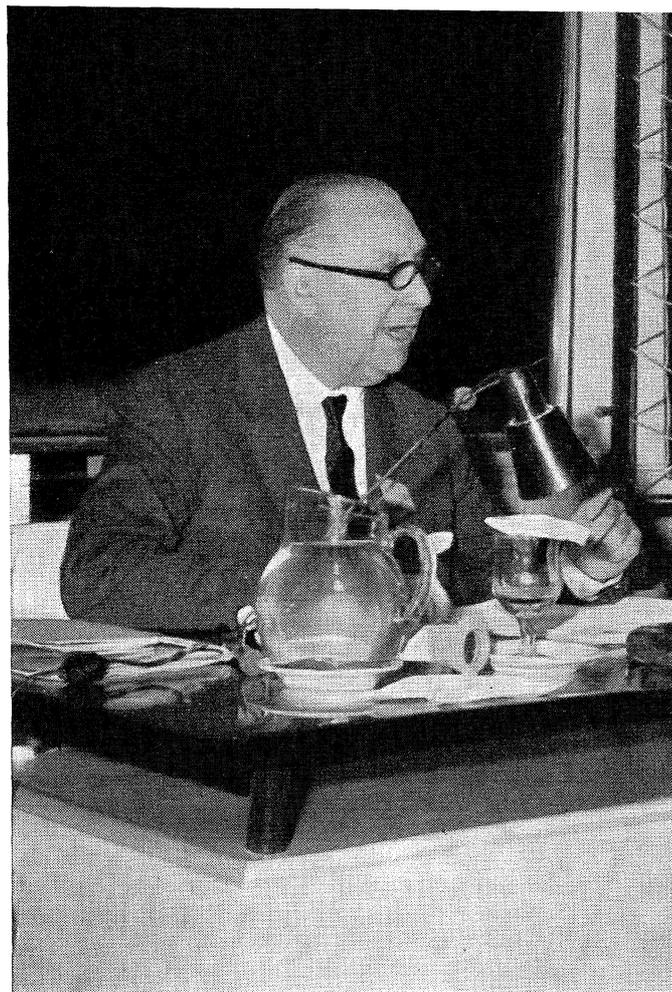


5.2 Hornos verticales

SEBASTIAN CARPI VILAR

Dr. Ingeniero Industrial
Presidente de Cementos Turia, S. A.,
de Cía. Catalana de Cementos Portland, S. A.
y de Hispano-Suiza de Cementos, S. A.



índice

- I. COMPARECENCIA
- II. LA TECNICA AL SERVICIO DE LA ECONOMIA
- III. ALGO DE HISTORIA
- IV. LA HOMOGENEIZACION EN VIA SECA
- V. EL HORNO VERTICAL VUELVE POR SUS FUEROS
- VI. LA FABRICACION CON HORNOS VERTICALES CONVENCIONALES
- VII. AUTOMATIZACION DEL HORNO VERTICAL
- VIII. APARICION DEL CRUDO NEGRO
- IX. PROCESO DEL CRUDO NEGRO; MOLIENDA SIMULTANEA Y SEPARADA; LA CASCARA
- X. EL PORVENIR QUE ESPERA AL HORNO VERTICAL
- XI. CADA FABRICA ES UN MUNDO
- XII. LA RESPONSABILIDAD DE LOS TECNICOS

I. Comparecencia

A la Dirección del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, con la inquietud que define su bien cimentada ejecutoria, le pareció oportuno abordar el tema de los «Hornos verticales», que ha sido distinguido con capítulo aparte en el programa de estos IV Coloquios de Directores y Técnicos de Fábricas de Cemento, cosa que merece nuestro aplauso; en lo que no podemos mostrar la misma conformidad es en la designación del Ponente para este tema. Indudablemente fue inspirado por el mejor deseo y, por eso, aceptamos el honor, pero sabiendo el valor de nuestras propias fuerzas, cuya flaqueza conocemos mejor que nadie, debilitadas como consecuencia de la deformación profesional que se produce en el ingeniero al ejercer puestos de mando ejecutivos, circunstancia que seguramente no se pensó al confiarnos la misión que hoy nos disponemos a cumplir haciendo un esfuerzo, para ponernos a la altura de las personalidades que con tanta preparación se han dado cita en esta casa para tratar por cuarta vez de los viejos problemas, las nuevas ideas y los reales progresos inherentes a la fabricación del cemento.

Por ello, a fuer de sincero, consciente de la obligación que me incumbe y el respeto que debo a los que habéis venido aquí en busca de algún conocimiento, que tal vez por la limitación de los míos no pueda satisfacer, he considerado elemental comparecer acompañado de los hombres que formamos equipo de trabajo alrededor de los hornos verticales.

Por lo tanto, aquí están presentes don Pascual Ferrando Albelda, Licenciado en Ciencias Químicas, Director del Laboratorio de Cementos Turia; don José Cano Denia, Ingeniero Industrial, Director de Proyecting; don Francisco Otero Yustos, Licenciado en Ciencias Químicas, Director del Laboratorio de Hispano Suiza de Cementos; don Patricio Palomar Llovet, Ingeniero Industrial, Director de la Cía. Catalana de Cementos Portland, y otros ingenieros de relevante perso-

alidad y competencia en los dominios del cemento. Debo aludir, además, a don José María García Gil, Licenciado en Ciencias Químicas y Director de Cementos Zaragoza, quien, por su incorporación a la disciplina de los hornos verticales, ocupa también un lugar destacado entre los concededores y, por tanto, defensores del horno vertical.

