

616 - 94

conceptos actualizados sobre la molienda del cemento*

JOSE OSORIO DE ROCHA E MELO,
Ingeniero Civil (E.P.U.L.)

(«Técnica», febrero 1961, núm. 309, pág. 303.)

La molienda del clinker consume, en una fábrica de cemento, cerca del 40 % de energía total; el rendimiento energético de la molienda es también pésimo, ya que resulta ser apenas del orden del 1 %. Los otros 99 % se pierden bajo forma de calor en calentar la máquina, las placas de blindaje, cuerpos molidores, el cemento, el aire ambiente y bajo la forma de sonido.

Se ha procurado mejorar estos bajos rendimientos que se reflejan en la economía general de la fabricación, y en este sentido se presentan algunos caminos que han sido explorados con este objeto.

Los cuerpos molidores

Dentro de un molino, el material que se pretende moler es triturado o aplastado por el cuerpo molidor (bola, esfera, cilindro o cubo) contra la placa (blindaje, coraza, revestimiento) o por el choque de los cuerpos molidores entre sí. Pero, frente al miserable rendimiento de esta operación, hay que admitir forzosamente que en estos choques, el efecto es raramente alcanzado y parece haber una probabilidad de cada cien de que una esfera acierte, sobre una partícula a pulverizar, bien contra otra esfera, bien contra la placa.

Toda esa onda de calor que se desprende del molino es provocada, en su casi totalidad, por esa serie de choques y fricciones inoperantes.

Dentro de esta deplorable técnica, y mientras no se descubran medios más eficaces de pulverización, veamos de qué pequeños progresos se ha beneficiado la molienda en los últimos tiempos. Para cada tamaño de material, la esfera de acero más conveniente para triturarla será, según nos enseña la práctica, de seis a ocho veces mayor en volumen.

Se comprende que para una molienda eficaz las esferas deben poder hacer buen contacto unas con otras y las partículas a moler no sean mayores que los intersticios entre esferas (fig. 1).

Las superficies útiles de contacto de molienda varían en razón inversa de los diámetros de las esferas y, por tanto, a medida que el diámetro de las esferas disminuye, la superficie útil de contacto aumenta.

Otro fenómeno conocido consiste en la segregación de las esferas por tamaños. Cuando ponemos en marcha un molino con esferas mezcladas, sin alimentación, se produce poco a poco una migración de las esferas mayores para un lado y las menores para otro. La explicación de este hecho resulta de las consideraciones siguientes:

C U A D R O I

1 m ³ de esferas de 60 a 100 mm para 4.400 kg:	Compacidad 0,56
1 m ³ de esferas de 30 a 50 mm para 4.600 kg:	Compacidad 0,59
1 m ³ de esferas de 20 a 30 mm para 4.800 kg:	Compacidad 0,62

* Comunicación presentada al Congreso Internacional del Cemento. Lisboa, Agosto-septiembre 1960.

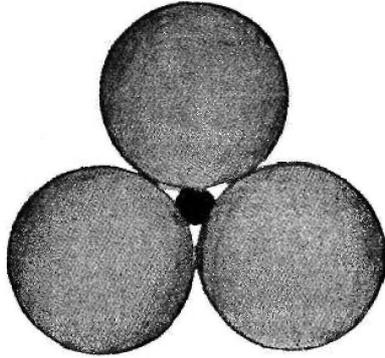


Fig. 1

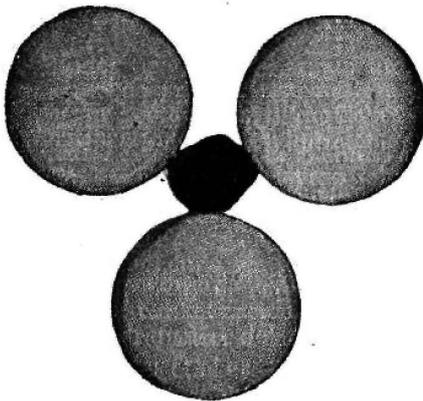


Fig. 2

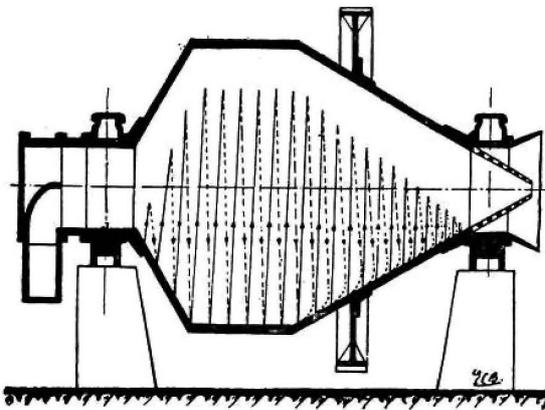


Fig. 3

Si las mezclamos, la compacidad sube y la densidad aparente o compacidad también y, por consiguiente, el sistema no queda en equilibrio. Con la rotación del molino, las esferas buscan ese equilibrio, las mayores, dotadas de mayor fuerza viva, expulsan a las chicas y, al final de cierto tiempo, las esferas tienen tendencia a clasificarse por zonas de igual compacidad, o sea, de igual diámetro.

Lo que acabamos de decir se refiere al molino sin alimentación. Si ésta se hace con granos de clínker que no excedan en tamaño de $1/6$ a $1/8$ del diámetro de la esfera, las cosas suceden como queda dicho.

