

601-1 CUESTIONES SOBRE MOLINOS Y MOLTURACION

J.M. Tobío, Licenciado en Ciencias.

La industria del Cemento es subsidiaria -en alto grado- de la molturación y sus problemas. La molienda de productos cumple en la industria cementera dos finalidades igualmente importantes: por una parte, reducir las materias primas a un grado de finura conveniente y, por otra provocar la mezcla íntima, homogénea y uniforme entre productos sólidos de clase diferente. Esto último es particularmente importante en los sistemas de fabricación de portland por vía seca. Puede decirse, sin temor a exageraciones, que una fábrica de cemento es una gran instalación de molinería.

Tres son las fases del proceso donde interviene la molturación en forma más acusada. En primer lugar, en la preparación del crudo; luego, en la pulverización del carbón empleado para la cocción y, finalmente, en la transformación del clinker obtenido en cemento. Toda instalación cementera bien montada debe poseer una serie de artificios de molturación adecuados a cada uno de los tres casos antes mencionados, pero cabe también la posibilidad de emplear un mismo aparato para varias aplicaciones.

M o l i n o s

El número de tipos es prácticamente infinito. Puede decirse - que cada casa constructora posee modelos propios para los cuales reclama las mayores ventajas. Aparte de los molinos de muelas, cuya época ha pasado ya, puede decirse que los sistemas de molienda empleados en la industria del cemento son derivados de un tipo fundamental: el molino de - bolas. No es preciso hacer mención a sus características funcionales ni a su construcción. Variando la relación entre la longitud y el diámetro

- INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO -

del tubo, la clase y cantidad de la carga contenida en el mismo, el tipo de recubrimiento o blindaje y algunos otros detalles, se llega a las distintas clases de aparatos que vamos a considerar separadamente.

Tomemos, en primer lugar, el molino de bolas simple, con o sin dispositivos de separación de polvos por medio de aire. Ha sido muy empleado, pero el producto obtenido no presenta las características debidas en cuanto a finura y homogeneidad.

El grupo formado por molino preparador y molino de refino, supuso una notable mejora para la trituración y mezcla de los diferentes componentes que entran en la composición del crudo. Sin embargo, los resultados, desde el punto de vista de la finura vienen limitados por un cierto grado mínimo por debajo del cual es imposible descender. Se producen fenómenos de almohadillado y otros que rebajan el rendimiento, ya de por sí pequeño, de la molturación. Hemos de recordar, a este respecto, que la operación de moler es una de las que ofrecen un rendimiento más deficiente. Ciertamente es que el cálculo de la energía necesaria para reducir un material hasta un cierto grado de finura no es cosa fácil, pero todos los investigadores coinciden en afirmar los bajísimos rendimientos de la molienda.

Si la molturación del material se hace en seco, la humedad que tiende a apelmazar las partículas, constituye un inconveniente. Sin embargo, en la práctica esto se obvia parcialmente en virtud del calentamiento producido por fricción en el interior del molino, que tiende a completar el secado del material. Basta para ello prever salidas para el vapor de agua formado. Estos conjuntos para molienda gruesa previa seguida de un refino o acabado, sobre todo en el caso de emplear como carga molturadora cilindros en vez de bolas, constituyen un expediente que se aproxima mucho a la perfección, especialmente en lo que respecta a homogeneidad de las mezclas. Hay que tener presente que para lograr una mezcla perfecta, la alimentación de las distintas materias debe regularse cuidadosamente. Esta regularidad puede fallar a menudo cuando las características físicas del crudo se alteran ligeramente.

El molino de bolas o cilindros.

Puede definirse este tipo de molino con "un molino de martillos a choques múltiples". Consta de una carcasa de fundición provista de gruesas planchas de acero especial, dispuestas en "escalera", como indica la fig. 1. Los cilindros o bolas que hacen de martillos, son bastante pesados (2 a 3 kg.) y, desde luego, no pueden pasar por los espacios dejados entre cada dos chapas. Por el contrario, el material molturado puede atravesar estas hendiduras, por lo cual se disponen uno o varios tamices concéntricos a la estructura. De este modo se produce una especie de molienda en circuito cerrado puesto que los finos atraviesan el tamiz (que suele ser del número 30 al 60) mientras que los gruesos vuelven a entrar en la verdadera cámara de molienda. La alimentación del crudo se hace por orificios adecuados situados en las cabezas del molino o por el interior de los muñones.

Un grave inconveniente de estos molinos es el desgaste rápido de los tamices. Esto se ha subsanado, en parte, disponiendo, entre el cuerpo del molino y el tamiz, unas chapas de palastro gruesas, provistas de perforaciones (línea de trazos en la fig. 1) que evita el impacto de los trozos gruesos de material sobre las mallas del tamiz. Otra dificultad de consideración es la sensibilidad de estos molinos. Así, en el caso de una alimentación demasiado fuerte, por aumento en la dureza del crudo o por un exceso de humedad en el mismo, puede producirse el "atascamiento" de los tamices, lo cual repercute sobre el rendimiento.