II. La técnica al servicio de la economía

El mundo de hoy gira alrededor de la economía, sea cual sea el sistema de organización social en pugna y, por consiguiente, tanto si la empresa es pública como privada en su gestión mercantil, tiene que saber si gana o pierde, como consecuencia, quiérase o no, de la instauración inevitable de la mecánica del mercado libre, aunque mixtificado casi siempre por las intervenciones políticas, porque, en definitiva, la soberanía siempre está en manos de los consumidores. Aquí surge el importante papel que la técnica tiene que desempeñar para tratar de resolver los problemas de la producción de toda clase de bienes, y satisfacer las necesidades de la sociedad humana, proporcionando los medios que contribuyan al mejor equilibrio de los factores determinantes de la formación de los precios.

Los avances de la técnica de los hornos verticales permiten obtener un producto de alta calidad con una mínima inversión de primer establecimiento; además de la repercusión que en el costo tiene la correspondiente menor cuota de amortización, hay otros factores que hacen también directamente económica la explotación, por los reducidos consumos de calor en la sinterización y de energía en la molienda de clínker. En cambio, para grandes producciones se aduce como inconveniente el número de personal obrero más elevado que se precisa para atender varias unidades de fabricación, limitadas hasta ahora a 180-200 t/día cada una, además de los laborantes necesarios para mantener el control de forma que esté garantizado el régimen de marcha en las condiciones preestablecidas; a nuestro juicio, esta aparente desventaja queda con creces compensada con la economía financiera que supone el servicio de intereses de la diferencia de inversión de capital que requieren los hornos horizontales, aunque individualmente sean relativamente grandes. Explicaremos mejor nuestro pensamiento si argumentamos con cifras; se admite como prudente el costo de 1.500 ptas./t/año de producción instalada con hornos horizontales, a la altura de unas 1.000 t/día, o sea, aproximadamente para una fábrica del orden de 400.000 t/año; para la misma producción con hornos verticales el primer establecimiento por tonelada/año es sólo de unas 1.000 pesetas. La realidad confirma que la instalación con hornos verticales cuesta 1/3 menos que con hornos horizontales. En el caso propuesto la inversión alcanzará respectivamente la suma de 400 y 600 millones de pesetas, con una diferencia en favor de los hornos verticales de 200 millones. El 6 por 100 de interés representa 12 millones de pesetas anuales como gastos de servicio del mayor capital invertido en la fábrica de hornos horizontales. Por cara que llegue a estar la mano de obra normal y especializada, ¿cuánto personal podría pagarse con este importe? Pues alrededor de 100. Salta a la vista que la objeción de mayor empleo de factor humano en los hornos verticales no resulta antieconómica.

III. Algo de historia

Inicialmente se fabricaba el cemento portland en los mismos hornos verticales empleados en la fabricación de cal y cementos naturales. Estos primitivos hornos se adaptaron para resistir mayores temperaturas, pero trabajaban intermitentemente con muy bajo rendimiento y mucha mano de obra; el tiro era natural.

La limitación de emplear cok o antracita como únicos combustibles en el horno vertical, así como el excesivo personal necesario, indujeron a hacer experimentos sobre nuevos tipos de hornos. El primer horno rotativo que funcionó con éxito fue inventado por Frederick Ransome, en Grays, junto al Támesis, y en los Estados Unidos se empleó por primera vez en Coplay (Pensylvania) en el año 1899.

El impacto de este primer horno rotativo en América fue extraordinario, debido esencialmente al menor empleo de mano de obra, tan cara en aquel país, y a la posibilidad de poder utilizar otros tipos de combustibles, por ejemplo petróleo. Este hecho hizo dejar de lado el horno ver-

tical, poniéndolo en trance de desaparecer, mientras se introducían continuas mejoras en los hornos rotativos aumentando el tamaño y la producción de los mismos, siendo dato curioso de esta evolución una patente de horno horizontal giratorio, de Thomas A. Edison, que en su tiempo fue el mayor del mundo ($45,7 \times 2,44$ m).

Entre 1880 y 1890, el Profesor Hans Hauenschild desarrolló el primer horno vertical continuo con la insuflación de aire por la base inferior, y posteriormente, entre 1910 y 1914, Alberto y Erich Hauenschild, continuadores de la obra de su padre, dieron nuevo impulso al horno vertical, dando un paso decisivo, con el estudio, proyecto e introducción de la parrilla giratoria patentada para la extracción automática del clínker con un gran ahorro de mano de obra. Este primitivo horno de Hauenschild, de forma cilíndrica, tenía $7 \times 2,50$ m \varnothing y una producción de 20 t/día.

Debido a la competencia, motor de todos los progresos y a las exigencias de mejores calidades de cemento, fueron introducidas en el horno vertical sucesivas mejoras que subrayaremos después, hasta llegar al perfeccionamiento del horno de cuba clásico, que permite actualmente la obtención de clínker y, por tanto, de cemento de alta calidad.

Al hablar de la calidad, nos referimos al moderno horno vertical automático de gran rendimiento, porque hay que tener en cuenta que la mayor parte de los hornos verticales existentes en el mundo no han superado aún el nivel técnico de los últimos veinticinco años. Es tanta la diversidad de hornos y tan grande el retraso de algunos, que todavía en el año 1961 decía Hans Eigen en un artículo sobre la economía térmica del horno vertical, aparecido en la revista *Silikattechnik*: «Creemos que en la actualidad se impone con urgencia modificar los procedimientos corrientes de la alimentación de los hornos (vagonetas, volquetes), sustituyéndolos por otros que permitan efectuar una carga continua y regular...»

