

4.2 Molienda fina, conjunta o subsecuente al secado

ALBERTO VIRELLA BLODA

Químico. Companhia Portuguesa de Cimentos Brancos

el criterio de finura tiene, para

de finura.

Este criterio será, forzosamente, relativo y circunscrito a la industria del cemento. Un material

65

que los cementeros juzgamos fino, o hasta muy fino, es posible que sea burdo y grosero para los especialistas de otras industrias, como, por ejemplo, la de los pigmentos colorantes.

Podemos, pues, entender por *molienda fina* aquella que proporciona un polvo compuesto por partículas cuyo tamaño haga posible su correcta e inmediata aplicación al fin que se destina. La industria del cemento suele trabajar, por lo menos, con tres clases de polvos finos: carbón, crudo y cemento. Para cada uno de estos materiales se tendrá que aplicar un criterio de finura diferente. Para conseguir una buena combustión no es necesario una molienda excesivamente fina del carbón pulverizado. Más finura se exige al crudo para que tenga una buena aptitud para la cocción. Y todavía debemos dar una mayor finura al cemento si se quiere que éste desarrolle altas resistencias en breves plazos.

Relacionamos la finura con el tamaño de las partículas del polvo considerado, pero, industrialmente, operamos siempre con sistemas polidispersos comprendiendo una muy extensa gama de tamaños. La distribución de las partículas por pesos y tamaños es tema de permanente discusión y sospechamos que lo seguirá siendo por mucho tiempo todavía. No queremos enveredarnos por los espinosos caminos donde ya nos arañamos en más de una ocasión. Diremos, apenas, que la distribución propuesta por Rosin, Rammner y Sperling nos agradó más por comodidad que por convicción, ya que si algo se ha probado, es que los polvos industriales no se ajustan totalmente a dicha distribución y que del conocimiento de sus parámetros principales no se sabe cómo llegar a un cálculo de la superficie específica que tenga una correlación significativa con la proporcionada por los métodos del turbidímetro o del permeabilímetro. La imprecisión del método integral reside en el desconocimiento de los límites reales de la distribución granulométrica, especialmente del límite inferior.

La finura de un sólido pulverulento se podría definir con bastante corrección por una medida de posición y otra de dispersión, supuesta conocida la distribución por pesos y tamaños. Aceptando la fórmula—no ley—exponencial de los autores antes citados se tiene:

$$R = 100e^{-\left(\frac{x}{d'}\right)^n}$$

R = Residuo sobre un tamiz de abertura x .

e = Base de los logaritmos naturales (2,71828).

x = Tamaño mínimo de partícula, en micras, para el residuo R .

d' = Constante de posición, o grado de finura.

n = Constante de dispersión.

Si representamos en un sistema de coordenadas donde las ordenadas correspondan a la derivada

$$y = \frac{\Delta R}{\Delta \log d}$$

y las abscisas a los tamaños de partícula en escala logarítmica ($\log d$), comprobaremos que la constante de posición corresponde, precisamente, a la ordenada máxima; $x = d'$; se tiene un residuo $R' = 100/e = 36,8$ por 100 (fig. 16).

Otros importantes residuos son los correspondientes a los tamaños de 200 y 90 micras y a los pesos de 20, 50, 80 y 90 por 100.

Por último, la superficie específica nos puede proporcionar un tamaño de partícula medio:

$$d_m = \frac{6 \times 10^4}{\sigma S_e}$$

donde S_e es la superficie específica, y σ , la masa volúmica o densidad media del sistema considerado.

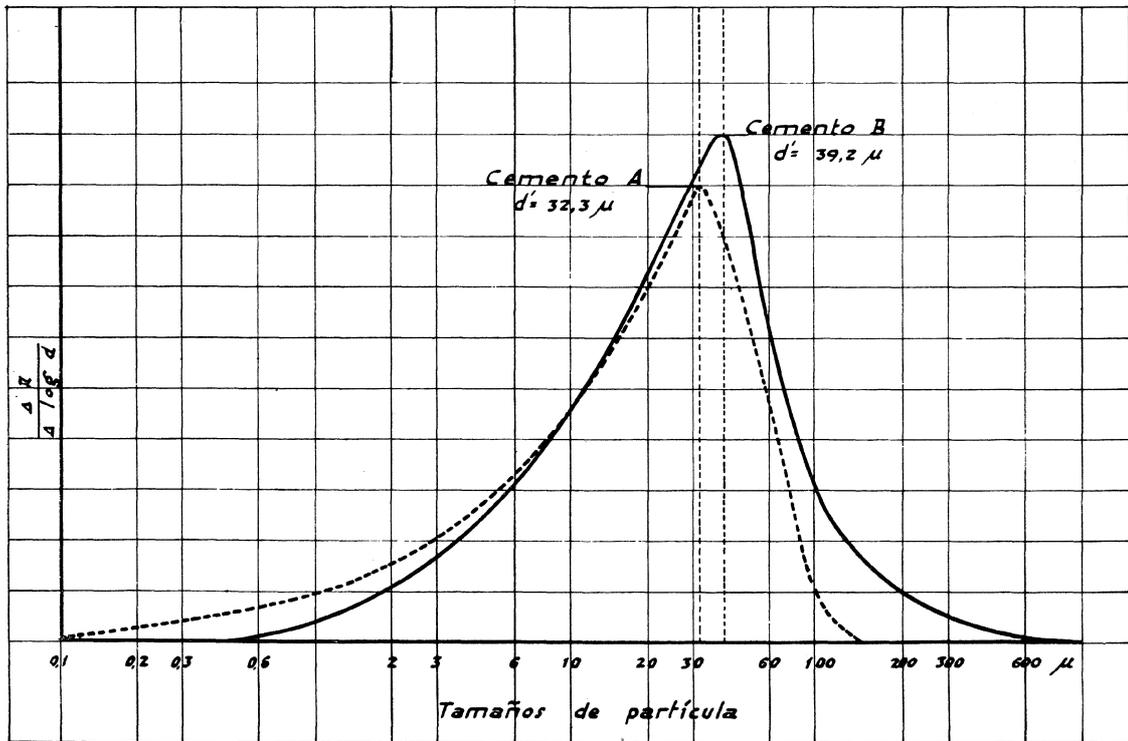


Fig. 16.

Esto nos dice que, para cuerpos con diferentes densidades, podemos obtener superficies específicas idénticas con tamaños de partícula medios bastante desiguales:

Clínker	$\sigma = 3,1$	$S_e = 3.400 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$	$d_m = 5,7 \mu$
Crudo	$\sigma = 2,7$	$S_e = 3.400 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$	$d_m = 6,5 \mu$
Antracita	$\sigma = 1,8$	$S_e = 3.400 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$	$d_m = 9,8 \mu$
Hulla	$\sigma = 1,4$	$S_e = 3.400 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$	$d_m = 12,7 \mu$

lo cual nos proporciona una demostración del porqué de la variedad de criterios de finura según la naturaleza de los materiales.

Para un cemento portland normal, con masa volúmica igual a 3,1 se obtiene una distribución tal como:

Tamaños de partícula	Residuos
200 μ	0,6 %
90 μ	10 %
63 μ	20 %
39 μ	36,8 %
27 μ	50 %
8,7 μ	80 %
4,7 μ	90 %
Superficie específica Blaine	3.400 cm^2/g

Esta misma distribución, para materiales con otras densidades, nos proporcionaría las siguientes superficies específicas:

Cemento	$\sigma = 3,1$	$S_e = 3.400 \text{ cm}^2/\text{g}$	$d_m = 5,7$
Crudo	$\sigma = 2,7$	$S_e = 3.900 \text{ cm}^2/\text{g}$	$d_m = 5,7$
Antracita	$\sigma = 1,8$	$S_e = 5.800 \text{ cm}^2/\text{g}$	$d_m = 5,7$
Hulla	$\sigma = 1,4$	$S_e = 7.500 \text{ cm}^2/\text{g}$	$d_m = 5,7$

Diremos que a dicho diámetro medio corresponde un 10 por 100 de residuo sobre un tamiz de 90 micras de abertura de malla, el clásico tamiz de 4.900 mallas/cm². Como quiera que

no se puede considerar fino un material que deje residuos superiores al 10 por 100, un criterio de finura convencional y aceptable sería el basado en la distribución límite expuesta.

2. Circuitos de molienda fina

La molienda fina, en las fábricas de cemento, se realiza casi universalmente en los molinos tubulares de bolas, y a éstos nos vamos a referir, no por preferencias exclusivistas, sino más bien por tácita aceptación de un parecer casi unánime.

La molienda fina se puede realizar con materiales de muy variable contenido de humedad, del cual mucho depende la aptitud para la molienda. Casi siempre se hace pasar por el interior del molino una corriente de aire, cuyo objetivo principal es evitar la acumulación de vapor de agua en las cámaras de molienda. Esta corriente de aire puede ser bastante intensa para arrastrar consigo la totalidad de las partículas finas originadas durante la operación, de donde se origina el sistema de molienda por arrastre en corriente gaseosa. En otras ocasiones la corriente es menos intensa y la mayor parte de las partículas finas descarga por gravedad, más o menos empujada por los anexos del interior del molino.

