

- 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.

(Conclusión)

Wilhelm Anselm

- - -

ALTURA DE LOS HORNOS VERTICALES

A continuación de las consideraciones sobre el tiempo de permanencia en el interior de los hornos del material que se cuece, debe determinarse la altura (altura útil) de los hornos verticales. Esta altura resulta de los valores de la fig. 5, publicada en el nº 50 de Ultimos Avances (abril 1954).

Las figs. 1 y 2 dan el diámetro interior y la altura de los hornos verticales de cal y cemento en función de la cantidad de aire o gases en Nm^3/seg y de la velocidad de los gases v_0 , para distintas temperaturas de cocción. Al mismo tiempo, se indica también la producción y el consumo de calor. El tamaño máximo de grano influye también mucho sobre la altura.

A las alturas dadas puede haber que añadir suplementos -que no consideramos aquí- por dificultad de calcinación, mala conductividad térmica de los crudos, granulometría dispar de los mismos, empleo de crudos blandos que tienden a desintegrarse o por inclusión de una zona de depósito sobre la zona de precalentamiento. En general, los valores dados son válidos, como ya se ha indicado anteriormente, para una relación entre los tamaños de grano máximo y mínimo de 2 a 1. Si la forma de los trozos a cocer es favorable (cúbica) puede rebajarse la al

tura en un 5%, si es desfavorable se aumentará en un 10%.

Ejemplos

Ejemplo de proyecto de horno vertical para la cocción de cal:

Requisitos: 100 toneladas diarias, cocción suave a 1200°C, tamaño de grano de 100 a 200 mm (grano máximo), 900 Kcal/Kg de CaO.

Resultado: $v_0 = 0,12$ m/seg; $d_i = 4,0$ m; $H = 16,5$ m.

Ejemplo de horno vertical existente para la cocción de cal hidráulica con un contenido de CaCO_3 del 70%, con un consumo de calor de 400 Kcal/Kg de cal, con un residuo de CO_2 del 5%. Dimensiones: 2,4 x 8,0 m.

Resultado: $v_0 = 0,06$ m/seg; producción, 30 toneladas diarias (extrapolar para otras cantidades de gases, pues existe un 70% de CaCO_3 en lugar de un 96%); tamaño de los trozos de caliza, 150 mm (tamaño máximo).

Ejemplo de proyecto de horno vertical de cemento:

Requisitos: 100 toneladas diarias; $t = 1500^\circ\text{C}$ (cocción intensa); gránulos de 15 a 25 mm; 1000 Kcal/Kg.

Resultado (a partir de las Tablas): $v_0 = 0,62$ m/seg; $1,6 \frac{\text{Nm}^3}{\text{seg}}$; $d_i = 1,7$ m; $H = 7,0$ m.

Requisitos: 180 toneladas diarias; $t = 1500^\circ\text{C}$ (cocción intensa); gránulos de 15 a 25 mm; 1000 Kcal/Kg.

Resultado: $d_i = 2,3$ m; $H = 8,5$ m.

Horno vertical de cemento ya existente de 2,6x9,0 m, con una producción de 150 toneladas diarias, un consumo de ca-

lor de 1330 Kcal/Kg, con un combustible de 5500 Kcal/Kg de poder calorífico y gránulos de 5 a 30 mm.

Ensayo: $2,8 \text{ Nm}^3/\text{seg}$; $v_o = 0,53$; $D_s = 1180 \text{ Kg/m}^2\text{h}$ (ver fig. 1 del nº 48 de Ultimos Avances, febrero 1954).

Temperatura del material, 1450°C exactamente conseguidos, calidad inferior al término medio.

Modificaciones necesarias: adoptar gránulos de menor tamaño y más regulares; alcanzar una producción de 190 toneladas diarias con un consumo de calor de 1100 Kcal/Kg, con un combustible de poder calorífico = 6500 Kcal/Kg.

No se debe operar por debajo de este consumo de calor, pues en los hornos de menos de 9 m el calor perdido por el clinker es considerable.

$t = 1480^\circ\text{C}$ (buena cocción, calidad); $3,0 \text{ Nm}^3/\text{seg}$; $v_o = 0,6$ - m/seg ; $D_s = 1500 \text{ Kg/m}^2\text{h}$; comprobar los inyectores, deben rendir $174 \times 1,2 = 210 \text{ m}^3/\text{min}$.