Supongamos ahora, por un momento, que el tamaño del grano aumentó. Las esferas ya no pueden hacer buen contacto unas con otras, y el intersticio entre esferas creció, como muestra la figura 2.

Sea:

d = Compacidad de las esferas sin material a moler.

d' = Compacidad de las esferas con material a moler.

h = Altura ocupada por las esferas sin material.

h' = Altura ocupada por las esferas con material.

Se encuentra, corrientemente, en estas circunstancias que:

$$d' = 0,6d.$$

$$h' = 1,1h.$$

Producida esta subida de nivel, la experiencia demuestra que las esferas grandes tienen tendencia, por gravedad, a emigrar hacia el lado de la salida del molino donde van a mezclarse con las pequeñas, que, a su vez, son expulsadas hacia el otro lado.

Por mediciones en un molino de una cámara de 6 m se encontraron las siguientes compacidades, al cabo de 20 minutos, después del comienzo de la perturbación provocada por el material más grueso:

Lado de la entrada $d'e = 0,9d$.

Lado de la salida $d's = 1,1d$.

Normalizada la alimentación, el equilibrio se vuelve a establecer, pero muy lentamente. La dislocación de las esferas grandes hacia la salida, provocada por la perturbación, es muy rápida: se realiza en pocos minutos; la vuelta a la normalidad es muy lenta: cerca de diez horas.

Durante ese período, el rendimiento del molino no es regular. Este hecho ha llevado a la industria moderna a instalar machaqueos y cribado previos, o, mejor aún, molinos preparadores que garantizan una alimentación de tamaño conveniente, y, sobre todo, regular, del molino principal.

Se cita el ejemplo de una Central de vapor quemado carbón pulverizado, cuyo molino era alimentado por un triturador. En las horas punta, si por cualquier motivo la alimentación estaba más grosera, el vapor era insuficiente. La intercalación de una criba, que permite una alimentación con grano de menor tamaño y más regular, resolvió perfectamente el problema.

La autoclasificación de los cuerpos moledores resulta muy facilitada por el molino cónico americano tipo "Hardinge", el cual es bien conocido (fig. 3).

En Europa la gran mayoría de los molinos son de cámaras (son los molinos "compound" de circuito abierto). En América son casi todos molinos de cámara única, con alimentación equigranular y circuito cerrado.

Al no ser regular en tamaño la alimentación, los molinos de cámaras impiden, por lo menos, hasta cierto punto, la migración de las esferas. Las divisorias separan las esferas y realizan el cribado entre cámaras, pero perjudican la evacuación del calor; se debe tener mucho cuidado en tener las ranuras de las divisorias libres de obturaciones.

El calor que el cemento lleva consigo, que avanza y sobrepasa los 100° C y que los grandes silos no evacuan, tiene, como es bien sabido, efectos nefastos sobre el papel de los sacos de embalaje. En circuito abierto, el calor se combate por inyección, en el eje del molino, de agua pulverizada en pequeñas dosis, por enfriamiento exterior del cuerpo del molino con agua y, aún después de la salida, en enfriadores especialmente contruidos a tal fin.

Placas de molienda

El rendimiento tan bajo de la molienda indujo a los constructores a procurar mejorarla por todos los medios. Las placas de molienda han sido objeto de estudio, pues influyen en la buena repartición de las esferas. Hardinge consiguió, con su molino cónico, resolver hasta cierto punto el problema en América. En Europa el primero fue Slegten; después, Muellhaeuser y Henricot procuraron aplicar estos principios a los molinos existentes, fabricando placas cuya superficie de molienda fuese inclinada con relación al eje del molino. Se engendran así superficies cónicas cuyos vértices se encuentran sobre el eje del molino, en el sentido de la salida; como consecuencia, se opera una selección de las esferas, se juntan las mayores en la entrada del molino y las más pequeñas se orientan hacia la salida.

Este tipo de placa se conoce por placa cónica; mediante estas placas resultan innecesarias las divisorias para efecto de selección de esferas, y la ventilación del conjunto gana mucho con esa supresión. No se cree que, por ahora, baste colocar placas de este tipo indiscriminadamente en nuestros molinos para conseguir resultados inmediatos.

La casa Kloeckner-Werke hizo en 1955 un ensayo de aplicación de placas cónicas en un molino preparador de 3,2 m. \varnothing \times 5,5 m. Según Mittag, ese molino con placas normales cilíndricas producía 62 t/h con un motor de 750 kW.

Después de una cierta mejoría de rendimiento se abrió el molino. Se comprobó que las esferas estaban perfectamente escalonadas, pero la distribución del material era bastante irregular, como indica la figura 4, con falta notoria al comienzo de la cámara y exceso en el centro.

Pero esto parecía querer indicar que las esferas mayores daban despacho excesivo y las medias insuficiente. Así, se ensayó retardar un poco esa acción cambiando las tres primeras hileras de placas cónicas por placas normales cilíndricas y se acertó en la realidad.

Los resultados están patentes en el cuadro II.

Bellwinkel cita, como consecuencia de una larga serie de ensayos, ser la placa que mejor ha probado la de acero al manganeso de 12 a 14 % y de 1 a 1,5 % de cromo. Esta composición resiste bien los esfuerzos al choque y martillado.

