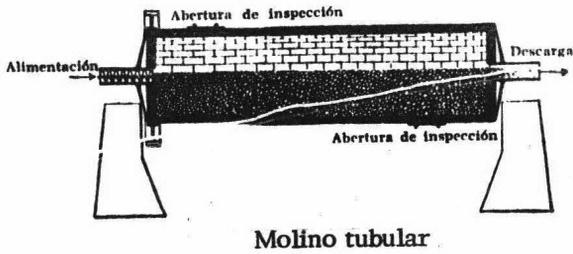
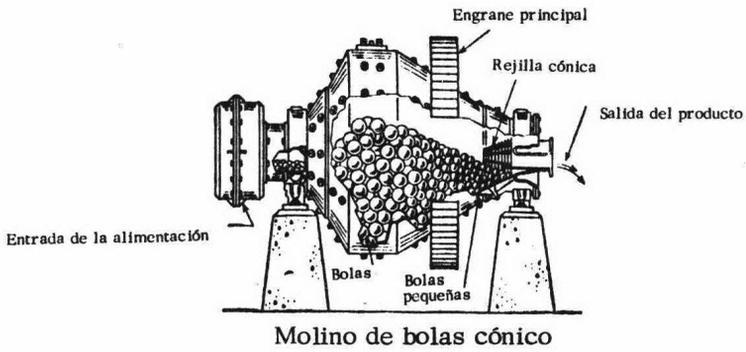
Molino de guijarros en molienda seca. El precio incluye, instalación, clasificador, motor, accionador, y un promedio para cimentación y erección. No incluye flete, equipo auxiliar o equipo para manejar los materiales.

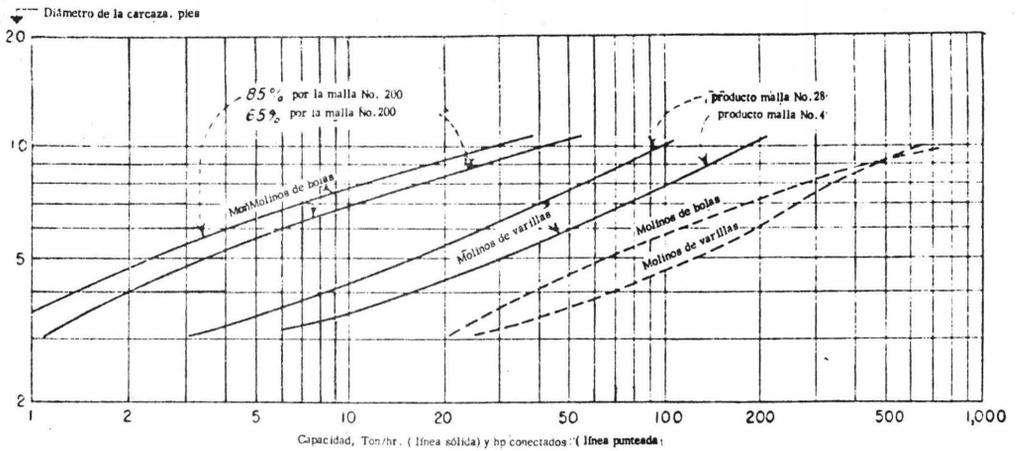
que tienen el largo mayor al diámetro en relación de 3 ó 4 a 1 y se usa como medio de molienda bolas, al igual que en los molinos de bolas que pueden ser de acero, piedra, porcela o guijarros.

Mientras que muchos molinos de bolas se operan continuamente, otros se operan intermitentemente para dar producto más fino, aunque a un costo más alto. En cambio, el molino popular está diseñado para molienda fina y trabajo contínuo. Muele el material de 3 a 5 veces según sea el largo del molino en comparación con uno de bolas y excelente para remoler un polvo en un solo paso, en donde la potencia no es primera importancia. Así, mientras el molino de bolas es adecuado para una pulverización relativamente gruesa, tal que el 95-98% pase a través de una malla No. 50 ó 60; los molinos tubulares se usan para producir un material aún más fino.

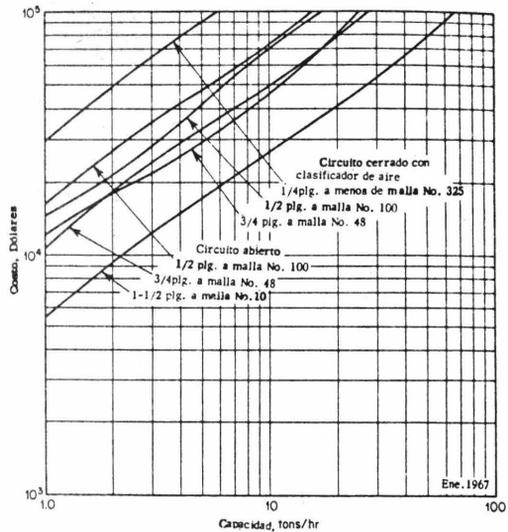
Las características de los molinos de bolas y los tubulares son similares, pero el material permanece más tiempo en el molino tubular debido a su mayor longitud y, por lo tanto, se obtiene un producto más fino. Los molinos tubulares varían de tamaño, desde 10 a 30 pies de longitud y de 3 a 8 pies de diámetro. Un molino de 5 x 26 pies puede moler de 75 a 95 toneladas de material de dureza media, obteniéndose producto de malla No. 20 a 150 por cada 24 horas. Se usan mucho en la Industria -- del Cemento en donde se requiere producir material fino utilizando equipo que sea lo más simple posible.

Molinos de compartimentos.- Estos molinos son una modificación de los

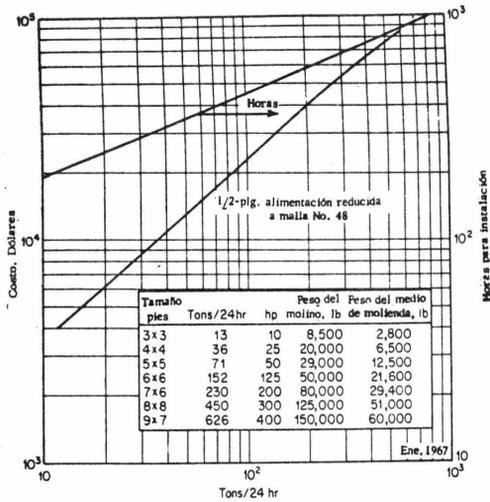




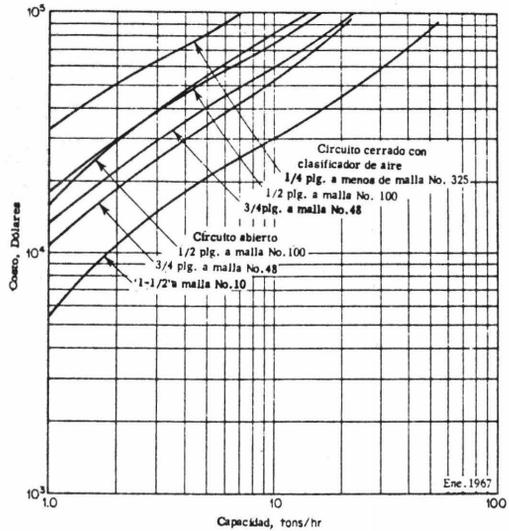
Molinos de bolas y de varillas. Capacidad referida a molienda húmeda, circuito abierto, un solo paso y material duro.



Molinos de bolas en molienda húmeda. -El precio incluye instalación, clasificador, motor, accionador y un promedio para cimentación y erección. No incluye flete, equipo auxiliar o equipo para manejar los materiales.



Molinos de bolas. - La carga de bolas es a \$90/ton. (U.S.).
 El precio incluye recubrimiento, motor, accionador y resguardo.



Molinos de bolas en molienda seca. - El precio incluye instalación, clasificador, motor, accionador y un promedio para cimentación y erección. No incluye flete, equipo auxiliar o equipo para manejar los materiales.

tubulares. Si dividimos un molino tubular, con diafragmas o parrillas, en varios compartimentos, tendremos un molino de compartimentos, uno de los cuales puede tener bolas grandes, otro bolas medianas y un último - bolas pequeñas. Esta segregación se hace con el objeto de simplificar el proceso de molienda, economizar espacio en el piso y reducir los costos de instalación, operación y mantenimiento, ya que ayuda bastante en la eliminación del trabajo no utilizable, porque las bolas grandes rompen solamente los trozos grandes de material, sin que haya interfe--ren--cia de los finos. Algunos de estos molinos son capaces de recibir y --descargar el material entre los compartimentos, permitiendo la operación individual de estos en circuito cerrado.

Molino de varillas.- Este tipo de molino es semejante al molino tubu--lar, pero usa como medio de molienda varillas con alto contenido de carbono. Es un molino de reducción preliminar que reduce piezas de 3/4 --plg. a más o menos un tamaño de malla No. 10. Se puede decir que este molino se encuentra entre los trituradores y los molinos pulverizadores y a menudo preparan el material que se alimentará a un molino de bolas para una reducción final. Las varillas de acero se extienden a lo lar--go del cilindro y se evita que se lleguen a torcer o a cruzar, colocan--do en el principio y final del armazón terminales cónicas. Las varillas varían de 1 a 5 plg. de diámetro, dentro de un molino de este tipo, de--bido al desgaste que sufren durante la operación.

En estas máquinas la molienda depende más bien de un contacto lineal -- que de un contacto puntual, como en el molino de bolas. Es decir, la - acción de la molienda consiste del efecto del rodamiento, compresión y

TABLA No. 7

VIBRO - ENERGY (MOLINO VIBRATORIO)

| DIAMETRO (PLG) | CAPACIDAD (GAL) | CARGA MEDIO DE MOLIENDA (LBS.) | MOTOR (HP) |
|-------------------|--------------------|---|---------------|
| 18 | 2.6 | 200 | 1/4 |
| 45 | 20 | 1600 | 2,2 1/2 ó 5 |
| 60 | 70 | 5600 | 7 1/2 ó 10 |
| 80 | 182 | 14000 | 20 |

NOTAS: TODOS LOS MOTORES SON TRIFASICOS DE 60 CICLOS Y DE 1200 RPM. -
 LOS MOTORES DEBEN SER ESPECIFICADOS PARA 220 ó 440 VOLTS. LA CAMARA DE
 MOLIENDA PUEDE RECUBRIRSE CON VARIOS TIPOS DE ELASTOMEROS. COMO ALTER-
 NATIVA, LA CONSTRUCCION DEL RECUBRIMIENTO PUEDE SER DE ACERO INOXIDABLE
 O DE CROMO-MOLIBDENO.

rozamiento y solamente existe poca reducción debida al choque entre las varillas. En consecuencia, el molino de varillas es inferior al molino de bolas en cuanto a moler materiales duros o resistentes al impacto. Las ventajas del molino de varillas consisten en que suministran productos muy uniformes, se consume poca potencia, se tiene menos desgaste en el medio de molienda y en el recubrimiento y el costo de las varillas - es bajo.

Los molinos de varillas, además de tener una relación de reducción comparativamente pequeña, no son adecuados para la molienda fina; su uso - se limita a mezclas pegajosas, ya que el peso de las varillas es suficiente para separarlas de la suspensión.