Antes de la adopción de los llamados "tubos de refino", el molino anteriormente descrito cumplía las dos funciones. Pero el rendimiento en finos no era muy bueno, por lo cual en la actualidad, el molino de cilindros (o de bolas o cylpebs) descrito, queda relegado a la función de molino preparador, disponiéndose, en serie con el mismo, el molino secundario o de refino.

Veamos ahora algunas notas sobre los molinos de bolas, en lo que se refiere a la trayectoria de la carga en el interior de los mismos. Cuando un tubo que contiene una carga determinada se pone en rotación, la masa contenida en el mismo tiende a girar con el molino, comportándose como si fuera un líquido viscoso. Así resulta, en el régimen, una posición de equilibrio de la carga limitada por una curva que puede asimilarse a una espiral logarítmica $r = Ce^{u\psi}$; (Curva AB de la fig. 2). La posición de la curva AB con relación a la sección del molino depende del coeficiente C que está a su vez en dependencia con el porcentaje de relleno (carga) del tubo; esta relación no es lineal por lo cual es preciso proceder por tanteos e interpolaciones para hallar la curva AB que corresponde a un relleno dado. La inclinación general de la superficie de equilibrio (cuerda AB) depende:

a) De la velocidad de rotación del tubo; esta dependencia viene dada por el valor del radio vector r, ó más exactamente, por el origen de la espiral que se coloca a una distancia $\frac{g}{\omega^2}$ por encima del eje del molino. (ω = velocidad angular).

b) Del coeficiente de frotamiento interno de la carga (factor u), que viene a ser como la viscosidad del pseudo-líquido constituido por la masa contenida.

c) Del coeficiente de frotamiento ψ que se ejerce entre la carga y el blindaje interno del molino a lo largo de la superficie de contacto. Si el frotamiento es insuficiente, la carga puede sufrir un deslizamiento "en masa", provocando un calentamiento de las superficies de contacto. Este fenómeno dá lugar a la producción de calor, con las consiguientes pérdidas de rendimiento e incluso peligro para el producto que se está moliendo. Por otra parte, como este deslizamiento se produce en sentido inverso al de rotación de la carcasa, resulta parcialmente anulado el efecto de esta rotación, con lo cual los fenómenos mecánicos de trituración vienen condicionados, no por la velocidad de giro del tubo sino

por la velocidad efectiva resultante.

$$N_{\text{eff}} = N_{\text{nominal}} - N_{\text{desliz.}}$$

El peligro de deslizamiento existe, según muchos autores, cuando el valor de φ es:

$$\varphi \geq 0,37 \text{ a } 0,39$$

Actualmente se fabrican placas de revestimiento o blindaje en las cuales φ puede llevarse al valor, $\varphi = u = 1,0$; por lo cual es siempre posible evitar en forma absoluta el deslizamiento.

No debe olvidarse, por ello, que las fórmulas dadas para la velocidad mínima de los molinos se remontan a épocas en las cuales aún no se habían puesto en práctica estos recubrimientos antideslizantes, por lo cual era preciso prever un posible deslizamiento que podría producirse si la velocidad era demasiado pequeña. Así, la fórmula: $N_{\text{nominal}} = \frac{32}{\sqrt{D}}$; da valores demasiado altos. Con placas bien estudiadas, la fórmula \sqrt{D} debe transformarse en:

$$N_{\text{eff}} = N_{\text{nominal}} = \frac{26}{\sqrt{D}}$$

(D = diámetro del tubo)

lo cual supone una reducción de un 20% aproximadamente.

La curva de equilibrio AB divide la sección del tubo en dos regiones: en la inferior, la carga puede existir en masa continua y compacta; por encima de AB, la masa se desagrega y como el pseudo-líquido no tiene cohesión, sus elementos resultan proyectados individualmente según la tangente a la trayectoria circular anterior de cada uno de los fragmentos.

Por el hecho de la proyección de los elementos de carga, el nivel de equilibrio desciende en una cierta magnitud; puede calcularse la proporción de cuerpos en suspensión, y por una nueva curva de equili-

brío libre CD (fig. 2).

La proyección de los fragmentos se hace según curvas que, si se tratase de bolas aisladas, en el vacío, serían parábolas en las cuales todos los elementos y sobre todo los puntos de caída podrían determinarse gráficamente o por cálculo. En realidad, las trayectorias de las bolas (u otros elementos de molturación) resultan un poco más alargadas que las parábolas correspondientes a causa de que cada elemento sufre un empuje por los que vienen detrás del mismo, mientras que los fragmentos de material se hallan, a consecuencia de su débil masa, tanto más frenados o retrasados por la resistencia del aire, cuanto más diminutos son. Existe pues una separación, por encima de la curva CD, de una cierta porción de material que viene limitada por la curva de equilibrio MN, correspondiente a otro coeficiente de frotamiento interno μ' (que puede ser diferente de μ), específico para ese caso particular. Tenemos, en definitiva, en régimen estacionario, una masa continua según CMN, y, por rodamiento sobre la pendiente MN, los trozos más grandes de material tienden a localizarse en los alrededores de N, es decir, donde normalmente deberían caer las bolas lanzadas desde C.