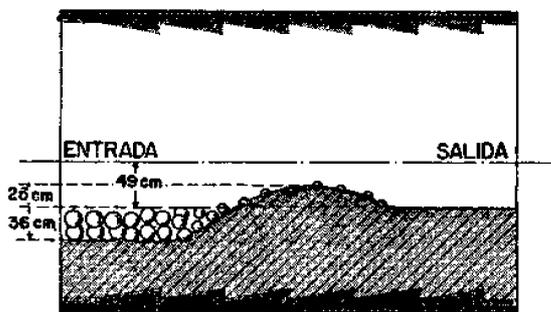


Fig. 4

Montados en el molino estas placas con dureza Brinnell 300 alcanzan, bajo la influencia del martillado, durezas de 500 Brinnell, lo que hace que aumente considerablemente la resistencia al desgaste.

Slegten confirma este punto de vista diciendo: el acero de aleación 12 a 14 % de manganeso reduce el desgaste al 50 %; el cromo en proporción de 1,5 % impide que la placa se extienda por martillado, y una proporción del 0,35 % de silicio aún disminuye el desgaste cerca del 15 %.

CUADRO II

Ensayo	I	II	III
Placas	Cilíndricas	Cónicas	Cil. + Cón.
Peso de las esferas T	40	37	45
r.p.m. 32/D	17,6	16,8	16,8
kW	690	530	610
t/h	62	70	85
kWh/t	11,1	7,6	7,2
Residuo a 4.900 m/cm ²	66 %	69 %	72 %

Mussgnung, por su parte, dice que el desgaste de las placas depende de la molturabilidad del clinker, de la finura a que se lleva el cemento y de la calidad del material de las placas. En ensayos realizados sobre placas de resaltos de acero al manganeso, se comprobó que para buena duración la existencia de una textura austenítica es esencial. En la composición de la placa, las relaciones Mn/C, Mn/Si + C y, especialmente, la relación Mn/Si, tienen mucha importancia.

Este cuadro nos da las composiciones corrientes.

CUADRO III

	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Mn / Si	Mn / C	Mn / Si + C
Fundición gris	2,80	1,21	0,76	0,47	0,20	—	—	—
Acero manganeso eléctrico 1	1,20	0,34	12,00	0,060	0,010	35,3	10,0	7,8
Acero manganeso eléctrico 2	1,02	0,96	11,89	0,083	0,013	12,4	11,7	6,0
Acero manganeso a)	1,18	0,56	12,89	0,077	0,010	23,0	10,9	7,4
Acero manganeso eléctrico 3	1,20	0,49	13,70	0,083	0,012	27,5	11,4	8,1
Acero manganeso b)	0,94	1,03	11,75	0,034	0,022	11,4	12,5	6,0
Acero manganeso c)	1,13	0,87	11,95	0,060	0,013	13,8	10,6	6,0
Acero manganeso eléctrico 4	1,08	0,56	11,71	0,042	0,012	21,0	10,8	7,2

y la figura 5 nos muestra el desgaste de placas en función de la relación Mn/Si.

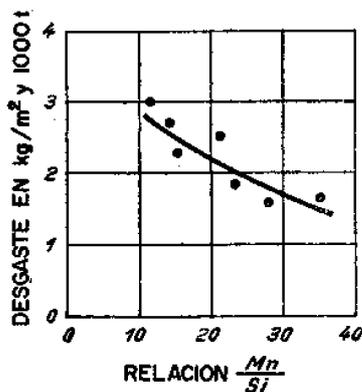


Fig. 5

No es raro conseguir en un molino de cemento una duración de placas de 12.000 horas de trabajo. Pero, caso curioso, con tal resistencia al martillado, estas placas son sensibles y resisten mal a la fricción y resbalamiento de los cuerpos moledores, que se puede dar en molinos girando en régimen de bajo número de revoluciones.

Los conductores de molino saben por experiencia que, sobre todo en la primera cámara, el sonido producido por la caída de las esferas debe ser claro y metálico, nunca sordo, que denota o alimentación forzada o revoluciones insuficientes.

El "Falofone" Smidth permite evitar que el sonido del molino pase a sordo, cortando la alimentación.

Para evitar ese resbalamiento de las esferas, sobre todo en la primera cámara, se utilizan placas de resaltos u onduladas. El tamaño de las esferas es, en general, determinado por el trabajo de fragmentación a realizar, provocado por la fuerza viva de caída de la esfera; la dureza y el tamaño del material a moler determinan la composición de la carga.

En la fábrica de Obourg, en Bélgica, se utiliza con excelentes resultados la placa de molienda tipo Henricot (conocida con el nombre de placa de tetones). El aspecto de esta placa es el de una serie de pernos verticales encastrados por la base, como se indica en la figura 6. El diámetro y la distancia de los pernos es función del diámetro de la esfera media.

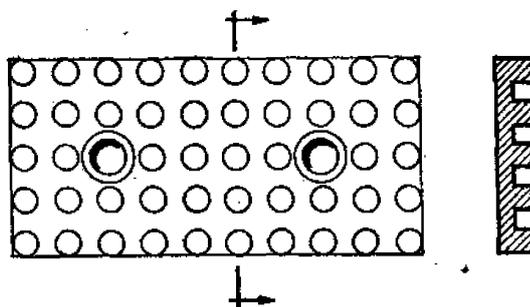


FIG. 6

Con la rotación del molino, la esfera que se encuentra apoyada sobre cuatro pernos, solamente comienza a caer cuando la inclinación alcanza de 35 a 45°; como la fuerza centrífuga actúa también sobre la esfera, el descolgado se produce bajo un ángulo todavía mayor, sin que haya peligro de fricción por resbalamiento. De esto se deduce la posibilidad de disminuir el número de revoluciones del molino, manteniendo la misma eficacia de molienda.