Molino vibratorio.- La vibración aplicada a los molinos de bolas ha tenido recientemente una aceptación como un nuevo e interesante método de molienda. Los molinos vibratorios no giran en la forma convencional, - pero la energía vibracional comunicada hace que las bolas se muevan y - giren sobre la carga, de tal manera que se produzca un efecto de molienda. Estos molinos son usualmente pequeños en capacidad, a menudo equipo de laboratorio que hace trabajos no usuales, como es producir fibras de Cotton de solamente unas micras de longitud. Sin embargo, existe la tendencia de que los molinos vibratorios se construyan en tamaños comerciales, los cuales estarían limitados todavía en tamaño debido a los -- problemas mecánicos asociados con la resistencia de los rodamientos a - las vibraciones. Entre las aplicaciones prácticas por las cuales estos molinos se han aceptado, están la molienda del Grafito, Calcita, Talco,

GUIA PARA LA SELECCION DE MOLINOS REVOLVENTES

| MOLINO | VARILLAS | | BOLAS | | COMPARTIMENTOS | GUIJARROS | MVB* |
|--|----------|------------------------|-------------------|---|----------------|-----------|------|
| MATERIAL | Derrame | Descarga Periférica | Derrame Diafragma | | | | |
| MINERALES | ° | ° | ° | ° | | | ° |
| AGREGADOS FINOS | ° | ° | ° | ° | | | |
| CERAMICA Y TALCO | | | | | | ° | ° |
| CEMENTO | ° | | | ° | ° | | |
| CEMENTO COCIDO | | ° | | ° | ° | | |
| CARBON Y COKE DE PETROLEO | | ° | | ° | ° | | |
| SILICE, CERAMICA, ETC. | | | | | | ° | ° |
| LIBRES DE FIERRO | | | | | | ° | ° |
| PRODUCCION DE UN TAMAÑO ESPECIFICO | ° | ° | ° | ° | | ° | ° |
| PRODUCCION DE UNA AREA ESPECIFICA | | | | ° | ° | ° | ° |
| MOLIENDA HUMEDA | ° | ° | ° | ° | ° | ° | ° |
| MOLIENDA EN SECO | | ° | | ° | ° | ° | ° |
| ALIMENTACION GRANDE (MENOR DE 1/2") | ° | ° | | ° | ° | | |
| ALIM. INTERMEDIA (MENOR DE 1/2") | ° | ° | ° | ° | ° | | ° |
| ALIMENTACION FINA (MENOR DE MALLA 20) | | | ° | ° | ° | ° | ° |
| PRODUCTO NO TERMINADO (MAS DE MALLA 35) | ° | ° | | ° | | | |
| PRODUCTO FINO (MENOR MALLA No. 35) | | | ° | ° | ° | ° | ° |
| MAXIMA PRODUCCION DE FINOS | | | ° | ° | ° | ° | ° |

| MOLINO | VARILLAS | | BOLAS | | COMPARTIMENTOS | GUIJARROS | MVB* |
|----------|----------|------------------------|-------------------|--|----------------|-----------|------|
| Material | Derrame | Descarga Periférica | Derrame Diafragma | | | | |

| | | | | | | | |
|--|---|---|---|---|---|--|---|
| MINIMA PRODUCCION DE FINOS | ° | ° | | | | | |
| PRODUCCION DE PARTI- CULAS CUBICAS | ° | ° | ° | ° | | | ° |
| MOLINO PRIMARIO DE UN CIRCUITO DE DOS PASOS | ° | ° | | ° | | | |
| MOLINO SECUNDARIO DE UN CIRCUITO DE DOS PASOS | | | ° | ° | ° | | |
| OPERACION EN CIRCUITO CERRADO O ABIERTO | ° | ° | | | ° | | ° |
| OPERACION EN CIRCUITO CERRADO SOLAMENTE | | | ° | ° | | | |

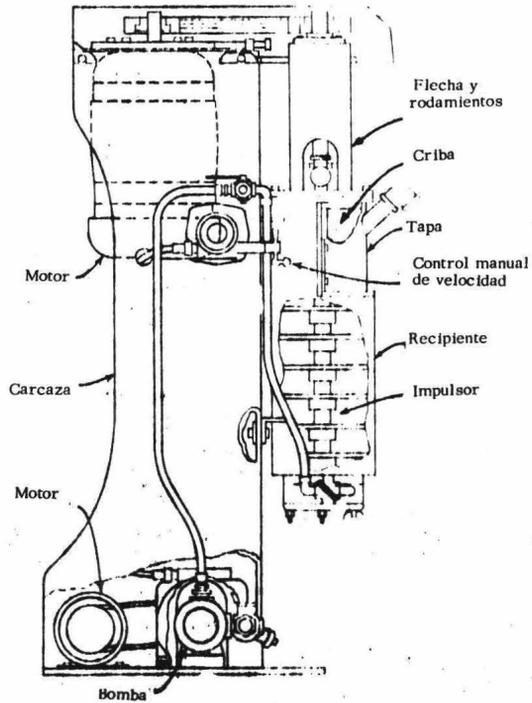
* MOLINO VIBRATORIO DE BOLAS.

Oxido de fierro, Aluminio, Pigmentos, Dolomita y Cuarzo. El intervalo de frecuencia oscilante de los molinos vibratorios está entre 1500 y -- 2500 c/min.

Pulverizador de arena.- Es un modelo original diferente a los demás, - ya que usa como medio de molienda partículas de arena de Ottawa de malla No. 20 a malla No. 30. El primer uso de este molino fue para moler y - dispersar una gran variedad de pigmentos para tintas y pinturas. Básicamente el pulverizador de arena consiste de un eje vertical sobre el - cual están colocados unos discos planos, dentro de una cámara cilíndrica. La cámara contiene la arena. Las partículas que van a ser molidas entran por la parte de arriba de la cámara y pasan hasta el fondo y se descargan a través de una criba con aberturas suficientes para no permi - tir que se salga la arena. Los discos rotando crean un movimiento circulatorio dentro de la mezcla de arena, vehículo y partículas sólidas, así una pequeña partícula cogida entre dos partículas relativamente - - grandes de arena moviéndose a diferentes velocidades, se ve sometida a fuerzas considerables de compresión y rasgado. Siendo esta la forma co - mo trabaja un pulverizador de este tipo.

Bajo condiciones apropiadas de operación, el desgaste en los discos y - en la arena es despreciable. Si bien la arena sufre un desgaste en las primeras horas, hasta quedar sin irregularidades, después dura meses.

La relación de carga es aproximadamente un volumen de arena por un volu - men de pulpa. Con cargas pequeñas se tienen huecos entre las partículas de arena, lo cual ocasiona que no se tenga eficiencia en la molienda, -



Operación de un molino de arena

por el contrario, una sobrecarga resulta en una estructura rígida de la arena que sofoca el rozamiento. La temperatura de operación en este molino está entre 120 y 150° F y, generalmente, está enchaquetado para -- mantener esta temperatura con un flujo de agua fría.

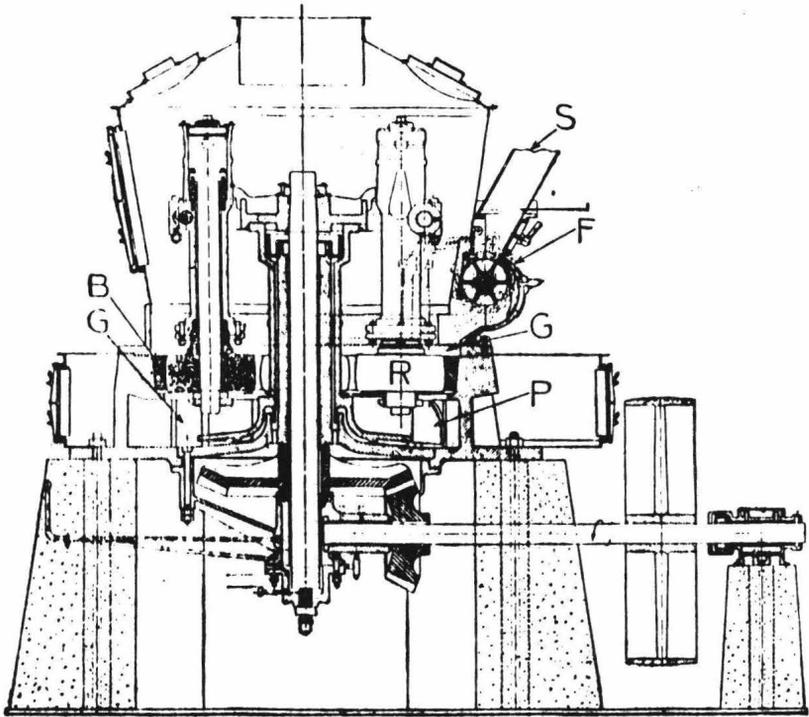
Molinos de rodillo centrífugo.- El principio de operación de estos molinos es semejante al de los trituradores de rodillo y de cubeta; pero estos se usan para molienda fina de materiales, mientras que los segundos son preliminares. El principio consiste en desarrollar la presión entre un elemento y otro por medio del uso de una fuerza centrífuga. - La mayoría de estos molinos han sido diseñados para satisfacer la necesidad que se ha presentado en algunos campos de aplicación específicos y son difíciles de clasificar desde el punto de vista del tamaño del -- producto que se maneja, considerando el gran traslapo de este último - factor. En general, no sólo trituran el material por presión directa, sino que también muelen por rozamiento.

Molino anular (de sturtevant).- Este molino es del tipo de rodillos -- que se mueven con rapidez dentro de la superficie interior de un anillo (de un modo semejante al triturador giratorio) o alternativamente, los rodillos pueden estar en posición fija mientras que la superficie de -- trituración exterior gira. El anillo tiene una superficie interior cóncava, la cual gira a velocidad relativamente alta y el material que va a triturarse se alimenta entre el anillo y uno de los rodillos; este rodillo tiene una superficie convexa y se presiona contra el anillo exterior por medio de potentes resortes. El material se tritura a medida que pasa

entre el anillo y el rodillo y algo del material fino se expele por la descarga. La fuerza centrífuga mantiene gran cantidad del material en el anillo; de esta manera, el material se somete al proceso con rodillos sucesivos hasta que, finalmente, sale fuera del molino siendo expulsado hacia afuera por la alimentación de entrada.

Molino de Fuller-Lehigh.- Es parecido al anterior, solamente que los rodillos se han sustituido por bolas sostenidas en cuencas. Está provisto de varias bolas de acero pesado que giran a gran velocidad alrededor de la superficie interior del anillo de trituración. El material que va a triturarse se alimenta por una tolva al transportador de tornillo sin fin del molino; se descarga en la jaula central y luego se lanza enfrente del anillo por medio del movimiento de las bolas y los empujadores. Fija a la jaula rotatoria se encuentra un ventilador que eleva el material finamente dividido y que lo forza a pasar directamente por el tamiz colocado encima de este ventilador. El material con el grado de finura suficiente pasa a través del tamiz, mientras que el material grueso cae nuevamente a la zona de trituración. Puede moler hasta producto muy fino y se usa para la pulverización del carbón que es usado en quemadores (calentadores) y para la molienda del cemento.

Molino de Raymond.- El material se alimenta por el conducto S (ver fig. hoja siguiente) y se suministra al molino a velocidad uniforme con el sistema de alimentación F. Se tritura entre los rodillos R y el anillo de molienda B. Los rodillos R están unidos a una estrella, la cual se hace girar con un eje movido en su parte inferior por un engranaje cóni



Molino de Raymond

co y la fuerza centrífuga provoca que los rodillos sean impulsados hacia afuera y trituren el material contra el anillo estacionario B. Estos molinos se construyen con dos a cinco rodillos dependiendo esto de la capacidad requerida en el molino. El material que cae de entre el rodillo y el anillo es tomado por el rascador P y se lleva nuevamente al campo del efecto de trituración. Por el pasadizo G se deja entrar aire; recoge el material finamente dividido y lo transporta al domo ligeramente cónico que encierra a los rodillos y sus ejes. Aquí la velocidad del aire disminuye un poco, permitiendo que el material grueso vuelva a caer entre los rodillos y el anillo, mientras que el material fino es transportado por medio de un ventilador al colector en donde entra tangencialmente a la parte superior de éste. El movimiento tangencial, juntos con la disminución de la velocidad, debida al aumento de la sección transversal, permite la separación del material finamente dividido que cae por un plano inclinado hacia el fondo del colector. El aire una vez libre de polvo se regresa a la base del molino, donde nuevamente recoge el material finamente dividido y se repite el ciclo.

