616 - 83

medida de la molturabilidad de los materiales y el control de los molinos industriales

**la mesure de la broyeurabilité des matériaux et le contrôle
des broyeurs industriels**

M. PAPADAKIS

(«Bulletin de la Société Française de Céramique», núm. 44, tercer trimestre 1959, pág. 45.)

Los molinos de bolas se utilizan, por su robustez y simplicidad, en numerosas industrias. De un modo particular en la industria del cemento, donde se trata un material duro (el clinker) que exige gastos elevados.

Constitución

Los molinos de bolas constan de un tubo de dimensiones variables (por ejemplo: 2 m de $\varnothing$ y 10 m de longitud), relleno de cuerpos molturadores, generalmente de acero.

Los molinos de bolas pueden instalarse:

- en circuito abierto,
- en circuito cerrado, es decir, con reintroducción, a la entrada del cilindro, de la fracción gruesa del material molido.

Principales factores que afectan al funcionamiento de molinos

Los factores más importantes, clasificados en orden de importancia, son los siguientes:

- a) velocidad de rotación;
porcentaje de carga en bolas y material.

La velocidad de rotación óptima es, aproximadamente, $30/\sqrt{D}$ (siendo D el diámetro útil del aparato, expresado en metros). Esta velocidad corresponde a un porcentaje de carga global del orden de 0,40 (en volumen), estando colmatados los huecos entre las bolas, por el material a moler;

- b) graduación del tamaño de los cuerpos molturadores desde la entrada hasta la salida del molino. El tamaño de elementos debe ser, en cada compartimiento, adecuado al tamaño de grano del material a moler;

— molturabilidad del material;

- c) factores tales como:

- naturaleza y forma del revestimiento protector del molino,
- naturaleza y forma de los cuerpos de molienda,
- aditivos de molienda, etc., etc.

son de importancia secundaria.

Molturabilidad de la materia

Recordemos la ley de Rittinger.

Establece que el aumento de superficie es proporcional al trabajo de rotura aplicado al material.

Esta ley, ¿se aplica como tal al molino de bolas? Aparentemente, no.

Coloquemos una cierta cantidad de material en un molino de bolas herméticamente cerrado y midamos el aumento de la superficie en función del tiempo. Se comprueba que la curva obtenida presenta siempre cierta concavidad dirigida hacia el eje en el que se representa el tiempo, es decir, el trabajo (fig. 1).

La ley de Rittinger no parece tener aplicación más que en las proximidades del origen, es decir, en una zona en que la curva y su tangente pueden confundirse. La curvatura observada más adelante demuestra que la creación de nueva superficie lleva consigo una pérdida de trabajo debido a la *conglomeración del material entre sí* por efectos del choque.

Esta idea de conglomeración es fundamental.

Proceso de molienda

En un molino que funciona normalmente, la molienda tiene lugar, por choques, en la zona en que los elementos molturadores poseen la energía cinética máxima.

En esta zona, la probabilidad de caída de las bolas es igual en todos los puntos, pero los efectos varían porque las bolas no caen sobre un plano horizontal, sino sobre otras bolas.

La molienda es, pues, un proceso *de orden estadístico*. Para comprenderlo mejor es necesario hacer surgir el concepto de *volumen probable de molienda*, concepto ficticio pero muy cómodo; se supone que cada grupo de dos bolas va acompañado de un volumen de material en el cual se realiza precisamente la molienda. Como máxima simplificación, se puede representar este volumen probable como una porción de la capa de material aplastado entre dos bolas.

Esencialmente, se produce en esta capa una compresión progresiva, acompañada de rotura, que conduce al material del centro a una compacidad máxima, gracias al efecto del coeficiente de frotamiento bola-material (fig. 2).

El trabajo suministrado por la bola que cae se utiliza para comprimir los granos entre sí, lo que provoca:

- frotamientos (desprendimiento de calor),
- roturas (aparición de granos más finos).

Por otro lado, estos granos finos se conglomeran bajo el efecto de la compresión. Al final de la operación, la superficie obtenida, y medida, con un permeabilímetro, por ejemplo, es inferior a la que debería alcanzar.

Este fenómeno es tanto más destacado cuando los granos son más finos y más numerosos, es decir, cuando la molienda es más avanzada.

Así se llega a las dos conclusiones siguientes, de gran importancia:

- 1) *La molienda tiende a producir elementos finos, cuya presencia disminuye rápidamente el rendimiento de la operación.*

El elemento fino, cuya aparición interesa, se comporta más bien como un enemigo del que hay que desembarazarse lo antes posible.