A título de orientación indicaremos con cifras estadísticas de los años 1959-60 que en Asia había 16 hornos verticales frente a 342 horizontales; en Oceanía, 4 verticales contra 42 horizontales; en África, 11 contra 93; en América del Norte y Canadá, 9 para 636 horizontales; en América Latina, 1 por 251, y en Europa, 404 verticales y 708 horizontales. Dato este último que es muy significativo por la parte principal que toma nuestro Continente.

Ateniéndonos a la época antes indicada, la estadística nos dice que en el mundo conocido existen 2.043 hornos horizontales y 445 hornos verticales que producen clínker de cemento portland.

IV. La homogeneización en vía seca

En general, estamos asistiendo al predominio del proceso de vía seca, después de haber resuelto completamente el problema de la homogeneización, hasta el punto que el polvo crudo alcanza tal perfección que las desviaciones del carbonato cálcico quedan dentro de los límites de $\pm 0,1$ por 100, que se logra por el procedimiento de emulsión neumática, bien sea con el sistema de cuadrantes u otras disposiciones similares.

El mucho menor consumo de combustible en «vía seca», en comparación con la «vía húmeda», que tanto porcentaje representa en la formación del precio de coste, ha determinado, salvo casos especiales que lo requieran por la naturaleza de las primeras materias, no sólo el desplazamiento de la «vía húmeda», al estudiar un proyecto, sino también la reconversión a la «vía seca» de las fábricas que trabajan por el procedimiento húmedo; quizá debido a las rigurosas comprobaciones a que se somete el crudo en la homogeneización neumática por «vía seca», el grado de regularidad es igual que en las pastas crudas de la «vía húmeda».

La regularidad en la homogeneización del crudo ha contribuido además, de manera decisiva, a mejorar esencialmente las condiciones físico-químicas de trabajo del horno vertical, y dejado abierta la puerta que asegura una buena fabricación.

V. El horno vertical vuelve por sus fueros

El viejo horno vertical tenía tanta personalidad por sus virtudes intrínsecas que, después de casi olvidado, ha vuelto por sus fueros.

La «Comisión Inspectoral del cumplimiento de las normas vigentes de la Unión Alemana de Fabricantes de Cemento», con su autoridad indiscutible, hizo público en 1957, según datos de valores medios obtenidos, que el primer lugar entre los cementos PZ-425 procedía de un horno vertical, y que entre los 75 fabricantes que producían PZ-325 había 19 de hornos verticales de un total de 24 fábricas con hornos exclusivamente verticales. Después de esta conclusión, no es ningún atrevimiento afirmar, una vez más, que el clínker que puede obtenerse en un horno vertical es de primera calidad. (No estará de más señalar que las Normas Alemanas DIN 1164 son más exigentes que las nuestras actuales.)

Es verdad que la calcinación en horno vertical es de por sí más racional y ventajosa porque se basa en mejores principios termo-técnicos. Por esto, sin duda, Alberto Hauenschild creía en el horno vertical de cemento. Sin embargo, pocos, más bien investigadores que dedicados a la práctica de la fabricación, seguían teniendo fe en el horno vertical, aun viendo los progresos que entonces presentaban los hornos horizontales rotativos.

Las dos generaciones de los Hauenschild trabajaron durante toda su vida y dedicaron su actividad con perseverancia a la instalación y funcionamiento de los nuevos hornos verticales. Sus ideas y sus esfuerzos culminaron, entre otras muchas, en innovaciones, que después han sido la base del desarrollo de los modernos hornos verticales automáticos de gran rendimiento, como son «los dispositivos mecánicos de alimentación» del horno, «la insuflación del aire por la parte inferior» de los hornos, «las esclusas de salida de clínker» y «la invención patentada de la parrilla giratoria» de descarga automática; cosas todas éstas consagradas por la práctica y perfeccionadas con el tiempo.

A estas conquistas hay que añadir otras dos que completan el cuadro de adelantos que enriquecen la técnica del horno vertical. Una de ellas se debe al Dr. Spohn que, como consecuencia de sus experiencias en Blaubeuren, dio forma cónica al tragante del horno vertical que hasta entonces era todo cilíndrico. Entretanto apareció en Suiza, el año 1947, otro gran hallazgo, el plato granulador, que ha sustituido con gran ventaja a todos los procedimientos de dar forma a las primeras materias y al combustible, siendo, hoy por hoy, la máquina más racional para alimentar los hornos debidamente; con ello el horno vertical recibió un nuevo y vigoroso impulso, como consecuencia del tamaño y uniformidad de los gránulos de lo que tantas ventajas se derivan.

La larga y esforzada andadura de medio siglo que ha sido preciso superar partiendo del molde clásico del horno vertical primitivo, ha conducido a la brillante posición actual que corresponde por derecho propio al moderno horno vertical.

VI. La fabricación con hornos verticales convencionales

Si se diera una uniformidad cien por cien en la preparación del crudo hasta la formación de los gránulos, podría funcionar un horno sin operarios, sin dispositivos de regulación y, sin embargo, se obtendría un producto uniforme y siempre de primera calidad. Pero la realidad ofrece composiciones físicas y químicas de minerales generalmente muy irregulares, que requieren medios técnicos y una cuidadosa observación para acercar el proceso al estado ideal.