Esta masa de material deberá, pues, estar sometida a un "bombardeo" destructor por parte de las bolas lanzadas violentamente desde la región de C, masa que deberá ser removida y triturada por las bolas que proviene de las regiones más próximas al eje del tubo, las cuales no describen en sus trayectorias más que curvas parecidas a la parábola. Por otra parte, existe también la posibilidad -igual que en cualquier punto de la carga- de que todos los elementos de ésta rueden unos sobre otros actuando por frotamiento sobre los granos de material a moler.

Es de la mayor importancia que todas las bolas o elementos, encuentren, en el punto final de su recorrido, una cantidad de material tal que sea suficiente para absorber, por impacto, toda la energía cinética almacenada en las bolas que sirve para la rotura de los fragmentos. Es -

menester, asimismo, que las bolas de trayectorias extremas tengan sus puntos de caída en las proximidades del espacio N, pie de la carga, so pena - de dedicar dicha energía cinética a una acción destructora sobre el recubrimiento interno del molino. Este fenómeno puede presentarse en los molinos con elevada velocidad de rotación, cuando se pretende aumentar el coeficiente ψ de adherencia entre el revestimiento y la carga para evitar un deslizamiento de conjunto. Se puede evitar esta dificultad actuando en forma - apropiada sobre la carga de relleno del molino y limitando en lo posible el coeficiente ψ a valores moderados.

Todos los fenómenos mencionados aquí a grandes rasgos, han sido objeto de múltiples estudios teóricos y de haberse podido ponerse en forma de ecuaciones de un modo satisfactorio. Estas expresiones podrán suministrar indicaciones muy valiosas, permitiendo la explotación científica y lógica de los artificios de molienda, cuando se conozcan con toda precisión los coeficientes físicos que entran en cada fórmula y los factores estadísticos de corrección que es preciso tener en cuenta en todos los estudios de este tipo. En lo que respecta a los coeficientes físicos tenemos, en primer término, la determinación de las constantes de frotamiento u y u' , para las diferentes cargas y los elementos de las mismas. Prescindiendo de una serie de factores más o menos "misteriosos" que pueden afectar momentáneamente a las variaciones del valor de u , tales como acciones mecánicas, químicas, térmicas y eléctricas (pensemos en el curioso fenómeno de la formación de laminillas o lentejuelas que se incrustan en los cuerpos molturadores, modificando incluso la trayectoria de los mismos) la medida de dicha constante u puede hacerse siguiendo dos caminos diferentes:

1º) De una forma global; en superficie. Para ello, estando parado el molino, con su carga de bolas y material a molturar, se le hace girar lentamente en el sentido de la marcha, con ayuda de palancas, hasta que se produzca en la cámara que se estudia la primera caída de bolas. Debe repetirse el experimento cuantas veces sea preciso para evitar errores debido a falsas caídas ocasionadas por la posición inestable de algunos cuerpos mol-

turantes o por un deslizamiento de conjunto de la carga a causa de un μ insuficiente. El desplazamiento del molino puede medirse perfectamente por el ángulo de giro y mediante la medida final de la inclinación sobre la superficie libre de la carga en el interior. Una posible causa de error puede ser también debida a la falta de homogeneidad de la mezcla como consecuencia de la parada del molino (acumulación de finos).

2º) En forma de promedios; en profundidad. Para ello se hace parar el molino de tal modo que uno de los agujeros de hombre del mismo quede frente a la carga. Se quita con cuidado la compuerta y se van separando con toda delicadeza y uno a uno los elementos molturadores que forman la primera fila. Quitar luego una fila más y otra más, por lo menos, del nivel superior; luego continuar en el fondo de la excavación así conseguida hasta lograr una fosa de sección triangular, una de cuyas paredes será la superficie cóncava del tubo del molino y la otra un talud formado por la carga colocada en su sitio. Operando con sumo cuidado, se puede ir rebajando este talud hasta el límite de inestabilidad, es decir, hasta que se produzca el desmoronamiento. A partir del ángulo del talud que provoque la caída de la carga puede deducirse el valor de μ .