Cuando el aire circulante se calienta previamente, o bien se utilizan gases calientes en vez de aire, se tiene la molienda fina combinada con el secado.

El material saliente del molino puede o no pasar por un seleccionador de partículas. Cuando los gruesos del seleccionador son devueltos a la entrada del molino, cerramos el circuito de molienda. En general, también suelen ser devueltos al circuito parte de los gases que atravesaron el molino.

En el circuito abierto no regresan a la entrada ni gases ni partículas sólidas. Los gases se llevan a un despolvoreador, y el polvo captado se suma a la descarga del molino. Es el circuito abierto genuino.

El circuito abierto no se puede aplicar a materiales con un porcentaje de humedad superior a 0,5-1 por 100. Es característico de los materiales secos, salvo, claro está, el caso de molienda por vía húmeda. En todo caso no hay ventajas en combinar la molienda fina y el secado en un circuito abierto.

3. Molienda en circuito cerrado

El circuito cerrado fue introducido en 1888 por los hermanos Pfeiffer para la molienda primaria. Se aplicó a la molienda fina, en 1909, por la casa Miag, con el molino «Ergo», y hacia 1920 se desarrolló la molienda combinada con el secado, introduciendo gases calientes en el circuito, a temperaturas que pueden alcanzar 600° C a la entrada del molino.

El secado combinado con la molienda fina fue la justificación y el triunfo del circuito cerrado, el cual muy pronto alcanzó general preferencia en la preparación de crudos por vía seca.

Hubo que tener en cuenta, sin embargo, que la capacidad de molienda es generalmente superior a la capacidad de secado, por lo que, cuando las materias primas se presentaban bastante húmedas, no era posible prescindir totalmente de un secado preliminar, a no ser que se sacrificara drásticamente el rendimiento del molino.

Porque, es bien sabido, la producción de un molino-secador disminuye cuando aumenta la cantidad de agua a evaporar, según Bornschein, en una proporción definida por:

$$P = P_n - 140(H - H_n) \text{ kg/hr}$$

donde:

P = Rendimiento de la molienda, en kg/hr.

P_n = Rendimiento normal de la molienda, en kg/hr.

H = Agua evaporada, por 100.

H_n = Agua normalmente evaporada, por 100.

Los gases que atraviesan el molino, a la vez que ceden su calor, arrastran el vapor de agua producido, debiendo pasar en cantidad suficiente para que se consiga una concentración sin peligro de condensaciones. Según Labahn, se pueden admitir hasta 80 g de vapor de agua por m³ de gases a la temperatura de 80° C. De acuerdo con estos datos, podemos establecer:

Producción pretendida para un molino secador: 20 t/hr.

Humedad inicial: 10 por 100.

Agua a evaporar: 2.000 kg/hr.

Cantidad mínima de gases (a 80° C): $2.000.000/80 = 25.000$ m³/hr.

Volumen normal de gases (a 0° C y 760 mm): 19.337,5 m³/hr.

Masa mínima de gases: 25.000 kg/hr.

Calor específico a presión constante: 0,24 kcal/kg °C.

Calor de los gases: $0,24 \times 25.000 = 6.000$ kcal/°C.

Consumo de calor en el secado: $2.000 \times 1.200 = 2.400.000$ kcal.

Gradiente de temperatura: $2.400.000/6.000 = 400$ ° C.

Temperatura mínima de los gases a la entrada: $80 + 400 = 480$ ° C.

Volumen de los gases a 480° C: 53.300 m³/hr.

Gases por tonelada de crudo:

Peso: $25.000/20 = 1.250$ kg/t.

Volumen: $53.300/20 = 2.665$ m³/t.

3.1. Molinos con arrastre por corriente gaseosa

La molienda en circuito cerrado por arrastre en corriente gaseosa, o barrido por gases fue realizada por Humboldt, en escala industrial, hacia 1923, siendo posteriormente adoptada por casi todas las casas que suministran equipo mecánico para la industria del cemento. La figura 17 esquematiza un circuito típico de arrastre por corriente gaseosa. Los gases calientes proceden de un hogar, *H*, o de un horno de cemento. Entran en un molino tubular que suele tener dos cámaras: una de secado, sin cuerpos molidores, y otra de molienda, con cuerpos molidores. De ahí, por un conducto ascendente, van los gases, con las partículas cuyo tamaño les permite ser arrastradas, a un separador estático, *Sp*, el cual devuelve las partículas gruesas a la entrada del molino por un transportador de rosca sin fin, *R*. Los finos van a un separador ciclónico, *Z*, y a un potente ventilador, *V*, que asegura la circulación, pasando o no, luego, a un filtro de mangas o eléctrico para depurar mejor los gases salientes.

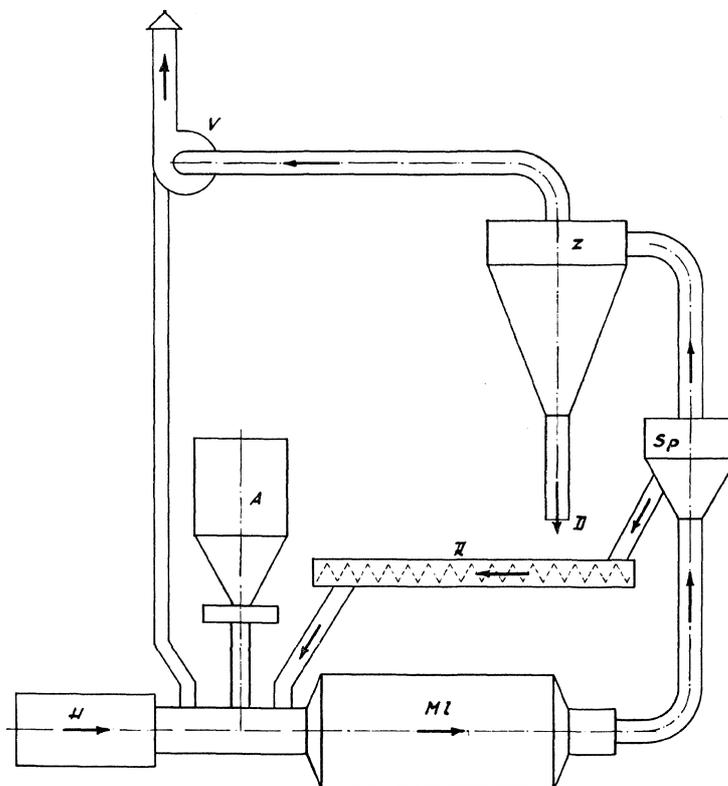


Fig. 17.

Los molinos con barrido por gases calientes pueden recibir materiales con 10-15 por 100 de humedad inicial, reduciéndola a 0,5 por 100. El consumo de calor es bastante elevado, de 1.100 a 1.200 kcal/kg de agua evaporada. El exhaustor principal tiene, aproximadamente, 1/3 de la potencia del molino y el ventilador del filtro 1/10 a 1/12 de dicha potencia, de modo que, al consumo específico de la molienda, 20 a 23 kWhr/t, hay que sumar un 40 por 100 adicional debido a los exhaustores y equipo auxiliar.

Este sistema de molienda se aplica, generalmente, a la molienda de carbón, pero también se puede aplicar a la molienda de crudo. Humboldt presenta un molino corto, de una sola cámara, cuyas dimensiones van de 0,8 a 3,0 m de diámetro a 1-6 m de longitud. La máxima capacidad de producción es de 36 t/hr. La humedad inicial puede ser de 15 por 100 en la hulla y 22 por 100 en el crudo, con un consumo específico de 18 kWhr/tonelada.

El molino «Tirax», de F. L. Smidth, comprende cámara de secado y cámara de molienda (lo mismo sucede con los molinos ventilados de Polysius, Rema, Krupp y otros). Su rendimiento disminuye, como es lógico, con la humedad inicial; así, se tiene:

4 por 100 de humedad inicial: 19 t/hr.

8 por 100 de humedad inicial: 15 t/hr.

Usando gases procedentes de un horno rotativo puede reducir la humedad de 5 a 1 por 100, con un consumo específico de 16 kWhr/tonelada.