Existen dos tipos de molino de Raymond, de vista lateral baja y de vista lateral alta, de los cuales el primero corresponde al descrito anteriormente. El molino de vista lateral alta difiere del de vista lateral baja en que el separador está colocado en el molino, entre los rodillos y el ventilador. El aire, después de recoger el material que se ha molido, asciende entre los conos interior y exterior en este separador, a través de una serie de compuertas colocadas en la periferia de la base del cono interior y hacia el cono exterior. Estas compuertas -

pueden colocarse a ángulos variables, de tal modo que el movimiento de remolino del aire pueda alterarse a voluntad. En este cono interior -- existe un efecto de separación semejante al descrito antes para el colector. Mientras más tangencial sea la introducción del aire al separador, más fino será el producto transportado por el aire al colector. El material grueso sedimenta en el fondo de este cono interior y nuevamente se alimenta al molino por los conductos en el fondo del cono interior. El aire, conteniendo sólo el material más fino, pasa por el ventilador hacia un gran colector donde se separa el material finamente dividido.

Siendo una máquina de alta velocidad, este molino no es satisfactorio - para la molienda de material duro y abrasivo, pero para muchos otros, - tales como el litopon, la roca fosfatada, las baritas, la piedra caliza, etc., es de suma conveniencia. No puede operar con materiales húmedos o con aquellos que se reblandecen con el calor. Por ejemplo, el asfalto o el alquitrán duro no pueden molerse en este molino sin antes recircular el aire y además pasar todo el aire a través de los filtros de bolas para polvo. Es uno de los mejores pulverizadores de producto fino que se han construído y puede operar con material de diámetro cercano a 1/4 plg., obteniéndose el material que pasa totalmente el tamiz malla - No. 200. El molino de 5 rodillos, que requiere de 50 HP para mover el mismo molino y de 40HP para operar el ventilador, es capaz de producir 5 ton/hr de material molido, de tal forma que el 90% pase el tamiz ma--lla No. 200.

A menos de que el material que se triture sea abrasivo, el costo de mantenimiento de estos molinos es bajo, no obstante que trabajan a alta ve

locidad y se utilizan para molienda de producto fino; además, el costo de la potencia es relativamente bajo, considerando la amplitud del grado de finura dentro del cual operan.

Otros tipos.- Existen otros molinos de rodillos cuya operación es algo similar a la del tipo Raymond, tal como los molinos de Bradley, de Griffin y el de Huntington. El molino de Griffin sólo tiene un rodillo oscilante que opera en contra de la superficie interior del anillo de trituración.

El molino de taza de Raymond es similar al molino de anillos de Sturtevant, excepto que es de rotación horizontal y la carga asciende por los lados inclinados de la superficie de trituración mediante la fuerza centrífuga.

Molino de martillos.- Los molinos de martillos usados para pulverización son operados a velocidades altas del orden de 21,000 pies/min. El rotor puede ser vertical u horizontal, generalmente lo último, en donde están los martillos que pueden ser de diversas formas y tamaños, por ejemplo en "T", en barras o en anillos, los cuales están fijos o pivotados al rotor o al disco fijado al rotor. El rotor gira dentro de una envolvente de placas lisas o corrugadas, que pueden no tener perforaciones que sirven como cribas.

La molienda se lleva a cabo por impacto y rozamiento entre los trozos ó partículas del material que está siendo molido, la envolvente y los elementos de molienda (martillos). Así, de esta forma, el material que se

alimenta es primeramente bateado por los martillos contra las placas de la envolvente y al impacto con ellas se rompe; luego se somete a rozamiento entre los martillos y estas placas y el material pulverizado se descarga a través de las perforaciones en las placas o las cribas colocadas en el fondo de la envolvente. La placa perforada o criba de descarga de un molino de martillos sirve como clasificador interno, pero su área reducida no permite el uso efectivo cuando se requieren aberturas pequeñas. Para satisfacer las especificaciones críticas de tamaño máximo en los intervalos de tamaño intermedio, el molino de martillos puede trabajar en circuito cerrado con cribas exteriores de área mayor que la que podría emplearse en el mismo molino.

La finura del producto se puede regular:

- a) variando la velocidad del rotor
- b) variando la velocidad de alimentación
- c) cambiando la distancia entre los martillos y las placas de molienda
- d) por la forma de los martillos usados y el claro entre ellos y
- e) por el área y abertura de las cribas usadas.

Los molinos de martillos se fabrican en varios tamaños; desde unidades que usan motores de fracciones de HP hasta los que consumen de 75 a 100 HP. Las capacidades llegan hasta cientos de toneladas por hora.

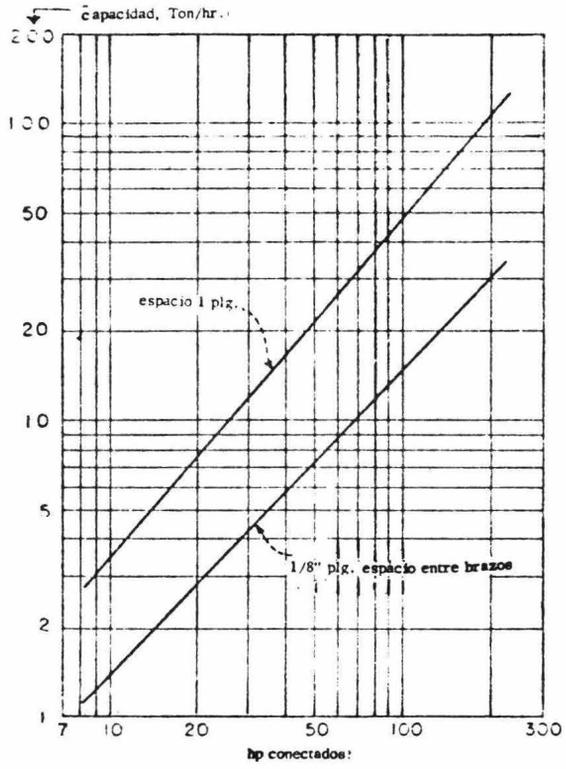
Trabajan materiales duros, fibrosos, blandos, húmedos, roca dura, pulpas, etc.; es común también que se revistan las puntas de los martillos con estelita o carburo de tungsteno con el fin de tener la superficie dura y disminuir los desgastes por abrasión.

Este tipo de molinos reducen material de 1/2 plg. a uno que casi pasa - por completo por la malla No. 200.

Existe un gran número de molinos de alta velocidad con clasificados interno, muchos de los cuales son individuales en el diseño. Un estudio de estos y de los molinos de energía flúida (jet) indica que su aplicación en la industria forma un pequeño porcentaje del total de los aparatos de molienda, debido a su alto costo.

Todos estos molinos tienen interconstruido un clasificador, que usa aire u otro gas para transportar el material dentro del sistema. La potencia total es grande debido a la formación de una nueva superficie y a la potencia requerida para mover el aire y el material molido dentro del sistema. Frecuentemente la capacidad por HP por hora es el 25% de la de los martillos convencionales de alta velocidad de claros cerrados. Estos molinos de martillos balanceados no usan placas perforadas o cribas y pueden ser molinos de eje vertical u horizontal. Las unidades de eje vertical tienen cierto número de martillos balanceados dentro de la envolvente, con un clasificador colocado por encima de los martillos, - el cual puede ser manejado a la misma velocidad de los martillos ó a -- una velocidad variable independiente. Los molinos de eje horizontal -- usan una salida para llevar el producto molido al clasificador.

Unos molinos usan clasificación doble, de ambos lados del rotor, mientras que otros tienen su clasificación en una sola salida directa en -- uno de los extremos del rotor.



Molinos de martillos. Capacidad y potencia basados en una alimentación de 3 a 6 plg. de carbón y piedra caliza.

En todos los casos, el clasificador usa una especie de ventilador recogedor para retirar el material aceptable de la cámara de molienda.

Todos estos molinos requieren de un colector de polvos porque producen partículas muy finas y manejan una mayor cantidad de aire que el molino convencional con placas perforadas ó cribas. La temperatura también es menor en estos molinos porque el aire que usan absorbe algo de calor de la molienda. A pesar de la temperatura reducida, hay materiales con punto de fusión muy bajo, tales como el DDT y el polvo de cacao, con gran cantidad de grasa que obstaculizan el molino. Estos materiales requieren refrigeración. La limitación de abrasión existe en estos molinos, ya que no usan cribas ó placas perforadas. Los materiales más abrasivos que el talco de silicio no se manejan en estos molinos en una forma económica. Sin embargo, cuando el valor y utilidad del producto es realizado suficientemente para justificar el costo adicional del equipo, se recomienda el uso de estas unidades. En algunas ocasiones, la molienda fina destruye algunos valores deseados en el material. Por ejemplo, en ciertos materiales de teñido se han visto que pierden algo así como el 50% de su valor tinctorial a través de la molienda fina.

Como ejemplo de los molinos de martillos sin clasificador, tenemos el desintegrador Rietz, el cual consiste de un rotor vertical rodeado por una criba, por lo que no tiene placa o yunque de molienda. Esta máquina hace casi todo su trabajo por rozamiento; la alimentación que se recibe por arriba se quiebra preliminarmente por medio de unas hojas pesadas y luego cae a una zona de trituración que consta de seis o más cuer

pos de martillos fijos. La flecha gira a velocidades entre 3600 y 7800 rpm. (se usan velocidades más altas para trabajos difíciles).

Los martillos estrellan el material, pero gran parte de la reducción se debe al lanzamiento y frotamiento de éste contra la criba, por lo que - el fabricante llama a esto rozamiento centrífugo. El material que no - se quiebra se puede sacar por el fondo de la máquina. El desintegrador se fabrica con rotores de 8 a 24 plg. de diámetro y con motores de 5 a 400 Hp. Procesa asbestos, alimentos para bebé, crema de maní y sustancias similares.

Otro tipo de molino de martillos que está dentro de esta clasificación es el Micro-Pulverizador que es un molino con rotor horizontal, con pares de martillos pivotados, conectados por medio de brazos axiales. A diferencia de otros molinos de martillos, éste se usa para molienda húmeda. Procesa de 75 a 25000 lb/hr. Debido a la gran velocidad perifé- rica de los martillos-arriba de 22000 pies/min. puede producir polvos - muy finos de materiales difíciles. Incluye tornillo alimentador y pre- visión para circulación de aire.

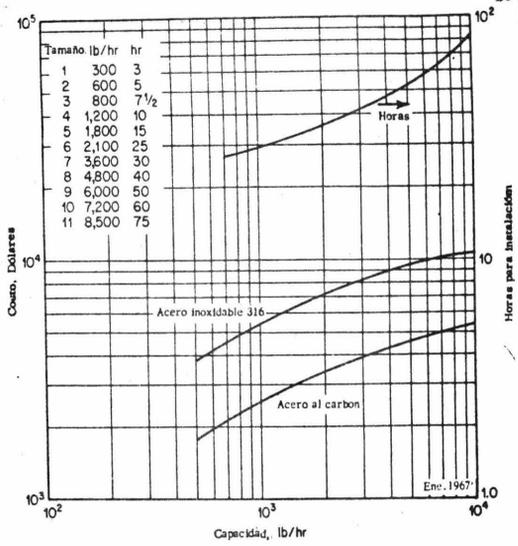
Por otro lado, tenemos el Micro-Atomizer que es una modificación con -- clasificador interno para producir polvo ultrafino. El rotor tiene dos ventiladores en adición a los martillos; las barras soportantes para -- los martillos tienen, además, hojas clasificadoras, de manera que los -- ventiladores inducen el aire dentro de la cámara de molienda a lo largo del rotor y sale radialmente a los ductos que conducen a los colectores .