- 2) *El comportamiento de un material cualquiera, bajo el efecto de un desmenuzamiento por compresión, puede caracterizarse por los dos coeficientes siguientes:*

- *Coefficiente de aptitud a la rotura.*
- *Coefficiente de aptitud a la conglomeración.*

El conjunto de estos dos coeficientes constituye la *molturabilidad* del material estudiado. Esta se representa por la curva de la figura 1.

Medida del coeficiente de aptitud a la rotura B

Su principio reposa sobre la noción de volumen medio de molienda anteriormente mencionado.

El material se coloca en un mortero instalado entre los platos de una prensa. El mortero lleva un pistón que reposa sobre el material y transmite el esfuerzo de aplastamiento (figura 3).

El desplazamiento del pistón se mide con dos comparadores a 1/100 mm. Por el aspecto del diagrama esfuerzo-deformación se deduce el trabajo invertido.

Fig. 3

Después de la compresión, el material se desaglomera por agitación en medio líquido y más tarde se deseca. Su superficie específica se mide por medio de un permeabilímetro.

La operación se continúa a partir del nuevo polvo obtenido y se prolonga hasta conseguir un número suficiente de puntos.

La experiencia demuestra que, de esta manera, el aumento de superficie de un cuerpo homogéneo es *proporcional* al trabajo invertido. La pendiente de la recta obtenida en el sistema de coordenadas superficie/trabajo, define el coeficiente B de aptitud a la rotura del material (fig. 4).

Un cuerpo heterogéneo posee, en general, varios coeficientes B sucesivos, siguiendo la superficie específica alcanzada.

La heterogeneidad puede ser:

- de composición (caso de una pegmatita),
- de constitución (caso de un clínker siempre más o menos poroso).

Es interesante señalar en este último caso que los poros desaparecen al eliminar los granos más gruesos. El clínker puede entonces considerarse homogéneo por encima de un cierto umbral de superficie específica, lo cual facilita su estudio (fig. 5).

Fig. 4

Fig. 5

Medida del coeficiente de aptitud a la conglomeración

Este coeficiente no es accesible directamente. Se puede deducir, en ciertos casos, de la curva de la figura 1, que representa la *molturabilidad* del material en las condiciones dadas.

La forma de esta curva depende, a la vez, del valor de A y de B que allí intervienen simultáneamente.

Cuando varios cuerpos poseen el mismo coeficiente B, es posible compararlos examinando su curva de molturabilidad. Entonces se determina fácilmente cuál de estos cuerpos posee el coeficiente A más pequeño: éste es el que es más fácil de moler (fig. 6).

Fig. 6

Estas observaciones conducen a las siguientes conclusiones:

- de dos cuerpos, cuyos coeficientes B son próximos, el más fácil de moler será aquel que posee el coeficiente A más bajo,
- de dos cuerpos, cuyos coeficientes A son próximos, el más fácil de moler es aquel que posee el coeficiente B más elevado.

Estos hechos son muy importantes, pues permiten comprender y comparar el comportamiento de diferentes materiales después del tratamiento en un molino de bolas.

Los valores de A y B pueden relacionarse con la composición química o con la constitución del material estudiado. Así, en el caso del clinker, A depende de la cantidad de silicato bi- y tricálcico formados, mientras que B está relacionado, probablemente, con la constitución de la fase intersticial. Ya se han puesto en evidencia relaciones significativas a este respecto.

El valor de A puede, igualmente, depender de las condiciones de molienda (molienda en húmedo o en seco) (fig. 7).

Molinos industriales

Antes de estudiar el funcionamiento de un molino, es necesario definir el material que se va a moler. Es preciso, por eso, precisar el valor de los *coeficientes A y B* que gobiernan su comportamiento en la molienda *por efecto de compresión* (tal como ocurre en la molienda por caída de los cuerpos molturadores).

A continuación es necesario medir la superficie específica o determinar la curva granulométrica del material antes de su introducción al molino.

Es preciso asegurarse que el molino está cargado con un grado de llenado adecuado y que marcha a una velocidad correcta. No queda más que definir la *gradación de cuerpos moledores* a adoptar a lo largo del aparato.

Fig. 7

Esta determinación se efectúa por aproximaciones sucesivas, teniendo en cuenta un cierto número de principios basados en la teoría y en la práctica.

El control del funcionamiento del aparato se hace midiendo la superficie específica de muestras tomadas sobre el eje del molino y lo más próximas posible.

Se debe tender a una relación lineal entre la superficie específica y la longitud útil de molienda, tal como se representa en la figura 8.

Discusión

SR. REY.—Creo que el trabajo del señor Papadakis es muy interesante, porque me parece que es la primera vez que se ha llegado a medir la molturabilidad por medios prácticos.

