

-- Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento --

618-25 EL HORNO VERTICAL (2ª Parte) -- DIMENSIONES Y CARACTERIS-
TICAS DE LA COCCION EN EL MISMO

(Continuación)

Wilhelm Anselm

-- --

VELOCIDAD DE LOS GASES Y CANTIDAD DE LOS MISMOS

En los hornos verticales, la velocidad de los gases ejerce la máxima influencia sobre la cocción. En dichos hornos - se debe mantener con exactitud una v_0 y una temperatura determinadas para conseguir una cierta calidad de producto cocido.

En los hornos verticales de cemento se precisa una velocidad, v_0 , de 0,5 a 0,7 m/sog, para alcanzar la temperatura de sinterización necesaria, de 1400 a 1450° C.

En los hornos verticales de cal se exigen distintos requisitos de la calidad del producto. La cocción suave de las fábricas de ladrillos sílico-calcáreos o de acero requiere una velocidad de gases pequeña y una temperatura de combustión baja no puede permitirse que la cal apagada se sintérico en la superficie de las piezas. La cal para horno alto se puede sinterizar superficialmente para garantizar una mejor estabilidad.

No se considera la cocción de calos hidráulicas con 70-75% de CaCO_3 en la piedra cruda y contenidos residuales de CO_2 del 5 al 10%, con un consumo de calor de 400-600 Kcal/Kg de

cal, si bien son aplicables los datos contenidos en este trabajo, referentes a las dimensiones y a la marcha de la cocción.

A continuación se indican las velocidades de los gases y las temperaturas del material o de las llamas, en la actualidad, en distintos hornos verticales, siendo v_0 la velocidad de los gases en m/seg, a 0° C, considerando vacía la sección interior del horno vertical o rotatorio:

v_0 en m/seg	t del material en °C	t media de los gases en la zona de cocción	consumo de calor en Kcal/Kg de material
Hornos rotatorios de cemento, 100 a 1000 Tm diarias:			
0,75-1,6	1350-1450	1700-1850	900-1600
Hornos rotatorios de cal:			
0,5 -1,0	1100-1300	1300-1600	1800-2200
Hornos rotatorios para la sinterización de magnesita:			
1,8 -2,1	1580-1620	1800-1850	1800-2200
Hornos rotatorios para la sinterización de dolomita:			
1,9 -2,2	1650-1750	1850-1950	1200-2800
Hornos verticales de cemento (de gran rendimiento):			
0,5 -0,7	1350-1450	1450-1550	950-1200 (2)
Hornos verticales de cal (cocción muy suave, tiro natural):			
0,06	1100-1140	1150-1200	900-1200 (10)
Hornos verticales de cal (cocción suave):			
0,12	1180-1220	1230-1300	900-1200 (10)
Hornos verticales de cal (cocción media):			
0,18	1250-1300	1320-1400	1000-1200
Hornos verticales de cal (cocción intensa):			
0,30	1400	1500	1000-1200

Hornos verticales para la sinterización de magnesita:

0,9	1580-1620	1650-1700	1800-2000
-----	-----------	-----------	-----------

Hornos verticales para la sinterización de dolomita:

1,0	1650-1750	1700-1800	2000-2300 (10)
-----	-----------	-----------	----------------

Hornos de cúpula:

1,5-2,5	1300-1400	1500-1600	500- 600
---------	-----------	-----------	----------

Hornos altos (en el vientre):

0,4-0,8	1400-1500	1500-1700	5000-7000
---------	-----------	-----------	-----------

Hornos altos (en el tragante):

0,7-1,5

Hornos de parrilla (piritas de hierro):

1000	1300
------	------

Las temperaturas son función de la velocidad que posean los gases en el interior del horno y también del tamaño de grano del combustible. La fig. 2 da la producción específica, en $\text{Kg/m}^2\text{h}$, en función de la velocidad de los gases, v_0 , en m/seg . (1). Esta figura constituye la base para las consideraciones que siguen sobre el dimensionamiento de los hornos verticales. La velocidad de los gases ha de entenderse también como cantidad de gases en Nm^3/m^2 de sección del horno, por hora, (considerando la sección como vacía), lo cual constituye, al mismo tiempo, un concepto de dicha velocidad.

Ahora bien, yo he intentado medir las temperaturas que se presentan para distintas velocidades de los gases, a base de medidas con pirómetros de flujo. Estoy convencido de que la cuestión de la medida de las temperaturas es ciertamente el problema más difícil, y que hay muchos factores que intervienen en él. No obstante, había que determinar, aunque sólo fuera de un modo relativo, el orden de magnitud de dichas temperaturas.