TABLA No. 8

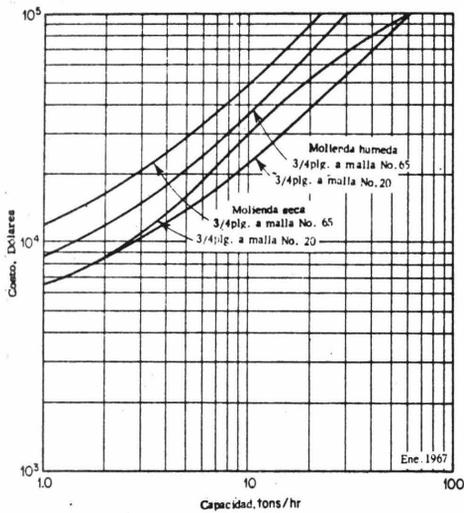
M I C R O P U L V E R I Z A D O R

CAPACIDAD EN LB/HR. (APROXIMADA)

| MATERIAL | FINURA | (3H.P.) | (10H.P.) | (30 (H.P.) | 50 (H.P.) |
|-----------------------------|----------------------|---------|----------|------------|-----------|
| ALUMINIO HIDRATADO | 99.8/, Malla No. 200 | 350 | 1,200 | 3,900 | 6,500 |
| ARCILLA | 98% Malla No. 325 | 350 | 1,200 | 3,900 | 6,500 |
| CALCIO | 99,0% Malla No. 300 | 750 | 2,500 | 8,000 | 14,000 |
| CARBON | 99.99% Malla No. 325 | 275 | 900 | 3,000 | 5,000 |
| ACETATO DE CELULOSA (PULPA) | 94.0% Malla No. 40 | 120 | 400 | 1,350 | 2,500 |
| CROMO AMARILLO | 99.9% Malla No. 200 | 750 | 2,500 | 8,000 | 14,000 |
| PULPA DE COLOR SECO | PULPA LISA | 475 | 1,600 | 5,250 | 9,000 |
| POLVO PARA LA CARA | PARA BUENA MEZCLA | 350 | 1,100 | 3,600 | 6,000 |
| YESO | 88% Malla No. 100 | 1,000 | 3,000 | 9,000 | 15,000 |
| FIERRO AZUL | 95% Malla No. 325 | 450 | 1,500 | 5,000 | 8,000 |
| CAOLIN | 99.9% Malla No. 325 | 450 | 1,500 | 5,000 | 8,000 |
| MALTA DE LECHE | 99% Malla No. 20 | 375 | 1,200 | 3,900 | 6,500 |
| COMPUESTO PARA MOLDURA | 90% Malla No. 16 | 450 | 1,500 | 5,000 | 8,000 |
| JABON EN POLVO | 96% Malla No. 20 | 900 | 3,000 | 10,000 | 16,500 |
| AZUCAR | 99% Malla No. 100 | 350 | 1,200 | 3,900 | 6,500 |
| TEJA DE ARCILLA | 100% Malla No. 16 | 1,000 | 5,500 | 15,000 | 25,000 |
| DIOXIDO DE TITANIO | 99.8% Malla No. 325 | 350 | 1,500 | 5,000 | 8,000 |
| PLOMO BLANCO | 99.99% Malla No. 325 | 600 | 2,000 | 6,600 | 11,000 |
| OXIDO DE ZINC | 99.9% Malla No.325 | 350 | 1,300 | 4,200 | 7,000 |



Pulverizadores. - El precio no incluye el motor y el accionador. El costo de los soportes para las unidades 1 a 5 es de \$50.00 U.S. y para las unidades 6 a 11 de \$ 150.00 U.S. Se adiciona el 15% para construcción a prueba de explosión y \$200.00 U.S. para conexiones flexibles.



Molinos de varillas en circuito abierto. El precio incluye instalación, clasificador, motor, accionador y un promedio para cimentación y erección. No incluye flete, equipo auxiliar o equipo para manejar materiales.

TABLA No. 9

P U L V O C R O N

| Cámara de Molienda | Motor | Velocidad rotor | Velocidad del Clasificador | Requerimiento de aire pérdida Capac. pres. estática | Dimensiones | Peso total |
|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|--|-------------------------------------|------------|
| 20 Plg. | 25-60 HP 1800-RPM | 2600 RPM 4800 RPM | 700 RPM 4200 RPM | 300-800 ft ³ / Min. | Ancho 78" Largo 68" Alto 55" | 3,400 Lbs. |
| 38 Plg. | 75-150 HP | 2000 RPM | 700 RPM | 1200-2500 ft ³ /Min. | Ancho 80" Largo 100" Alto 68" | 9,300 Lbs. |

El aire recoge el material molido y lo transporta radialmente pasando - por las hojas clasificadoras, las cuales están girando en el pequeño es pacio entre la cámara de molienda y el rotor.

Si la partícula es suficientemente pequeña pasa a la descarga y si es - gruesa, todavía, las hojas clasificadoras la regresan dentro de la cáma ra de molienda, debido a la fuerza centrífuga, para someterla a más re- ducción. Este molino es una máquina ruidosa, en donde el rotor gira en tre 3000 y 6000 rpm. La típica máquina de 14 plg. maneja 2000 lb/hr. - de material de 1/4 plg. al cual reduce a un tamaño promedio de partícu- la de 5 a 15 micras que pasa completamente la malla No. 325.

Estos molinos se encuentran también en diferentes tamaños con motores - de 5 a 150 HP y velocidades del rotor de hasta 14000 r.p.m. en unidades pequeñas. El intervalo de capacidad va de 30 a 6000 lb/hr. Estas uni- dades vienen a ser más caras que las que usan clasificación porque re- quieren de un colector adicional de polvos para retener las partículas muy pequeñas, tales como las que se encuentran el intervalo de las mi- cras.

Molinos de rozamiento.- Molinos de disco.- Estos molinos son una ver- sión moderna del antiguo molino de muelas de piedra. El conjunto que - comprende un eje, un disco y una placa de molienda, se llama muela. Es tas muelas se han sustituido por discos de acero que giran a gran velo- cidad y que tienen montadas placas metálicas intercambiables o de com- puestos abrasivos. La molienda tiene lugar entre las placas, que pue--

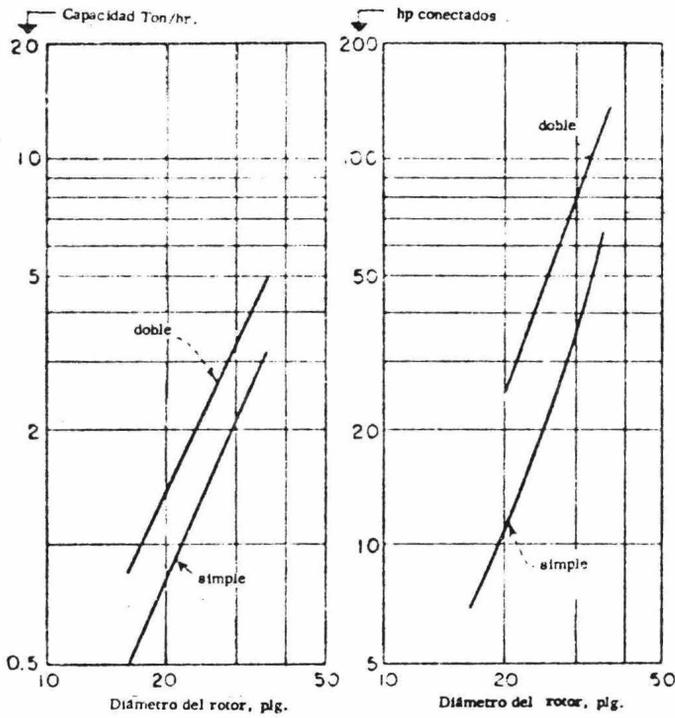
den trabajar en un plano horizontal o vertical. Pueden girar ambos - - discos o uno solo; si giran los dos lo hacen en sentidos opuestos. La distancia entre las placas es ajustable para permitir alterar el tamaño del producto, así como ajustarlo para evitar desgaste excesivo. En general, los molinos de una sola muela tienen las mismas aplicaciones que los de dos, con la diferencia de que admiten un material más grueso, de que sus límites de reducción son más estrechos y de que ofrecen producciones más elevadas con menos consumo de potencia.

Actualmente se usan molinos de discos de piedra que se puede decir son descendientes directos de los antiguos molinos de muelas de piedra; entre ellos, el molino de piedra de esmeril Sturtevant y el molino Sprout Waldron.

Tienen discos de 10 a 54 plg. de diámetro y giran entre 350 y 700 r.p.m. y generalmente son de eje horizontal. Estos molinos se alimentan -- con material de 1/4 plg. y lo reducen a un tamaño que está entre el de malla No. 20 y No. 200. Están diseñados para manejar de 1/2 a 8 ton/hr. de substancias blandas como la arcilla, el yeso, el talco y la cal y con sumen de 12 a 80 HP.

Los molinos de disco con muelas de piedra de esmeril pueden producir material de tamaño malla No. 100 sin usar cribas. Para productos más finos se necesita usar estos molinos en circuito cerrado con clasificadores de cribas o de aire.

Una razón por la que son más comunes los molinos de discos de metal es



Molinos de rozamiento. Doble rodamiento, alimentación de 1/8 a 1 plg. de materiales blandos; rodamiento simple, alimentación de 1/4 plg. de materiales más duros.

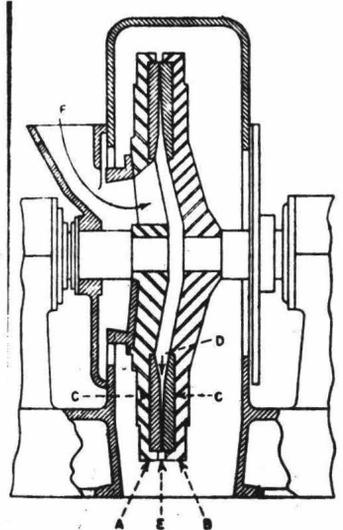
porque se ha dejado de experimentar con los de piedra. Existen muchos tipos de limas para diferentes propósitos; de ahí que existan muchos y variados modelos de placas de molienda. Cambiando el modelo de la placa, la velocidad del molino o la distancia entre las placas, se pueden obtener ligeras variaciones en la molienda.

En muchas formas, los molinos de rozamiento son las máquinas para reducción de tamaño más versátiles; de hecho, entre ellas harían cualquier trabajo desde moler roca hasta retorcer plumas. En general, se usan para moler materiales blandos o fibrosos. Un molino de una sola muela se usa para moler materiales duros, mientras que uno de dos muelas produce partículas finas pero usualmente procesa materiales blandos.

El funcionamiento de estos molinos se puede describir con la ayuda del siguiente esquema. El material alimentado entra por F, pasa entre las placas de molienda C, como indica la flecha D y sale por E. A y B son los discos a los que están atornilladas las placas.

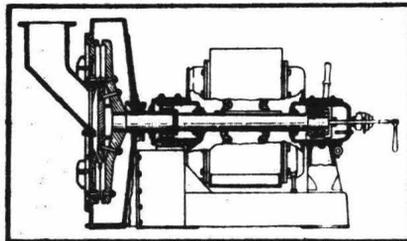
Dentro de los modelos de una sola muela encontramos el molino de Robinson, que gira aproximadamente a 1000 r.p.m. para quebrantamiento y granulación y a 3500 r.p.m. para molienda fina. Usa placas corrugadas de diferentes diseños para molienda y desgarramiento y placas con dientes piramidales para mezclar pigmentos e insecticidas; usa también piedras de silicio de carbono para moler almidón.