Para obtener una mayor claridad en lo que respecta al consumo de calor, cuya influencia puede apreciarse con exactitud en las figs. 2 (nº 49 de Ultimos Avances, marzo 1954), 3,4 (nº 50 de Ultimos Avances, abril 1954) y 1 y 2 del presente número, vamos a indicar otro ejemplo:

En un horno vertical de cal con un diámetro interior de 3,0 m, una altura de 16 m, alimentado con un material de 50 a 300 mm, se obtienen 65 toneladas diarias de cal, con un consumo de calor de 1300 Kcal/Kg de CaO; el producto está cocido un poco en exceso y presenta un rendimiento pequeño. Mediante el empleo de una mejor granulometría en el material de alimen-

tación, disminuyendo la proporción de finos, y eligiendo para el cok un tamaño de grano adecuado, se consiguió la misma producción de 65 toneladas diarias con un consumo de calor de - 1000 Kcal/Kg y una cocción más suave, descendiendo la velocidad de los gases y la temperatura, lo cual permitió obtener una cal de mayor rendimiento.

En lo que respecta al rendimiento de las cales, nos explicamos ahora por qué se consigue una cal de mayor actividad elevando la temperatura más lentamente, lo cual equivale en este caso a una velocidad de los gases y a una temperatura menores.

Este mismo horno, de 65 toneladas diarias de producción y un consumo de calor de 1300 Kcal, se podría alimentar con un material de menor tamaño, obteniéndose un producto de mejor calidad con un menor consumo de calor; pero, si el acceso de aire es suficiente, se elevan v_0 y t , disminuyendo la producción y la calidad. La pérdida de presión aumentó de 90 mm de columna de agua a 190, porque la altura del horno era - demasiado grande para los trozos de caliza ahora empleados, - más pequeños.

En este horno se obtuvo éxito por aplicación del primer camino indicado.

La relación altura/diámetro interior en los hornos verticales de cal resulta ahora del cálculo de d_i y H , observándose que es la misma, a grandes rasgos, para cualquier producción, pero es función del tamaño del material de alimentación:

| | |
|---------------------------------|---------------|
| para un tamaño de 300 mm (máx.) | $H/d_i = 6,0$ |
| para un tamaño de 200 mm (máx.) | $H/d_i = 4,1$ |
| para un tamaño de 100 mm (máx.) | $H/d_i = 2,6$ |
| para un tamaño de 50 mm (máx.) | $H/d_i = 2,0$ |

Estos valores para la relación H/d_i deben considerarse en principio como cifras mínimas, ya que en cada caso decidirán las circunstancias particulares.

LEYES QUE RIGEN LAS DIMENSIONES DE LOS DISTINTOS TIPOS DE HOR-NOS VERTICALES

En la fig. 133 se hace una comparación de los resultados obtenidos para las dimensiones de los hornos verticales en un estudio en serie, con los valores dados por otros investigadores (18,19). Se observa que también los generadores, hornos cúpula y hornos altos corresponden aproximadamente, en lo que se refiere a la altura y diámetro interior, con los valores obtenidos por mí, lo cual no quiere decir que se hayan determinado precisamente de este modo las dimensiones de estos hornos - por medio de investigaciones en serie. No obstante, puede afirmarse que la dirección que llevan nuestros estudios es correcto y que deben revisarse los datos existentes anteriormente sobre los hornos verticales de cal y de cemento, pues proceden únicamente de instalaciones antiguas.

Basándose en los resultados de un estudio de los distintos tipos de hornos verticales, análogo al realizado por mí sobre los hornos rotatorios (1), obtenemos la variación de los valores al aumentar la producción en una proporción de 1 a 10 (véase la Tabla 3). Puede observarse que el desarrollo es muy distinto que en los hornos rotatorios. La diferencia fundamen-

tal reside en la velocidad de los gases, que en los hornos rotatorios pasa de 1 a 2, mientras que en los verticales la relación es de 1:1. En los hornos rotatorios se puede llegar también ciertamente a 1:1, pero entonces resultan diámetros demasiado grandes y longitudes demasiado cortas, no susceptibles de realización técnica. En los hornos verticales, tanto pequeños como grandes, se debe tratar de mantener igual velocidad de los gases, v_0 , a fin de llegar a las mismas condiciones.

De esta distinta determinación de v_0 resulta que el diámetro interior varía de 1 a 2 en los hornos rotatorios y de 1 a 3,1 en los verticales, al aumentar la producción de 1 a 10.

Este comportamiento influye sobre aquellos factores como volumen, superficie, altura y longitud. Únicamente permanece constante en los hornos rotatorios y verticales la relación de la producción específica en $\text{Kg}/\text{m}^2\text{h}$, como pone de manifiesto la fig. 2 (nº 49 de Ultimos Avances, marzo 1954). Insistir más sobre este punto saldría de los límites que nos hemos propuesto en este trabajo.