La fórmula corriente del número de revoluciones por minuto dada por $n = 32/d$ puede, con placas Henricot, pasar a $n = 26/d$, siendo d el diámetro interno del molino.

La especial resistencia al desgaste de esta placa proviene de que su superficie es no continua, sino que está formada por las cabezas de los pernos que representan cerca del 60 % de la superficie total de la placa. Son las cabezas las que reciben el choque puro de los cuerpos moledores, sin resbalamiento, endureciéndose por martillado aún más de lo que las placas en idénticas circunstancias. Con el martillado, toda la placa se deforma y ensancha, creciendo contra las adyacentes, lo que ocasiona la rotura de los pivotes de sujeción.

En la placa Henricot la distancia entre pernos debe ser menor que el diámetro de la esfera menor.

Utilizando las propiedades selectivas de las placas cónicas, la casa Henricot también las fabrica de este tipo. Como las esferas grandes son impelidas hacia la entrada del molino y las pequeñas hacia la salida, el diámetro de los pernos y la distancia entre ellos varían a lo largo del molino, como es obvio.

Según informaciones de la fábrica de Obourg, la duración de estas placas ya alcanzó y pasó las 30.000 horas, o sea, 2,5 veces la duración de la placa normal.

La instalación de Obourg se compone de dos molinos preparadores o primarios de 3,7 m. ϕ \times 4,5 metros, y cuatro de refinó de 2,4 m. ϕ \times 12,6 m, éstos en circuito cerrado con separadores Sturtevert. Todos los molinos van revestidos con placas Henricot. Los primeros producen cada uno 122 t/h en grano de 3 mm, y los secundarios, 55 t/h a una media de 2.640 Blaine. La potencia instalada es, respectivamente, de 850 y 750 kW por molino, a esto hay que añadir las potencias instaladas a los elevadores y separadores. Los molinos de refinó están completamente revestidos con placas Henricot, lo mismo que los preparadores. Los molinos secundarios de 2,4 m. ϕ trabajan a 17 r.p.m. con sonido de martilleo bien claro. El desgaste es del orden de 100 g/m² y 1.000 t. La temperatura media del cemento a la salida de los molinos es de 70° C.

Otros ejemplos citados por Mittag, esta vez con placas cónicas Muehlhaeuser, sobre ensayos realizados en tres fábricas alemanas, una en el norte, otra en el centro y otra en el sur:

Fábrica A.—En un molino Compound de 2,4 m. ϕ \times 14 m, en el que la primera cámara estaba revestida con placas de resaltos; en la cámara de refinó se habían sustituido las placas cilíndricas normales por placas cónicas. Al cabo de un año moliendo cemento normal y cementos metalúrgicos los resultados son los indicados en el cuadro IV.

Fábrica B.—Se componía de un molino primario que alimentaba a un secundario de 2,4 m. ϕ \times 14 metros con clinker, dejando un residuo de 75 % sobre 900 mallas; en ambos, las placas cilíndricas habían sido sustituidas por cónicas. En la instalación se molieron cemento normal tipo Z-275 y especial Z-375, con los resultados que figuran en el cuadro V.

Fábrica C.—Molino 2,20 m. ϕ \times 13 m de tres cámaras.

Fue retirada la divisoria de la segunda a la tercera cámara y las placas cilíndricas normales sustituidas por placas cónicas. Los resultados en el Cuadro VI.

C U A D R O I V

P L A C A S	CEMENTO NORMAL		CEMENTO METALURGICO	
	Cilíndricas	Cónicas	Cilíndricas	Cónicas
t/h	20,8	24,6	21,8	25,6
Blaine cm ² /g	3.069	3.030	2.908	2.979
kW	791	765	791	765
kWh/t	38	31	36,5	30

Molinos Compound 2,4 m. ϕ \times 14 metros.

C U A D R O V

P L A C A S	CEMENTO NORMAL Z 275		CEMENTO ESPECIAL Z 375	
	Cilíndricas	Cónicas	Cilíndricas	Cónicas
t/h	30,2	29,0	20,3	19,6
kW	575	566	560	533
kW/t. {	Primario	11,1	7,1	11,1
	Secundario.. ...	19,0	19,5	27,6
	Total	30,1	26,6	38,7
Blaine cm ² /g	—	—	3.100	3.350

Molinos: Primario 3,2 m. ϕ \times 5,4 m + Secundario 2,4 m. ϕ \times 14 metros.

C U A D R O V I

P L A C A S	CEMENTO NORMAL Z 275		CEMENTO ESPECIAL Z 375	
	Cilíndricas	Cónicas	Cilíndricas	Cónicas
t/h	17,2	19,4	10,2	11,0
Residuos 4.900 mallas/cm ² %.	14,4	13,7	4,0	4,3
kW	432	462	432	462
kWh/t	25,1	23,9	42,5	39,7

Molino Compound 2,20 m. ϕ \times 13 metros.

De una manera general esta serie de ensayos muestra que las placas cónicas mejoran el rendimiento en cerca del 10 %.

Kraus presenta un ensayo realizado con placas cilíndricas normales, pero, en vez de montarlas alineadas según la generatriz, las montó con junta encontrada e imbricadas como indica la figura 7. Informa que obtuvo mayor duración, menos pivotes de sujeción partidos y mejor rendimiento de mollenda (cerca del 5 %). También presenta un caso curioso con un molino de dos cámaras de 2,8 m. ϕ \times 5,7 metros. A este molino le fue quitada la divisoria, montando placas vulgares en su lugar; la primera cámara tenía placas corrientes también y las de la segunda eran de resaltos. Las esferas fueron introducidas por los dos agujeros de visita, y al cabo de poco tiempo de marcha se notó baja de rendimiento, que fue atribuido a falta de esferas. Al abrir las tapas del molino se vio que las esferas grandes estaban al lado de la salida y las pequeñas en el de entrada.