En el modelo de disco frígido ambas placas se enfrían con agua o salmue



- A, B. Discos de molenda.
- C. Placas de molenda.
- F. Entrada de la alimentación al molino.
- D. Entrada de la alimentación entre las placas.
- E. Salida del producto.

Funcionamiento del molino de discos



Molino de discos

ra, de tal manera que el molino pueda manejar materiales que se destruyan con el calor generado durante la molienda, como sería el caso del hule y el hule vulcanizado.

El molino Sprout-Waldron con placas provistas de hileras circulares concéntricas de clavijas, se usa para desfibrar y granular. La potencia consumida por este molino varía mucho y depende del tipo de material -- que se procese; pero se encuentra dentro del intervalo de 9 a 90 lb/Hp Hr.

Las características de los molinos de dos muelas son: diámetro entre 16 y 36 plg. giran a una velocidad entre 1200 y 7000 r.p.m. y se les -- alimenta material de tamaño entre 3/8 y 1 plg. La alimentación, a través de una abertura cerca del eje de uno de los discos, es cogida y quebrada entre las placas y descargada por la periferia.

Estos molinos se usan para moler pescado pretriturado, gomas, aserrín y granos a capacidad entre 2000 y 12000 lb/hr. -- A menudo se introduce aire a través del molino para remover los finos y prevenir el aglomeramiento.

11.4.- MOLINOS PARA MOLIENDA FINA

Molinos de energía fluida.- Molinos de chorro "JET".- Los molinos de energía fluida están muy aparte de los molinos hasta ahora descritos, -- ya que no tienen partes móviles. La fuente de potencia es aire, vapor u otro gas a presión que va desde 100 hasta 150 psig. La diferencia en

tre usar aire o vapor está en que si el material que se va a reducir de tamaño se vea o no afectado por una temperatura alta se puede usar vapor, pero si, por ejemplo, se tiene un material con punto de fusión bajo, entonces se usará el aire (insecticidas y productos farmacéuticos). Se puede aprovechar la rápida expansión del aire, que baja su temperatura, para enfriar el material dentro del molino y obtener el producto a la temperatura a la cual fue alimentado el material o para abatir la temperatura generada por la molienda. Los molinos de energía fluida pueden producir materiales con finura excelente, tanto más que los pulverizadores mecánicos usuales. Una práctica usada con este fin es que cuando se usa aire como fuente de potencia se calienta, con lo que se logra mayor producción de finos al crearse un incremento de presión (o de volumen).

Dentro de los materiales que se pulverizan con mejores resultados en un molino de chorro, usando aire, están: la penicilina, los altos concentrados de DDT y las resinas.

En los molinos de energía fluida o molinos de chorro, la alimentación se mantiene suspendida en corrientes de gas a alta velocidad y se rompe por rozamiento e impacto entre las mismas partículas del material alimentado.

El modelo original del molino de energía fluida es el Willoughby que consiste de dos chorros de vapor de alta presión diametralmente opuestos y de un eliminador que trabaja por medio de aire ascendente para

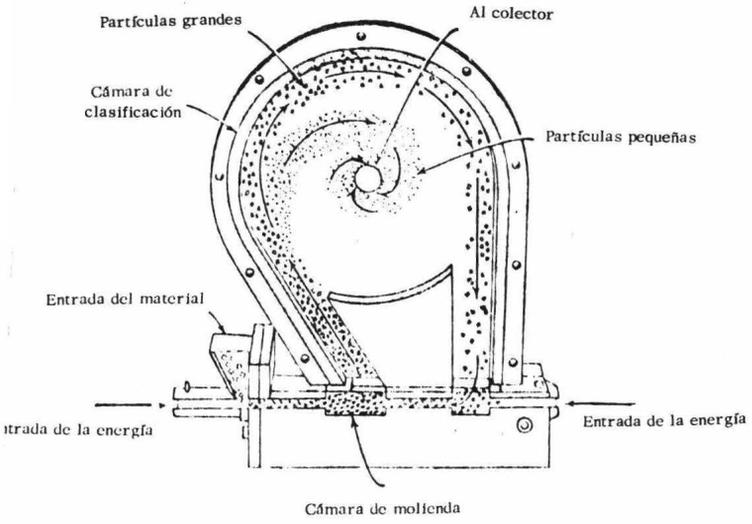
TABLA No. 10

GUIA GENERAL PARA MOLINOS DE ENERGIA FLUIDA

| Tamaño del Molino | Operación con Aire* (ft ³ /min) | Operación con Vapor** Lb/hr. |
|-------------------|---|---------------------------------|
| 2 | 20 | - |
| 4 | 40 | - |
| 8 | 100 | 250 |
| 12 | 225 | 600 |
| 15 | 350 | 900 |
| 20 | 550 | 1,500 |
| 24 | 1,000 | 2,600 |
| 30 | 1,500 | 4,000 |
| 36 | 2,250 | 6,000 |
| 42 | 3,300 | 8,000 |

* Aire a 60° y 14.7 psi., comprimido a 100 psi.

** Vapor a 150 psi. y 550°F



MOLINOS DE ENERGÍA FLUIDA

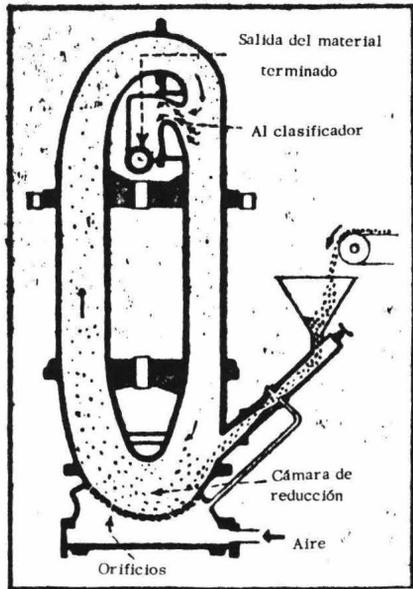


TABLA No. 11

MICRO PULVERIZADOR "BANTAM"

CAPACIDAD APROXIMADA DEL MICRO PULVERIZADOR "BANTAM" EQUIPADO CON UN MOTOR DE 1/2 HP CUANDO SE PROCESAN CIERTOS MATERIALES A UNA FINURA ESPECIFICA.

| MATERIAL | FINURA | LBS/Hr. |
|--------------------------------|--------------------------------|---------|
| ALUMINIO HIDRATADO | E1 99.8% por la Malla No. 200 | 75 |
| ARCILLA | E1 98.0% por la malla No. 325 | 70 |
| ARSENIATO DE CALCIO | E1 99.0T por la Malla No. 300 | 175 |
| CARBON NEGRO | E1 99.99% por la malla No. 325 | 60 |
| ACETATO DE CELULOSA (PULPA) | E1 94.0% por la malla No. 40 | 25 |
| CROMO AMARILLO | E1 99.99% por la Malla No. 20 | 150 |
| COLOR SECO | PULPA LISA | 110 |
| MEZCLA, POLVO PARA LA CARA | PARA BUENA MEZCLA | 75 |
| YESO AL BRUTO | E1 88.0% por la malla No. 100 | 200 |
| FIERRO AZUL | E1 95.0% por la malla No. 325 | 100 |

remover las partículas de tamaño adecuado. Esta idea es todavía aplicada en el molino Majac de la Majac Engineering Corp. que para moler carbón bituminoso usa como fuente de potencia vapor sobrecalentado a 750°F. Se tiene capacidad de 15 ton. por hora en este molino. La forma como opera es más o menos como a continuación se indica. El material se alimenta directamente a la zona de impacto entre los chorros opuestos. En esta forma, los chorros solamente pulverizan parcialmente el material, luego finos y gruesos son llevados de la zona de pulverización a un clasificador mecánico arriba de esta zona. Los gruesos eliminados del clasificador caen dentro de unas pequeñas cámaras en ambos lados de la cámara de molienda en donde son cogidos por los chorros y llevados a una velocidad considerable hacia la cámara de molienda para impactarlos contra ella y así terminar su reducción. La finura se controla variando la distancia entre los chorros, la presión, la velocidad del motor del clasificador y/o la cantidad de aire. Cuando trabaja con aire usa de 90 a 450 cfm. de aire comprimido a 100 psi.

Otro ejemplo de molino de chorro lo tenemos en el Micronizer que como todos estos molinos puede trabajar con aire o vapor. Consiste de una cámara de molienda circular poco profunda, de 2 a 48 plg. de diámetro hecha generalmente de acero fundido, fierro blanco o acero inoxidable. Los orificios para los chorros están perforados en la periférica de la cámara, variando su número entre 3 y 16 colocados equidistantemente. El diámetro de los orificios también varía, pero generalmente son de 1/4 plg. y están orientados tangencialmente, de tal modo que el aire o vapor promueve la rotación en una dirección del material a pulverizar.

El molino Micronizer funciona como sigue: El material, no mayor de - - 1/4 plg. se alimenta por medio de venturries a la cámara de molienda, en donde es cogido por la fuerza de los chorros, los que hacen que el mate rial gire a gran velocidad por la periferia de esta cámara debido a la fuerza centrífuga. Mientras el material grueso sigue girando y reduciéndose en la periferia, el fino es llevado por la corriente de aire - que se desaloja en forma de remolino por el centro, que al expansionarse dentro de la cámara funciona como un clasificador preliminar. La sa lida de la cámara de molienda conduce directamente a un colector centrí fugo concéntrico que recibe el material a medida que este se desplaza - en un movimiento rotativo de gran velocidad, lo cual facilita la separación del material y el fluido. Se recoge cerca del 85--95% del material en el colector.

El molino Jet Pulverizer es un modelo con características fundamentales iguales a las del anterior, es decir, tiene una cámara de molienda circular y poco profunda, así como chorros angulares.

En el Reductionizer, la reducción tiene lugar en una curva ovalada de tubo de 1 a 8 plg. de diámetro con altura de 4 a 8 pies. Se puede alimentar material con tamaño desde 1/2 plg. hasta malla No. 100, pero con este último se obtienen mejores resultados. Se usa aire comprimido a - 100 psi. aunque la presión en el interior de la curva es solamente un poco superior a la atmosférica. Cuando se trabaja con vapor, se requie re que sea sobrecalentado a 500-650°F; también se han llegado a usar ga ses inertes con productos muy sensibles. El requerimiento en libras --

por hora de vapor viene siendo de 100 a 5000 y de 30 a 500 cfm de aire, según sea el caso. Produce partículas de una micra de tamaño, más o menos, pero eso sí, no está diseñado para producir partículas mayores de diez micras.

El reductionizer opera así: El material grueso se introduce al pulverizador por medio de un inyector venturi. El fluido a presión penetra en el tubo por una serie de toberas y sale con el producto terminado en suspensión a través de un ciclón u otro tipo de colector. La reducción se lleva a cabo por el choque y rozamiento entre las partículas dentro del tubo, en el cual el codo superior funciona como clasificador interno. La producción varía de 1 a 1000 lb/hr de materiales como: pigmentos, medicamentos, ceras, insecticidas, talco, grafito, fosfatos, sulfato de calcio, sílice, arcilla, minerales, cosméticos, colorantes orgánicos, etc.