Polysius presenta un circuito esquematizado en la figura 18, con retorno de gases a la entrada del molino y una fuerte aspiración que hace funcionar al molino bajo un régimen de depresión,

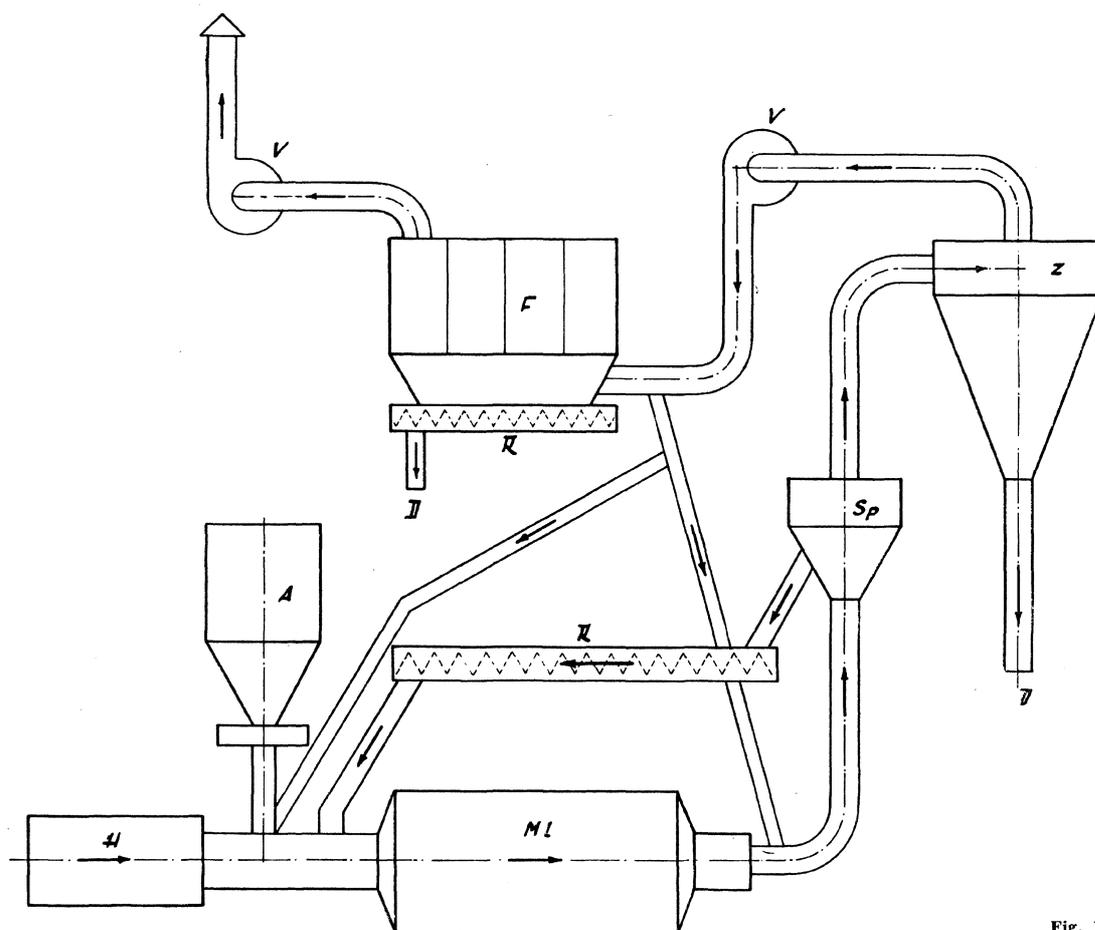


Fig. 18.

que se extiende a todo el circuito evitando pérdidas de polvo. Para una producción de 36 t/hr, con 8 por 100 de humedad inicial, se recomienda un molino de $3 \times 5,25$ m, con un motor de 560 kW y dos ventiladores de 235 y 40 kW, respectivamente, que, con otros anexos, equivale al 50 por 100 del motor principal.

Krupp, en su molino «Universal», admite materiales con humedad máxima de 15 por 100. La producción máxima llega a 60 t/hr de materia cruda. Sus características difieren poco de las anteriormente descritas, salvo detalles constructivos, siempre interesantes a la hora de las decisiones.

El talón de Aquiles de los molinos ventilados reside en el exhaustor principal. Dijimos, al tratar del secado, que la máxima capacidad de transporte de los gases es de 1 kg de sólidos por 1 kg de gases. Como sea que en el circuito cerrado hay que contar con una carga circulante de dos a tres veces superior a la producción, consecuentemente la cantidad de gases debe aumentar en dicha proporción. Así, un molino con una producción de 20 t/hr debe contar con 50.000 ó 60.000 kg de gases, 36.000 a 43.000 m³N, es decir, de 44.000 a 56.000 m³/hr de gases a 80° C. Por consiguiente, es necesario un exhaustor de elevada potencia, aumentando bastante el consumo específico de energía.

3.2. Molinos con elevador y separador centrífugo

Como ya dijimos en otro lugar, el molino en circuito cerrado de los hermanos Pfeiffer, de 1888, cerraba el circuito por medio de un elevador de cangilones (noria) y un separador centrífugo. Los gránulos de mayor tamaño son devueltos al molino y los finos descargados.

Este circuito, aplicado inicialmente a la molienda de materiales secos (aún hoy día lo empleamos cada vez más a la molienda del cemento, desde luego con molinos de mayor potencia y mejor capacidad de afinación), en la década de 1920 a 1930 entró en competencia con los molinos ventilados, siendo presentado, inicialmente, por Polysius, a la cual siguieron la mayoría de las casas constructoras de equipos industriales.

La cantidad de gases en circulación es mucho menor que en los molinos ventilados, aproximadamente 1/3, ya que su función se limita a secar y arrastrar al vapor de agua, pero no a los sólidos, que descargan por gravedad y son llevados al separador por medio del antes citado elevador. El separador debe ser, en este caso, impulsado por un móvil que supla la falta de una rápida corriente de gases. El separador centrífugo—ya descrito al tratar del secado—también posee un potente motor, pero su potencia equivale, a igualdad de producción, a 1/3 de la del exhaustor de los molinos ventilados. La capacidad de secado parece ser más limitada. Si utilizamos los gases procedentes de un permutador de calor por suspensión, no debemos alimentar con más de 4,5 por 100 de humedad inicial, y si sólo disponemos de los gases de un enfriador de clínker de parrilla inclinada o rotatoria no podemos pasar de 3,5 por 100 de humedad en la alimentación.

En los circuitos de molienda cerrados con un separador centrífugo tiene éste una importancia primordial. Fue descrito en sus generalidades en la ponencia relativa al secado y molienda preliminar (fig. 9).

Al igual que ha sucedido con los molinos, se ha manifestado una tendencia pronunciada hacia tamaños y potencias cada día mayores. Se construyen separadores con 6 m de diámetro, equipados con motores de 300 ó más kW, capaces de producir de 80 a 100 t de productos seleccionados.

Los separadores centrífugos regulan fácilmente la finura del producto y con ésta varía su capacidad de producción. Conviene que, una vez regulados, funcionen con la carga normal, visto que el rendimiento y las condiciones de trabajo sufren una gran quiebra, tanto en casos de sobrecarga como por falta de alimentación. Hay que observar aquí que, cuando se utilizan grandes elevadores, la alimentación se efectúa con intermitencias, según la descarga de los cangilones. La solución adecuada suele aportarla los elevadores de gran velocidad o, en su defecto, un transportador-distribuidor intercalado entre el elevador y el separador.

Antiguo es el problema de la posible segregación causada por los separadores centrífugos cuando operan con materiales de densidades diferentes. Si bien ya en 1926 Meade demostró que no había por qué recelar semejante peligro, el hecho es que tras él se escudan numerosos partidarios del circuito abierto. La segregación puede, de hecho, producirse por poco tiempo, durante la puesta en marcha del circuito; pero pasados pocos minutos, es evidente que la composición final corresponde a la composición inicial, pese a cualquier diferencia en las densidades, aptitud para la molienda o tamaños de partícula. Sin embargo, es evidente que la descarga del separador centrífugo no presenta la misma composición que la descarga de los filtros. El producto final reúne ambas descargas y puede que la divergencia entre ambas exija—como lo exigen diferencias mayores de otro orden—una buena homogeneización cuando se trata de crudos para la alimentación de hornos rotativos.

3.2.1. Características de los separadores centrífugos

Si bien cada casa constructora de separadores presenta a éstos con características propias, procuraremos establecer unas condiciones medias que sirvan de orientación para este tipo de circuitos de molienda.

La velocidad del rotor aumenta con el diámetro del separador. La velocidad tangencial, para un separador de diámetro D , es del orden:

$$v = 5D + 30 \text{ (m/s)}$$

y, por consiguiente, la velocidad de rotación será:

$$n = \frac{60 v}{\pi D} \text{ (r.p.m.)}$$

resultando:

Diámetro del separador	Velocidad tangencial	Velocidad de rotación
2,0 m	40 m/s	382 r.p.m.
4,0 m	50 m/s	239 r.p.m.
6,0 m	60 m/s	191 r.p.m.