En los hornos rotatorios, al aumentar la producción, el diámetro interior aumenta y la longitud disminuye, de modo que la relación de la producción específica en $\text{Kg}/\text{m}^2\text{h}$ permanece constante. En los hornos verticales, al aumentar la producción, el diámetro interior aumenta y la longitud también aumenta, de modo que la relación de la producción específica en $\text{Kg}/\text{m}^2\text{h}$ también permanece constante.

En los hornos rotatorios, al aumentar la producción, el diámetro interior aumenta y la longitud disminuye, de modo que la relación de la producción específica en $\text{Kg}/\text{m}^2\text{h}$ permanece constante. En los hornos verticales, al aumentar la producción, el diámetro interior aumenta y la longitud también aumenta, de modo que la relación de la producción específica en $\text{Kg}/\text{m}^2\text{h}$ también permanece constante.

T A B L A 3

Variación de las distintas magnitudes en los hornos verticales, al aumentar la producción de 1 a 10.

Relación entre los tamaños de grano máximo y mínimo de 2:1.

V_0 y t_M constantes, y un consumo de calor aproximadamente constante

| Producción | 1 | 10 | Producción | 1 | 10 |
|----------------------------------|---|------|--------------------------------|---|------|
| d_i | 1 | 3,1 | F_G | 1 | 10,0 |
| H | 1 | 3,1 | V_G | 1 | 31,0 |
| v_G **) | 1 | 3,1 | v_0 | 1 | 1,0 |
| $\frac{V_G}{Tm \text{ diarias}}$ | 1 | 0,32 | $\frac{H}{d_i}$ | 1 | 1,0 |
| $\frac{F_G}{V_G}$ | 1 | 0,32 | $\frac{Q}{F_G}$ | 1 | 1,0 |
| $\frac{H}{Q}$ | 1 | 0,32 | $\frac{K_G}{m^2 Q h}$ | 1 | 1,0 |
| N *) | 1 | 10,0 | $\frac{Tm \text{ diarias}}{Q}$ | 1 | 1,0 |
| Q | 1 | 10,0 | | | |

Potencias de incremento de la producción:

$$p(d_i) \quad 0,5$$

$$p(H) \quad 0,5$$

*) $N = Nm^3/seg.$ de gases; inferior a 10, cuando se considera la radiación, que, en los hornos grandes, es pequeña; igualmente v_0 .

$$**) \quad \frac{V_G}{Tm \text{ diarias}} = \frac{\text{Volumen del horno}}{Tm \text{ diarias}}$$

F_G = superficie interior total; d_i = diámetro interior del horno;

Q = sección interior del horno; H = altura del horno;

v_0 = velocidad de los gases en la zona de calcinación, en m/seg.

RETRACCION Y ESTRECHAMIENTOS EN LOS HORNOS VERTICALES

Respecto a la cuestión del estrechamiento o ensanchamiento de la sección de los hornos verticales, hemos hablado ya a propósito de los hornos verticales de cemento (2). El ensanchamiento de la zona de sinterización hacia la boca del horno y la altura de esta zona ensanchada es función de la producción, del consumo de calor y de la retracción que experimentan los gránulos. A una mayor producción corresponde un menor consumo de calor (controlando rigurosamente el tamaño de grano del material de alimentación y del combustible), una temperatura más alta en el material y, con ello, una mayor retracción. Se sabe, por Cerámica, que la retracción aumenta cuando las temperaturas de cocción son elevadas. La fig. 144 da una idea sobre los pesos específicos, pesos aparentes y pesos aparentes con asentamiento así como sobre la porosidad y la disminución de volumen, para distintas temperaturas de cocción. Convendría completar y ampliar este diagrama por medio de estudios en serie.

La disminución de volumen de los gránulos de cemento para una buena cocción viene a ser del 35 al 40%, según los crudos, porcentaje que corresponde a una disminución de superficie o de diámetro del 25 al 29%, pero sobre este punto se conocen hasta ahora pocas mediciones (20). Ahora bien, hay que añadir otra retracción por sinterización en el interior del horno, que puede ser muy distinta según la producción, el consumo de calor, las condiciones de tiro, forma de los gránulos y temperatura. Es imposible dar directrices generales dada la gran diversidad de condiciones. Incluso los ensayos de laboratorio resultan infructuosos en este caso. Se ha puesto de manifiesto

que en los hornos verticales actuales las condiciones de operación, así como la calidad del cok o antracita, presentan unas fluctuaciones demasiado grandes para obtener las temperaturas necesarias para una retracción máxima.