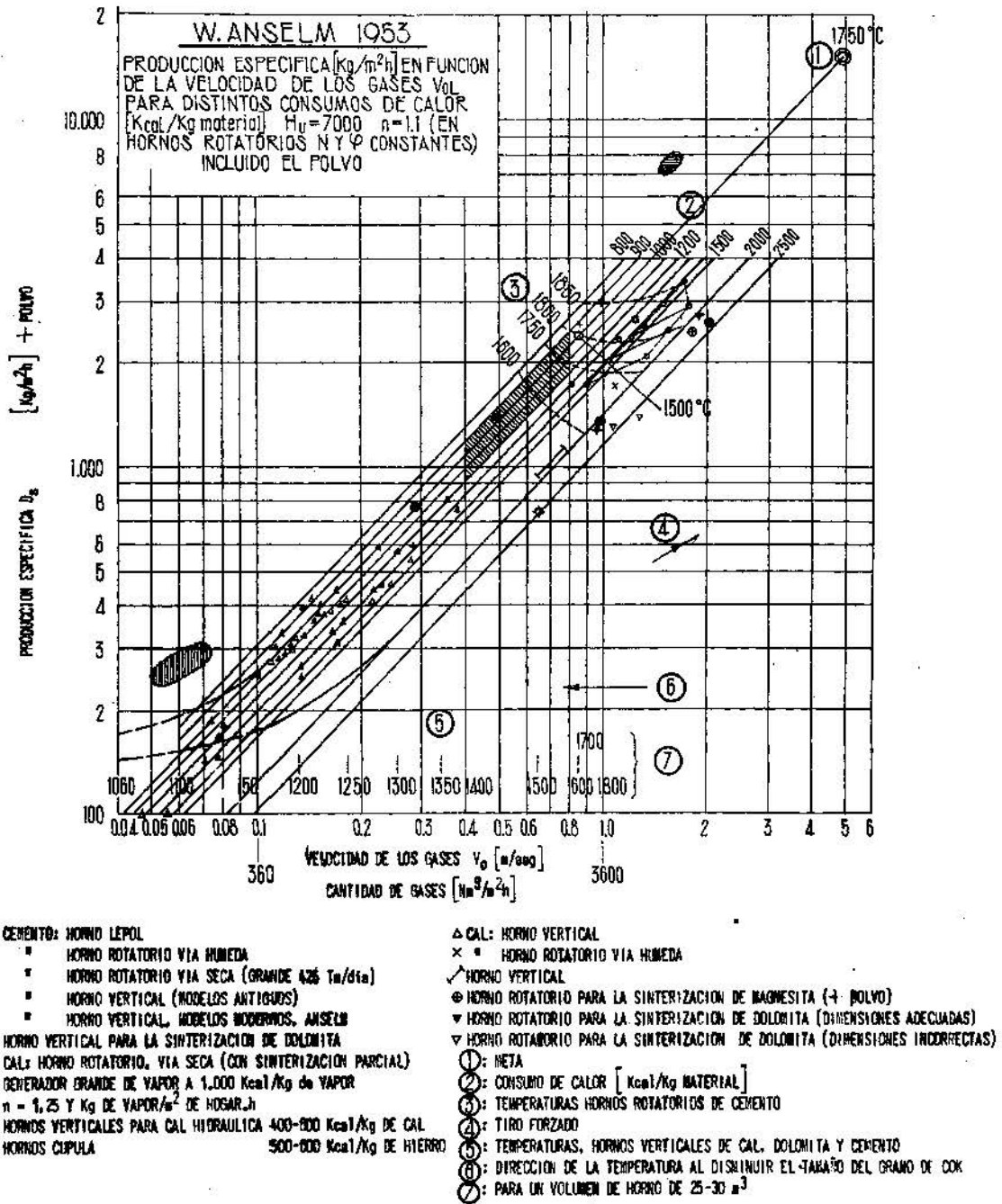


Fig. 2

Quizá, en el futuro, sea posible mejorar estos valores para las temperaturas por medio de mediciones más exactas.

La producción viene determinada por el diámetro del horno y por v_0 y, con ello, también por la presión p , y la calidad de la cocción viene determinada por la temperatura que, a su vez, depende de la velocidad de los gases, debiéndose tener en cuenta, además, que el cok de grano menudo da lugar a una temperatura más elevada.