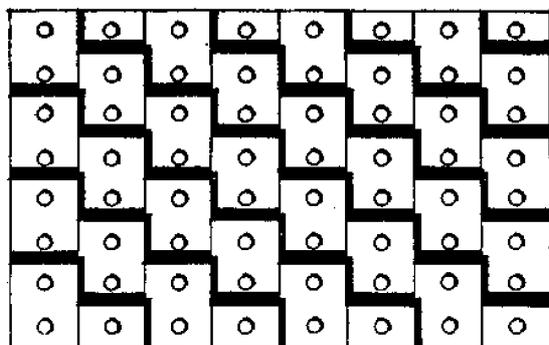


Fig. 7

Se cambiaron las placas pasando para la entrada las de resaltos. Lanzados los cuerpos moledores a granel dentro del molino y pasados pocos días el rendimiento mejoró, tanto en producción como en finura; la clasificación de las esferas por tamaños se había realizado.

Siguiendo este ensayo, se comprobó que las de resaltos eran más "macias" que las otras. Con el martilleo de las esferas grandes, se habían extendido y se partieron bastantes pernos de sujeción. Alguien tuvo la idea, por falta de placas de resaltos, de montar las placas normales en escalera invertida, comprobándose que pasaban a trabajar como auténticas placas de resalto, con idéntico resultado.

Desgaste de placas

Slegten indica desgastes de placas en los molinos de cemento entre 30 y 160 g/t, siendo los valores más elevados relativos a los molinos que muelen escoria de alto horno.

Una batería de siete molinos de 2,00 m. ϕ \times 12 m consumió en siete años una media general de 66 g/t ó 304 g/m² y 1.000 t. Mejorada la composición del acero, se consiguió reducir en la misma instalación el desgaste a la mitad. En otra instalación con molinos primarios y secundarios, los desgastes fueron, respectivamente, 105 y 435 g/m² y 1.000 toneladas.

Todas estas cifras de desgaste tienen un significado poco real si no fueran ligados a la nueva superficie específica creada y ésta es función de la molturabilidad.

Molturabilidad

La mayor o menor resistencia a la trituración de un clinker (la "grindability" de los ingleses o la "broyabilité" de los franceses) puede ser medido y el mercado dispone de aparatos de éstos. Tiene mucha importancia el conocerla, pues es posible conjugar la conducción de los hornos rotativos con el resultado del ensayo de molturabilidad.

Bellwinkel relata que en una misma fábrica y en el mismo día se encontraron diferencias del orden de 30 %. Esto permitió, después de estudiado y sin pérdida de calidad del clinker ni de las resistencias del cemento, conseguir una mejora en el grado de molturabilidad, traducida en una apreciable reducción del consumo de fuerza motriz y en el desgaste de cuerpos moledores y placas. El desgaste de placas está, pues, íntimamente ligado al coeficiente de molturabilidad del clinker.

En clinker de varias procedencias se encuentran en este ensayo diferencias del 100 %, habiendo unos cuya molienda grosera se hace fácilmente, pero con refino difícil, y otros en que se da la inversa. De ahí el interés en conocer la molturabilidad de todos los materiales que se han de moler en una fábrica, crudo, carbón, clinker, escoria, etc., cuando se proyectan nuevas instalaciones, ampliaciones y así determinar "a priori", tanto como sea posible, el tipo de molino más conveniente y sus características.

La operación de la molienda

El rendimiento de la molienda varía, como se ve, con el tamaño del clinker y con su molturabilidad, y ésta, a su vez, depende del grado e intensidad de la cocción, definida en parte por el valor del peso del litro (que indica mayor o menor porcentaje) de fundentes, temperatura del horno, llenado de la zona de cocción, etc., de la dureza, la mayor o menor porosidad, composición química y del proceso de enfriamiento del clinker.

Por otra parte, el rendimiento de la molienda es inversamente proporcional al grado de finura que se quiere alcanzar.

Por lo que respecta al tamaño del clinker para la alimentación, cuanto más pequeño mejor. En general, los molinos Compround corrientes de 1.800 a 2.400 mm ϕ no deben ser alimentados con grano superior a 30 mm, pues la altura de caída de las esferas no es suficiente para comunicarles la fuerza viva necesaria, y esto lo acusa el rendimiento. Para estos casos debe instalarse una trituradora previa o un molino primario de diámetro entre 2.800 y 3.500 milímetros.

Modernamente, ya se construyen molinos Compround hasta 3.600 mm ϕ . En América el tamaño corriente del clinker en la alimentación del molino secundario es lo que pasa por la criba de 1/4 de pulgada. En Obourg, en Bélgica, la alimentación se realiza a 3 milímetros.

En cuanto al número de revoluciones para molinos con placas normales lisas, la velocidad crítica viene dada por la fórmula $n = 42,3/D$; y la velocidad de rotación más conveniente viene dada, según Anselm, en porcentaje de esta velocidad crítica, según indica el cuadro VII.

