

- Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento -

34

618 - 25 EL HORNO VERTICAL (Continuación)

(Der Schachtofen)

Wilhelm Anselm.

- - -

B. INVESTIGACIONES MAS RECIENTES

a) Generalidades.

Sentida la necesidad de estudiar de un modo unitario los datos, frecuentemente contradictorios, procedentes de diversos hornos, se ha procedido a dicho estudio, utilizando para ello mis métodos principalmente (6). Trátase de un nuevo camino para poner de manifiesto las diferencias y el desarrollo que presentan los actuales hornos verticales en comparación con los primitivos. Los resultados obtenidos demuestran que el camino es viable. La Tabla 10 indica los datos en que se basa el estudio comparativo mencionado.

Tabla 10

Productividad de los hornos verticales

Nº	Año	Calidad	Producción Tm/día	Consumo de calor
1	1900	1	20	1100
2	1915	1,6	45	1500
3	1925	2,05	80	1300
4	1935	2,6	115	1200
5	1950	3,0	165	1050
6	1950	3,1	190	950
7	1952	3,2	220	900

Constituyen una excepción en este proceso evolutivo los primitivos hornos de tiro natural, con un bajo consumo de calor, como los que funcionan aún actualmente en algunos lugares, si bien con producciones mínimas.

Conviene también estudiar comparativamente la calidad del clinker fabricado, pues tanto ésta como las normas correspondientes han ido mejorando ininterrumpidamente. Previa transformación de las cifras de los primeros años de acuerdo con las normas actuales, resulta que la calidad ha mejorado de 1 a 3,2 en lo que se refiere a las resistencias mecánicas (Tabla 10).

Esta elevación de la calidad no puede introducirse en los cálculos, pero, tiene, no obstante, una gran importancia cuando se trata de hacer una crítica de los modernos hornos verticales. Desempeñan también un papel importante, tanto en el rendimiento como en la calidad, las diferencias de calidad de los combustibles a lo largo de los años. Anteriormente ya se ha indicado hasta qué punto la calidad del combustible influye sobre la producción. En el presente estudio se ha utilizado una calidad única de antracita, con un poder calorífico de 7000.

La construcción del horno vertical ha experimentado también muchas transformaciones, piénsese en el mezclado del crudo molido y del combustible, en el moldeo, en los cierres de esclusas y en los inyectores empleados. Se han considerado objetivamente todas estas diferencias, de modo que sólo queda un pequeño número de valores realmente comparables. A pesar de que no es posible una comparación real y aparecen resultados de lo más diverso, el estudio que comentamos aclara muchas cosas. No podemos indicar aquí los detalles porque conducirían demasiado lejos, pero las consecuencias coinciden bien entre sí.

b) Tamaño de los gránulos, retracción y volumen de huecos en el horno vertical.

Ciertamente éste es el problema más difícil a resolver, pues en la bibliografía también faltan datos, o no pueden aplicarse al material sinterizado en el horno.

Los valores de la Tabla II proceden de un cálculo teórico y sólo pretenden servir de orientación. Prácticamente, los materiales granulados de análogo peso aparente dan lugar a un volumen de huecos del 50 al 55%.

Ahora bien, los nódulos no son esferas perfectamente formadas; sólo se obtienen éstas cuando se aplica el procedimiento de granulación, conservándose esta forma hasta alcanzar la zona de sinterización; pasada ésta no se puede llegar nunca a los valores calculados teóricamente para el volumen de huecos.

Las condiciones reales en el horno vertical son muy distintas. Se hace preciso, por ello, crear una nueva teoría sobre la configuración de los granos de clinker y sobre los espacios huecos que aparecen entre aquéllos.

En el proceso de granulación se forman bolas de 5 a 10 mm o de 10 a 30 mm; debe procurarse producir gránulos de igual tamaño aproximadamente. Al cabo del primer metro en el interior del horno vertical de gran rendimiento, las bolas se encuentran ya aglomeradas entre sí. Del examen de esta carga de clinker resulta idealmente que las esferas se deforman dando cubos con aristas redondeadas, análogos a los elementos molturantes utilizados en la molienda del clinker; estas aristas redondeadas

dan lugar, según el grado de sinterización, a los huecos intersticiales. Esta interpretación es la que más se aproxima a las condiciones en la práctica, y explica también el pequeño volumen de huecos que resulta, que llega a ser del 16,5%.

Ahora bien, desde el punto de vista fluidodinámico, no está libremente disponible todo este volumen, porque la corriente de aire no lo llena totalmente. Consideraciones sobre el coeficiente de resistencia de la carga han conducido al resultado de que el diámetro hidráulico corresponde aproximadamente a los valores de la Tabla 12.