El Jet-0-Mizer es de igual diseño que el reductionizer, es decir, emplea un tubo ovalado y en el cual la curva superior actúa como clasificador interno. La alimentación se introduce en la parte baja, en la periferia, en donde se somete a la gran velocidad de los chorros de fluido -- introducidos también en la periferia. La corriente fluida crea un flujo circulante rápido en el interior del tubo. Como en todos estos molinos la reducción se lleva a cabo por impacto y rozamiento entre las partículas a lo largo del tubo hasta llegar a la curva superior en donde los finos son eliminados con parte del fluido que sale del tubo y las partículas grandes recirculan para someterlas a más reducción hasta que

alcancen el tamaño deseado

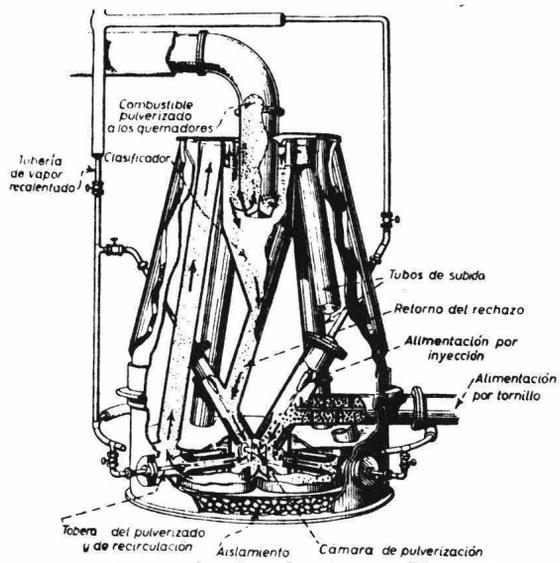
Cabe hacer mención que este molino puede ser usado para otras operaciones como son el mezclado, la eliminación de solventes y para efectuar cambios químicos, incluyendo oxidación y reducción.

El pulverizador de chorro Blaw-Knox se desarrolló para pulverizar carbón para combustible; es un aparato para la inyección directa al horno de combustible pulverizado que utiliza como energía fluida vapor recalentado o aire comprimido a la presión de 100 psi. El combustible se pulveriza, para quemarlo, hasta que el 90% pase por la malla No. 200, pero también se aplica a otras cargas reduciéndolas a 1-20 micras.

En este molino la alimentación entra a una cámara cilíndrica un poco angosta, en la cual están colocados, en el fondo, orificios opuestos por donde se mandan chorros de vapor o aire a gran velocidad, de modo que haya un choque entre ellos. Originalmente se usan cuatro chorros, pero pueden ser solamente dos. Los chorros se encuentran a 400 pies/seg., de esta forma el material cogido entre esta zona de turbulencia se estrella rápidamente. Los gases calientes pueden, simultáneamente, secar y pulverizar en este molino, así que es posible moler material conteniendo arriba del 20% de agua sin perder nada de capacidad.

Algunos modelos usan un clasificador de cono, pero cuando se requiere molienda ultrafina se necesita usar un clasificador, mecánico, operado externamente con aire.

Cuando se muele carbón, los modelos normales procesan de 500 a 20000 lb.



Pulverizador de chorro Blaw-Knox

/hr. Para tales capacidades, el molino es medianamente pequeño y casi sin ruido, así que no requiere de una base ni estar anclado al piso. - Las temperaturas que usan van de 70 a 800° F cuando se procesa carbón. Entre los materiales que se pueden reducir en este molino, están el grate, la mica, asbestos, minerales ferrosos, etc.

Esta máquina ha llegado a reducir la arcilla con promedio de 10 micras de tamaño a un tamaño de 0.7 micras.

El molino Eagle es otro tipo de molino de chorro, de tubo curvado, teniendo 200 pies de extensión con diámetro entre 1/2 y 1 1/4 plg. generalmente. El aire o vapor transporta el material por el tubo en donde se va rompiendo por rozamiento e impacto. Al final de la curva, un eyector envía la mezcla sólido-gas a una cámara de expansión en donde las partículas gruesas se asientan. La alimentación fluye libremente por una tolva colocada en la pared del cilindro; los materiales más pegajosos se empujan adelante del eyector. Este molino reduce de malla No. 10 ó de 1/4 plg. a sólo micras de tamaño, materiales como: talco, granos, pigmentos, insecticidas, arcillas y muchos otros productos, aunque está diseñado, principalmente, para moler grafito.

Consideraciones generales.- Cuando se instalan unidades de este tipo, se debe adicionar al costo del molino, el costo de la fuente de energía fluida, así como el costo del equipo recolector de polvos. Cuando es vapor, la fuente de energía, la recolección de los polvos se vuelve un problema, debido a las temperaturas tan altas con las que se tiene que trabajar.

FUNCIONAMIENTO DE LOS MOLINOS DE CHORRO "JET"

| MATERIAL | Tamaño del Producto Promedio (micras) | Tamaño del Producto Máximo (micras) | Tamaño de la Alimentación (malla) | Consumo de gas/lb. de Producto Aire a 100 psig. (ft ³ /min.) | Vapor a 125 psig. (lb/Hr.) |
|-----------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|----------------------------|
| Oxido de Aluminio Fundido | 4 a 5 | 70 | 60 | - | 4 |
| Oxido de Aluminio Calcinado | 1 | 20 | 100 | - | 1.25 |
| Bauxita | 1 | 15 | 20 a 60 | - | 2 |
| Barita | 3.5 | - | 40 | - | 2.2 |
| Grafito | 2 | - | 3 | - | 8.5 |
| Antracita Carbón | 3.5 a 4.5 | 35 | 3 a 4 | - | 1.4 |
| Criolita | 3 | - | 60 | - | 4.0 |
| DDT.75% | 2 | - | 20 | 1.0 | - |
| Cromo Verde | 0.5 | 3 a 5 | 80 | 1.0 | - |
| Caliza | 3.5 | - | 80 | - | 4.0 |
| Penicilina | 3 a 3.5 | 25 a 30 | 140 | 1.5 | - |
| Perclorato de Potasio | - | 6 | - | 0.6 | - |
| Resina de Copal | 5 | - | 2 | 7.5 | - |
| Gel de Silicio | 3 a 5.5 | - | 40 | 1 a 9 | - |
| Azufre | 3.5 | - | 3 | 5.6 | - |
| Talco | 3.5 a 6.5 | - | 20 | - | 2.2 a 4.0 |
| Dióxido de Titanio | 0.2 a 0.5 | - | 80 | - | 1.5 a 2.0 |

Debido a que los molinos de energía fluida requieren de una considerable cantidad de energía para su operación, resulta más económico primero moler tan fino como sea posible con los molinos convencionales y luego finalizar la pulverización en los molinos de energía fluida.

Molinos coloidales.- Otro aspecto de la molienda fina llamada molienda coloidal, existe cuando se tratan de romper partículas muy pequeñas, de deshacer aglomerados o de romper ligaduras débiles, como por ejemplo el quebrantamiento de pigmentos que se incorporan posteriormente en vehículos líquidos para hacer las pinturas.

También otras estructuras débiles, como purés, pastas alimenticias, pulpas, etc., se procesan por estos medios. La dispersión está también -- asociada con la formación de emulsiones, las cuales son básicamente dos tipos de sistemas fluidos. Como por ejemplo, emulsiones de pintura y agua, crema, loción, leche, jarabe, salsas y ungentos. Para las operaciones coloidales y de dispersión existen molinos especiales llamados molinos coloidales. Se pueden definir como aquellos capaces de reducir sólidos en una fase líquida hasta un diámetro de 1 micra, por lo menos; también como aquellos que sean capaces de emulsificar y homogeneizar -- fluidos. Estos molinos operan con altas velocidades desarrollándose -- fuerzas de rasgado, principalmente, y también de impacto dentro del molino.

Se clasifican en dos grupos: molinos coloidales de superficie lisa y de superficie corrugada. Otros autores agregan a los anteriores otros

dos, molinos de martillos ó turbina y molinos de válvula de orificio.

Los molinos de superficie lisa consisten de una superficie que se mueve sobre otra fija a gran velocidad, habiendo una separación entre ellas - de 0.001 plg. De esta forma se crean grandes esfuerzos de rasgado en - un fluido, entre las dos superficies, rompiéndose las partículas que -- con él vayan o bien que se disperse el fluido suspendido en él. Estas superficies pueden ser discos o también un cono truncado girando dentro de un cono fijo. La parte que gira hace de bomba centrífuga, ya que ja la al material dentro del molino en forma continua y con gran fuerza. Los molinos coloidales de superficies corrugadas difieren solamente en que se adhiere a la acción hidráulica de rasgado, corrientes arremolina das de gran velocidad y turbulencia e impacto por las corrugaciones o - estrías que llevan.

La concentración de energía en molinos de esta clase es grande y por - esto es que existe una considerable cantidad de calor; éste materialmente se elimina por medio de una chaqueta, con la que se provee al molino, para enfriar con agua. En otras ocasiones, como en el de las emulsio-- nes, que se hacen en caliente, la chaqueta se emplea para calentar con vapor.

Es común usar en este tipo de molinos aditivos químicos como agentes dispersantes, con lo cual se mejora el rendimiento del equipo y el producto en sí.

Entre los modelos de molinos coloidales citamos los siguientes y sus ca

racterísticas:

El molino Morehouse (Morehouse-Cowless, Inc.) es un molino del tipo de discos de alta velocidad. La fase no dispersa se alimenta por la parte de arriba del molino y pasa entre los discos convergentes, siendo lanzada hacia afuera. A medida que las partículas grandes se rompen y la dispersión se va haciendo más fina, la corriente se sujeta, no obstante, a mayor energía en la zona más estrecha entre los discos para completar la desintegración y asegurar la libertad esencial de las partículas gruesas.

En el molino Premier (Premier Mill Corp), el rotor tiene forma cónica; las superficies son lisas y el ajuste del claro puede ser de 0.001 plg. o menos. El molino es encaquetado para controlar las temperaturas.

En la siguiente tabla están las características de estos molinos:

| | Diámetro rotor plg. | Velocidad r.p.m. | Potencia HP | Capacidad gal/hr. |
|----------------------|------------------------|---------------------|----------------|----------------------|
| Conexión directa | | | | |
| tipo líquido | 15-21 | 3600 | 100 | 3000 |
| tipo pasta | 6-12 | 1800-3600 | 1 1/2-50 | 5-5000 |
| Conexión engranes | 6-10 | 9000 | 3-30 | |
| conexión # banda | 3-4 | 7200-17000 | - | 5-150 |

Generalmente son modelos para plantas piloto o laboratorios, como por ejemplo el Laboratory Mill No. 200 que tiene rotor de 2 plg. y opera a

13500 r.p.m. con una potencia de 1 1/2 HP y capacidad de 2 a 25 Gal/hr.

El molino Charlotte (Chemicolloid Corp.) también emplea rotación a gran velocidad con el líquido fluyendo entre un rotor cónico estriado y su correspondiente estator cónico también estriado. El calor entre ellos se regula por medio de un implemento calibrador de ajuste externo.

Las corrientes se levantan debido a las estrías sujetando al producto a fuerzas tanto de rasgado como de impacto. Todos los modelos operan a 3600 r.p.m.

Los materiales en que se fabrican van desde acero inoxidable hasta níquel, monel, bronce y fierro fundido. También se fabrican modelos sanitarios para procesar productos alimenticios.

El dispersador homogenizador Tri-Homo (Tri-Homo Corp.) tiene un estator y un rotor de alta velocidad, el cual puede tener varios tipos de estrías, o ser del tipo liso o abrasivo.

El molino Manton-Gaulin (Manton-Gaulin Co.) usa una válvula y un impactor. En este implemento la suspensión se bombea a través de un pequeño orificio para incrementar su velocidad hasta niveles cercanos a velocidad sónica. Esto produce grandes fuerzas de rasgado para reducción y todavía se incrementan a medida que esta corriente de alta velocidad golpea un anillo de impacto que cambia de dirección. Esto es acompañado por una turbulencia de alto orden, la cual se convierte en trabajo de dispersión.