C U A D R O V I I

Velocidad de rotación de los molinos

Velocidad crítica	$n = 42,3/D$.
Molinos preparadores	70 % de la velocidad crítica.
Molinos de refinó	64 % de la velocidad crítica.
Molinos Compround	67 % de la velocidad crítica.
Molinos circuito cerrado	70 % de la velocidad crítica.

C U A D R O V I I I

Producción de superficie específica en función del número de r.p.m.

A 85 % de su velocidad crítica	230 millones de cm^2/kWh .
A 70 % de su velocidad crítica	302 millones de cm^2/kWh .
A 48 % de su velocidad crítica	265 millones de cm^2/kWh .

Producción de superficie específica en función del grado de llenado

Con el 22,5 % de llenado se alcanzan	292 millones de cm^2/kWh .
Con el 30,0 % de llenado se alcanzan	302 millones de cm^2/kWh .
Con el 37,5 % de llenado se alcanzan	251 millones de cm^2/kWh .

Slegten dice que el número de revoluciones del molino tiene influencia en la producción de superficie específica, así como el grado de llenado de cuerpos molidores.

El cuadro VIII pone esto en evidencia.

En la granulometría, el cemento no debe ser uniforme, sino que debe ser variado; las mayores resistencias se obtienen con partículas entre 5 y 35 micras.

El molino corriente para cemento normal suministra granos comprendidos entre 0 y 200 micras. El grano superior a 40 micras ya no es componente de actividad inmediata para el cemento, sino que concurre para el aumento de resistencia a largo plazo.

El grano inferior a 7 micras concurre mucho para la retracción, y por bajo de 5 micras su valor hidráulico es muy reducido. Cuando la finura aumenta más allá de estos límites, aumenta la superficie específica, sin que crezcan las resistencias. Es, pues, una finura improductiva y dispendiosa. Consta que los japoneses, en el nuevo Pliego de Condiciones que está para salir, van a prohibir finuras inferiores al 1 % de residuo sobre 4.900 mallas/ cm^2 .

También esta molienda prolongada da origen a la formación de "plaquetas" que recubren los cuerpos moledores, almohadillándolos e impidiendo una molienda efectiva.

Tanto el molino Compond en circuito abierto, que muele bastante por encima y por debajo del tamaño ideal, como el molino con selector que tiende a obtener grano uniforme en el circuito cerrado, tienen sus inconvenientes.

El molino ideal no existe todavía y, por lo tanto, la solución se debe procurar utilizando las ventajas de ambos sistemas, eliminando sus inconvenientes.

Comparando dos molinos semejantes, uno en circuito abierto y otro en circuito cerrado, no nos podemos limitar a comparar superficies específicas Blaine; debemos comparar igualmente los residuos en los tamices y las resistencias, pues la relación "Residuos/Blaine" varía del circuito abierto al cerrado.

Böerner nos presenta el gráfico siguiente (fig. 8), según el cual se comprueba que, para el mismo Blaine, el circuito cerrado presenta una diferencia en los residuos por debajo de 2% en el tamiz de 10.000 mallas/cm². El cemento de circuito abierto posee, en general, más finos que el de circuito cerrado, en concordancia con el Blaine, pero las resistencias no suben correlativamente. Por tanto, no se deben comparar sólo superficies específicas, sino superficies específicas equivalentes en resistencia.

El exceso de finura aumenta, como vimos, la retracción y, por lo tanto, hay mayor tendencia a la fisuración. Por este hecho, en Alemania se da más importancia a este pormenor que a la expansión (ensayo en autoclave).

Las autopistas alemanas construidas con cementos más groseros, se comportaron, bajo el punto de vista de la fisuración, mejor que las americanas, que utilizaron cementos más finamente molidos.

De la comparación durante varios años, en la fábrica de Watenstedt, de dos molinos produciendo cemento de escorias, uno en circuito abierto y otro en circuito cerrado, sacó Böerner las siguientes conclusiones:

- 1.ª Para las mismas resistencias finales del cemento de escorias, en un molino de circuito abierto, la superficie específica tiene que ser 350 cm² más alta que en circuito cerrado, lo que puede representar de 5 a 6 kWh/t, debido a que en el circuito abierto hay exceso de partículas inferiores a 5 micras.
- 2.ª El molino en circuito abierto muele demasiado fino la parte de material más fácil de moler; en general, la de menor valor. En el caso del circuito cerrado, el separador lo elimina.
- 3.ª El montaje en circuito cerrado es más económico en energía, esferas y placas.
- 4.ª La temperatura del cemento molido en circuito cerrado es más baja que en circuito abierto.

En este ensayo se utilizó escoria granulada de diversas procedencias con molidurabilidad bastante variable, siendo una blanda (500 a 700 g/litro), otra media (700 a 900 g/litro) y otra dura (900 a 1.000 g/litro), y el clinker también presentaba irregularidades. Cuanto menor era la diferencia de las molidurabilidades entre el clinker y la escoria, tanto menor era la diferencia en los rendimientos entre el circuito abierto y el cerrado e, inversamente, cuanto mayores eran las diferencias, mayor era la ventaja del circuito cerrado.

Otros ensayos de molienda

La Asociación Alemana de Fabricantes de Cemento Portland realizó un estudio de racionalización de la molienda del cemento. Este ensayo se extendió a 50 fábricas.

En aquel país, tanto los cementos Portland como los metalúrgicos se presentan en tres clases, indicando el número de cada uno la resistencia a la compresión a veintiocho días.