Tabla 11

Valores comparativos del volumen de huecos

Ordenación de las esferas	Volumen de huecos en %
Esferas de igual tamaño, ordenación de compacidad mínima (cúbica) . . . . .	48,6 %
Esferas de igual tamaño, ordenación de compacidad máxima (rombododecaédrica) . . . . .	25,9
Esferas de dos tamaños (1 - 0,732) . . . . .	27,1
Esferas de tres tamaños (1 - 0,732 - 0,268) . . . . .	24,0
Esferas de cuatro tamaños (1 - 0,732 - 0,268 - 0,178) . . . . .	17,0
Esferas de igual tamaño, ordenación de compacidad máxima (rombododecaédrica) . . . . .	25,9
Esferas de dos tamaños (1 - 0,414) . . . . .	20,6
Esferas de tres tamaños (1 - 0,414 - 0,225) . . . . .	19,0
Esferas de cuatro tamaños (1 - 0,414 - 0,225 - 0,177) . . . . .	15,8

Tabla 12

Tamaño de grano y diámetro hidráulico

Número aproximado de nódulos en el horno vertical		Tamaño medio de grano en el horno	Diámetro hidráulico
< 30000	Anteriormente a 1900 formato de ladrillo	150-100 mm de longitud de arista	20 - 12 mm
140000	1915 prensados cilíndricos	45 mm de longitud de arista	7
380000	1925 prensados cilíndricos	16 mm de longitud de arista	4,5
1000000	1935 gránulos	12 mm de diámetro	1,8
3000000	1950 gránulos	9 mm de diámetro	1,3
74600000	1952 gránulos	5 mm de diámetro	0,34

Estas consideraciones, y el estudio comparativo de las velocidades que presentan los gases, permiten la conclusión de que el actual volumen de huecos del 16 al 18% no es demasiado bajo. - Hasta la fecha se venía considerando que el volumen disponible para el tiro, en cargas granuladas, era de aproximadamente el 20%, - con lo que la velocidad de los gases se hace 5 veces mayor de lo que sería si no existiese carga en el interior del horno. Que ésta cifra no es de valor general se desprende de los cálculos realizados, según los cuales dicha velocidad ha aumentado desde 1, inicialmente, hasta 5,6 en el momento actual, de acuerdo con el volumen de huecos y el tamaño de los gránulos.

Estas ideas dejan de ser válidas para un tamaño de grano de 2 a 4 mm, porque se establece entonces un régimen inestable de corriente, esto es, los nódulos empiezan a flotar en la boca -

del horno. Resultan demasiado ligeros y dan lugar a un volumen de huecos demasiado grande, lo cual no es conveniente.

Otro modo de considerar el volumen de huecos consiste en comparar el peso aparente de la carga del horno con el peso específico del material. Los resultados de la determinación del volumen de huecos por este método son idénticos a los obtenidos por los restantes procedimientos.

Según la naturaleza de los crudos y el comportamiento de éstos en la cocción, se presentan aproximadamente los siguientes valores medios para los pesos:

Peso específico del clinker de horno vertical de gran rendimiento (sin poros internos) . . . . .	3,1
Peso aparente del clinker (con poros internos) . . . . .	2,25
Peso aparente de la carga (con poros internos y huecos externos) . . . . .	1,85
Peso aparente después de salir del horno (con poros internos y huecos externos, clinker triturado) . . . . .	1,3-1,4

de donde resulta igualmente un volumen de huecos del 18% en la carga de clinker.

Ahora bien, estas cifras sólo son válidas para el actual horno vertical de gran rendimiento; en los primeros hornos eran más bajas, cosa que se desprende también de las resistencias de los cementos fabricados con aquellos clinkers.

Para poner de manifiesto que el estrechamiento de la zona de sinterización es una medida oportuna, es preciso tener en cuenta que en el horno vertical los gránulos experimen-

tan una disminución de volumen desde 100 a 60 - 65, esto es, de un 40 - 35% y que en la sinterización los huecos que rodean a los gránulos se hacen menores, con lo que la disminución de volumen puede llegar hasta un 73% aproximadamente, lo que corresponde a una disminución de la sección desde 100 hasta 65 = 35%. Con fines comparativos conviene indicar que en los hornos Leopol y en las cintas de sinterización estos valores se elevan al 80% y 90%, respectivamente, como se desprende de los pesos específicos y aparentes correspondientes:

Anselm-Schindler (12), en su trabajo sobre pesos aparentes, dan los siguientes valores (Tabla 13) para la disminución de volumen de los gránulos de crudo molido, sin mezclar con cok, y sin considerar la disminución de huecos entre los gránulos:

Tabla 13

Disminución de volumen de los gránulos

Temperatura	Peso aparente	Disminución de volumen	Peso específico
20°	1,91	0	2,72
930	1,30	1,5	3,18
1000	1,29	2,7	3,20
1100	1,27	3,5	3,21
1200	1,46	16,6	3,24
1400	1,98	38,3	3,26

Evidentemente, esta retracción es distinta según la naturaleza del crudo, fluctuando entre el 28 y el 40%, Pero hay una cosa segura, y es que por el rápido calentamiento que tiene lugar en los modernos hornos de gran rendimiento en comparación

con los antiguos, las masas de material crudo se contraen considerablemente más, como sucede también en cerámica.