De la consideración de la fig. 2 se desprende la influencia que la velocidad de los gases v_0 (referida al volumen vacío, a 0° C y 760 mm de columna de mercurio) ejerce sobre la temperatura, lo cual no se conocía con tanta claridad hasta ahora. He representado únicamente una parte de todos los valores referentes al clinker de cemento, a la sinterización de dolomita y magnesita, a la cocción de cal, y también valores referentes a otros procesos. La función se cumple tanto para materiales difíciles, como fáciles de cocer, y para velocidades de los gases grandes o pequeñas.

Ahora bien, por consideración de la transmisión del calor en materiales granulares resulta más clara la influencia de v y de t y del diámetro de grano, o volumen de huecos, en un lecho poroso. Sin entrar a fondo en las fórmulas de la transmisión del calor, el sorprendente resultado de la fig. 2 es que, en materiales granulares, los factores que más influyen sobre la transmisión de calor son v y t y que el tamaño del material de alimentación y el volumen de huecos sólo influyen sobre la altura del horno o sobre el tiempo de permanencia del material en el interior del mismo, y no sobre la producción específica dada.

En la fig. 2 hay que considerar también en la producción específica, en $\text{Kg/m}^2\text{h}$, el polvo que se produce.

Parece ser que, al disminuir la velocidad de los gases, v_0 , por debajo de 0,2 m/seg, la producción específica aumenta algo, como se indica en la fig. 2. Una explicación de esta relación entre la producción específica en $\text{Kg/m}^2\text{h}$ y la velocidad de los gases, por lo menos en el régimen turbulento, consiste en que el intercambio de material y la transmisión del calor aumentan proporcionalmente a v_0 , al considerar el consumo de calor. Las únicas investigaciones sobre este punto, aprovechables para nuestro tema de los hornos verticales, corresponden a Boehm (11), Bretz (12) y Lydersen (13); estos trabajos ponen de manifiesto la misma dependencia para la zona considerada en conductos estrechos, y, por lo tanto, para velocidades de los gases elevadas. Se ha puesto de manifiesto una diferencia entre el régimen laminar y el turbulento, en el sentido de que la conductividad térmica es independiente de la velocidad de los gases y del diámetro de los granos en el régimen laminar; en el régimen turbulento, es decir, para mayores velocidades de los gases, que es el caso más frecuente, la conductividad térmica real aumenta de un modo aproximadamente proporcional a la velocidad de los gases y a la raíz cuadrada del diámetro de los granos; cuanto mayor se hace v_0 , tanto menor es la dependencia con la conductividad térmica propia del material granular y del gas en reposo. La conductividad térmica efectiva es independiente de la presión (para las presiones aplicadas por nosotros) y de la temperatura de las paredes.

Los coeficientes de transmisión del calor y de permeabilidad térmica dependen de la velocidad de la corriente de

gases y del tamaño de grano, siendo de notar que, como también varía el volumen de huecos, dependen también de éste.

Un cálculo aproximado, teniendo en cuenta todos estos factores, así como el consumo de calor, demuestra que, por ejemplo, los hornos de cal, con un material de alimentación grueso y una v_0 pequeña, coinciden en el hábito de las curvas con los hornos de cemento, que se alimentan con un material más fino y presentan v_0 mayores, como se pone de manifiesto en la figura 2.

Sería de desear que se pudiesen realizar también en la industria alemana estos estudios para temperaturas más elevadas y para otras condiciones en lo que se refiere a volumen de huecos.

DIAGRAMA CALOR-TEMPERATURA

Es preciso considerar con más detalle aún la cantidad de gases que atraviesa el horno en Nm^3/seg . La fig. 3 representa el diagrama $Q - t$ de un horno vertical de cal y de un horno vertical de cemento. Al considerar ambos diagramas, debe prestarse una especial atención a la temperatura de inflamación del cok. En los hornos verticales de cal, la inflamación tiene lugar a unos 700°C , en un punto en el que los gases sólo poseen una pequeña proporción de O_2 y en el que comienza precisamente la descarbonatación. Véanse a este respecto las manifestaciones hechas por el autor en "El horno vertical" (2).