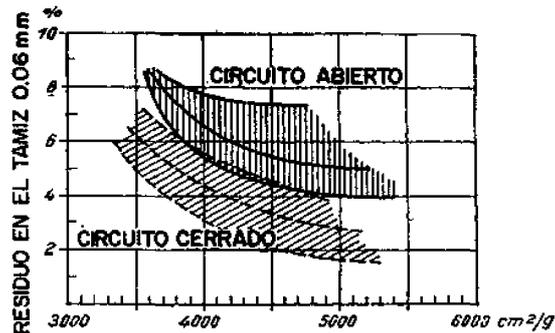


Fig. 8

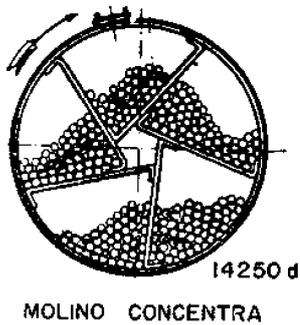
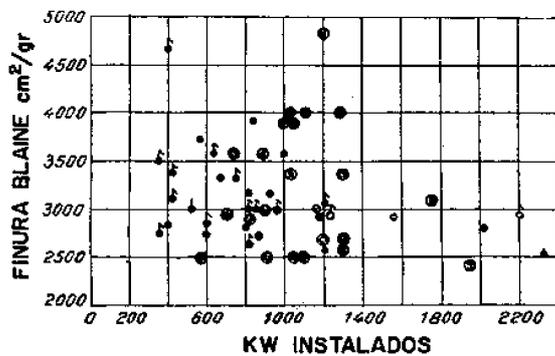
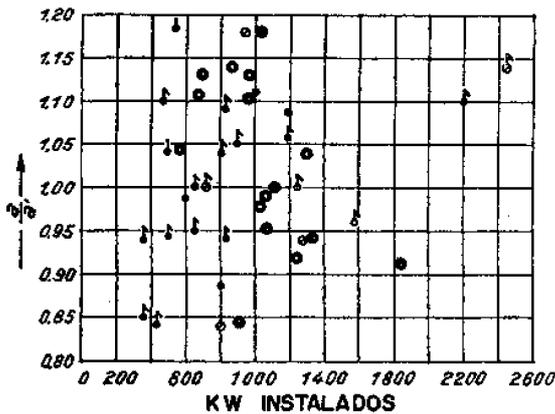


Fig. 9



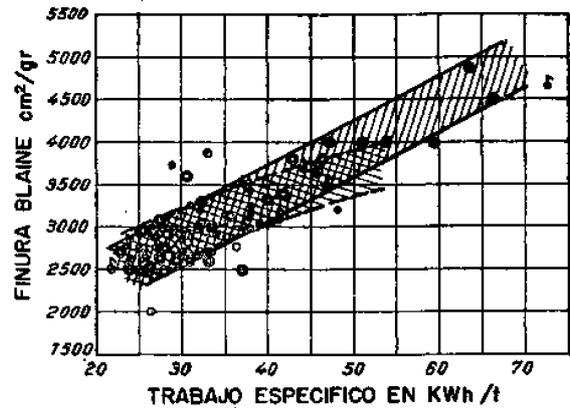
- MOLINO
- MOLINO DE CIRCUITO CERRADO
- MOLINO PREPARADOR Y DE REFINO
- MOLINO CON SEPARADOR DE AIRE
- † MOLINO CON PLACAS CONICAS
- † MOLINO CON CAMARA CONCENTRA

Fig. 10



- MOLINO
- MOLINO DE CIRCUITO CERRADO
- MOLINO PREPARADOR Y DE REFINO
- MOLINO CON SEPARADOR DE AIRE
- † MOLINO CON PLACAS CONICAS
- † MOLINO CON CAMARA CONCENTRA

Fig. 11



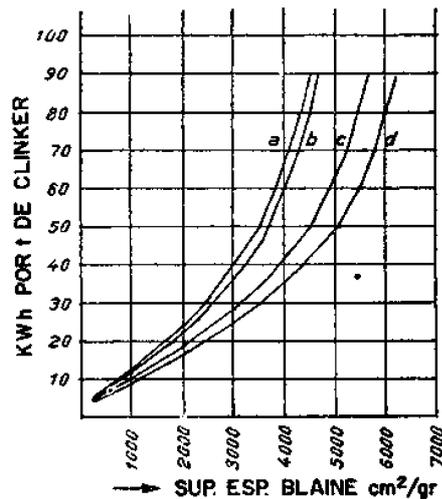
- MOLINO
- MOLINO DE CIRCUITO CERRADO
- MOLINO PREPARADOR Y DE REFINO
- MOLINO CON SEPARADOR DE AIRE
- † MOLINO CON PLACAS CONICAS
- † MOLINO CON CAMARA CONCENTRA

Fig. 12

La media del consumo en estos últimos años fue la siguiente:

Cemento Normal Z275 75 % del consumo.
Cemento Especial Z375 23 % del consumo.
Supercemento Z475 2 % del consumo.

Es evidente que la racionalización debe comenzar con la producción del tipo normal, cuyas finuras se sitúan entre 2.600 y 3.000 Blaine.