Por esta razón, es aconsejable no hacer muy grandes los ensanchamientos de la zona de sinterización en los hornos verticales de cemento, por ejemplo, de 2,4 a 2,8 m. Para la altura se utiliza actualmente como valor medio una inclinación del 7 al 10% respecto del eje central, lo que da para el ensanchamiento una altura de 1,6 a 1,25 m. Cuando se cumplen todas las condiciones, como una elevada producción, un consumo de calor bajo, un combustible y un tiro óptimos, se puede llegar a mayores ensanchamientos y a menores alturas. El tamaño de los gránulos representa también un papel en la retracción. Cuanto menores son los gránulos, tanto mejor es la transmisión del calor y tanto más rápidamente tiene lugar la cocción a temperatura más altas y con una mayor retracción. Se ha indicado ya (2), que es conveniente que los gránulos sean de distinto tamaño de grano, por ejemplo, de 5 a 15 mm, porque de este modo disminuye el volumen de huecos. Esto es igualmente aplicable al caso de la cocción de cal. Además, se ha comprobado por medio de ensayos que la resistencia a compresión de los gránulos aumenta de un modo inversamente proporcional a su tamaño; sucede igualmente al calentar desde 400 a 600°C.

También en el caso de hornos verticales para la cocción de otros materiales se debiera prestar una mayor atención a la retracción, sobre todo en los hornos para la sinterización de dolomita.

En los hornos verticales de cal, el estrechamiento de la zona de calcinación debería ajustarse a la temperatura necesaria.

De este modo se cierran los canales que se forman en el interior del horno vertical. No puede considerarse totalmente la retracción, pues debe asegurarse la salida del material según el dispositivo de descarga. Los estrechamientos dan lugar a una velocidad de los gases algo mayor en la zona de calcinación y, con ello, a una cierta elevación de la temperatura del material, que debe comprobarse en los hornos existentes; sin embargo, siempre se puede ensanchar algo el diámetro para una v_0 y t dadas.

| Temperatura del material | Estrechamiento de la zona de secado en el límite con la zona de calcinación en %. | |
|--------------------------|---|-----------------------|
| | Combustible en capas: | Combustible disperso: |
| 1000 - 1100 °C | 0 | 5 - 10 |
| 1100 - 1200 °C | 5 | 10 - 15 |
| 1200 - 1300 °C | 10 | 15 - 20 |

TIRO FORZADO Y PRESION

Para obtener 1 Kg de producto, hay que emplear de 1,6 a 2,0 Kg de crudo y se necesitan de 1,2 a 3,0 Kg de aire. Hemos de reconocer que no hemos prestado suficiente atención a este -

aire. Incluso hoy día, la cuestión de los inyectores continua - siendo un punto oscuro en muchos hornos, también en los de cal. Cuando se llevan a cabo comprobaciones, se observan casi siempre defectos en lo que se refiere a los inyectores, en general, por falta de aire (contenidos de CO de hasta un 10%, debido también en parte al empleo de combustibles demasiado finos) y por no estar ajustados al tiro o presión requeridos. También se peca con frecuencia por exceso, sobre todo en los hornos verticales de cemento, lo que da lugar a un consumo de fuerza demasiado grande. Yo estimo las pérdidas producidas en las industrias de la cal y del cemento, solamente por defectos en los inyectores, en varios millones de DM al año.

Conviene hablar aquí de la pérdida específica de presión, Δp , en mm de columna de agua/m de altura, que es función de la velocidad de los gases, del tamaño de grano del material de alimentación y del combustible, de la relación entre los granos de tamaño máximo y mínimo en éstos, de la disposición de la carga en el interior del horno (lo cual equivale al volumen de huecos en el mismo), de la sinterización y de la desintegración de los trozos y de la viscosidad de los gases para la temperatura en cuestión. Dicha pérdida de presión no puede determinarse de antemano, sino que resulta de observaciones prácticas; no obstante, podemos dar aquí algunas ideas que sirvan de punto de referencia.

Si los trozos del material que se cuece son grandes, la pérdida específica de presión es proporcional a la primera potencia de v_0 ; para trozos menores, llega a ser función de v_0^2 (2).

La fig. 155, construida con valores tomados de la práctica, da un primer resultado: que la función indicada se cumple totalmente y que el hábito de las curvas es muy distinto de lo que se venía suponiendo hasta ahora, ya que las mediciones realizadas a baja temperatura dan resultados muy diferentes (véase la fig. 6, nº 39 de Ultimos Avances, marzo 1953).

Se presenta un requisito importante: propiamente se debería trabajar únicamente para una relación entre los granos de tamaño máximo y mínimo de 2,5:1, lo cual se puede conseguir en la trituración, siendo preciso separar por tamizado del 20 al 30% de los finos. He estudiado (9) con especial cuidado los distintos tipos de trituradoras en lo que se refiere a la proporción de finos a que dan lugar; se puede influir de este modo en el sentido de conseguir unas condiciones de cocción más favorables. Siempre es importante realizar análisis granulométricos por tamizado antes de elegir una trituradora, a fin de adoptar el tipo más adecuado para el crudo de que se trate. No todas las fábricas están en condiciones de valorar la proporción de finos.