Sin embargo, la inflamación del cok en los hornos verticales de cemento comienza sobre los 1000°C , porque la carbónilla de cok está incorporada en un porcentaje del 10% en los

DIAGRAMA Q-T

V. ASEÚN 1953

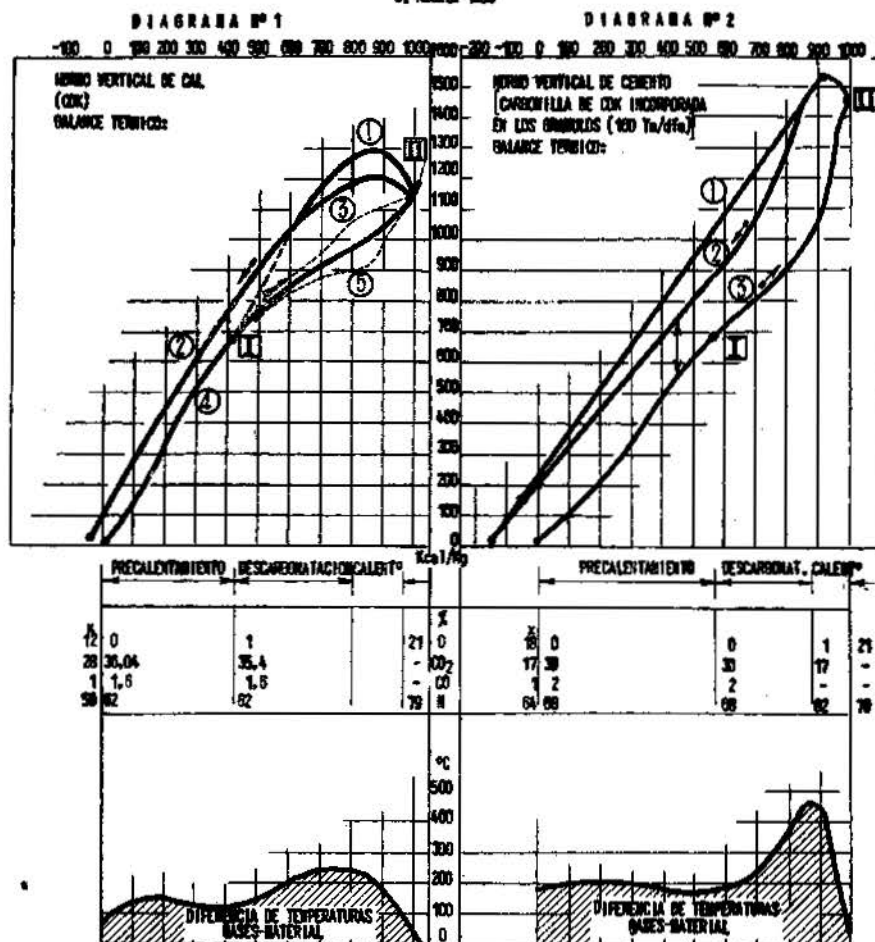


DIAGRAMA Nº 1

COCCION DE LA CAL	687 Kcal/Kg
EVAPORACION DEL AGUA	33
CALOR CEDIDO POR LA CAL	45
CALOR CEDIDO POR LOS GASES	60
CO	25
RESIDUOS SIN COCER	40
RADIACION	60
TOTAL	1000 Kcal/Kg

DIAGRAMA Nº 2

COCCION DEL CEMENTO	430 Kcal/Kg
EVAPORACION DEL AGUA	150
CALOR CEDIDO POR EL CLINKER	50
CALOR CEDIDO POR LOS GASES	150
CO	130
RESIDUOS SIN COCER	60
RADIACION	30
TOTAL	1000 Kcal/Kg

- ①: COKE
- ②: GASES
- ③: MATERIAL (SUPERFICIE)
- ④: MATERIAL (MEDIA)
- ⑤: MATERIAL (NUCLEO)
- I: INFLAMACION DEL COKE - COMIENZO DE LA COMBUSTION
- II: FIN DE LA COMBUSTION DEL COKE

- ①: GASES
- ②: GASES
- ③: MATERIAL
- I: INFLAMACION DEL COKE EN LOS GRANULOS - COMIENZO DE LA COMBUSTION
- II: FIN DE LA COMBUSTION DEL COKE

z: CON AIRE SECUNDARIO, z = 2,0

Fig. 3

nódulos de crudo, y la inflamación tiene lugar en una atmósfera de gases pobre en O_2 .

En los cálculos referentes a hornos verticales de cemento se considera exclusivamente la cantidad de gases procedentes del combustible, y en los hornos verticales de cal se considera una proporción del 50% de CO_2 procedente del crudo, como valor medio en la zona de calcinación, que hay que añadir a la cantidad de gases procedentes del combustible.