También la potencia del motor aumenta en función del diámetro del separador:

$$W = kx^D$$

$$\log W = D \log x + \log k$$

$$\log W = 0,34D + 0,44$$

resultando:

Diámetro del separador	Potencia del motor
2,0 m	13 kW
4,0 m	65 kW
6,0 m	300 kW

Podemos suponer, en principio, que la producción horaria de finos está en razón directa de la potencia instalada; esto nos lleva a admitir un consumo específico constante para cualquier tamaño de separador, lo cual, evidentemente, es una extrapolación que no se puede demostrar. Un consumo, quizá elevado, puesto que la literatura de algunos constructores que hemos consultado proclama, a veces, valores inferiores, admitiremos que sea:

$$3,5 \text{ kWhr/t}$$

lo que nos da:

Diámetro del separador	Producción de finos
2,0 m	3,6 t/hr
4,0 m	18 t/hr
6,0 m	84 t/hr

Inversamente, el caso más frecuente será el proyecto de un molino con separador para una determinada producción horaria de finos. De un trabajo recientemente publicado, para un molino de crudo, extractamos:

$$P = 2,4D^{2,6}$$

$$W = 58D^{2,4}$$

Producción de finos	Diámetro	Potencia del motor
20 t/hr	2,26 m	413 kW
40 t/hr	2,95 m	783 kW
60 t/hr	3,45 m	1.140 kW

Para el separador centrífugo se pueden aplicar las ecuaciones:

$$D = \frac{\log W}{0,34} - \frac{0,44}{0,34}$$

$$D = 2,94 \log W - 1,294$$

$$W = 3,5 P$$

Producción de finos	Diámetro del separador	Potencia del separador
20 t/hr	4,15 m	71 kW
40 t/hr	5,04 m	143 kW
60 t/hr	5,56 m	214 kW

Como se puede ver, el diámetro del separador es, siempre, mucho mayor que el diámetro del molino respectivo, pero la potencia del motor del separador es inferior a la del motor del molino. Sumando ambas potencias se tendrá:

Producción de finos	POTENCIAS			
	Molino	Separador	Total	Por tonelada
20 t/hr	413 kW	71 kW	484 kW	24,2 kWhr/t
40 t/hr	783 kW	143 kW	926 kW	23,1 kWhr/t
60 t/hr	1.140 kW	214 kW	1.354 kW	22,5 kWhr/t

Lo que nos dice que, en todo caso, es ventajoso instalar unidades de gran capacidad de molienda en circuito cerrado (fig. 19).

3.2.2. Carga circulante en el circuito cerrado

Supongamos un separador centrífugo en el cual entran F t/hr de materiales no seleccionados. Después de la separación se tienen una producción de materiales finos de P t/hr y un rechazo de R t/hr, que es devuelto al molino. Por definición, se tendrá:

$$F = P + R \text{ (t/hr)}$$

Llámase carga circulante a la relación:

$$Q = \frac{R}{P}$$

O sea:

$$R = P Q$$

$$F = P (1 + Q)$$

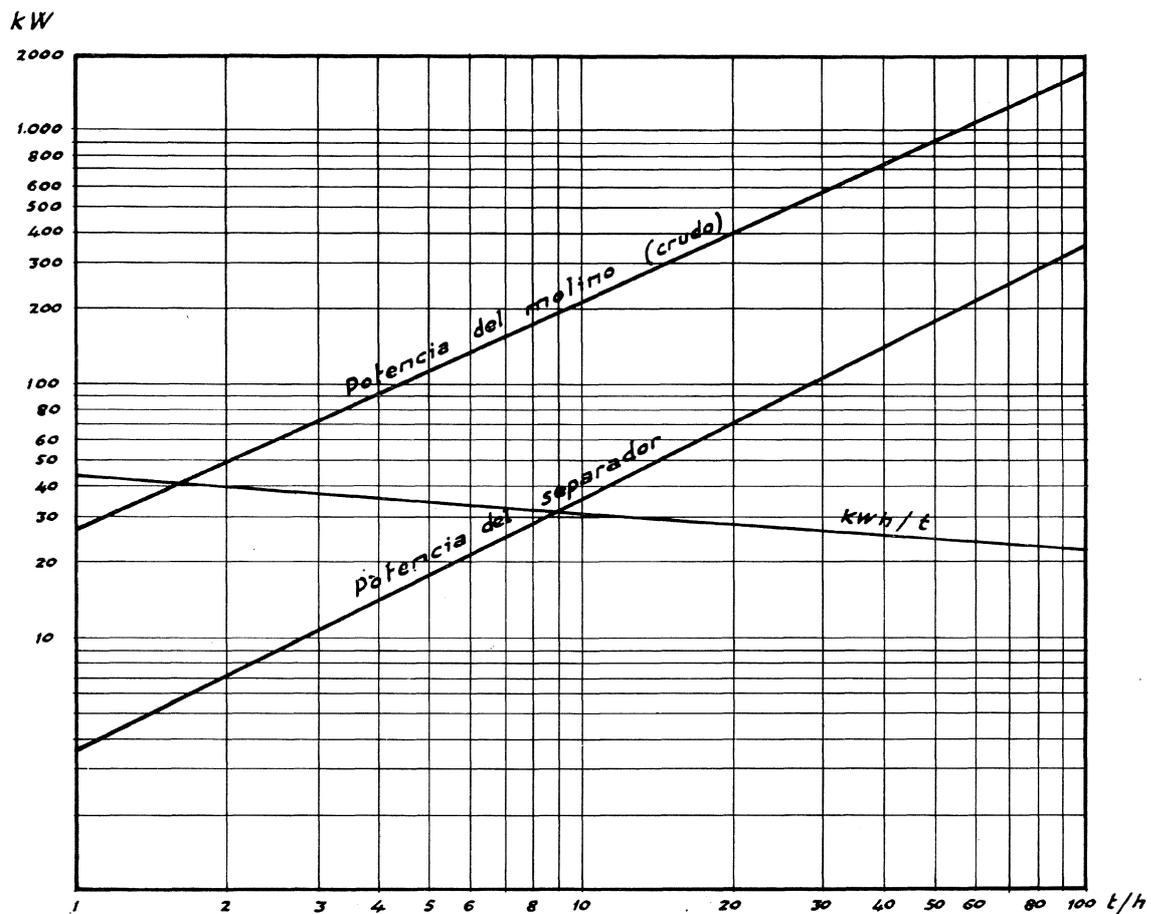


Fig. 19.

Comúnmente podemos determinar por simple pesada el valor de la producción de materiales finos, P .

Las determinaciones de la alimentación, F , y de la carga circulante, Q , se pueden determinar indirectamente desde que sepamos las finuras de los materiales considerados.

$A = \%$ de finos en la alimentación, F , del separador.

$B = \%$ de finos en el rechazo del separador, R .

$C = \%$ de finos en la producción de material acabado, P .

De aquí:

$$\% Q = 100 \frac{C - A}{A - B}$$

Y asimismo:

$$F = P \frac{C - B}{A - B} \text{ (t/hr).}$$

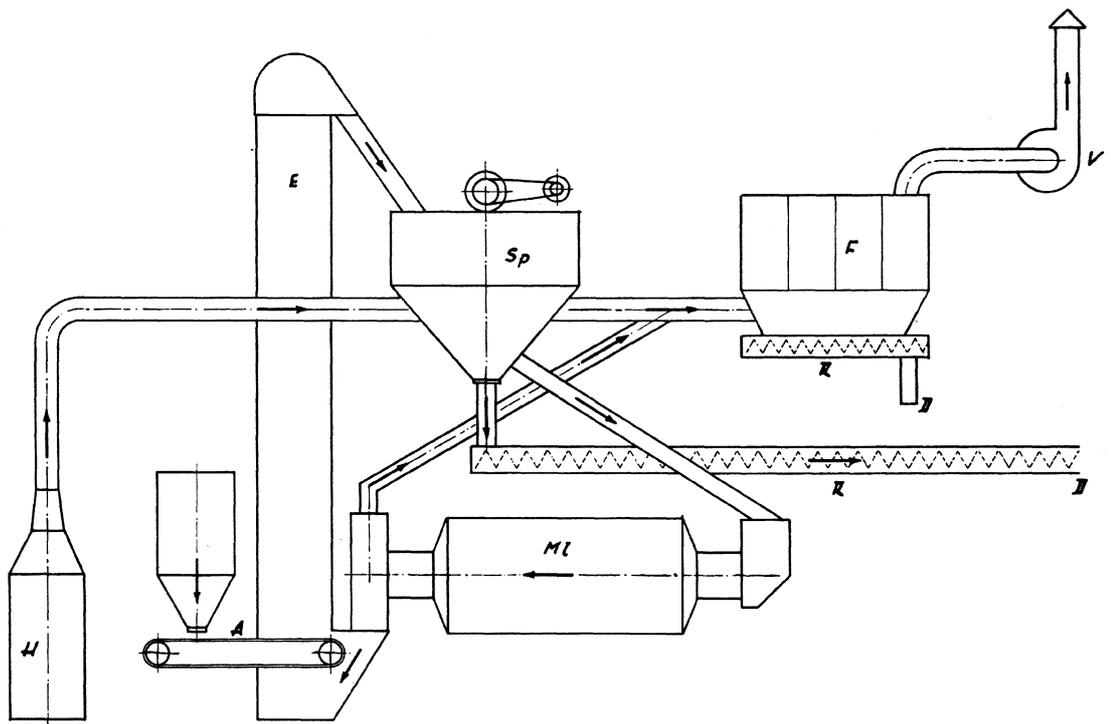


Fig. 20.