La disminución de volumen que comentamos da la explicación de por qué se estrecha el diámetro del horno. El estrechamiento, visto desde el eje central, presenta un ángulo del 15° en los hornos de 150 toneladas diarias y de 20° en los hornos de 200 toneladas diarias de producción; es condición necesaria un revestimiento de superficie tersa, sin desigualdades.

El volumen de huecos ha disminuido así desde el 30% en los hornos antiguos hasta el 16,5% en los actuales. En una figura que se incluirá más adelante se da el volumen de huecos en función de la producción diaria. Para favorecer la contracción y comprimir los granos de clinker en la sinterización, se ha propuesto la instalación de un dispositivo de compresión. Ahora bien, el estrechamiento del horno da lugar también a que los gránulos se compriman y aglomeren entre sí, lo cual resulta un inconveniente, ya que los gránulos aglomerados en racimos no constituyen un material adecuado para una cocción rápida y para obtener un producto de calidad.

La Tabla 14 da los tamaños de los gránulos, determinados en el estudio comparativo de que nos estamos ocupando.

Tabla 14  
Tamaño de los gránulos

Nº	Tamaño de grano en mm	
	Desde	Hasta
1	300	100
2	130	110
3	60	50
4	80	8
5	65	6,5
6	50	5
7	30	3



Para calcular el tamaño medio de los gránulos se ha procedido de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\sqrt[3]{\frac{2 \cdot d_1^2 \cdot d_2^2}{d_1 + d_2}}$$

donde  $d_1$  = tamaño máximo de grano en mm y  
 $d_2$  = tamaño mínimo de grano en mm

Resulta también que la retracción interna de cada grano en particular era antes de un 9% únicamente, mientras que ahora se eleva al 38%. Los valores correspondientes al ensayo número 4 presentancierta dispersión; el diámetro medio era probablemente de 30 o 25 mm (se trata en este caso de una deformación producida en el tornillo sin fin de humedecimiento).

### c) Temperaturas.

Se trata en el caso que nos ocupa de una combustión superficial (sin llamas). La combustión tiene lugar exclusivamente en el interior o en los pequeños huecos entre los gránulos ya parcialmente sinterizados. La zona de combustión se va desplazando hacia abajo, en contracorriente con el aire, hasta que se consume todo el combustible, cosa que puede comprobarse también cuando se enciende el horno.

Para determinar la marcha de las temperaturas del aire y de los gases en el interior del horno vertical fué preci

so un estudio a fondo de los fenómenos que en él tienen lugar. La fig. 12 reproduce las curvas obtenidas en los hornos estudiados, nos. 1 a 7, con indicación de las zonas de calcinación y sinterización.

En esta figura se pone de manifiesto la pronunciada disminución de las zonas, así como el enorme aumento de presión en la zona de sinterización y la disminución de la influencia de los bordes. Puede decirse que en los modernos hornos verticales nos encontramos muy cerca de las características de la cinta de sinterización.

El precalentamiento del aire de combustión tiene lugar rápidamente desde 380° hasta 900°C, si se prescinde del caso 1 con tiro natural, siendo también este elevado precalentamiento un factor nada despreciable para una cocción rápida. Con ello resulta que en la actualidad la temperatura máxima de los gases es de 1500°C, frente a los 1300°C que se alcanzaban antes, lo que constituye otra razón de que se obtenga ahora una mejor calidad. Puede verse fácilmente que, en el actual sistema de trabajo, el calor procedente del precalentamiento del aire basta para alcanzar súbitamente la temperatura de inflamación de las cenizas y del combustible. En los hornos antiguos no bastaba esto, y por esta razón se prolongaban las dimensiones de la zona de sinterización.

La fracción de calor introducida por precalentamiento del aire de combustión, referida al consumo total de calor (combustible + precalentamiento), ha aumentado desde un 19% inicialmente hasta un 27% en la actualidad.

Se ha determinado por medio de un planímetro la temperatura media que reina en el horno, que era de una importancia decisiva para todas las mediciones ulteriores. En este sentido es interesante que, precisamente esta temperatura media, referida a la altura del horno, ha descendido desde 740° en los hornos antiguos a 460°C en los actuales (con ello las pérdidas por radiación y por conducción son mucho menores). En la fig. 12 puede verse fácilmente que, con los gránulos grandes que se empleaban primitivamente, se presentaba un "efecto de pared", que con los gránulos pequeños actuales resulta apenas perceptible.

La fig. 12 pone de manifiesto, con la máxima claridad, las modificaciones que han tenido lugar en la conducción de los hornos verticales. La temperatura de los gases desprendidos, sin aire secundario, y la temperatura del clinker que sale del horno, han descendido desde 450° inicialmente hasta 250°C en la actualidad; si se introduce aire secundario, los gases alcanzan la chimenea con una temperatura de 100 a 150°C.

(Continuará)

- - - - -