El señor Papadakis indica que la ley de Rittinger no es siempre aplicable; ¿cuáles son sus límites?

SR. PAPADAKIS.—Yo no lo indico; demuestro que es cierta para un cuerpo homogéneo, y que lo es, incluso, para un cuerpo heterogéneo; ya que no existe una curva: como habrán observado, hay inflexión; hay dos porciones de recta que se continúan, luego hay dos coeficientes de Rittinger sucesivos. Ahora bien, en el caso del molino de bolas, creo que es donde viene la controversia y jamás se cumple la ley de Rittinger. Es por lo que he introducido el concepto de conglomeración que me permite explicar de un modo sencillo el proceso del fenómeno en el molino de bolas. Por otro lado, la comprobación se hace muy fácilmente: tomad un polvo molido en un molino de bolas y desconglomerarlo en un líquido, encontraréis en todos los casos una superficie específica elevada. Esto no falla nunca; hay un fenómeno de conglomeración, y de ahí, el desperdicio de trabajo.

SR. REY.—Pues bien, ¿qué hacer para molinos distintos al de bolas?

SR. PAPADAKIS.—En este caso, yo he estudiado de un modo particular la molienda por compresión, es decir, la molienda por bolas; no he estudiado los molinos por percusión ni otros similares.

SR. REY.—Entonces, ¿considera que todavía queda por estudiar todo lo relacionado con los molinos por percusión?

SR. PAPADAKIS.—Yo pienso que de todos modos, la ley de Rittinger no puede aplicarse directamente, puesto que la operación tiene siempre un cierto rendimiento.

Yo no he estudiado especialmente esta cuestión; nosotros tratamos de estudiar, particularmente, los molinos de bolas de gran consumo, es decir, los molinos por compresión.

SR. DE GROOTE.—El molino de bolas, ¿no trabaja también, en cierto modo, a percusión, en los principios de su trabajo y cuando el grano de material es bastante grueso?

SR. PAPADAKIS.—No; yo no pienso eso; creo que, siempre, en el molino de bolas hay un efecto de compresión, es decir, hay percusión—si usted quiere—, pero este efecto va siempre acompañado de conglomeración de materia entre sí.

SR. LILLE.—¿Ha encontrado, en efecto, un máximo de superficie específica al aumentar el tiempo de molienda?

SR. PAPADAKIS.—En efecto, la curva que han visto sufre una cierta inflexión, alcanzando un tramo horizontal para descender en seguida al aparecer una fuerte conglomeración; por otra parte, esto se observa a simple vista. Cuando un material se muele en exceso, se observa que se obtienen granos que empiezan a crecer en el seno del polvo; en realidad, aumenta el número de elementos finos, pero se encuentran conglomerados en forma de partículas más gruesas.

SR. LILLE.—¿Cuál es, más o menos, el tiempo de molienda? En el caso por usted estudiado ha sido de quince minutos para el cuarzo, por ejemplo.

SR. PAPADAKIS.—Yo no he molido cuarzo en el molino de bolas, pero sí lo he hecho con clínker, y al cabo de media hora o una hora, por ejemplo, la curva descende.

SR. MOTZETSKI.—El aparato de tubo, ¿es un aparato para medir permeabilidad?

SR. PAPADAKIS.—Exactamente.

SR. LAFUMA.—¿No hay más cuestiones de que tratar? Yo quería hacer una aportación suplementaria a lo que ha dicho el señor Papadakis, en lo que se refiere a la reconglomeración por efecto de sobremolienda.

Esto explica un fenómeno conocido desde hace mucho tiempo por los cementeros. Saben ustedes que durante la fabricación del cemento, durante la molienda, siempre se añade al clínker un poco de yeso para regular el fraguado.

En el laboratorio se ha demostrado que cuando se llega a una sobremolienda el fraguado surge inmediatamente, lo que se dice un cierto «falso fraguado del cemento». Esto está relacionado con la aparición de escamas en la molienda, es decir, de elementos que se vuelven a conglomerar por exceso de molienda. Se comprueba que todo el sulfato cálcico del yeso se concentra en estas escamas y no puede actuar en el fraguado. En suma, es la diferencia que hay entre la molturabilidad del clínker solo y la del yeso, que se pone en evidencia con la experiencia mencionada.

El yeso es mucho más fácil de moler que el clínker, pero también se reconglo mer a mucho más fácilmente. Y en esta experiencia se ve bien claramente que son las partículas de yeso las que se vuelven a conglomerar con más rapidez de un modo sistemático.

F. S. S.