Todo lo anteriormente mencionado puede aplicarse por igual tanto al molino primario (preparador) como al secundario (de refinado). En lo que se refiere a este último, cuya paternidad es muy discutida entre los técnicos, puede decirse que es uno de los aparatos más sencillos de todos los utilizados en una instalación cementera. Un simple tubo -cuya longitud es mayor que el diámetro- parcialmente lleno con una carga de elementos molturadores: bolas de acero o fundición, piedras de río, cilindros de hierro, cylpebs, helipebs, etc. etc. que gira a una cierta velocidad, (sobre la cual se ha discutido y se discute mucho). En realidad, cada constructor ha investigado las circunstancias particulares de la máquina que manufactura y fija esta velocidad, que es óptima para el buen rendimiento del aparato. A través del tubo formado por el molino se hace circular el material a moler que se ve sometido a choques y frotamientos entre las bolas y entre éstas y el recubrimiento interno. Cuando el producto con que

se alimenta un molino tiene un tamaño de grano muy regular y las propiedades del material no varían mucho, puede modificarse y regularse la alimentación de tal modo que, a la salida del tubo de refino no se precisen tamices. Otra originalidad del tubo de refino, al que muchos llaman "tubo Dana" es su gran elasticidad, tanto en lo que se refiere a la producción horaria como a la finura de molienda.

Los molinos tubulares y en especial los de refino, se calientan mucho durante la marcha. Cuando la carga molturadora es de pedernal el calor desarrollado es aceptable y no es preciso tomar precauciones especiales. Las razones fundamentales para que los tubos con carga de sílex se calienten menos que los que contienen cargas metálicas son, en primer lugar sus mayores dimensiones, puesto que la densidad de las piedras es baja y se necesita un gran espacio para las mismas y, por ende, una mayor superficie de radiación. Por otra parte, la finura del material que se exige a estos molinos es bastante menor que la que se busca al sustituir las bolas de pedernal por piezas metálicas; la producción es mayor y por tanto el material permanece menos tiempo en los molinos. Todo lo contrario ocurre en los molinos con carga metálica. En estos, sobre todo tratándose de finuras elevadas (caso de los supercementos) es posible alcanzar temperaturas de 120 a 130°C y aún mayores. Cuando se trata de molinos para crudo el enfriamiento de los mismos es más sencillo - sobre todo en la molturación en húmedo - que en los molinos para clinker. Se han adoptado numerosos artificios para el enfriamiento interno o externo del molino, pero hasta ahora, ninguna de las soluciones es enteramente satisfactoria.

Preparación de cretas puras o arcillosas. Estas masas de origen sedimentario, más o menos duras, contienen casi siempre impurezas formadas generalmente por sílice. En realidad, estos crudos no deberán tratarse más que por vía húmeda. En efecto, la creta es muy refractaria a la molturación en seco, no siendo posible obtener por este procedimiento un crudo adecuado.

Casi todas las cretas se desagran fácilmente por la acción del agua. Una simple operación de desleimiento es suficiente para transformar las en pasta fina. Los desleidores no pueden considerarse como molinos en sentido estricto, por lo que no es preciso mencionarlos aquí. Sin embargo, puede obtenerse una gran mejora de la pasta cruda si, a la salida de los desleidores se la hace pasar por un tubo de refino. En este caso, se trituran los grumos que hayan podido quedar, obteniéndose una pasta perfectamente homogénea que puede manejarse con toda facilidad por medio de bombas. Hay, además, otra ventaja. El crudo así obtenido es de una estabilidad bastante grande, pudiendo mantenerse en los depósitos o balsas, antes de la entrada al horno, sin que se necesite demasiada agitación.

Preparación de margas blandas más o menos arcillosas. Las margas blandas también son susceptibles de la operación de desleído lo mismo que las cretas, si bien el rendimiento de los desleidores es algo menor. La operación resulta bien siempre que el crudo no contenga calizas duras. Si se emplea tubo de refino, lo cual siempre es conveniente, el rendimiento del mismo es bastante elevado y el consumo de fuerza motriz muy pequeño.

Tanto las margas blandas como las cretas son bastante refractarias a la molturación en seco. El tratamiento de estas materias por vía húmeda presenta tales ventajas que resulta muy difícil pensar que tales crudos puedan emplearse en una fabricación vía seca. En el caso de que, a pesar de todo, se quiera intentar la molturación en seco, se recomienda el empleo de un triturador de bolas (o cilindros), acoplado a un separador de aire cuya función es obvia. El material que se introduzca en el molino debe estar bien seco, lo cual constituye también un espinoso problema.

Preparación de calizas o margas de dureza media (en seco). Si los crudos son demasiado compactos para la penetración del agua, puede intentarse una fabricación por vía seca. Para que ésta se lleve a buen término deberá investigarse bien la composición de la cantera de que se dispone y tener la seguridad de que, con dicho material, puede obtenerse una ha-

rina que se caracterice por un residuo máximo de 5 a 10% sobre tamiz nº 200.

La fabricación en seco obliga a una desecación previa del crudo, después de la operación de machacado. Este secado complica mucho la fabricación sobre todo en el caso de arcillas plásticas y eleva el precio de coste por tonelada. Después del secado, los trozos de tamaño inferior a 4 cm. se colocan en silos que alimentan a los trituradores. El contenido en humedad no debe pasar de 1%. La caliza y la materia arcillosa deben estar, naturalmente, en silos separados. La extracción del crudo de estos silos para introducirlo en el dispositivo de alimentación del molino también constituye un problema de consideración.

