- Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento -

601-5 LA MOLTURACION.

(Le Broyage)

A. Joisel

De: "REVUE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION", 240, nº 18, 1950

Los Laboratorios de la Construcción y Obras Públicas de Francia llevan varios años dedicados al estudio de la fragmentación de sólidos en general. El Sr. Joisel, Jefe de Servicio en dichos Laboratorios, ha pronunciado una Conferencia en la Reunión Técnica de la Sociedad Francesa de Cerámica, de la cual publica ahora el texto la Revue des Materiaux.

Comienza el trabajo con algunas consideraciones sobre los antecedentes históricos -y aún prehistóricos- de la molienda en la Humanidad. Luego entra de lleno en la técnica del molino tubular de bolas o tubo Alsing, diciendo algunas palabras sobre su construcción y carga de relleno pasando seguidamente a exponer los principios de su funcionamiento.

La carga de bolas, cuya superficie en reposo debe mantenerse por debajo del eje de rotación del molino (fig. 1) es arrastrada al ponerse en marcha éste. En el régimen, es decir, cuando el tubo gira a su velocidad constante de trabajo, cada bola, considerada aisladamente, gira con el cilindro en la parte baja, sumergida en el conjunto de las demas bolas. Una vez que ha pasado el plano horizontal determinado por el eje, se encuentra solicitada por dos fuerzas: una que tiende a hacerla caer, la fuerza de la gravedad, y otra que la llevaría hacia la pared superior del cilindro, la fuerza centrífuga, (ver fig.). Si las cosas marchan correctamente, llega un momento que la fuerza de la gravedad vence a la centrífuga y la bola sale de su trayectoria circular para caer libremente describiendo una parábola. Si el molino marcha regularmente, la bola que cae encuentra a las demás bolas, y al material que se está molturando, sobre el círculo que había seguido anteriormente. Se efectúa así una molienda por choque.

Los puntos de partida de todas las bolas se encuentran sobre un círculo que pasa por el centro del tubo y que tiene su centro por encima del eje del cilindro. El diámetro de este círculo depende la velocidad de giro del tubo. Los puntos de impacto de todas las bolas se encuentran sobre una curva "caracol de Pascal" que se une con los dos extremos del diámetro del círculo antes mencionado.

Existe una trayectoria límite interior: aquella que es tangente al caracol de Pascal (fig. 2). De aquí se deduce que la carga de relleno de material de un molino tubular es limitada. El tanto por ciento de carga de producto a moler no debe pasar en ningún caso de 45. En otras palabras, en el momento de parada del molino, la superficie superior de las bolas debe estar netamente por debajo del eje del cilindro.

Mediante el cálculo se puede determinar la velocidad de llegada de una bola al punto de impacto, es decir, la velocidad relativa con respecto al material, que también se encuentra en movimiento. Se puede deducir así el trabajo de molienda para una zona circular infinitamente delgada. Integrando de la periferia al centro, puede hallarse el trabajo total efectuado.

Se encuentra que este trabajo es máximo para una velocidad de rotación dada por:

$$n = 35{,}4/\sqrt{D} = 25/\sqrt{R}$$

siendo D y R el diámetro y radio interior del tubo, y n la veloci dad de rotación en vueltas por minuto.

Esta velocidad corresponde al caso en que las bolas exteriores golpean la pared a 45º por debajo de la horizontal (fig. 3). Se concibe fácilmente que el trabajo de molienda sea función de la velocidad de rotación. En efecto, si el cilindro gira muy de prisa, el círculo de los puntos de partida es totalmente interior al tubo. Existe en este caso una corona de bolas (y material) que gira constantemente con el tubo y que resulta centrifugado sin efecto molturante alguno.

Si el tubo gira muy lentamente, la trayectoria límite interior de que se ha hablado antes (tangente al caracol) se encuentra demasiado cerca de la pared del tubo (fig. 4). El porcentaje de relleno lleva implícito el volumen aparente total de las bolas).