TABLA No. 13

MOLINO COLOIDAL "CHARLOTTE"

MODELOS "G"

| CAPACIDAD Gal/Hr. | MOTOR (HP) | VELOCIDAD RPM | AREA DE PISO (p1g) | PESO (LB) |
|----------------------|---------------|------------------|--------------------------|--------------|
| 20 a 50 | 2-3 | 3600 | 16 x 38 | 450 |
| 50 a 100 | 3-5 | 3600 | 14 x 39 | 510 |
| 100 a 200 | 7 1/2-10 | 3600 | 19 x 49 | 650 |
| 200 x 400 | 10-20 | 3600 | 24 x 58 | 1450 |
| 300 a 600 | 20-30 | 3600 | 24 x 74 | 1600 |
| 600 a 1000 | 50-75 | 3600 | 28 x 64 | 2100 |
| 1000 a 5000 | 75-100 | 3600 | 36 x 88 | 2500 |
| 3000 a 7000 | 100-125 | 3600 | 36 x 88 | 2800 |

MODELOS "ND"

| | | | | |
|------------|----------|------|---------|------|
| 1 a 35 | 1-2 | 3600 | 15 x 36 | 240 |
| 1 a 60 | 2-3 | 3600 | 18 x 45 | 465 |
| 50 a 250 | 5 | 3600 | 16 x 51 | 895 |
| 200 a 350 | 7 1/2-10 | 3600 | 16 x 51 | 1180 |
| 300 a 750 | 20 | 3600 | 24 x 74 | 1500 |
| 600 a 1200 | 40-50 | 3600 | 26 x 68 | 1850 |

El Viscolizer (Cherry-Burrell Co.) es un modelo similar a la estructura de la válvula del molino Manton Gaulin.

11.5. CORTADORES ROTATORIOS

Son usados con materiales fibrosos o duros y en los cuales las acciones sucesivas de corte son más efectivas que las de presión o impacto. El alimentador no debe de exceder la longitud de las cuchillas y el grueso de éstas debe ser menor a 1 pulgada.

La Estructura incluye un rotor con cuchillas esparcidas uniformemente sobre la periferia para cortar contra otras cuchillas fijas montadas en el armazón de la caja del molino. El producto es descargado a través de unas cribas; su tamaño se controla por la apretura de las cribas y por el diseño y operación del molino. Con cribas de tamaño malla No. 20 y en algunos casos menor de malla No. 80; el sistema de colección del producto es neumático. En general, los cortadores rotatorios están fabricados de acero o acero inoxidable y también pueden serlo de materiales resistentes a la corrosión. En todos los modelos puede conseguirse el rotor con cuchillas de corte con cizalla que disminuye bastante la carga de choque.

Las unidades de laboratorio operan con unos cuantos caballos de potencia y tienen capacidad arriba de 100 libras por hora, mientras que las unidades industriales están impulsadas por motores de 5 a 60 HP y son de alrededor de 1 a 2 pies de diámetro; tienen cuchillas de 12 a 30 pulgadas de longitud y capacidad de 1 a 2 ton/hr.

Como ejemplo clásico de este tipo de máquina, tenemos el modelo Sprout-

Waldron que se usa para servicio pesado y se fabrica en 2 series: (1) Unidades con rotor de 10 pulgadas de diámetro y 920 r.p.m. de velocidad, con cuchillas de 18, 24 y 30 plg. de largo montadas en una armazón fundido de fierro, acero ó acero inoxidable. (2) Unidades con rotor de 20 plg. de diámetro, velocidad de 750 r.p.m. y con cuchillas de 10 y 30 -- plg. de largo con armazón de acero. Estas unidades varían de acuerdo a la aplicación. La alimentación del material se hace por medio de una tolva o por rodillos de compresión. Generalmente se especifica un rotor con cinco cuchillas y colocadas con un ligero ángulo respecto a la flecha del rotor, con el fin de tener cortes con dirección contraria en las cuchillas alternadas, para eliminar el tener que llevar la carga al final del cortador. Se especifican de 2 a 7 cuchillas fijas que alternan con cribas, en los claros entre ellas, alrededor del armazón para tener un área de descarga y para mantener los finos al mínimo.

Las diferentes variaciones en la construcción permiten muchas aplicaciones como la granulación de hojas de plástico y el trillado de las hojas de tabaco. Los molinos están impulsados por motores de 10 a 60 HP de potencia con bandas en V y emplean cubos de seguridad unidos con clavijas de acero.

Entre estos modelos tenemos además: los cortadores Ball & Jewell, los cortadores para trabajo rudo Mercer-Robinson Unique, los cortadores rotativos Abbé que trabajan con materiales fibrosos como el asbesto, las cáscaras de coco, el papel y el cuero; también se emplea como preparador de carga para los molinos de rozamiento y de muelas.

12.- MATERIALES DE CONSTRUCCION DE EQUIPO

12.1. DESGASTE

El desgaste de las superficies de trituración y de molienda depende del carácter de la abrasión y, en particular, de la naturaleza y distribución del abrasivo. Otros factores son la velocidad, presión de contacto, temperatura, tiempo y condiciones de la superficie de moljenda. Uno de los principales costos en una planta de trituración y molienda es el desgaste de estas superficies, que también puede tener una importante influencia en la pureza del producto y debe considerarse cuidadosamente cuando se seleccione la máquina y el material de las superficies de trabajo de ésta.

Generalmente, los materiales duros son también abrasivos y tienen una gran resistencia a la trituración, aunque pueden tener poca al rozamiento. En el caso de las rocas, éstas pueden tener gran resistencia a la abrasión, pero ser muy frágiles.

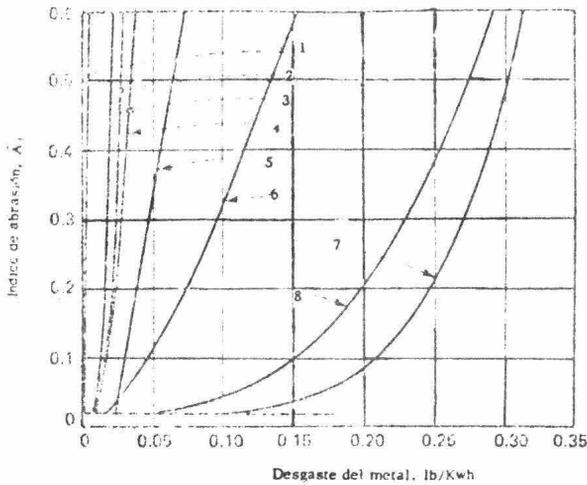
En las rocas existe una relación entre la composición de minerales, estructura, propiedades mecánicas y el carácter abrasivo. Los abrasivos dependen principalmente de la presencia de una matriz o cemento de grano fino o del equivalente de la relación entre los cristales constituyentes y la forma en que están orientados. La dureza y tenacidad naturales de estos cristales es un factor accesorio.

Bond describe un método para probar diferentes materiales y minerales por medio de su relativo desgaste abrasivo y da ecuaciones que relacio-

TABLA No. 14

DESGASTE DEL METAL EN LA MOLIENDA

| <u>TIPO DE OPERACION</u> | <u>KWH/lb. de metal</u> |
|--------------------------|-------------------------|
| Molienda húmeda | |
| Bolas | 7 |
| Rodillos | 5-6 |
| Recubrimientos | 30 |
| Molienda en seco | |
| Bolas | 35 |
| Rodillos | 30 |
| Recubrimientos | 150-175 |
| Molinos de Martillos | 5-10 |
| Molienda Preliminar | 30 |
| Molienda fina | 40 |



Desgaste del metal en terminos de índice de abrasión.

| | <u>Tipo de molino</u> | <u>Tipo de molienda</u> | <u>Desgaste en:</u> |
|------|-----------------------|-------------------------|---------------------|
| 1. - | Bolas | Seca | Recubrimiento |
| 2. - | Bolas | Humeda | Recubrimiento |
| 3. - | Varillas | Humeda | Recubrimiento |
| 4. - | Bolas | Seca | Bolas |
| 5. - | Giratorios | --- | Recubrimiento |
| 6. - | Rodillos | --- | Coraza |
| 7. - | Varillas | Humeda | Varillas |
| 8. - | Bolas | Humeda | Bolas |

nan el índice de desgaste abrasivo, probado en el laboratorio, al desgaste real en máquinas comerciales. El término usado, libras de metal por kilowat-hora, permite una comparación entre diferentes máquinas, diferente alimentación y tamaño del producto y diferentes materiales.

El probador de abrasión Pensylvania, mide la pérdida de peso de una pala de acero que golpea partículas de un material que está siendo triturado o molido; siendo la pérdida de peso en gramos, el índice de abrasión del material.

La corrosión afecta la rapidez de desgaste, así como la pérdida de material en molienda húmeda es mayor que en molienda en seco, debido esto a la disolución del metal.

12.2. MATERIALES RESISTENTES AL DESGASTE

La tenacidad del metal (y su habilidad para resistir el impacto) es una función del esfuerzo de tensión, del límite elástico y de la ductibilidad.

Se representa por el área bajo la curva de esfuerzo y puede definirse como el total de energía por unidad de volumen que puede ser absorbido, arriba de la ruptura. La tenacidad está dada por el producto del esfuerzo de tensión multiplicado por la elongación en el momento de la fractura.

La aleación acero-manganeso (11-13%) tiene un alto grado de tenacidad, combinada con una dureza (adquirida) producida por la deformación. La

tenacidad puede variarse considerablemente mediante varias técnicas de manufactura, pero la dureza debe desarrollarse por martilleo o por presión. Cuando el material triturado sea abrasivo, pero no desmenuzable, el desarrollo de la presión puede ser insuficiente para causar un endurecimiento apreciable.

Un desgaste rápido bajo condiciones aparentemente fáciles, no siempre - pueden tomarse como reflejo de la calidad del acero.

Para facilitar la dureza, se usa acero con aleación de manganeso de 6 a 9%, pero las propiedades de impacto en el corte son inferiores.

La adición de 2% de cromo para las aleaciones de acero aumentan su límite de fatiga y estabilidad dimensional. El uso del 2% de molibdeno subirá el límite de fatiga y hará al material más tolerante a las técnicas de producción. Estos aceros tienen una buena combinación de resistencia a la abrasión y a la tenacidad con suficiente resistencia a la compresión, pero son útiles solamente para condiciones de medio impacto.

El contenido de cromo del hierro resistente al desgaste varía de 2 a 28%. El hierro con alto contenido de cromo con adiciones de níquel y/o molibdeno y cobre contiene partículas de carburo de cromo verdaderamente fuertes. Este hierro es tenaz en servicio, con una estructura metalúrgica en la cual la fase carburo es discontinua y, por lo tanto, menos tendiente al comportamiento frágil.

La aleación de hierro al 15% de cromo-níquel-molibdeno se usa para ba--



rras de impacto fijo en pulverización de partículas pequeñas. Las barras tienen excelente resistencia al desgaste, pero son frágiles y necesitan de tratamiento de calor para optimizar su resistencia y tenacidad. Los armazones de acero reforzado pueden fundirse para evitar que se fragmenten en caso de falla.

13.- SELECCION DEL EQUIPO

En la selección del equipo apropiado para reducir un cierto material - de tamaño, se deberá considerar primero si es necesario utilizar varias máquinas para reducir hasta un tamaño dado el material, o basta con una sola máquina que realice el mismo trabajo.

Generalmente hablando, cada molino hace un determinado trabajo y, usualmente, uno de ellos, en particular, sirve para un trabajo específico. La selección debe hacerse en función del servicio que vaya a dar el - - equipo y de su costo, especialmente costo de operación. El precio de compra en sí tiene un efecto pequeño en el costo total del molino durante su vida de operación, los bajos costos de mantenimiento y la confiabilidad son los aspectos más importantes en la selección del equipo adecuado.