Así, hay que procurar la molienda del crudo de 8 a 12 por 100 de residuo sobre 4.900 mallas por centímetro cuadrado y de 0,2 a 0,3 por 100 de residuo sobre 900 mallas, de forma que, teniendo la finura influencia tan importante en la calidad del clínker sinterizado en horno vertical, no impida, por contener exceso de partículas finas, mantener el grado de porosidad de los gránulos, cuyo límite crítico, según Klatt, está en el 30 por 100.

La homogeneidad del crudo en CaCO_3 no debe tener oscilaciones superiores a $\pm 0,2$ por 100. Ahora bien, si las variaciones de los componentes ácidos del crudo son apreciables será necesario, además, llevar el control del C. S. (coeficiente de saturación de cal) manteniendo su posible constancia en evitación de modificaciones en el consumo de carbón. Un M. S. (módulo de silicatos) por encima de 2,5 produce perturbaciones en la marcha del horno según nuestra experiencia; tampoco el M. F. (módulo de fundentes) debe pasar de 2,00, agregando mineral de hierro o cenizas de piritas tostadas si precisa. La homogeneización neumática por el sistema de cuadrantes es suficientemente exacta y los costes de inversión y de servicio son, por lo menos, tan favorables como los otros sistemas de homogeneización.

No todos los combustibles son aptos para utilizarlos en el horno vertical convencional, lo que constituye una limitación para su empleo. Excluidos los líquidos y gaseosos, ha de considerarse, entre los sólidos, su potencia calorífica, cenizas, volátiles, inflamabilidad y granulometría.

Al horno vertical convencional le convienen carbones de gran poder calorífico, pocos volátiles y pocas cenizas. Los volátiles destilan en la atmósfera reductora que antecede a la clinkerización y se pierden sin quemar, por lo que su contenido debe ser inferior al 8 por 100; los tipos de carbón más apropiados son las antracitas, los coqs o la mezcla de ambos.

La proporción de cenizas debe ser la más baja posible, porque como los carbones que se utilizan son «menudos» tal como vienen de la mina, sin moler, resulta difícil, por no decir imposible, calcular con antelación un coeficiente de saturación determinado, debido a la irregular distribución de las cenizas y a que éstas no se combinan totalmente.

No cabe duda que la granulometría del carbón juega un papel importante en el proceso de clinkerización. Siendo más pequeñas las partículas de combustible, tienen sus cenizas más probabilidad de combinarse y se aminoran los perjuicios de las descorrecciones que pueden determinar. A pesar de que ha llegado a decirse que con granulometrías inferiores a 2 mm la marcha del horno no era regular, con la propia experiencia se han encontrado buenos resultados con «menudos» de antracita con el 55 por 100 de tamaños inferiores a 1 mm y sólo el 25 por 100 mayor de 2 mm; el clínker resulta más poroso y de enfriamiento más rápido.

La repercusión de la cantidad de cenizas ha sido puesta de manifiesto al mezclar, por ejemplo, cok de petróleo importado de Norteamérica, prácticamente exento de cenizas (0,4 por 100) y granulometría inferior a 0,2 mm en partes iguales con menudos de antracita de 18 por 100 de cenizas; el clínker obtenido ha mejorado su calidad en el sentido de haber aumentado las resistencias del cemento entre el 30 y el 50 por 100. En cambio, no es recomendable el cok de petróleo puro, por su bajo índice de reactividad.

La regularidad de la alimentación de crudo y la proporcionalidad crudo-carbón constante, son fundamentales para el buen funcionamiento del horno. La dosificación no debe tener oscilaciones superiores al 1 por 100. Debe darse preferencia a las básculas continuas de cinta sobre las intermitentes, porque la mezcla crudo-carbón es más perfecta y la producción que se obtiene en los hornos es un 10 por 100 mayor.

Hay que tener la precaución de determinar con frecuencia la humedad del carbón para mantener constante la proporción de combustible sin variar el peso real.

El tamaño óptimo del gránulo formado con crudo, carbón y agua tiene relación con las dimensiones del horno, con la granulometría del combustible, así como con la plasticidad del gránulo. Es importante evitar que los gránulos estallen dentro del horno procurando que tengan la debida porosidad.

Una indicación práctica de buena granulación se tiene si los gránulos recién formados se pueden aplastar con los dedos sin deshacerse. Se favorece la estabilidad aumentando la cantidad de agua sin que ello represente más consumo de combustible, pues el secado se efectúa con los gases de escape cuyo calor se pierde.

Los gránulos se distribuyen en la boca troncocónica o tragante del horno formando un cráter. El material pasa de forma continua por las tres fases sucesivas: de precalentamiento y secado, de descarbonatación y de clinkerización. El espesor de la zona de clinkerización debe ser como máximo de 1 m en el centro del horno, encontrándose a 0,5-1,0 m de la plataforma del horno. Cuando la zona de clinkerización desciende demasiado, el clínker se apelmaza, dificulta el paso del aire, baja el rendimiento del horno y la calidad del clínker. Esto ocurre siempre que hay exceso de carbón o el módulo de fundentes es excesivamente bajo.

Las pegaduras no constituyen problema en el horno vertical; si se forma alguna costra de clínker adherida al refractario, el hornero podrá despegarla fácilmente con ayuda de una barra de hierro. Una fuerte pegadura sólo puede ser debida a una falta de cuidado en la fabricación, por un crudo rico en fundentes o por defectos de dosificación de las básculas.

Después de una parada de 24 horas, puede recuperarse sin dificultad la marcha normal de un horno vertical.