La molturación se hace, en general, por medio de un grupo de dos molinos; uno preparador y otro de refino, este último de uno o dos compartimientos. Actualmente se tiende a unir estos dos molinos en una sola unidad que es el molino compuesto, es decir, preparador-refinador. Esto, y el empleo de elementos molturadores perfeccionados (cylpebs etc.) permiten mejorar considerablemente tanto la finura como el rendimiento. Si, por formarse adherencias y almohadillados de las bolas no es posible emplear el molino compuesto, puede apelarse al molino de bolas acoplado a un separador de aire.

Preparación de crudos duros (en seco). Las margas y los esquistos necesitan un tratamiento similar al que acabamos de describir. La desecación de estas materias es, en general, más fácil que la de los crudos medios. Los cuerpos duros consumen más fuerza motriz en las operaciones de machaqueo y preparación antes del refino. Sin embargo, en lo que respecta a éste, dichos crudos son muy susceptibles a la acción de los cuerpos molturantes metálicos, obteniéndose un buen rendimiento en la producción de finos. No puede decirse lo mismo de la homogeneidad. En efecto, el crudo ya molturado depositado en los silos de alimentación al horno responde, en cuanto a su composición media, a las fórmulas químicas previstas. Pero su heterogeneidad es grande. Es preciso provocar un mezclado perfecto dentro de los silos lo cual se verifica (cuando se hace) por inyección de aire comprimido.

Preparación de caliza o margas de dureza media (en húmedo). Estos crudos de dureza media se prestan bien a la fabricación por vía húmeda. Para ello es preciso un machacado previo lo mismo que en el método en seco. Por el contrario, se suprime aquí la operación de secado, lo cual es una gran ventaja. La molturación ha de hacerse, necesariamente, en los molinos compuestos o en el conjunto preparador-refinador, trabajando siempre en húmedo. Los molinos empleados son idénticos a los utilizados en la molturación en seco salvo algunos detalles para asegurar la circulación de la pasta y evitar ciertos inconvenientes que pueden producirse en los cuerpos de preparación. El agua se introduce, perfectamente dosificada, en el molino, teniendo en cuenta que su proporción debe ser de un 40% aproximadamente. Después de la molturación, la finura es tal que el crudo deja un residuo de 5-10 % sobre tamiz de 4.900 mallas (suponiendo la pasta seca).

Crudos duros (procedimiento húmedo). La preparación de estas materias primas se hace en forma análoga a lo que queda descrito en el apartado precedente, es decir, empleando el equipo: machacadoras, dosificador, molino preparador y molino de refino (o molino compuesto). Como es lógico, aquí también sobra la operación de secado.

Las materias primas deben introducirse en los molinos con el agua necesaria. En el caso de que se disponga de arcilla, una parte de ésta puede llevarse a los desleidores, introduciéndola con un 60% de agua, en los molinos. En la molturación húmeda de estos crudos duros se logran muy buenos rendimientos pues, aunque el agua no puede penetrar en su masa, al parecer impregna la superficie de los gránulos haciéndolos más desintegrables por los elementos molturadores. La proporción de agua necesaria para la molturación de crudos duros debe encontrarse en los alrededores de 35%, pudiendo descender, en algunos casos, a 30%.

La finura alcanzable en la molienda en húmedo de los crudos duros es prácticamente ilimitada. La única limitación es, evidentemente, el consumo de fuerza motriz que repercute sobre el coste de fabricación del cemento. La finura viene condicionada por la proporción de agua empleada.

- INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO -

La homogeneidad de las pastas obtenidas es casi perfecta. Su aptitud para la cocción también es buena.

Cualquiera que sea el procedimiento de molturación seguido se producen inevitablemente irregularidades en la dosificación de los crudos (tanto en calidad como en cantidad) que perjudican a la homogeneidad de las pastas. Sin embargo, dada la longitud de los modernos tubos molturadores y las contracorrientes que en su interior se producen -sobre todo en la molienda en húmedo- hay que suponer que dichas irregularidades se compensan, al menos en parte, y la uniformidad del producto de salida no es tan mala como sería de esperar. De todos modos, las papillas que salen de los molinos (o la harina seca, en otro caso) pasan a los silos de alimentación del horno, en los cuales se verifica una última homogeneización. Nada hemos de decir de la corrección de los crudos que se verifica en las distintas balsas, puesto que esto se sale del objeto principal de estas notas.

Preparación de los combustibles (molienda del carbón) La segunda fase de molinería a la que hacíamos mención al comienzo de este trabajo es la preparación del carbón pulverizado. Nada hay que decir de los hornos alimentadores con combustibles líquidos puesto que, al menos en Europa, el polvo de carbón es el universalmente empleado. La preparación de este polvo tiene el mayor interés tanto técnico como económico. Partiendo de la base de que se necesita alcanzar en la zona de cocción del tubo una temperatura muy elevada (del orden de los 1.500 °C) y que el precio actual de la hulla no es despreciable ni mucho menos, el proceso de preparación del carbón adquiere una importancia primordial.