Vamos a indicar en unos ejemplos prácticos cómo varían las condiciones cuando se opera con distintas relaciones entre los tamaños de grano máximo y mínimo.

| <u>Tamaño de grano</u> | <u>V_o</u> | <u>Δ p</u> | <u>Relación entre los tamaños de grano máximo y mínimo</u> |
|------------------------|----------------------|------------|--|
| 100 - 200 | 0,30 | 9 | 2,0:1 |
| 60 - 200 | 0,30 | 16 | 3,3:1 |
| 80 - 200 | 0,155 | 5 | 2,5:1 |
| 30 - 240 | 0,155 | 11 | 8,0:1 |
| 30 - 200 | 0,520 | 45 | 6,6:1 |
| 100 - 200 | 0,520 | 25 | 2,0:1 |

Pueden observarse las distintas pérdidas de presión que se obtienen incluso en los mismos hornos, al variar la relación entre los tamaños de grano máximo y mínimo. En el futuro - será posible, por utilización del diagrama de la fig. 155, determinar de antemano el rendimiento de los inyectores, ya que siempre son éstos la causa de un rendimiento malo y de un consumo de calor demasiado grande. Naturalmente, debe tenerse presente una posible entrada de aire secundario por la boca del horno, - cuando la aspiración se realiza desde arriba. Si se dispone de un inyector cuya potencia es insuficiente, lo cual puede comprobarse por un consumo de calor demasiado alto (CO), se puede remediar la situación disminuyendo la relación entre los tamaños de grano máximo y mínimo o utilizando un material de alimentación de mayor tamaño de grano; sin embargo, el factor decisivo será siempre el coste que se origine. No se debería pasar nunca de una relación entre los tamaños de grano máximo y mínimo de 4:1; este valor da lugar, ciertamente, una pérdida de presión mayor que 2,5:1 (supuesto que el inyector esté así ajustado), - pero, sin embargo, cuando se trata de materias primas duras, que no se desintegran en el interior del horno, se consigue de este modo un contacto íntimo entre los gases y los crudos.

La cocción de trozos pequeños exige en el horno una menor altura, pues de otro modo las pérdidas de presión resultan demasiado grandes. Si comparamos un horno que se alimenta con material grueso, con uno que se alimenta con material fino, para una misma producción, no resulta para el segundo un mayor consumo de energía, pues aunque las pérdidas de presión aumentan ciertamente, la altura disminuye al mismo tiempo.

Tenemos un excelente ejemplo de reducción de las pérdidas de presión en el caso del "pebble heater" (calentador de guijarros), en el que se calientan o enfrían esferas homogéneas de material cerámico de 10 mm (relación entre los tamaños de grano máximo y mínimo 1:1) y en el que se establece una pérdida de presión de 600 mm de columna de agua para una velocidad de los gases de 4,7 (ver la fig. 4 del nº 42 de Ultimos Avances, junio-julio 1953). De acuerdo con la fig. 155, si la mencionada relación fuese de 2:1, resultaría una pérdida de presión de 1200 mm de columna de agua.

Basándose en los distintos resultados conocidos, puede suponerse que, en la conducción en la práctica de hornos verticales, variarían las pérdidas de presión del siguiente modo:

| <u>Relación entre los tamaños de grano máximo y mínimo</u> | <u>$\Delta p'$</u> |
|--|-------------------------------|
| 1:1 | 1 |
| 2:2 | 2 |
| 4:1 | 3 |

Cuando la resistencia que se presenta en el interior del horno a la circulación de los gases se hace demasiado grande por desintegración del material o por adición de una cantidad excesiva de finos, es fácil no conseguir en los gases la velocidad necesaria, aunque permanezca constante la presión del inyector. Tiene entonces que recurrirse a aumentar la presión o el tiro, a fin de hacer pasar la cantidad necesaria de aire, pues de otro modo resulta una cocción reductora y pérdidas por formación de CO. Se podría demostrar por medio de ejemplos que, por ejemplo,

al duplicarse la fracción de finos, la velocidad de los gases (que equivale a la cantidad de aire en m^3/m^2 y a la permeabilidad a los gases) disminuye a la cuarta parte, manteniendo constante la presión (!).

Esto constituye también una causa de las presiones tan distintas que se presentan en los hornos verticales. Debemos prestar una atención especial a esta permeabilidad a la circulación de los gases, que disminuye al aumentar la altura y la proporción de finos, y aumenta al disminuir la cantidad de éstos y al elevar la presión.