Los factores del incremento de la cantidad de gases al variar el consumo de calor se pueden calcular fácilmente. Al introducir la cantidad de gases en Nm^3/seg se obtiene al mismo tiempo la correspondiente velocidad de los mismos, para la sección interior de que se trate (referida al espacio interior considerado vacío). Este cálculo es de muy fácil ejecución y causa siempre una agradable sorpresa observar la excelente coincidencia que se obtiene para el consumo de calor de que se trate (su poniendo siempre un índice de aire $n = 1,1$).

Estas directrices han constituido el punto de partida para otras muchas nuevas consideraciones referentes a las temperaturas que se presentan, calidad de la cocción, consumo de calor y producción.

A diferencia de los diagramas correspondientes a los hornos rotatorios, el diagrama $Q - t$ para los hornos verticales (fig. 3) presenta una marcha mucho más próxima en las curvas de los gases y del material; y, probablemente, su marcha es aún más próxima. En dicha figura se representan también los correspondientes balances térmicos, así como las proporciones de CO_2 y O_2 que se establecen en las distintas zonas, procedentes de la

combustión y del CO_2 desprendido. Las diferencias de temperatura existentes entre los gases y el material caracterizan la comparación de los hornos verticales de cal y los de cemento.

Sin embargo, probablemente en la cocción de la cal no se presenta un exceso de calor demasiado grande a temperaturas por debajo de los 800°C , después de la calcinación, como se suponía hasta ahora. Existen ya pruebas de que se puede cocer la cal por debajo de 900 Kcal/Kg , con unas temperaturas más bajas en los gases desprendidos. Por esta razón, debe ponerse en tela de juicio que la recuperación de los gases, recogidos después de la calcinación e introducidos en la zona de calefacción, dé lugar a ventajas económicas, sino que más bien lo que sucede es que la temperatura desciende en la zona de calcinación. Las diferencias de temperatura entre los gases y el material subsisten ciertamente, de acuerdo con el cálculo, pero el horno mismo se ocupa de compensar totalmente estas diferencias, como se desprende de la consideración del diagrama $Q-t$ (figura 3). Claro que, de este modo, puede tener lugar un determinado desplazamiento de las distintas zonas, lo que explicaría muchos fenómenos. En esencia, cuando se hace una recuperación de los gases, se reproduce en el punto de descarga el mismo estado que antes de aplicar dicha recuperación, pero el consumo de calor es mayor debido a una mayor temperatura en los gases desprendidos y a una mayor radiación, y la producción resulta menor. Se puede calcular fácilmente que, para un mismo consumo de calor y recuperación de un tercio de los gases como mínimo, la temperatura de la mezola en la entrada desciende unos 200°C , pero la temperatura final en el punto de descarga permanece la misma al considerar la elevación que experimenta la zona de coc

ción. Ahora bien, la velocidad de los gases y la presión aumentan en un 30% aproximadamente y, por el aumento que experimentan las zonas, resultan mayores las pérdidas de calor en los gases desprendidos, la radiación y, con esto, el consumo de calor. - Además, se estableció una mayor proporción de CO, debido a la cantidad de CO₂ que se reintroduce en el horno.

Por esta razón, no he oído hasta la fecha que en los procesos Azbe o Eldred, que utilizan la recuperación de los gases, se hayan conseguido consumos de calor por debajo de las - 1000 Kcal/Kg de CaO.

Así, pues, no existe razón alguna para empeorar los hornos verticales de cal sencillos por instalación de dispositivos adicionales.

Al considerar ambos diagramas, se pone de manifiesto una diferencia entre los hornos verticales de cal y los de cemento. En los hornos de cal, en los cuales el punto de inflamación del cok corresponde a 700° C o más (hay que tener en cuenta que, al comenzar la inflamación, existe presente aún poco oxígeno y casi nada de vapor de agua (2)), el cok se calienta y llega a alcanzar una temperatura superior a la de los gases. Resulta de aquí que la diferencia de temperaturas entre los gases y el material es menor de lo que se venía suponiendo hasta aquí, llegándose casi a una igualación, como se desprende de la figura 3.

En los hornos verticales de cemento las condiciones son distintas en cuanto que en este caso los gránulos, con cok incorporado, determinan la temperatura de los gases y porque es

preciso llegar a la sinterización. Esto da lugar a un exceso de calor en los gases en contacto con la superficie de los gránulos. Más adelante volveré sobre la fig. 3, al tratar de la reacción de Boudouard. (Continuaré).

L.S.C.