Para que el proceso de cocción dentro del horno pueda ser llevado de una manera perfecta se requieren, entre otras, las siguientes condiciones: Combustión rápida y completa del polvo de carbón; temperatura elevada del dardo; llama bastante radiante para favorecer los cambios de temperatura. Todo esto lleva consigo determinadas exigencias en el combustible tales como: sequedad completa del mismo; una finura de grano suficiente para que el polvo de carbón pueda ser comparado a un gas; una proporción

de aire de combustión muy cercana a la teórica; mezcla regular y perfecta del combustible (polvo) y del comburente (aire), es decir, una buena carburación; temperatura bastante elevada del aire de combustión.

Es evidente, en primer término, que la humedad contenida en el carbón tiende a rebajar la temperatura de la llama. Hay que contar una pérdida de calorías (unas 250 por kg. de agua) destinadas a elevar la temperatura del agua hasta la de salida de los gases por la chimenea (cerca de 250°). Por otra parte, la conversión de este agua en vapor consume también calor (537 por kg. de agua) que se pierde totalmente. Todo ello tiende a enfriar considerablemente el dardo.

La finura de molido tiene una gran importancia sobre la llama misma y sobre la formación de anillos e incrustaciones sobre la camisa refractaria del horno. Con un carbón finamente pulverizado la combustión se produce enteramente en la fase gaseosa (suspensión aire-carbón) y las cenizas son arrastradas, en su mayor parte, por los gases de salida.

Si el carbón se encuentra en un grado de división suficientemente grande, las partículas del mismo se mezclan íntimamente con el aire de combustión, ardiendo casi instantáneamente y consumiendo una cantidad de oxígeno (aire) muy cercana a la teórica, o lo que es lo mismo, llegándose a una temperatura máxima de la llama. No conviene exagerar, sin embargo, en cuanto al grado de finura de las partículas de carbón, puesto que si éstas estuviesen en estado molecular, arderían como un gas, perdiéndose entonces la mayor parte del poder radiante de la llama debido, como se sabe, a la incandescencia de los pequeños gránulos de carbón al rojo.

En cuanto al aire de combustión, hay que recordar que el aire primario, el empleado para la insuflación del combustible, no debe estar a una temperatura muy elevada para evitar inconvenientes (incluso inflamación espontánea) durante el transporte del aire-carbón por las tuberías y tobera. Este aire primario viene a representar un tercio del total neces-

ario; los otros dos tercios (aire secundario) deben, por el contrario, estar a una temperatura suficientemente elevada para facilitar la combustión y elevar la temperatura de la llama,

Para la molturación del carbón se utilizó primeramente el grupo: molino preparador de bolas y tubo de refino precedido de un secadero. Este conjunto ha dejado paso al grupo: secadero y molino compuesto de dos compartimientos. El primero de dichos compartimientos lleva una carga de bolas de acero y el segundo contiene piedras de sílex. Ultimamente se ha mejorado el conjunto añadiendo un tercer compartimiento con relleno de cylpebs.

Para simplificar el proceso de molienda y secado se ha buscado, por numerosas casas constructoras, la posibilidad de un molido-secado simultáneos, empleando trituradores pendulares, de rodillos, molinos de gran velocidad, molinos con bolas de acero de un sólo compartimiento y otros artificios que, inevitablemente, han de trabajar con una corriente de aire caliente que actúa de agente de secado.

Según E. Duteyrat, ninguno de estos artificios constituye una solución perfecta. La corriente de aire efectúa una acción selectiva de arrastre del material más fino, lo cual tiene como consecuencia que el producto final contenga menos superfinos, aunque el residuo sobre tamiz de 900 mallas sea el mismo que el logrado con carbón molido según el método clásico (con secado previo). Por otra parte, si la calidad o el contenido en agua del carbón varían de una a otra partida, las propiedades del polvo saliente se modifican en amplio grado y con ello la marcha del horno rotatorio. Todas las ventajas están pues de parte del conjunto: secadero-molino preparador-molino de refino.

Molido del clinker. Antiguamente los clinkers eran mucho más friables que ahora a causa de que la cocción o sinterización no se llevaba tan cerca del punto de reblandecimiento del crudo. Los hornos de hoy dan unos gránulos francamente vitrificados y de una gran dureza y tenacidad, poco

frágiles (a pesar de la vitrificación) y de una considerable resistencia al molido.