A diferencia de los hogares de parrilla y de los que queman polvo de carbón, en los hornos verticales no aumenta el exceso de aire en el tragante al crecer la cantidad de aire, porque aumentan también la combustión y la producción y las zonas se hacen más cortas, lo cual, a su vez, influye en cierta escala sobre la altura del horno; por esta razón, damos también la altura en función del tamaño de grano y de la velocidad de los gases. Por consiguiente, en los hornos verticales se puede aumentar la producción únicamente incrementando la cantidad de aire, prescindiendo en los hornos de cal de la calidad exigida.

Tampoco puede afirmarse que, con una composición granulométrica y combustión correctas, pueda operarse con un mayor exceso de aire. Si se determina realmente un cierto contenido de oxígeno en la boca del horno, puede proceder éste exclusivamente del acceso de aire secundario al punto de medida o de una granulometría inadecuada (influjo de las paredes o formación de canales, también empleo de cok poco reactivo) o de que no se haya fi

jado correctamente la relación tamaño de grano de la caliza/tamaño de grano del cok. En los hornos verticales puede únicamente presentarse oxígeno en los gases desprendidos y, con ello, un consumo excesivo de aire inyectado, cuando el hogar se encuentra en la boca del horno, como es el caso muchas veces en hornos de cemento.

También hay que tener cuidado en introducir de un modo adecuado el aire de combustión por la parte inferior del horno, porque los finos pueden ser arrastrados hacia arriba por el aire enriqueciéndose en una zona determinada e impidiendo el acceso de aire a la zona de combustión. El resultado de esto sería una producción baja, un alto consumo de calor y unas condiciones poco uniformes en la conducción del horno.

PRODUCCION

La fórmula sencilla (2, 14) resulta aplicable también para el cálculo rápido de la producción en los hornos verticales de cal:

$$\text{Producción en toneladas diarias} = \frac{1200 \cdot \text{Cantidad de aire en m}^3/\text{min}}{\text{Consumo de calor en Kcal/Kg CaO}}$$

Sin embargo, en esta fórmula, sólo se puede calcular la cantidad de aire que atraviesa el horno y no la cantidad total de aire que proporciona el inyector, incluyendo las pérdidas debidas a la falta de estanqueidad. Podemos observar también aquí la gran influencia que sobre la producción ejerce la cantidad de aire. En los hornos verticales de cemento el factor es 1190.

Se ha ensayado si, aumentando la cantidad o velocidad

del aire, éste ya no es absorbido por el cok y si el horno se enfria (conduciéndolo adecuadamente). Ha resultado que una velocidad de 4,0 m/seg es admisible todavía, antes de que suceda esto, de modo que tampoco en los hornos verticales para dolomita se corre peligro alguno.

Sirviéndonos del precedente estudio de las dimensiones de los hornos verticales, podemos ahora explicarnos también la cuestión de la producción específica, D_s , en toneladas diarias/m² y en toneladas diarias/m³, punto que hasta ahora ha sido muy debatido.

La fig. 166 da dicha producción específica en función del tamaño de grano del material de alimentación (tamaño máximo). Se observa una zona muy extensa, pero ésta resulta de los estudios realizados hasta la fecha. Los datos indicados son válidos para unas condiciones medias (una cocción de intensidad media); los valores dados pueden aumentarse elevando la velocidad de los gases y la presión de éstos, pero, no obstante, la que decide es la temperatura.

La producción específica, D_s , en toneladas diarias/m² de sección, permanece constante para cualquier tamaño de horno y para cualquier tamaño de grano del material crudo, dependiendo exclusivamente de la velocidad de los gases, v_0 , y del consumo de calor.

La producción específica, D_s , en toneladas diarias/m³, aumenta al disminuir el tamaño de grano del material de alimentación, por disminuir también la altura.

En la fig. 177 se da la producción específica, en tone

ladas diarias/m³, en función del volumen del horno, del consumo de calor y de la velocidad de los gases en los hornos verticales de cemento. Se puede ver en seguida a qué punto hemos llegado.

Por consiguiente, únicamente se puede conseguir una mayor producción en un horno disminuyendo el consumo de calor y elevando la velocidad de los gases, lo cual, en los hornos verticales de cemento y dolomita, depende sobre todo del correcto dimensionamiento del diámetro; en los hornos verticales de cal interviene en la fijación del diámetro interior y de la velocidad de los gases una determinada temperatura de cocción.