- a = MOLINO CIRCUITO ABIERTO
- b = MOLINO CIRCUITO ABIERTO + 1 SEPARADOR
- c = MOLINO 2 CAMARAS CIRCUITO CERRADO
- d = MOLINO 3 CAMARAS 3 CIRCUITOS CERRADOS

Fig. 13

Bellwinkel detalla las conclusiones de este estudio, que son las siguientes:

- 1.ª Las grandes unidades de molienda tienen, en general, rendimientos de 10 a 15 % superiores a los molinos pequeños.
- 2.ª Hasta 35 t/h, con alimentación regular y clínker de tamaño inferior a 30 mm, el molino de circuito abierto es defendible para finuras hasta 3.500 Blaine. Para finuras mayores y rendimientos superiores se impone el circuito cerrado.
- 3.ª Para moler cementos de finuras variables debe utilizarse el circuito cerrado.
- 4.ª Para moler materiales de durezas diferentes es preferible el circuito cerrado.
- 5.ª En lo que respecta a la fuerza motriz, el consumo específico de energía para el mismo Blaine en circuito abierto o cerrado no presenta diferencia clara.

Los mejores molinos Compound contruidos hasta hace pocos años eran: de 2,60 m. ϕ \times 15 m, y la unidad más corriente en la actualidad es de 2,40 m. ϕ \times 14 m. No obstante, la revista "Rock Products", de julio pasado, menciona la Dundee Cement Co., que acababa de instalar un molino de cemento de dos compartimientos de 12' m. ϕ \times 36' (3,60 m. ϕ \times 10,8 m), con motor de 2,500 CV, circuito cerrado en la primera y segunda cámara, enfriamiento interno por pulverización de agua, suministrado por la casa Smidth.

La pulverización de agua parece dificultar la formación de plaquetas.

Las instalaciones "Concentra" han dado excelentes pruebas con reducciones de cerca del 20 % en la fuerza motriz consumida por la tercera cámara (véase fig. 9).

Lo mismo se dice de las placas cónicas autoclasificadoras. No basta, no obstante, esta autoclasificación; es necesario que a lo largo del molino las relaciones entre las superficies específicas del cuerpo molidor y del material molido estén en correspondencia, pues así el trabajo útil es mayor, la elevación de temperatura menor, la progresión de la molienda se hace correctamente y las bolas o cypebs tienen menos tendencia a almohadillarse con el exceso de finos. Esto es, sobre todo, aplicable a las grandes finuras de 3.500 Blaine para arriba, ya que de otra forma, la energía de caída de los cuerpos molidores se transforma en calor y no en trabajo útil de trituración.

Por esta razón no es conveniente, en un molino preparado para molienda corriente, querer fabricar económicamente cementos muy finos sin alterar las cargas y las dimensiones de los cuerpos molidores. Un molino preparado para moler cemento normal, falla cuando se le exigen grandes finuras.

Es de la mayor importancia la regularidad de alimentación, en tamaño y cantidad, utilizando los nuevos aparatos dosificadores.

Para conocer convenientemente las condiciones de trabajo de los molinos, se aconseja hacer determinaciones de molidabilidad del clínker con el aparato especial que nos indica el trabajo realizado en la obtención de la finura. Este trabajo se expresa en millones de centímetros cuadrados por kWh ($\text{cm}^2 \cdot 10^6/\text{kWh}$), que designamos por a .

En el control del trabajo del molino se puede hallar el mismo coeficiente, conociendo la superficie específica del cemento y el consumo de energía. Sea esto a' .

Si $\frac{a}{a'} > 1$, el molino trabaja bien.

Si $\frac{a}{a'} < 1$, el molino no trabaja bien.

Se están modernizando muchas instalaciones, montando antes de los molinos antiguos, molinos primarios de gran diámetro, que trituran el clínker hasta residuo de 75 % sobre 900 mallas por centímetro cuadrado, siendo en varias instalaciones equipados con placas cónicas los molinos secundarios. En conjunto, la economía de fuerza motriz es apreciable.

La figura 10 presenta, según Bellwinkel, resultados obtenidos por los 50 molinos ensayados, donde se pueden ver las tendencias actuales.

La figura 11 presenta un gráfico semejante, asociado al ensayo de molturabilidad. Nótese que la mayoría de los molinos Compound con buenos rendimientos instalaron placas cónicas.

Finalmente, la figura 12 muestra bien claro que para las grandes finuras los molinos en circuito cerrado constituyen la gran mayoría.

En lo que respecta al consumo de energía, relacionado con la finura, utilizando circuito abierto o cerrado, el diagrama de Bomke nos muestra los resultados a que se ha llegado (fig. 13).

Conclusión

Para reducir los costes de la molienda del clínker se ha procurado racionalizar esta operación mejorando el escalonamiento de los cuerpos moledores en relación con el estado de fragmentación en que se encuentra el material a moler a lo largo del molino.

Se debe distinguir entre la producción en masa del cemento corriente hasta una finura de 3.000 cm²/g Blaine (que en Europa se realiza más en circuito abierto y en América en circuito cerrado) de la producción de cementos muy finos en que el circuito cerrado es más racional y económico.

bibliografía

BÖERNER: *Sichter oder Vesbundmühlen*.—Revista "Zement-Kalk-Gips", abril 1956.

BELLWINKEL: *Neureitlichz Mahalanlagen*.—Revista "ZKG", diciembre 1952 y enero 1959.

KRAUS: *Verbesserte Mühlenpauesungen*.—Revista "ZKG", octubre 1952.

SLEGTEN: *Kugelmühlen Probleme*.—Revista "ZKG", junio 1954.

ANSELM: *Stand der Zementmahlung*.—Revista "ZKG", febrero 1956.

MITTAG: *Mühlhäuser platten in Rohrmühlen*.—Revista "ZKG", mayo 1956.

BOMKE: *Kohlen und Zement*.—Edición 1958. Bauverlag Wiesbaden.