Los equipos que se emplean actualmente para la molturación son, con muy pocas excepciones, los formados por un molino preparador de bolas y tubo de refino con carga de pedernal, con o sin tamices. Buscando un mayor rendimiento en la molturación y una mayor finura en el cemento resultante, los constructores de molinos han logrado considerables progresos, sobre todo en lo que respecta a la carga molturadora. Las directrices seguidas para conseguir estas mejoras han sido, principalmente, el aumento de la carga de piezas molturadoras en el tubo y el empleo de piezas de forma especial de mayor eficacia. En este sentido hay que citar la aparición del "cylpebs" tantas veces mencionado en estas líneas, introducido por M. Davidsen después de numerosos ensayos. En cuanto al aumento de la carga se cita la cifra de 20% con respecto a los molinos antiguos y lo mismo puede decirse respecto al aumento de la producción. Para aprovechar los molinos antiguos, lo que se ha hecho es practicarles un compartimiento adicional en el que se colocan los cylpebs. Los resultados de esta mejora pueden verse de una forma gráfica en la fig. 3. En abscisas se dan los tiempos de molienda y en ordenadas los residuos correspondientes, sobre tamiz nº 200. Los resultados corresponden a ensayos verificados en plan de laboratorio, pero con aparatos grandes, por M. Duteyrat. La curva aa se refiere al funcionamiento de un tubo de un solo compartimiento con relleno de pedernal. Tomamos como unidad la producción de este tubo molturador, y como límite de molturación la finura correspondiente a un residuo de 5% sobre tamiz nº 200.

La curva bb corresponde al mismo molino con una cámara adicional que contiene cylpebs. La producción es también = 1 y la finura no se puede controlar con el tamiz 200, es decir, el residuo sobre dicho tamiz es 0,0. Los tiempos, en todas las curvas, van en abscisas.

La curva cc representa el trabajo del mismo tubo cuando la producción es 1,3 y el residuo sobre tamiz 200 es 5%. Como puede apreciarse, al aumentar el rendimiento disminuye la finura.

En los molinos bi-cámara se ha buscado que resulte una curva de finuras lo más regular posible para lo cual lo que se hace es que el segundo compartimiento sea más largo que el primero. Esto en cuanto a la reforma y adaptación de los molinos simples ya existentes. En los de nueva construcción, el proyecto se hace de tal modo que ambas cámaras -pedernal y cylpebs- contengan el mismo peso de elementos molturadores. En los últimos tiempos, y por razones de espacio y precio, se intenta reemplazar por completo las piezas de pedernal por elementos metálicos.

Las curvas de la fig. 4 corresponden al trabajo de un molino compuesto. La curva d corresponde al funcionamiento de un bi-cámara que contiene, en el primer departamento, una carga de bolas de acero; la segunda cámara lleva pedernal. La producción es también 1,0 y el residuo 5 % sobre tamiz 200. La curva e se refiere al trabajo de un molino de tres compartimientos; el primero lleva una carga completa de bolas de acero; el segundo contiene sílex (siendo su longitud unos $\frac{2}{3}$ de la parte de tubo dedicada al refinado); y el tercero va cargado con cylpebs (longitud = $\frac{1}{3}$). La producción de un molino como este es = 2,0 y la finura corresponde a un residuo de 5% sobre tamiz nº 200.

Veamos en la fig. 5 el comportamiento de un molino tri-cámara. La primera sección lleva relleno de bolas grandes de acero y se comporta como molino preparador; las otras dos secciones, que son iguales en longitud, llevan cargas de bolitas de acero (o fundición) y cylpebs, respectivamente. Los resultados corresponden a: Producción = 2,0; residuo = 5%.

El examen de las diferentes curvas representadas en las figs. 3, 4 y 5 muestra claramente la influencia de la naturaleza y de la forma de los elementos molturadores sobre la intensidad de su acción dentro de los molinos.

Para más detalles -incluso constructivos- sobre modernos molinos para clinker puede verse el artículo: "UN NUEVO MOLINO PARA CLINKER", publicado en el Nº 11 de este mismo Boletín (pág. 30), en el cual se da una amplia referencia a un molino "compound" de tres cámaras.

Numerosos especialistas han proyectado y fabricado cuerpos molturadores de las formas más caprichosas y variadas, para ser utilizados como carga en los molinos tubulares, buscando siempre el aumento de la superficie de contacto para un peso igual de carga. No obstante, los resultados logrados no siempre han respondido a las esperanzas concebidas.

El calentamiento de los molinos. Todos los molinos tubulares, especialmente los que contienen cargas metálicas y se dedican a la molturación de clinker o crudos por vía seca, se calientan indefectiblemente. La elevación de temperatura, que puede ser muy considerable, afecta, en una forma u otra, a la acción de las cargas molturadoras. Al principio la acción de la temperatura puede ser favorable pero se llega pronto a un punto en que los efectos son perjudiciales. Es muy difícil fijar este punto de cambio de signo porque depende, entre otras cosas, de la naturaleza del material a moler, de la composición química y del grado de coacción (si se trata de clinker).

Pero, aparte de lo anterior, hay numerosas consideraciones de orden mecánico y constructivo que restringen considerablemente el calentamiento admisible en un molino de bolas. Tenemos, en primer lugar, la cuestión de las dilataciones y contracciones térmicas que pueden atentar contra la construcción misma del aparato. Por otra parte, hay ciertos problemas de engrase que se complican a temperaturas altas.