Las causas de un mal rendimiento en los hornos verticales de magnesita, de dolomita o de cemento son las siguientes: falta de aire, exceso de finos, empleo de un material crudo de forma inadecuada, esclusas no herméticas, combustible de mala calidad. En los hornos de cal, estas causas son: una relación tamaño de grano del material de alimentación/tamaño de grano del cok inadecuada, un valor demasiado grande para la relación entre los tamaños de grano máximo y mínimo, inyectoras, así como cuestiones relacionadas con la carga y descarga, que no pueden tratarse aquí. En los hornos con tiro forzado, alimentados con un material dividido en trozos pequeños, sobre todo en los hornos verticales de dolomita con una elevada velocidad de los gases, $v = 1$ m/seg, sucede que la zona de cocción se dispone oblicuamente. La razón ha de buscarse en la formación de canales, a través de los cuales se va desplazando lateralmente la zona de cocción, o bien en una succión irregular.

REACCION DE BOUDOUARD

La reacción $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$ constituye un problema en los hornos verticales que ha sido muy debatido. Todo horno vertical es análogo a un generador de gas, en el cual se trata de producir un gas combustible de una potencia calorífica máxima, transformándose el CO_2 en CO ; en los hornos de cúpula se desea un alto rendimiento de fusión, y a veces también unos gases desprendidos ricos en CO , aunque no se pueden utilizar económicamente. En la cocción del cemento y de la cal, así como de magnesita y dolomita, se tiende a conseguir un rendimiento máximo en la combustión y, para ello, se trata de evitar la presencia de CO en los gases desprendidos. Hasta ahora, se venía considerando como un arte conseguir esto, porque todo horno vertical es, en principio, un generador, en el cual el CO_2 ya formado se transforma en CO en contacto con el cok incandescente. En los hornos verticales de cal, esta reacción no puede tener lugar en la mayor parte de la zona de calcinación o descarbonatación, pero, en el límite de esta zona con la de precalentamiento, puede presentarse la reacción $\text{C} + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{CO}$, porque en este punto es pequeña la proporción de oxígeno, como ya he indicado (2). Cuando se ha consumido todo el oxígeno, aparece la reacción $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$. Por consiguiente, debe haber en el horno una zona de temperaturas en la que se establece un equilibrio. Pero la palabra equilibrio no define del todo este proceso, porque se establece en una determinada zona pequeña y se desplaza muy rápidamente; no obstante, dicho equilibrio determina las condiciones de combustión y la composición de los gases desprendidos. Hasta ahora la cuestión más importante era si se alcanza realmente el equilibrio o si la curva de equi-

librio (para aire seco, véase la fig. 188, según Gunz (21) nos da al menos una indicación sobre en qué zona tiene lugar la reacción. Considerando la relación de combustión $\Psi = (\text{CO}_2/\text{CO}_2 + \text{CO}) \cdot 100$, en %, puede observarse que esta reacción tiene lugar en todos los hornos verticales actuales. La relación de combustión se ha calculado exclusivamente a partir de la combustión del combustible, sin introducir el CO_2 procedente del crudo. Se plantea ahora la cuestión, considerando también el diagrama Q - t (fig. 3, nº 49 de Ultimos Avances, marzo 1954), de a qué temperaturas y en qué momento de la combustión se presenta la reacción de Boudouard en los hornos verticales de cemento y de cal. Tomando como base los valores de la mencionada figura, puede calcularse el tiempo real de permanencia de los gases en el interior del horno, por introducción de la velocidad de los mismos en los huecos del lecho poroso o granular. Se llega así a unos tiempos de permanencia de los gases en la zona de calcinación de los hornos verticales de cal de 5 a 10 segundos, lo cual correspondería a una temperatura de reacción de 800 a 900°C; en los hornos de cemento resultaría de 0,1 a 0,2 segundos, correspondiente a unos 1000°C.

Ahora bien, no disponíamos de los puntos de inflamación del cok; yo he supuesto que eran, para un aire totalmente seco y un contenido de oxígeno del 1%, 700°C para el cok solo y 1000°C para el cok incorporado en los gránulos de crudo. De acuerdo con estas suposiciones, la reacción tendría que tener lugar, por consiguiente, poco después, o al principio, de la combustión; esto, bien entendido, en hornos modernos con un consumo de calor pequeño. Se comprende fácilmente que, en aquellos hornos en que el consumo de calor es mayor, se desplazan las zonas. Está, pues, en -

nuestra mano, el reducir a un mínimo la reacción de Boudouard conduciendo el horno correctamente, como puede observarse también en la comparación de los balances térmicos correspondientes a los hornos antiguos y a los modernos (22). Si consideramos la reacción del CO_2 procedente de los crudos con el cok incandescente a base de los diagramas $Q - t$ de la fig. 3 del nº 49 de Ultimos Avances (reacción de Hauenschild), observamos que podría tener lugar en los hornos verticales de cal, en los cuales la zona de calcinación corresponde con la de combustión del cok, pero los análisis de Orsat realizados en los hornos modernos no dan indicación alguna de esta reacción; en los hornos de cemento es ésta imposible, pues el combustible se inflama a temperaturas superiores a las correspondientes a la zona de calcinación; quizá tuviese lugar anteriormente en los hornos antiguos, en los cuales las zonas de sinterización y calcinación eran bastante largas (2). En los modernos hornos verticales de cemento de gran rendimiento las zonas de sinterización y calcinación son muy cortas y la temperatura de los gases desciende en seguida súbitamente debido a la elevada cantidad de calor consumido por la descarbonatación, siendo el tiempo de permanencia de los gases muy breve.