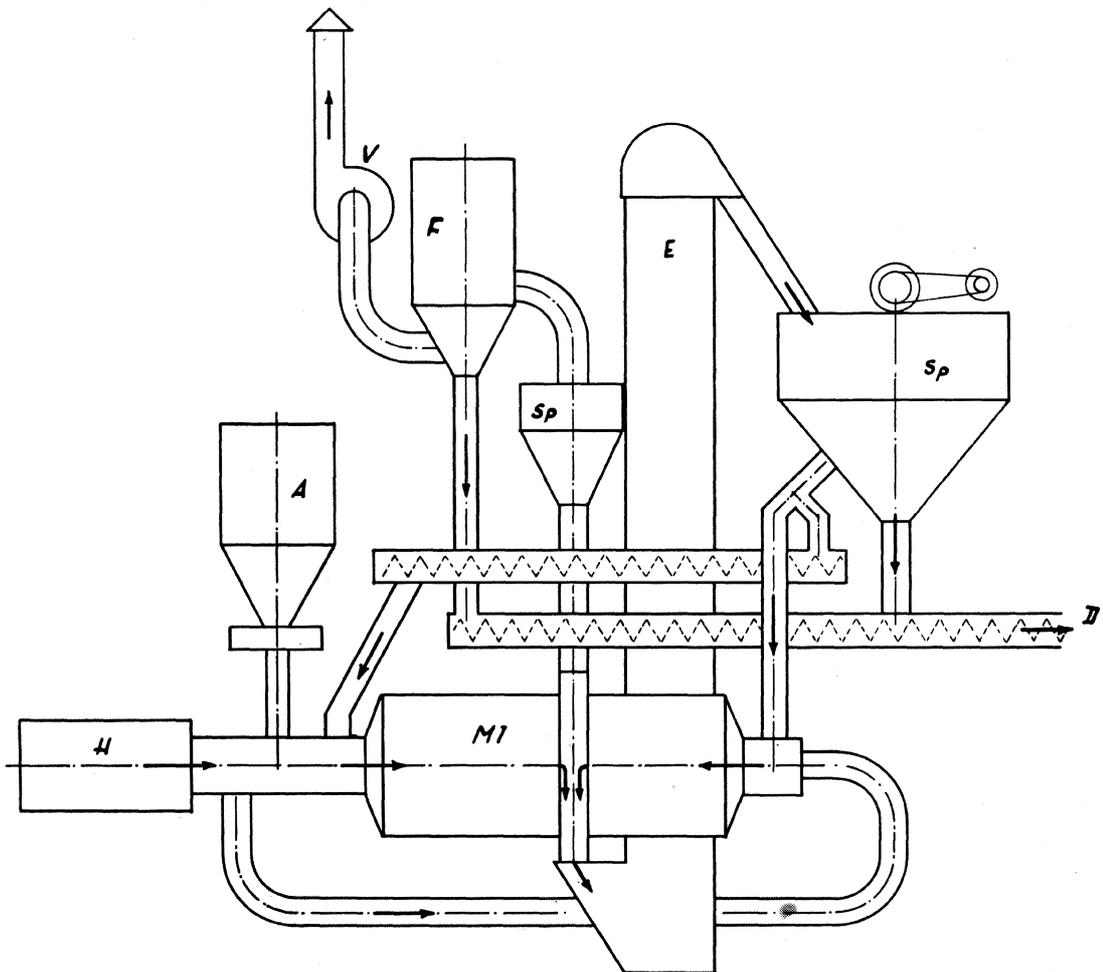


Fig. 21.

Característica de los separadores centrífugos es que la selección dista mucho de ser cuantitativa. Quiere esto decir que el material acabado contiene una pequeña proporción de materiales gruesos y el rechazo contiene, asimismo, una cierta cantidad de materiales finos. De aquí nace la idea de la eficacia de un separador, definidora del grado de separación que con él se obtiene:

$$\% E = 100 \frac{C(A - B)}{A(C - B)}$$

Para mejor comprensión vamos a dar un ejemplo práctico:

	Residuos en 90 micras	Finos
Alimentación	28,5 %	A = 71,5 %
Rechazo	65,2 %	B = 34,8 %
Material acabado	10,55 %	C = 89,45 %
Carga circulante: $Q = 100 \frac{89,45 - 71,5}{71,5 - 34,8} =$		49 %
Producción		21,120 kg/hr
Masa de la carga circulante: $0,49 \times 21,120 =$		10,350 kg/hr
Alimentación del separador		31,470 kg/hr
Eficacia: $E = 100 \frac{89,45 (71,5 - 34,8)}{71,5 (89,45 - 34,8)} =$		84 %

El grado de eficacia de los separadores centrífugos raramente pasa de 90 por 100. La carga circulante, en cambio, puede ser mucho mayor de la que resulta del ejemplo antecedente, alcanzando hasta 300 por 100, o más, en relación a la producción de material acabado.

3.2.3. Molienda y secado simultáneos por entrada de aire caliente en el separador de finos

Ya dijimos, al tratar del secado autónomo, que era posible utilizar los separadores centrífugos para el secado de materiales combinado con la selección por tamaños de partícula. Esta realización, en circuitos de molienda, parece ser debida a Allis Chalmers, que la introdujo hacia 1929. Hoy día la utilizan algunos otros constructores. El montaje básico se expone en la figura 20.

Característica de este circuito es que la alimentación, *A*, no se lleva directamente al molino, sino al elevador, *E*, que la conduce al separador, mezclada con los materiales procedentes del molino *Ml*. Esto obliga a no entrar con materiales muy gruesos, a lo sumo con los mayores fragmentos con una dimensión de 15 mm, lo que presupone una molienda preliminar. Esta alimentación suele contener ya una cierta proporción de finos, los cuales, al pasar por el separador, *Sp*, son eliminados del circuito en su mayor parte, pasando a la descarga por la rosca sin fin, *R*.

El separador recibe aire caliente de un hogar, *H*, y lo expelle a un filtro para su despolvoreamiento. La temperatura del aire caliente puede estar comprendida entre 150 y 400° C, según el origen de los gases calientes. Para Klovers, la entrada ideal de los gases calientes es el separador centrífugo, porque allí las partículas se dispersan totalmente a la velocidad del aire circulante, creándose unas condiciones ideales para la transmisión de calor.

La misma disposición de entrada de gases en el separador centrífugo se puede usar en la molienda de clínker, introduciendo gases fríos, para el enfriamiento rápido del cemento.

3.3. Circuitos de molienda dobles

Están cada día más en boga los circuitos complejos de molienda. Como caso típico en la figura 21 esquematizamos el doble rotator de Polysius para la molienda y secado del crudo. El molino está dividido en dos partes, separadas entre sí por un espacio vacío limitado por dos paredes perforadas, formando la cámara de descarga.

En nuestro esquema los gases del hogar, *H*, pasan directamente a la cámara de secado, seguida de la cámara de molienda primaria. A la derecha aparece la cámara de molienda fina. El paso de una a otra parte del molino doble se efectúa a través de la cámara de descarga. Esta comunica con el elevador, *E*, y con el separador estático, *Sp*, el cual está ligado a un filtro y a un exhaustor, *V*. Las partes finas son retenidas en el filtro y descargadas en *D*. Las fracciones más gruesas y pesadas van por el elevador, *E*, al separador centrífugo, *Sp*, pasando los finos a la descarga, *D*, y los gruesos a la cámara de molienda fina, o a la de secado y molienda primaria, según los casos.

Este circuito de molienda puede recibir materiales con humedad hasta 10 por 100 y permite producciones hasta 75 t/hr, con un consumo de energía relativamente bajo. Funciona el conjunto en depresión, por lo que no hay que temer pérdidas de polvo.

El mismo sistema del doble rotator se aplica a la molienda del cemento, con la diferencia de que, en vez de aire caliente, entra una corriente de aire frío por cada uno de los muñones huecos del molino. Este aire contribuye al enfriamiento del cemento producido y, como se sabe, una ligera humectación beneficia en vez de perjudicar a la molienda. El rotator de cemento permite varios esquemas de funcionamiento. El funcionamiento normal consiste en efectuar la molienda preliminar en circuito abierto y la molienda fina en circuito cerrado, descargando el retorno del separador a la entrada de la cámara de molienda fina. Para obtener cementos de mayor finura, ambas secciones funcionan en circuito cerrado, siendo necesarios dos separadores centrífugos. Los finos de la molienda preliminar se reúnen a los gruesos de la molienda fina y constituyen la alimentación de la última cámara. El producto acabado consiste, principalmente, en los finos del segundo separador, a los cuales se unen los captados en el filtro. La cámara de descarga está, desde luego, dividida en dos partes, para no mezclar los productos de la molienda primaria y secundaria.