El enfriamiento del clínker tiene dos aspectos: Su casi total enfriamiento producido por la contracorriente de aire que recorre la cuba en sentido ascendente mientras desciende lentamente el material clinkerizado en la parte alta, y la rapidez de enfriamiento al pasar de la sinterización a la fase sólida con la formación definitiva de la textura del clínker. Su disgregación por inversión del SC_2 (silicato bicálcico), que siempre se presenta antes del total enfriamiento, es mayor cuanto más lento se ha producido el tránsito a la fase sólida; dicha disgregación es, en parte, debida a crudos defectuosos y, sobre todo, a la influencia perjudicial de las cenizas del carbón.

El material a la salida del horno consta de granos sueltos y arracimados a temperatura algo superior a la del ambiente, junto con clínker reducido y compacto a veces en estado incandescente, formado en el núcleo central del horno.

Según Anselm, para alcanzar $1.450^{\circ}C$ y, por tanto, conseguir una buena clinkerización, la velocidad aparente del aire en el interior del horno debe ser de 0,5 a 0,7 m/s. A través de la parrilla, que gira de una hasta seis vueltas por hora, puede regularse la descarga del horno por medio de una triple esclusa con accionamiento mecánico o hidráulico para evitar el escape del aire aun trabajando a presiones superiores a las normales de funcionamiento.

En el refractario de revestimiento se distinguen dos zonas; *la de cocción*, en donde da muy buenos resultados y evita pegaduras un refractario con un 70-75 por 100 de alúmina (Al_2O_3). La experiencia con refractarios de magnesita fue negativa por su poca resistencia al desgaste. Para la *zona de enfriamiento*, basta un refractario con 25-30 por 100 de alúmina porque sólo sufre poco desgaste por abrasión.

La duración media del refractario es de dos años. En la parada para cambio del revestimiento y reparación general del horno se invierten unos cinco días, que sólo representa un 0,7 por 100 de pérdida de producción.

El aislamiento de toda la zona de clinkerización y de la parte superior de la de enfriamiento, es conveniente bajo todos conceptos, técnicos y económicos. El gradiente de temperatura del centro a la periferia del horno se acusa menos al contener la radiación, determina un ahorro de carbón que es superior al 5 por 100 y repercute en un aumento de producción.

El balance térmico del horno vertical es muy favorable. Según Narjes, Z. K. G., septiembre 1960, si se le compara con el de un horno Lepol, que también se alimenta con gránulos húmedos, salta a la vista como factor importante y decisivo, aparte de otros conceptos cuyos consumos se compensan, la diferencia en favor del horno vertical en las pérdidas por radiación y convección cuya cuantía es de 120 kcal/kg de clínker.

Los datos que conocemos de orden práctico permiten decir, en cuanto a la economía térmica del horno vertical, que el consumo medio actual es de 800 kcal/kg de clínker. Con el curioso matiz digno de registrarse, que en hornos alimentados por balanzas continuas el consumo se contrae a 780 kcal y llega a 820 kcal cuando las balanzas son intermitentes.

La forma interior del horno ha quedado establecida definitivamente troncocónica en el tragan-te y cilíndrica en el resto. Las dimensiones que han sido aceptadas para hornos de una produc-ción de 180-200 t/día son de 8,5-9 m de altura y 2,40-2,50 m de diámetro interior. La parte có-nica del tragante tiene una altura de 1,5 m y la abertura de la boca, como máximo, de 3 m de diámetro.

VII. Automatización del horno vertical

El moderno horno vertical automático de gran rendimiento no es todavía una unidad de fabri-cación completamente automática; como ocurre en general cuando se habla de automatismos, siempre hay una conjunción de movimientos que se realizan por sí mismos en combinación con mandos complementarios a distancia.

Este es el caso del horno vertical automático que, en su seguro camino hacia su automatización total, consiste en una instalación compuesta de unos elementos automáticos y otros mecaniza-dos, coordinadas todas sus operaciones desde un centro de mando a distancia, que al propio tiempo vigila, registra y controla la marcha de la fabricación.

La automatización y mecanización se contrae esencialmente a la dosificación crudo-carbón, a la granulación, a la alimentación, a la parrilla y a las esclusas de descarga.

Establecida la debida proporción crudo-carbón, ésta se mantiene constante independientemente de la cantidad de alimentación que mediante un potenciómetro se puede regular automática-mente con la temperatura de los gases de escape.

La granulación perfecta requiere que se mantenga constante la proporcionalidad de agua al va-riar la cantidad de crudo de alimentación; el mejor sistema para la regulación automática del agua es la utilización de bombas dosificadoras de émbolo de desplazamiento y velocidad varia-ble proporcional al peso de crudo.

Regulando la velocidad de la parrilla se consigue la estabilización de la zona de clinkerización y, por tanto, de la marcha del horno. El nivel constante del material en el horno se automatiza directamente aumentando o disminuyendo la velocidad de la parrilla según suba o baje el nivel deseado, por medio de aparatos indicadores de nivel electromecánicos con sonda intermitente; de ultrasonidos con emisor y receptor de ondas reflejadas en la superficie del material; e indica-dores de nivel de isótopos radiactivos constituidos por un emisor de partículas y un contador Geiger.

La regularidad de la temperatura de los gases de escape se logra actuando sobre la alimenta-ción o sobre el aire comburente, por medio de aparatos equipados con reaccionador térmico que consiguen una constancia casi absoluta de la temperatura, bien manteniendo un caudal de aire constante que se establece de antemano y regulando automáticamente la alimentación, o bien manteniendo constante la alimentación y regulando automáticamente el aire. Cualquiera de estos dos procedimientos permite estabilizar la zona de clinkerización en el cuello del tragante troncocónico del horno.