Aparte de soluciones más o menos ingeniosas para el enfriamiento (riegos de agua exteriores, etc.), la única posibilidad de evitar el calentamiento parece ser el aumento de la producción de los molinos sin variar la fuerza motriz empleada ni la finura. ¿Como puede lograrse esto? Según parece, el tubo molturador aún no ha dado de sí todo lo que debe y, a no dudarlo, aparecerán dispositivos eficaces que eleven su rendimiento rebajando la temperatura de trabajo.

Si se tiene en cuenta que en los tres procesos de molturación: crudo, clinker y carbón, que intervienen en la fabricación de una tonelada de cemento se consumen en números redondos unos 70-75 kwh. de energía, ya se comprende la tremenda importancia que sobre la totalidad del proceso de fabricación de cemento tienen las operaciones de molienda. Cualquier mejora en las mismas ha de repercutir en forma muy acusada sobre el precio de coste del producto. Todo ello justifica pues, cuantos estudios tiendan a elevar la eficacia de los artificios destinados a la operación de moler, que como hemos dicho al principio de estas líneas, es el proceso mecánico de más bajo rendimiento.

Como complemento a las ideas generales que acaban de ser expuestas, indicamos al final una serie de referencias bibliográficas, posteriores en su mayoría al año 1940, relativas a diversas obras y artículos relacionados con la molturación.

BIBLIOGRAFIA

=====

- 1 - Davis: Amer. Inst. Min. Mat. Eng. pág. 250, vol. 61.
- 2 - H. Fischer: Arbeit. Kugelmühlen ZVDI, vol. 48, pág. 437.
- 3 - Coghill y De Vaney: Concrete, 9, 245, 1939.
- 4 - Coghill y De Vaney: Cement Lime Manuf., 9, 163, 1940.
- 5 - Nordberg: Rock Products, Diciembre, 1941.
- 6 - Tavasci y Cereseto: La Chimica e l'Industria, 47, Feb. 1941.
- 7 - Mussgnug: Zement, 17, 183, 1942.
- 8 - Koeltzsch: Zement, 19, 205 1942.
- 9 - Mussgnug: Stahl u. Eisen: 28, Enero, 1943.
- 10 - Dawley: Cement Lime Manuf., 1, XVII, 1944.
- 11 - W. Anselm: "La Fabricación del Cemento". Barcelona 1944.
- 12 - Fagerholt: "Distribución granulométrica de partículas en los productos triturados con molino tubular". Copenhague, 1945.
- 13 - Chassevent: C.R. Acad. Sci., 223, 243, 1946.
- 14 - Slegten: Rock Products, 119, Enero 1947.

- INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO -

- 15 - Witt: "Tecnología del Cemento Portland", Nueva York, 1947.
- 16 - Epstein: J. Franklin Inst., 471, Diciembre, 1947.
- 17 - Rey: "Monografía de Lab. d'Etude des Silicates", Noviembre 1947.
- 18 - Jager: La Technique Moderne, 357, Noviembre, 1947.
- 19 - Taniyama: Rev. Mat. Constr., 379, 207, 1947.
- 20 - Wolfe: Rock Products, 119, Enero 1947.
- 21 - Anónimo: Compressed Air Magazine, Octubre, 1947.
- 22 - Lenhardt: Rock Products, 142, 1948.
- 23 - Duteyrat: Mines, Carrières (Fr.), 224, Junio 1948.
- 24 - Chassevent: Chim. and Ind., 4, 374, 1947.
- 25 - Chassevent: Rev. Mat. Constr., 318, 1947.
- 26 - Avery: Pit and Quarry, 60, Diciembre 1948.
- 27 - Bulbena: Cemento-Hormigón, 318, Diciembre, 1948.
- 28 - Duterte: Mines, Carrières (Fr.), 7 Junio, 1948.
- 29 - Lenhardt: Rock Products, 51, Octubre, 1948.
- 30 - Anónimo: Mines, Carrières (Fr.), 9, Marzo, 1948.
- 31 - Dubuisson: Rev. Mat. Constr., 3, Enero, 1948.
- 32 - Taggart: "Manual para la preparación de minerales", Nueva York, 1948.
- 33 - Vian: Cemento-Hormigón, Marzo-Abril, 1948.
- 34 - Slegten: Rock Products, 118, Febrero 1949.
- 35 - Schmid: Zement-Kalk-Gips, 66, Abril 1949.
- 36 - Anónimo: Rev. Mat. Constr., 127, Abril 1949.
- 37 - Nordberg: Rock Products, 127, Agosto 1949.
- 38 - Gosset: Equip. mec. Min, Carrières, grandes Entrepr. (Fr.) 5, Junio 1949.
- 39 - Bulbena: Cemento-Hormigón, 3, Enero, 1949.
- 40 - Lomas: Intern. Chem. Eng., 461, Octubre 1949.
- 41 - Holborough Works; Cement Lime Manuf., 15 nº 5, 1949.
- 42 - Duteyrat: Rev. Mat. Constr., 103, Marzo; 135, Abril 1950.
- 43 - Fobeleta: Rev. Mat. Constr., 173, Mayo 1950.