Los circuitos dobles tienen como característica común la descarga central, y como finalidad unir en un solo cuerpo los circuitos de molienda primaria y secundaria. Se conocen variadas combinaciones de circuitos dobles y no siempre son ambos cerrados. Puede uno de ellos ser abierto y otro cerrado. En general, el circuito de molienda primaria suele ser cerrado. Cuando no incluye el secado combinado, el separador centrífugo se sustituye con ventaja por un simple tamiz vibratorio que envía los residuos a la entrada de la primera cámara.

La aplicación de los circuitos dobles es casi exclusiva para los crudos y es ventajosa cuando incluye un secado conjunto. Este no tan sólo se puede realizar, como en el doble rotator por entrada de aire caliente en las cámaras del molino, sino también dando acceso del aire caliente al separador centrífugo. Tal es el caso de un modelo propuesto por Gebreuder-Hischmann, en el que la alimentación se efectúa por medio de un separador con circulación de aire caliente, el cual separa inmediatamente los finos y envía los gruesos, divididos en dos partes, a ambas entradas del molino con descarga central. La descarga es devuelta al elevador, pero un potente exhaustor aspira una cierta parte de finos y los envía al correspondiente filtro.

4. Molienda en circuito abierto

Tal vez sea sorprendente que hayamos dejado para último lugar el sistema de molienda más simple y que, a primera vista, parece ser el más primitivo. No es así, ya que, como dijimos antes, Pfeiffer introdujo el circuito cerrado en 1888 y el molino tubular «Dana», de circuito abierto, no apareció hasta 1894, tardando hasta 1908 la aparición de los molinos tubulares compuestos.

Pero dejando de lado el problema de la prioridad, que no resuelve nada, tendremos que convenir en que, cuando se trata de moler materiales secos, el circuito abierto proporciona la instalación más barata en su primer establecimiento, más simple en su funcionamiento y, en ciertos casos, puede que no sea la más cara de explotación.

La molienda en circuito abierto se efectúa, en general, en molinos tubulares compuestos, con tres o más cámaras, cada una cargada con cuerpos molidores de tamaños decrecientes. Para un

mismo diámetro la longitud media de un molino en circuito abierto es mayor que para un molino en circuito cerrado, de acuerdo con las ecuaciones:

$$L_{c.a.} = 7 D^{0.6}$$

$$L_{c.c.} = 5 D^{0.6}$$

lo que da:

LONGITUD		
Diámetro	Circuito abierto	Circuito cerrado
1 m	7,0 m	5,0 m
2 m	10,6 m	7,3 m
3 m	13,5 m	9,7 m
4 m	16,0 m	12,0 m

Del mismo modo, la potencia motriz resulta inferior para un molino de cemento en circuito cerrado, o sea:

$$W_{c.a.} = 92 D^{2.4}$$

$$W_{c.c.} = 85 D^{2.4}$$

POTENCIA MOTRIZ		
Diámetro	Circuito abierto	Circuito cerrado
1 m	92 kW	85 kW
2 m	488 kW	438 kW
3 m	1.290 kW	1.190 kW
4 m	2.560 kW	2.370 kW

A pesar de todo, la instalación de un molino en circuito abierto suele ser la más económica, no sólo en el equipo mecánico, sino también en el eléctrico (menor número de motores y de arrancadores), y, asimismo, en la obra de construcción civil, menos elevada y menos sometida a cargas pesadas en los pisos superiores.

Las instalaciones en circuito abierto se aplican a la preparación de crudos por vía húmeda, molienda autónoma de crudo y molienda de clínker de cemento portland. En los dos últimos casos hay que contar con la acción de una cierta cantidad de aire circulante, que, en tiempos de Anselm, ya se fijaba de 0,8 a 1,0 m³/kg de aire de producto molido. Este aire es conducido a un filtro de mangas o eléctrico, y su circulación forzada mediante un exhaustor menos potente que para el circuito cerrado.

5. Comparación de los circuitos de molienda entre sí

Hace ya un cuarto de siglo que Bond decía que el único criterio válido de rendimiento en una operación de molienda era la economía de la producción, y puntualizaba que la mayor eficacia en la molienda consiste en la mayor creación de superficie a más bajo precio de coste.

Tan simple criterio no deja de ser objetable y nos hace volver sobre nuestros pasos, preguntándonos si la creación de superficie en el material molido es, por sí sola, índice seguro de la calidad del producto.

Creemos de la mayor importancia la distribución granulométrica. La superficie específica define, a lo sumo, un tamaño de partícula medio, pero nada dice sobre la distribución por pesos y tamaños. La mayor parte de los trabajos acerca del papel de los tamaños de partícula sobre las reacciones químicas que ulteriormente se desarrollan se refieren al cemento acabado, pero no faltan estudios sobre la influencia de la finura del crudo en la cocción.

Por lo que a las partículas del cemento se refiere, no parece que se haya llegado a conclusiones definitivas.

Para Wuhler las mejores resistencias mecánicas las proporcionan cementos con partículas comprendidas entre 0 y 30 micras, dando más de 650 kg/cm² a los 28 días por compresión y más de 100 kg/cm² por flexo-tracción en el mismo plazo. Los gránulos con más de 30 micras se hidratan con dificultad y los mayores de 50 micras no llegan a hidratarse.

Anselm creía que la resistencia de los cementos dependía de las partículas comprendidas entre 5 y 30 micras, importando poco los tamaños encima o debajo de estos límites.

Para Steinhertz no era necesaria una finura exagerada, ya que, con ella, no se mejoraban las propiedades aglomerantes de un cemento. Las partículas muy finas se hidrataban tan rápidamente que no influían en la resistencia del cemento fraguado. Como sea que para Anderegg y Hubbel el tamaño crítico estaba comprendido entre 2 y 3 micras, Steinhertz admitía que las partículas con menos de 2,5 micras no poseían propiedades hidráulicas efectivas.

Czernin consiguió eliminar las partículas ultrafinas del cemento mediante un separador de aire que extraía los gránulos con menos de 4 micras. Los cementos sin finos así obtenidos, necesitaban más agua para la pasta de consistencia normal, veían disminuida su velocidad de fraguado y sus resistencias iniciales. Tan sólo al año se conseguían resistencias mecánicas equiparables a las de los cementos con finos, lo que, en cierta medida, contrariaba las ideas en boga sobre el papel de las partículas finas.

Venuat determinó los plazos de hidratación de las partículas de clínker según sus tamaños:

Gránulos inferiores a 6,9 micras	proporcionan resistencias a 1 ó 2 días
Gránulos inferiores a 9,8 micras	proporcionan resistencias a 3 días
Gránulos inferiores a 24,4 micras	proporcionan resistencias a 7 días
Gránulos inferiores a 31,7 micras	proporcionan resistencias a 28 días
Gránulos inferiores a 50,0 micras	proporcionan resistencias a 182 días

llegando a la conclusión de que cada dimensión de gránulos proporciona resistencias a la compresión a una época determinada.

Nuestra experiencia personal nos hace estar de acuerdo con Venuat. Estamos convencidos—y no nos faltan pruebas de nuestra convicción—de que las propiedades mecánicas de un cemento no dependen apenas de su superficie específica, sino también de su distribución granulométrica. Entre dos cementos con igual superficie específica proporcionará mejores resistencias el que presente una mayor dispersión de tamaños de partícula.

Contra los malos augurios que se pronunciaron hace tiempo precaviéndonos de la molienda excesiva, está la tendencia universal y generalizada de cementos cada vez más finos. Pero, advertamos una vez más, creer que la finura consiste apenas en la determinación de un residuo sobre un tamiz de 4.900 mallas no es tan sólo un anacronismo, sino también una peligrosa ingenuidad.

La molienda en circuito abierto proporciona cementos con una amplísima gama de tamaños de partícula.

La molienda en circuito cerrado proporciona menos partículas finas y menos partículas gruesas. La densidad de distribución aumenta entre 10 y 30 micras. Boerner comprobó que al representar la superficie específica Blaine en función de la finura de molienda se observa una gran dispersión en los resultados, pero, considerando las curvas medias, a igualdad de superficie específica, la molienda en circuito cerrado presentaba residuos sobre el tamiz de 10.000 mallas, 2 por 100 menores que los materiales obtenidos por circuito abierto. Sin embargo, para dicho autor, las resistencias no aumentaban correlativamente. Para alcanzar iguales resistencias era necesario que un cemento obtenido por circuito abierto presentase una superficie adicional de 350 cm²/g Blaine que un cemento obtenido por circuito cerrado. Concluía dicho autor que el circuito abierto era recomendable y ventajoso para la molienda de materiales duros, homogéneos, y a finuras no muy superiores a los 3.000 cm²/g. El circuito cerrado conviene para la molienda de mezclas heterogéneas y a finuras superiores a los 4.000 cm²/g, según Blaine.

En otras palabras, para Beke, el circuito abierto conviene para la obtención de cementos portland normales. La molienda en circuito cerrado se impone para cementos de alta calidad.

6. Tendencias y resultados

Hace relativamente pocos años, si nos hubiesen preguntado cuáles eran nuestras preferencias acerca de los circuitos de molienda, habríamos contestado sin dudar un momento:

Molinos ventilados: Para la molienda de carbones.