La regulación del caudal de aire se efectúa generalmente por medio de una válvula «by-pas» accionada a distancia, pero tiene el inconveniente de ser sensible a la variación de presión. Es más segura y efectiva la regulación de aire, instalando más de una soplante de émbolo gira-torio, que son las que se emplean con exclusividad por ser las adecuadas, accionando una de ellas con un motor de colector o por medio de un variador de velocidad; así se elimina el «by-pas» y se consigue una constancia casi absoluta del caudal, independientemente de las oscilacio-nes de presión.

La observación directa de la zona de sinterización no es posible. El procedimiento rudimenta-rio de introducir una barra de acero atravesando la zona de fuegos para conocer su intensidad será siempre un recurso, pero actualmente ya se utilizan termopares colocados en distintos pun-tos de la envolvente del horno que miden la temperatura del forro refractario; con pirómetros dis-tribuidos a distintas alturas de tal modo que en cada sección transversal del horno hay tres si-

tados a 120°. Las indicaciones de estos pirómetros dan una idea muy aproximada de la situación de la zona de clinkerización y detectan cualquier desequilibrio de la misma. Empiezan a utilizarse aparatos de televisión en circuito cerrado con monitores de rayos infrarrojos que dan directamente en la pantalla una visión de conjunto del fuego y los puntos en que es más o menos intenso.

Las particularidades del funcionamiento de un horno vertical no sólo hacen pensar en alcanzar cada día un mayor y más perfecto grado para su total automatización, sino que, además, se conseguirá en condiciones siempre mucho más económicas que para otros tipos de hornos.

VIII. Aparición del crudo negro

El horno vertical mecanizado, gracias al espinoso camino de trabajo recorrido durante muchos años, había logrado un nivel de perfeccionamiento y desarrollo que le colocaba en rendimientos unitarios de 170 a 180 t/día, con un consumo de calor de 1.060 kcal/kg de clínker. La calidad del cemento fabricado con tales hornos en Blaubeuren era sensiblemente mejor que la media de los cementos alemanes de entonces, que en su mayor parte se fabricaban en hornos giratorios; los certificados de haberlo empleado en la construcción de autopistas alemanas acusan no solamente resistencias elevadas, sino también gran regularidad de fraguado y endurecimiento, y escasa dilatación.

Pero poco antes de la segunda guerra mundial, el menudo de antracita empezó a escasear y los otros carbones que se utilizaron en sustitución ocasionaron dificultades debidas a las cenizas excesivas que contenían. Entonces el Dr. Spohn pensó que el inconveniente de las abundantes cenizas podría superarse moliendo el combustible así como el crudo y homogeneizando la mezcla en los silos. Esta misma experiencia se efectuó en otros sitios; no obstante, todos los demás ensayos se abandonaron, porque por consideraciones teóricas se creía que con ello se aumentaban las pérdidas de calor por CO. Entre las conclusiones a que llegó el Dr. Spohn, padre del «crudo negro», la principal era la de tener que idear una nueva parrilla que no permitiese el paso fácil de la mayor parte de los gránulos clinkerizados que quedaban sueltos con tendencia a colarse por los agujeros de la parrilla clásica.

Los ensayos correspondientes al proyecto de la nueva parrilla se interrumpieron y no prosiguieron hasta 1951 a la vuelta de cumplir el autor sus deberes militares. Resuelta la construcción de la parrilla escalonada, patentada por el Dr. Spohn, se habían alcanzado los objetivos propuestos y, como resultado, que la marcha del horno era más regular y el clínker más negro y mejor oxidado, análogo al mejor obtenido con hornos giratorios. Entretanto se había desarrollado y puesto a punto el granulador de plato, que permitía la preparación del material en nódulos esféricos regulares de cualquier tamaño.

Con el «crudo negro» se encontró inesperadamente un ahorro del 10 por 100 en el consumo de carbón y que era posible utilizar combustibles de inferior calidad, incluso escorias de carbón con 40 por 100 de cenizas. Además, la calidad del cemento había mejorado muy sensiblemente. Así apareció y tomó carta de naturaleza el revolucionario proceso del «crudo negro» para la producción de clínker con horno vertical.

IX. Proceso del «crudo negro»; molienda simultánea y separada; la cáscara.

La técnica de fabricación de clínker con «crudo negro» difiere inicialmente de la del horno vertical convencional, en que también se tiene que moler el carbón, además de las primeras materias, para luego homogeneizar su mezcla convenientemente dosificada. Las cenizas del combustible hay que considerarlas como un componente más y tener en cuenta su composición química a los efectos del cálculo de los módulos del crudo.

Molido el carbón a una finura óptima, que no suele ser idéntica a la finura óptima del crudo propiamente dicho, la combustión se desarrolla según la famosa y discutida ecuación (fórmula) de Hauenschild: $\text{CaCO}_3 + \text{C} = \text{CaO} + 2\text{CO}$. Lo que quiere decir que el carbón también escapa del gránulo aun sin acceso de oxígeno. El óxido de carbono quema al salir del gránulo, en tanto

haya oxígeno. En el gránulo no quedan ni restos de carbono; por eso no es fácil que el clínker se requeme y sea reducido.