Se han verificado diversas experiencias para determinar la carga óptima de materia que puede admitir un molino. Si se llevan a una gráfica, en abscisas la carga de material y en ordenadas el trabajo de molturación, para una duración de giro dada, por ejemplo una hora, se obtiene una curva como la de la fig. 5, en la que puede verse que existe un óptimo de carga para el cual el trabajo es máximo. Este óptimo corresponde a una carga tal que se rellenen exactamente los intersticios existentes entre las bolas en reposo. Estos huecos vienen a constituir un 40 % del volumen total.

Se puede explicar matemáticamente el por que, en una mezcla de bolas de tamaños diferentes, las bolas grandes se colocan cerca del centro y las pequeñas cerca de las paredes, cuando la velocidad de rotación es bastante pequeña y por que, a velocidades altas, las cosas ocurren al contrario. Se explica también el hecho de que se produzca la mezcla de la carga, aunque cada elemento siga siempre la misma trayectoria, porque se verifica una transformación de zonas en cada vuelta del molino. Así, una zona comprendida entre dos radios se transforma, al cabo de una vuelta en una zona limitada por dos espirales (fig. 6).

Para aclarar todos estos principios, tomemos, por ejemplo, un molino de 200 litros de capacidad y de 60 cm. de diámetro interior. Su velocidad de rotación debe ser:

$$n = 35,4/\sqrt{D} = 35,4/0,7745 = 45 \text{ r.p.m.}$$

El peso máximo de bolas de acero que debe contener será:

$$200 \text{ l} \times 0,45 \times 0,60 \times 7,7 = 415 \text{ Kg},$$

suponiendo que se tome 45 % como porcentaje de relleno; 0,60 la proporción de "llenos", es decir, (1-0,4), siendo 0,4 el porcentaje de huecos; y 7,7 el peso específico del acero.

El volumen aparente de materia admisible en el molino, viene dado por:

$$90 \text{ l} \times 0,40 = 36 \text{ litros.}$$

siendo 90 litros el volumen aparente de las bolas y 0,40 la proporción de huecos. Si la densidad del producto a moler es de 1,5, se podrán introducir en el molino:

$$36 \times 1,5 = 54 \text{ Kg.}$$

El autor ha estudiado la evolución de la finura del producto molturado en función del tiempo de molienda. Esto puede hacerse observando la variación en la superficie específica del producto en función del tiempo. Se halla que esta superficie específica, que caracteriza la finura del producto, es proporcional a la duración de la molienda durante un periodo de tiempo que, en los experimentos del autor, viene a ser de 1,5 horas. Pasado este tiempo no se observa incremento en la superficie específica, por lo que huelga por tanto proseguir la molturación, (fig. 7).

El punto anguloso de la curva (fig. 7), que en el experimento citado ocurre a 6.000 cm^2/gramo de superficie especifica, - varía según las condiciones de trabajo. Probablemente, la finura - alcanzada es mucho mayor en la molienda en húmedo que en la molienda en seco.

La finura depende tambien del tamaño de las bolas. Parece, hasta el presente, que la superficie de los cuerpos o elementos molturadores debe estar comprendida entre 1/100 y 1/500 de la superficie del material a moler.

Si volvemos al ejemplo mencionado anteriormente veremos que cuando la finura alcanza a 2000 cm^2/gr., la superficie del material a molturar es:

$$54.000 \times 2.000 = 108 \times 10^6 \ cm^2$$

y si d es el diámetro de las bolas, su peso viene dado por:

$$\frac{3,14 \ d^3}{6} \times 7,7 \times N = 415,000 \ gr.$$

puesto que las bolas contenidas en el molino pesan 415 Kg. En la fórmula anterior N es el número de bolas.

La superficie de las mismas es:

$$3,14 \ d^2 \times N \quad (\text{en } cm^2)$$

Pero esta superficie debe ser 1/100 a 1/500 de la superficie total del material a moler, de donde, tomando 1/300 como media, tenemos:

$$1/300 \times 108 \times 10^6 \times d/6 \times 7{,}7 = 415.000$$

o sea:

$$d = \frac{415.000 \times 300 \times 6}{108 \times 10^6 \times 7{,}7} = 1 \text{ cm.}$$

En resumen, el refino del material deberá hacerse, en este caso, con bolas de 1 cm. de diámetro.

* * *