Circuito cerrado con separador centrífugo: Molienda de crudo.

Circuito abierto: Para la molienda de cemento.

Hoy, el panorama mudó algo, y no precisamente a favor del molino en circuito abierto. Desde que, poco antes de morir, Anselm se mantenía firme en sus convicciones y se declaraba partidario del proceso de molienda en circuito abierto, no sabemos que nadie más haya sido capaz de tanta osadía. El circuito abierto ha tenido muy mala prensa y no hay necesidad de puntualizar el por qué esta tendencia evidente puede ser un tanto «tendenciosa».

Sería sano y confortable confrontar las opiniones sinceras y desinteresadas de los usuarios de los varios sistemas de molienda adquiridos a buen precio.

Por nuestra parte creemos que los molinos ventilados son muy apropiados para la molienda y secado de materiales ligeros, fáciles de arrastrar por una corriente de aire. He aquí unos resultados medios, representativos del tratamiento de 50.000 t de combustibles:

Carbón húmedo	1.000 kg				
Humedad a la entrada	11 %				
Humedad residual	0,6 %				
Contenido de agua a la entrada	110 kg				
Contenido de agua a la salida	5 kg				
Agua evaporada	105 kg/t				
Consumo de carbón	27 kg/t				
Poder calorífico inferior	5.300 kcal/kg				
Consumo de calor: $\frac{5.300 \times 27}{105} =$	1.362 kcal/kg de H ₂ O				
Residuos a 90 micras	<table> <tbody> <tr> <td>Carbón fino</td> <td>7,6 %</td> </tr> <tr> <td>Retorno</td> <td>56 %</td> </tr> </tbody> </table>	Carbón fino	7,6 %	Retorno	56 %
Carbón fino	7,6 %				
Retorno	56 %				
Consumo de energía	46 kWhr/t				

El consumo de energía se refiere a la totalidad de la instalación y no sólo al molino propiamente dicho.

La preferencia ya es dudosa cuando se trata de moler materiales secos. F. Kraus publicó los siguientes datos de la molienda de cemento en Gmunden:

Molienda de cemento en circuito cerrado		
	Barrido por aire	Separador centrífugo
Longitud del molino	5,7 m	6,1 m
Diámetro	2,8 m	2,8 m
Potencia del motor del molino	400 kW	450 kW
Exhaustor	130 kW	—
Separador centrífugo	—	45 kW
Ventilador del filtro	45 kW	43 kW
Potencia total	675 kW	598 kW

Molienda de cemento en circuito cerrado		
	Barrido por aire	Separador centrífugo
Producción	12 t/hr	19,7 t/hr
Superficie específica Blaine	2.650 cm ² /g	2.950 cm ² /g
Consumo de energía	48 kWhr/t	27,4 kWhr/t
Superficie creada	5.500 m ² /kWhr	10.400 m ² /kWhr
Resistencias a la compresión: 7 días	205 kg/cm ²	214 kg/cm ²

Si comparamos los resultados de la molienda de crudo en circuito cerrado con separador centrífugo y de la molienda del mismo crudo en circuito abierto, trabajando en paralelo, tenemos:

	Separador centrífugo	Circuito abierto
Residuos a 90 micras	12,3 %	17,1 %
Producción	19,8 t/hr	15,2 t/hr
Superficie específica Blaine	6.590 cm ² /g	5.500 cm ² /g
Consumo de energía	24,8 kWhr/t	26,0 kWhr/t
Superficie creada	26.570 m ² /kWhr	21.125 m ² /kWhr

Comte publicó algunos datos comparativos de la molienda de cemento en ambos circuitos:

	Separador centrífugo	Circuito abierto
Producción	10,1 t/hr	9,2 t/hr
Superficie específica Wagner	1.512 cm ² /g	1.433 cm ² /g
Superficie Blaine equivalente	3.402 cm ² /g	3.323 cm ² /g
Consumo de energía	53 kWhr/t	51 kWhr/t
Superficie creada	6.400 m ² /kWhr	6.500 m ² /kWhr
Resistencia a la tracción: 7 días	24,5 kg/cm ²	23,9 kg/cm ²

Los resultados son poco significativos para ser concluyentes. Parece ser que el dilema se mantiene en lo que a la molienda de cemento se refiere. De nuestra experiencia podemos decir que, moliendo el clínker en circuito abierto, obtenemos un cemento portland normal de excelentes propiedades, como se deduce de los siguientes resultados medios:

	Molienda de cemento en circuito abierto
Residuos a 90 micras	1,6 %
Superficie específica Blaine	3.720 cm ² /g
Consumo de energía	46,9 kWhr/t
Superficie creada	7.932 m ² /kWhr
Resistencia a la compresión, 7 días	330 kg/cm ²

Y los ejemplos podrían multiplicarse hasta la fatiga. Es posible que no llegásemos a cualquier conclusión, porque los datos tomados aquí y allí no son comparables ni coherentes, ya que se ignoran las condiciones especiales que concurren en cada caso. Sería necesario emprender ensayos de conjunto más precisos y coordinados, analizando los datos obtenidos de acuerdo con los métodos estadísticos usuales. Estos ensayos podrían emprenderse en escala nacional o internacional; no en vano existen prestigiosas organizaciones como RILEM, CEMBUREAU y otras que bien podrían orientar superiormente una encuesta lo más objetiva posible para aclarar los aspectos de la molienda que, por falta de información adecuada, nos parecen todavía envueltos en la neblina de la confusión. Y esperemos que ciertos malentendidos secretos de fabricación no contribuyan a tornar más densa dicha neblina, con una cortina de humo adrede levantada.

bibliografía

- (1) Anónimo: Secado y molienda combinados en los materiales crudos. «Cement and Lime Manufacture», (1957), núm. 5, pág. 67.
- (2) Anónimo: Reducción de la temperatura durante la molienda del cemento. «Cement and Lime Manufacture», núm. 5, pág. 61 (1957).
- (3) Anónimo: La molienda y el secado en una sola operación en las fábricas de cemento. «Cemento», (1932), página 280.
- (4) Anselm, W.: La fabricación del cemento. Publicación «Asland», Barcelona, (1944), pág. 29.
- (5) Anselm, W.: Técnica de la molienda y del polvo. D. I. V., Dusseldorf (1950).
- (6) Anselm, W.: La técnica de la molienda. I. T. C. C. (1952), Monografía núm. 115.
- (7) Anselm, W.: Estudio económico comparativo de las resistencias de los cementos en relación con la molienda de los mismos. «Ultimos Avances en Materiales de Construcción» (1953), núm. 37, pág. 1.
- (8) Anselm, W.: La molienda del cemento en circuito abierto y en circuito cerrado. «Silicates Industriels» (1958), núm. 7-8, pág. 396.
- (9) Arias, S.: Secadores rotativos. «Ion» (1951), núm. 125, pág. 75.
- (10) Beke, B.: La molienda del cemento en circuito cerrado. «Zement Kalk Gips», (1958), núm. 12, pág. 529.