La zona de sinterización en el horno ya no es del orden del metro de altura, pues sólo es de milímetros de espesor y está localizada en cada gránulo, en donde va de fuera hacia dentro. Como resultado se obtiene un clínker que exteriormente se ha encogido muy poco, pero que interiormente tiene una estructura concrecionada con muchos huecos que favorecen la oxidación y el rápido enfriamiento. El proceso de sinterización sólo dura pocos minutos. El tiempo de paso a través del horno, que es de unas 6 hr, no quiere decir en ningún caso que el clínker haya estado sometido a la temperatura de sinterización igual tiempo o más que en el horno rotativo. El proceso de sinterización en sí mismo es muchísimo más corto.

El breve tiempo de clinkerización requiere una materia prima muy finamente molida y homogénea; el mayor gasto de molienda en «crudo negro» queda compensado con el ahorro que se obtiene al moler un clínker bien oxidado, poroso, suelto y, además, bien frío.

La finura de molido más favorable para cada combustible se puede calcular por gasificación en corriente de Argón, según una patente reciente.

Para rendimientos óptimos, la materia prima debe ser bastante plástica y los gránulos no deben reventarse ni descomponerse.

El procedimiento del «crudo negro» permite el empleo de carbones pobres con muchas cenizas, sin perjuicio de la calidad del cemento, cuyas resistencias han aumentado considerablemente.

El ahorro de calorías con «crudo negro» es de un 10 por 100 y el aumento de rendimiento de los hornos corresponde al mismo orden de magnitud, puesto que se parte de igual cantidad de aire disponible.

La parrilla escalonada excéntrica, junto con la molienda del carbón, constituyen la clave del proceso de «crudo negro».

Con objeto de no complicar y encarecer las instalaciones, la experiencia industrial del «crudo negro» ha comenzado con la molienda conjunta del crudo y del carbón; algunas fábricas están en servicio y otras en período de instalación proyectadas con la molienda simultánea del crudo y de las primeras materias en un mismo molino.

Creo que cumplo un deber al informar que, precisamente, coincidiendo con la celebración de estos IV Coloquios, se ha encendido, y está produciendo clínker, el primer horno vertical que funciona en España con «crudo negro» y molienda conjunta en la fábrica de Vallirana, de la Compañía Catalana de Cementos Portland. Debemos felicitarlos por este acontecimiento técnico.

Para instalaciones nuevas de mayor importancia, se presenta como más ventajosa la molienda separada del carbón y del crudo, con dos molinos, porque siendo el peso específico del carbón menor que el de las primeras materias, para llevarlo a la finura técnicamente más favorable al moler conjuntamente obliga a sobremoler el crudo con baja sensible del rendimiento de la molienda. La molienda separada, además, ofrece la gran ventaja de poder efectuar con toda precisión la dosificación del crudo y del carbón sobre materiales secos.

Las posibilidades de elasticidad de trabajo que se derivan de la molienda separada prometen buenos e interesantes resultados en la explotación, tanto para el «crudo negro» formado y homogeneizado previamente como para una nueva modalidad que merece estudio y consideración actualmente para nuevos proyectos de fábricas en las que el crudo preparado y el carbón molidos y almacenados separadamente se dosificarían inmediatamente antes de su entrada en el horno, como acontece en el sistema convencional. En la preparación de crudo habría que tener en cuenta la composición de las cenizas del carbón molido.

La realización de semejante proyecto haría necesario instalar un mezclador, que ya está sancionado por la práctica, entre las básculas dosificadoras y el plato granulador que habría de garantizar una homogeneización adecuada de ambos componentes crudo y carbón.

Con esta disposición se tendría la posibilidad de modificar la dosificación del carbón adaptándola a las necesidades del momento para asegurar una marcha del horno más regular, ante una posible variación en la composición del crudo.

Muchas veces las disposiciones más convenientes a una buena técnica encuentran obstáculos de aspecto económico por parte de los propios fabricantes de maquinaria que no quieren perder la oportunidad de realizar una instalación y hacer un negocio, si por cualquier circunstancia de esta índole gana la partida la competencia.

Un nuevo ahorro de carbón de otro 10 por 100 se obtiene con la llamada «cáscara», que consiste en recubrir el gránulo de «crudo negro» con una capa de «crudo blanco» o de crudo sin carbón. La cáscara aísla los gases de escape y el carbón contenido en el gránulo, con lo que se consigue una economía de calor al evitar pérdidas de óxido de carbono.

El complemento del proceso del «crudo negro» con la «cáscara» lleva consigo ciertas complicaciones que, como todo en la vida, mejor o peor, se resuelve.

Obliga por un lado a intercalar un tambor o trómel entre el plato granulador y el horno, cuyo funcionamiento exige una cuidadosa vigilancia para evitar que, en la operación de recubrimiento para proveer de cáscara blanca al gránulo negro, se formen gránulos sólo blancos, exentos de carbón; el tamaño de los gránulos negros es conveniente que sea bastante uniforme, porque si no el espesor de la cáscara blanca de los pequeños gránulos sería mayor que en los grandes y daría lugar a desdosificación del carbón. La cáscara puede servir también para corregir los posibles excesos de dosificación de carbón.

La otra exigencia en cuanto a las instalaciones, que lleva consigo la «cáscara», es que también precisa un silo de reserva para el crudo blanco, con las consiguientes líneas independientes de aerodeslizadores y elevadores.