De los costos, los dos más significativos en el equipo de reducción de tamaño son: el requerimiento de potencia y el mantenimiento. Debido a que casi todo el equipo de reducción es continuo y a menudo maneja -- grandes tonelajes, los costos de operación son pequeños.

Para empezar la búsqueda de la máquina apropiada, el Ingeniero debe --

armarse, asimismo, con tanto conocimiento del problema como le sea posible. Debe conocer el contenido de humedad, la dureza, la abrasividad, la resistencia al impacto y otras propiedades del material que desea -- triturar.

También debe conocer el tamaño de partícula, especialmente el valor máximo, el tonelaje por hora requerido y el tamaño y otras características del producto; debe buscar, de preferencia, la máquina de reducción de -- tamaño que produzca la máxima cantidad del producto con el mínimo de potencia y el mínimo de desgaste en las partes de trabajo del molino.

Existen varias guías en la selección del equipo apropiado (ver tablas); la alimentación altamente abrasiva requiere de un equipo cuyas partes -- se muevan lentamente para eliminar problemas de desgaste, aunque a veces resulta económico sacrificar una parte reemplazable en unidades de alta velocidad.

Los trituradores de mandíbula y giratorios se usan para reducción gruesa o preliminar de materiales abrasivos y los molinos revolventes para reducción fina.

Los impactores que no tienen rejilla o malla pueden manejar también materiales abrasivos, aún cuando estén húmedos. Los materiales de una -- abrasividad moderada son reducidos a menudo por compresión en rodillos, como en granuladores de anillos, de rodillos y de paila; los materiales blandos, no abrasivos, son molidos en molinos de martillos y de rozamiento.

TABLA No. 15

| OPERACION DE REDUCCION | DUREZA DE MATERIAL | TAMAÑO DE LA ALIMENTACION MAXIMO | TAMAÑO DE LA ALIMENTACION MINIMO | TAMAÑO DEL PRODUCTO MAXIMO | PRODUCTO MINIMO | RELACION DE REDUCCION | TIPO DE* EQUIPO USADO |
|------------------------|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------|
| TRITURACION PRIMARIA | DURO | 20 a 60 plg. | 4 a 12 plg. | 5 a 20 plg. | 1 a 6 plg. | 4:1 | a,b,c,d,e |
| TRITURACION SECUNDARIA | DURO | 1 1/2 a 5 plg. | 1/4 a 1 plg. | 1/4 a 1 plg. | $\frac{1}{16}$ a 1 plg. | 7:1 | a,b,c,d,e,n, o,p,q,r |
| | BLANDO | 20 plg. | 4 plg. | 2 plg. | 1/2 plg. | 10:1 | c,d,e,f,l,h |
| PULVERIZACION | DURO | Malla No. 4 a 14 | Malla No. 20 a 100 | Malla No. 10 a 100 | Malla No. 200 a 1250 | 15:1 | k,l,n,o,p,q, r,u. |
| | BLANDO | Malla No. 2 a 5 | Malla No. 10 a 40 | Malla No. 10 a 100 | Malla No. 200 a 1250 | 50:1 | k,l,n,o,p,q, r,s,t,u. |

* TRITURADORES: a, de mandíbula; b, de cono y giratorios; c, de paila; d, de rodillos simple; e, de doble rodillo, de martillos baja velocidad y martinetes.

PULVERIZADORES INTERMEDIOS:

g, de jaulas múltiples; h, cortadores rotatorios y de cubo; i, molinos de disco; j, de martillos velocidad media; de rodillo centrífugo.

MOLINOS PARA PULVERIZACION FINAL:

k, de bolas, guijarros y varillas; l, de tubo y compartimentos; n, molinos anulares; o, de piedra esmeril; p, de rodillos de vista lateral alta y molinos de arena; q, molinos de disco; r, molinos de martillos de alta velocidad; s, molinos coloidales; t, molinos de alta velocidad con clasificador mecánico; u, molinos de energía fluida.

** Equivalente a 10 micras.

Por otro lado, el tamaño de partícula de la alimentación y del producto determinan, en gran parte, la clase de molino que se va a emplear. El intervalo del tamaño del producto también influye en la selección, ya que algunos tipos, como los molinos de anillos, producen una gran cantidad de finos; otros, como los trituradores de rodillos, producen pocos finos y algunos, como los cortadores de cuchillas, no producen materialmente finos.

Después de hacer una selección primaria del tipo o tipos de molinos, el Ingeniero deberá consultar a los fabricantes del equipo que él ha escogido. Ellos le podrán decir si su máquina es adaptable al problema; -- también pueden sugerir algún pretratamiento de la alimentación, enfriamiento del molino u otros medios para evitar dificultades; también cuenta con plantas piloto en las que pueden hacer pruebas o hacer pruebas a gran escala, a menudo sin cargo alguno; es en los laboratorios de los fabricantes, bajo los ojos de hombres experimentados, en donde se han resuelto la mayoría de los problemas de reducción de tamaño.

Cuando se instale y opere el equipo de reducción de tamaño, considérese la operación en su totalidad y no se restrinja la atención al equipo reductor de tamaño solamente; el pretratamiento de la alimentación y los accesorios tales como cribas y clasificadores, son en ocasiones de gran importancia.

14.- CONCLUSIONES

En el desarrollo de este trabajo fue posible darse cuenta de que la reducción de tamaño es poco conocida como una operación unitaria dentro del medio del Ingeniero Químico y, muy especialmente, dentro de la Facultad de Química. En ésta se limita su estudio a una práctica de laboratorio de Ingeniería Química en un molino de bolas, pero casi no se trata desde el punto de vista teórico. Es por lo que se sugiere se complemente esta práctica con algunas clases teóricas o que se instale un nuevo equipo, diferente al molino de bolas, de reducción de tamaño en el laboratorio para ampliar el estudio de esta operación que aunque, como ya se dijo, es poco conocida, es de mucha importancia por la cantidad de equipo instalado en diferentes industrias.

La literatura sobre reducción de tamaño es amplia y se conocen varias teorías útiles que pueden ser aplicadas a esta operación; pero no se ha formulado una teoría general aceptable. La estructura de esta posible teoría es compleja y podrá llegar a ser aún más compleja en el futuro.

Va se ha visto que el equipo para reducción de tamaño es teóricamente ineficiente; aproximadamente el 2% de la energía suministrada aparece como incremento de energía de superficie en los sólidos molidos; el resto de esta energía se pierde, como calor, ruido, vibración, fricción entre las partículas, energía de transporte del material dentro del molino (levantar), etc. Es por esto que se considera que la reducción de tamaño seguirá siendo un arte.

Muchas de las teorías y leyes sobre reducción de tamaño son el resultado de experiencias prácticas, muchas de las cuales sirven sólo para un intervalo de reducción determinado o, en ocasiones, para un equipo o para un material también determinado, como se ha visto en algunos ejem- - plos.

Cuando se seleccione equipo para reducción de tamaño, debe estudiarse - el problema y hacer una selección preliminar; posteriormente, lo mejor es consultar directamente con los fabricantes, ya que ellos son los únicos que conocen perfectamente las limitaciones de los equipos que fabrican.

La evolución en el diseño de los molinos y trituradores no ha sido mu--cha, ya que se siguen utilizando los equipos clásicos durante años (mo--linos de bolas, trituradores de mandíbula, etc.) y sólo se encuentra --evolución cuando se resuelve un problema particular que en ocasiones se puede aplicar en forma más general. En México, por lo regular, sólo se desarrollan equipos con aplicaciones generales, o sea, los más comunes.

B I B L I O G R A F I A

- JOHN H. PERRY, *Chemical Engineering's Handbook*, sección 8, Mc Graw Hill Book Co., New York, 1963.
- MAX S. PETERS, *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, 499-503, McGraw Hill Book Co., Chemical Engineering Series, New York, 1968.
- BROWN and ASSOCIATES, *Unit Operations*, parte 1 cap. 4, John Wiley and - Sons Inc., New York, 1950.
- WARREN L. McCABE and JULIAN C. SMITH, *Unit Operations of Chemical - - - Engineering*, cap. 4, McGraw Hill Book Co., México, Editorial Novaro - - México, S.A. 1965.
- WALKER, LEWIS, McADAMS, GILLIAND; *Principios de Ingeniería Química* cap. 9, Compañía Editorial Continental, S.A., México, 1967.
- JOHN H. PERRY, *Manual del Ingeniero Químico*, vol. II sec. 16, U.T.E.H.A., México, 1966.
- HARRY McCORMACK, *The Applications of Chemical Engineering*, cap. XI D. - Van Nostrand Co., Inc., New York, 1943.
- FRANK C. VILBRANDT, *Ingeniería Química del Diseño, de Plantas Industriales*, 108-110, Editorial Grijalbo, México, D.F., 1963.
- CECIL H. CHILTON, *Cost Engineering in the Process Industries*, 53, 324, McGraw Hill Book Co. Inc., New York, 1960.
- McGRAW HILL ENCYCLOPEDIA OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, vol. 12 348-351, - vol. 5 389 390, McGraw Hill Book Co., 1966.
- KIRK-OTHMER, ENCYCLOPEDIA OF CHEMICAL TECHNOLOGY, vol. 18 324-365, -- Interscience Publishers, New York, 1969.
- ROBERT S. ARIES, *Chemical Engineering Cost Estimation*, 162, 166, 69, 61, - Chemical Engineering Series, McGraw Hill Book Co., 1955.
- ALFRED RATCLIFF, *Trends in Size Reductions of Solids... Crushing and - Grinding*, *Chemical Engineering*, 62-75, Julio 10, 1972.
- JULIAN C. SMITH, *Size Reduction*, *Chemical Engineering*, 151-166, Agosto, 1952.
- ARTHUR L. STERN, *A Guide to Crush and Grinding Practice*, *Chemical - - - Engineering*, Diciembre 10, 1962.
- R.V. RILEY, *Theory and Practice of Crushing and Grinding*, *Chemical and Process Engineering*, Abril, 1965.

LINCOLN T. WORK, *Size Reduction Annual Review, Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 57 No. 11 97-99, Noviembre, 1965.

L.T. WORK y R.H. SNOW, *Size Reduction Annual Review, Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 58 No. 11 63-66 Noviembre 1966; vol. 59 - No. 11, 80-85, Noviembre, 1967.

RICHARD H. SNOW, *Size Reduction Annual Review, Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 60, No. 11, 36-42, Noviembre, 1968; vol. 61 No. 11 102-11, Noviembre, 1969; Vol. 62, No. 11, 36-43, Noviembre 1970.

L.G. AUSTIN y R.R. KLIMPEL, *The Theory of Grinding Operations, Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 56, No. 11, 18-24, Noviembre, 1964.

TATSUO TANAKA, *COMMUNITION LAWS, Industrial and Engineering Process - Design and Development*, vol. 5, No. 4, 353-358, Octubre, 1966.

HAROLD E. GALANTY, *The Size Reduction Paradox, Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 55, No. 1, 46-52, Enero, 1963.

M. BALASUBRAMANIAN y EMIL H. HOHMANN, *Studies on Grinding Ball Mill on Pilot Plant Scale, Chemical Age of India*, Vol. 19, No. 10, 878-883, Octubre, 1968.

M. RAMANUJAN y D. VENKATESWARLU, *Studies in Fluid Energy Grinding, Powder Technology*, vol. 3, 92-101, 1969/70.

CHRIS W. MATTHEWS, *Trends in Size Reduction of Solids... Screening*, -- *Chemical Engineering*, 76-83, Julio 10, 1972.