- (11) Beke, B.: Teoría y tecnología de la molienda del cemento. «Silikattechnik», (1962), núm. 4, pág. 115.
- (12) Bellwinkel, A.: Nuevos aspectos de la molienda. «Zement Kalk Gips», (1959), núm. 2, pág. 41.
- (13) Bellwinkel, A.: Tendencias actuales en la construcción de maquinaria para la fabricación de cemento. «Zement Kalk Gips», (1961), núm. 2, pág. 41.
- (14) Bellwinkel, A.: Desarrollo en la construcción de molinos de bolas. «Revue des Matériaux», (1963), número 572, pág. 173.
- (15) Blanc, E. C.: Tendencias actuales y perspectivas en el dominio de la fragmentación. «L'Equipement Mécanique», (1963), núm. 33, pág. 25.
- (16) Blanc, E. C.: Clasificación de materiales por el viento. (Separadores de aire). «L'Equipement Mécanique», (1951), núm. 255, pág. 11.
- (17) Bodmer y Nissolle: El calentamiento por carbón pulverizado. París, (1933), pág. 18.
- (18) Bond, F. C., y Maxson, W. L.: Molturabilidad y molienda de minerales. A. I. M. E., (1939), vol. 134.
- (19) Bond, F. C.: Cálculos en la trituración y en la molienda. «Canadian Min. Metall. Bull.», (1954), número 507.
- (20) Bond, F. C.: Una nueva teoría de la conminución. A. I. M. E., (1957), vol. 9, pág. 1372.
- (21) Bornschein, G.: Balance térmico de una instalación de molienda, con secado por corriente de aire. «Silikattechnik», (1956), núm. 4, pág. 162.
- (22) Börner, H.: Molienda del cemento en circuito abierto y en circuito cerrado en la fábrica de Watensted. «Revue des Matériaux», (1952), núms. 446-447, págs. 303-336.
- (23) Börner, H.: Molienda en circuito cerrado y en circuito abierto. «Zement Kalk Gips», (1956), núm. 4, página 152.
- (24) Catlin, A. W.: Fórmulas aplicables a los separadores de aire. Reimpreso de «Rock Products» por Universal Road Machinery, Co.
- (25) Comte, J.: Estudio sobre la molienda del crudo o del clínker en circuito abierto y en circuito cerrado. «Revue des Matériaux», núm. 486, (1956), pág. 61.
- (26) Czernin, W.: Sobre el papel de las partículas muy finas en el cemento portland. «Zement Kalk Gips», (1954), núm. 4, pág. 161.
- (27) Duteyrat, E.: La molienda y los molinos en la fabricación de cemento. «Revue des Matériaux», (1950), números 414-415, págs. 103-135.
- (28) Fahrenwald, A. W.: Algunos fundamentos de la molienda fina. A. I. M. E., (1934), vol. 112.
- (29) Fréney, E., y Masson, A.: Influencia en los molinos de bolas, operando con materias secas, de la presencia de partículas finas en los materiales sometidos a la molienda. «Revue des Matériaux», (1959), número 520.
- (30) Gascuñana, S.: Treinta años de evolución en la industria del cemento. «Cemento-Hormigón», (1959), número 303, pág. 315.
- (31) Geoffroy, J.: Desarrollo de un molino-secador en la estación experimental de Marienau. «Revue des Matériaux», (1964), núm. 588, pág. 259.
- (32) Heilmann, T.: Influencia de la finura de los crudos de cemento en su aptitud para la cocción. «Proceedings of the Third International Symposium on the Chemistry of Cement», London, (1952), pág. 711.
- (33) Herrero, A.: Consideraciones sobre las ventajas de realizar una trituración en circuito cerrado, previa a la alimentación de los molinos de bolas, en la industria del cemento. «Ingeniería», (1953), núms. 23-24, págs. 2-6.
- (34) Hildebrand, K.: Métodos racionales de montaje de las fábricas modernas de cemento. «Cemento-Hormigón», (1953), núm. 236, pág. 365.
- (35) Jacob, K.: Indices de capacidad de los molinos tubulares. «Silikattechnik», (1963), núm. 1, pág. 45.
- (36) Jäger, H.: El ciclón de clasificación por aire circulante. «Zement Kalk Gips», (1962), núm. 11, pág. 479.
- (37) Jaspers, M. J. M.: Las leyes que regulan la relación entre la superficie específica y las propiedades tecnológicas del cemento. Método de control rápido y de predeterminación de la calidad del cemento. «Revue des Matériaux», (1951), núms. 429, 430, 431-432, págs. 169, 207, 254.
- (38) Jipp, R.: Método de secado y molido por choque y su aplicación a las industrias pétreas. «M. C.», (1958), núm. 6, pág. 25.
- (39) Joisel, A.: La Molienda. «Revue des Matériaux», (1950), núm. 418, pág. 240.
- (40) Kargas, E. J.: ¿Es el molino de rodillos la respuesta a nuestros problemas de molienda? «Rock Products», (1964), septiembre, pág. 82.
- (41) Klovers, E. J.: Circuitos de molienda aplicables a las industrias del cemento y de los agregados. «Rock Products», (1952), febrero, pág. 123.
- (42) Kolb, E. R.: Cemento enfriado durante la molienda del clínker. «Rock Products», (1956), octubre, página 118.
- (43) Kondr, H.: Estado actual y perspectivas de las instalaciones de molienda en la industria del cemento en la R. D. A. «Silikattechnik», (1962), núm. 4, pág. 124.

- (44) Koulen, K.: Resumen de la bibliografía reciente sobre la molienda en circuito cerrado con separadores. «Zement Kalk Gips», (1960), núm. 4, pág. 158.
- (45) Kraus, F.: Funcionamiento de los molinos con separadores. «Zement Kalk Gips», (1954), núm. 7, pág. 273.
- (46) Labahn, O.: Prontuario del cemento (s. a.). Ediciones «Palestra», pág. 69.
- (47) López Peciña, D.: Molienda en las fábricas de cemento. (1954), I. T. C. C. Monografía núm. 157.
- (48) López Peciña, D.: Investigaciones sobre la molturación en molinos de bolas. «Cemento-Hormigón», (1960), núms. 316, 317, 318, 321, págs. 342, 429, 465, 685.
- (49) Maclead, K. M.: Modernización y ampliación de la fábrica de Chinor Cement Co. «Cemento-Hormigón», (1958), núm. 297, pág. 553.
- (50) Margarit, A.: Influencia de la finura de los cementos en sus propiedades. (1954), I. T. C. C., Monografía núm. 167.
- (51) Meade, R.: Cemento Portland. Su composición. Materias primas. Fabricación. Ensayos y análisis. «The Chemical Publishing Co.», (1926), Easton, Penn. E. U. A., 3.ª edición.
- (52) Mittag, C.: 60 años de molinos tubulares en la industria del cemento. (1960), «Tonindustrie Zeitung», número 4, pág. 184.
- (53) Nenstiel, W.: Nuevos secadores para materiales sueltos. «Interceram», (1964), núm. 1, pág. 52.
- (54) Palomar, P., y López Peciña, D.: «Las operaciones de molienda en la fabricación de cemento». «Cemento-Hormigón», (1954), núms. 244, 245, 246 y 249, págs. 286, 324, 366 y 479.
- (55) Papadakis, M.: La molienda de los materiales. «Annalles des Mines», (1959), noviembre.
- (56) Papadakis, M.: Contribución al estudio de los molinos de bolas industriales. «Revue des Matériaux», (1960), núm. 542, pág. 295.
- (57) Papadakis, M.: Estudio comparativo de los molinos en circuito abierto y en circuito cerrado.
- (58) Rezola, J.: Los cementistas españoles ante el Plan de Desarrollo. «Cemento-Hormigón», (1964), número 363, pág. 283.
- (59) Rocha Melo, J.: Conceptos actuales sobre la molienda de cemento. «Cemento-Hormigón», (1960), número 320, pág. 586.
- (60) Rowland, C. A.: Producción de cemento de alta resistencia inicial en molinos de bolas de una sola etapa. «Cemento-Hormigón», (1960), núm. 312, pág. 111.
- (61) Rowland, C. A.: Investigaciones sobre la molienda mejoran el rendimiento de los molinos. «Rock Products», (1962), enero, pág. 112.
- (62) Rowland, C. A.: El progreso de la molienda utiliza complicados factores. «Rock Products», (1963), septiembre.
- (63) Saint-Jacques, C.: Molienda y selección del cemento. «Revue des Matériaux», (1954), núm. 465, pág. 185.
- (64) Schmid, A.: La molienda fina en los molinos tubulares. «Zement-Kalk-Gips», (1949), núm. 4.
- (65) Schmid, A.: La evolución y funcionamiento de las instalaciones de molienda a base de molinos tubulares en las fábricas de cemento. «Cemento-Hormigón», (1959), núm. 303, pág. 401.
- (66) Schöneck, C.: Molienda de crudos en el molino Aerofall. «Zement-Kalk-Gips», (1963), núm. 6, pág. 244.
- (67) Suzuki, S.: Investigaciones sobre el rendimiento de los molinos en circuito cerrado. «Rock Products», (1952), octubre, pág. 122.
- (68) Tanaka, T.: Circuito cerrado con separadores de aire normales. «Zement-Kalk-Gips», (1958), julio, página 298.
- (69) Tanaka, T.: Proyectos de instalaciones de molienda en circuito cerrado. «Zement-Kalk-Gips», (1958), septiembre, pág. 396.
- (70) Témoín, A.: Utilización del molino Aerofall para la molienda en fábricas de cemento. «Cemento-Hormigón», (1963), núm. 363, pág. 379.
- (71) Virella, A.: Determinación de la superficie específica por medio de un nomograma. «Últimos Avances en Materiales de Construcción», (1957), núm. 82, pág. 611.
- (72) Virella, A.: Combustión y Combustibles. «Últimos Avances en Materiales de Construcción», (1961), número 102.
- (73) Virella, A.: Evolución del problema de la molienda. «Cemento-Hormigón», (1964), núm. 363, pág. 299.
- (74) Voos, E.: Rendimiento máximo de los separadores. «Zement-Kalk-Gips», (1955), núm. 8-9, pág. 319.
- (75) Walter, J.: Técnicas de molienda. «Revue des Matériaux», (1952), núm. 441, pág. 163.
- (76) Walter, L.: Trabajo eficiente de los secadores. «Rock Products», (1954), mayo, pág. 116.
- (77) Williams, A. E.: La separación por aire en la industria del cemento. «Indian Concrete», (1959), número 7, pág. 249.
- (78) Wolf, K.: Separación granulométrica por corrientes de aire espirales. «Zement-Kalk-Gips», (1950), núm. 7.
- (79) Wuhler, J.: Resistencias de las fracciones de diferentes tamaños de cemento y de clínker después de la separación por aire. «Zement-Kalk-Gips», (1950), núm. 7.
- (80) Zacher, W. J.: Una nueva aproximación al problema de la fragmentación. «Rock Products», (1959), página 94.