X. El porvenir que espera al horno vertical

La lenta pero constante evolución iniciada con la mecanización del horno vertical hace cincuenta años, algo más acelerada en los últimos diez años, abre amplias perspectivas que permiten esperar mayor difusión de empleo del horno vertical en el futuro. Las conquistas alcanzadas en la regularidad de la alta calidad que producen, el mínimo consumo de calorías, la más simple y económica automatización, el menor coste de primer establecimiento y de explotación, le ofrecen un porvenir de éxito, gracias al desarrollo logrado, que pone a nuestra disposición una máquina de calcinar que puede ser verdaderamente automática, cuya alimentación y vaciado puede regularse con la temperatura de los gases de escape.

Los hornos verticales en el año 1915 eran cilíndricos de 8 m de altura y 2,5 m de diámetro, tenían los fuegos a una profundidad de 5 m, y alcanzaban una producción de unas 35 t/día, con un consumo de 1.600 kcal/kg de clínker, y con un gasto de 50 m³/min de aire a una presión de 100 mm · c. a.

En el año 1925 continuaba la forma cilíndrica de los hornos verticales; sin embargo, se aumentó su tamaño hasta 11 m de altura y 2,70 Ø, los fuegos bajaron a una profundidad de 6 m y con ello se dobló la producción diaria, siendo del orden de 70 t, con un consumo de 1.300 kcal/kg de clínker, con un gasto de 80 m³ de aire comburente y a 500 mm · c. a.

En el año 1950 los hornos eran ya de forma cónica en la parte superior y el resto cilíndricos; el tamaño quedó desde entonces establecido en 8,5 m de altura y 2,45 m Ø, los fuegos subieron hasta situarse a 1,50 m de la boca; la producción llegaba a 150-170 t/día, con un consumo de 1.100 kcal/kg de clínker y un gasto de 140 m³/min de aire comburente a una presión de unos 1.400 mm · c. a.

Más recientemente se ha consolidado la forma del tragante cónico de los hornos verticales y también sus dimensiones de 8,5 m de altura y 2,40 de Ø, que aparecen como dimensiones ideales y prácticas para alcanzar hoy producciones de 190 a 200 t/día con los fuegos a sólo 0,5-1 m de la boca, consumo de 850 kcal/kg de clínker y 165 m³/min de aire comburente a 1.600 mm · c. a.

Como quiera que el clínker de «crudo negro» se contrae solamente la mitad que en los hornos convencionales, se puede aumentar el diámetro del horno hasta 3 m sin que la zona cónica de combustión se haga muy abierta. Con este diámetro mayor y también proporcionalmente mayor altura se espera que el rendimiento del horno se incremente en relación con la sección, llegando a unas 275 t/día. Producciones mayores no se han alcanzado hasta ahora con hornos verticales.

Queda fuera de discusión la economía de instalación de fábricas con hornos verticales, para capacidades pequeñas.

Aún se discute dónde está la línea divisoria económica que señala la instalación de hornos verticales como de más ventajoso y reducido primer establecimiento, que es precisamente donde empieza la conveniencia de instalar hornos horizontales. Parece que ya se aceptan hasta las 1.000 t/día, con hornos verticales de 200 t/día, como límite de inversión más favorable. Si los hornos aumentan su rendimiento unitario, no sería raro ver subir el «plafon» de capacidad económica de instalación con hornos verticales a magnitudes del millón anual de toneladas, porque por lo que parece ya se apunta a hornos de 3,20 m de diámetro.

En orden a combustibles, se tiene por ahora la limitación (aparte la granulación) de empleo de los que han resultado apropiados. Pero todos sabemos que se prosiguen los ensayos con combustibles líquidos y, una vez resuelta su aplicación, entrarán en juego los gaseosos.

XI. Cada fábrica es un mundo

Sobre gustos no hay nada escrito. Y si encima los gustos o deseos de cada cual se tienen que acomodar a las circunstancias de hecho, con las variaciones incesantes de la técnica, no exentas del aspecto económico que influye en la transformación de las fábricas, habremos de convenir que, así como cada casa es un mundo, también cada fábrica es un mundo, mundo animado en el que siempre se están haciendo cosas.

XII. La responsabilidad de los técnicos

Puestos a terminar, no debemos hacerlo sin manifestar que la misión del técnico tiene elevado rango y es trascendente. De él dependen muchas conquistas en bien del progreso de la humanidad, lo que obliga a entregarse a la disciplina elegida con apasionamiento y también con optimismo, aun sabiendo de críticas anticipadas y de los riesgos que esperan a toda iniciativa.

La técnica evoluciona sin cesar dejando atrás los fracasos y los afanes puestos en acción. Así van quedando trozos de vida; no hay vocación sin valor.

Con este espíritu, predicando con el ejemplo e inspirados en la ilusión de dar un paso más en los dominios de la fabricación del cemento, hemos aceptado el riesgo de hacer el experimento a escala industrial en la fábrica de Meco al aplicar por primera vez dos innovaciones importantes como son, la mayor dimensión de los hornos de 3,05 m \varnothing \times 10 m de altura, que puede dar cada uno 100.000 t/año, la molienda separada del crudo y del carbón. Ello nos permitirá investigar en la línea de lo que creemos interesante.

Sin reservas de ninguna clase estarán las instalaciones dichas a vuestra disposición, y esperamos que el esfuerzo y la inquietud que sentimos por el resultado sean útiles para el futuro de esta industria del cemento, con la satisfacción de haber dado este paso en el suelo de España, nuestra patria.

Más todavía, porque hace poco hemos sabido directamente por conducto internacional muy solvente que ya se dice en Estados Unidos que las futuras fábricas de cemento serán de horno vertical. Démonos, pues, cita para los próximos y siempre gratos Coloquios con el objeto de contemplar lo que diga la realidad.