La explicación consiste en que, cuanto más baja es la temperatura de reacción, se forma tanto más CO_2 y tanto menos CO (Fig. 188). La cocción rápida que tiene lugar en los modernos hornos verticales produce un enfriamiento muy rápido de los gases en la zona de precalentamiento por debajo de una determinada temperatura, de suerte que ya no se puede establecer un equilibrio químico, o sólo se establece parcialmente, ya que las reacciones

quedan prácticamente "congeladas". La reducción del CO_2 es un proceso endotérmico, es decir, que consume calor, y el balance térmico de los modernos hornos verticales de cemento y de cal pone de manifiesto que, al aumentar la producción con un consumo de calor mucho más bajo, este calor sólo puede invertirse en una parte muy pequeña para dicha reducción.

Esto nos proporciona otra explicación de la fig. 2, incluida en el nº 49 de Ultimos Avances (marzo 1954), en la cual se observa que la producción específica disminuye al aumentar el consumo de calor; al aumentar la cantidad de aire para una misma relación de mezcla crudo/combustible, se incrementa también la producción, con lo que se eleva asimismo la temperatura de precalentamiento del aire por enfriamiento del producto cocido y aumenta la temperatura del material debido al incremento de v_0 . Las distintas zonas se desplazan hacia arriba y quizá exista disponible en la zona de precalentamiento una menor cantidad de calor, con lo que descenderá la temperatura de los gases. Pero, al disminuir el consumo de calor por un incremento de la producción, resulta una mejor relación de combustión, γ , con lo que se eleva de nuevo la temperatura y entonces se dispone en la zona de precalentamiento de una cantidad de calor mucho mayor, lo cual está de acuerdo con los resultados prácticos obtenidos en los hornos verticales de cemento. En los hornos verticales de cal puede observarse todavía en el momento actual que la relación de combustión, γ , es muy mala (hasta un 10% de CO) con un consumo de calor alto (de 1300 a 1400 Kcal/Kg de CaO). Esto puede regularse en estos hornos, si bien hay que tener en consideración para ello muchos factores que influyen, como son granulometría del material

de alimentación (exceso de finos), combustible de mala calidad, limitación de la temperatura en favor de la calidad del producto, tiempos de permanencia en el interior del horno y condiciones de presión. Una causa fundamental de estos fenómenos debe buscarse, ya se trate de hornos de cal, de cemento ó de dolomita, en que el aire no pasa a través de los canales y con ello resulta un valor poco favorable para la relación de combustión, Ψ , funcionando el horno de acuerdo con el principio del generador, que se expresa precisamente en el equilibrio de Boudouard.

Calculando la relación de combustión, Ψ , a partir de muchos balances térmicos (2, 10, 14, 22), resultan valores comprendidos entre el 73 y el 90% en hornos verticales de cal y de cemento, con consumos de calor de 1500 o 1300 a 900 Kcal/Kg de producto cocido.

LEYES FUNDAMENTALES QUE RIGEN LOS HORNOS VERTICALES

Von Preen (23) ha estudiado a fondo las condiciones en los hornos de cúpula, llegando a determinadas conclusiones. Este autor enjuicia la conducción del horno según la relación de combustión, Ψ , -que en nuestro caso exige una modificación del cálculo por aparición de CO_2 procedente de la caliza- y según el rendimiento de fusión, llegando a una ley fundamental para el horno de cúpula. Sin entrar en los complicados detalles del cálculo, vamos a aplicar aquí las ideas de von Preen a los procesos que tienen lugar en los hornos verticales de cal y cemento.

La fig. 199 representa los balances térmicos de un horno vertical de cal y de uno de cemento referidos a la combustión

de 1 Kg de C. Resulta de aquí una ley fundamental para la marcha de cada horno, que da el rendimiento de cocción = producción específica = D_s , en Kg de producto cocido/Kg de C y las Kcal/Kg de C liberadas = Q_c , para cada caso, comprendiendo al mismo tiempo la relación de combustión, ψ .

La ley fundamental para los hornos verticales de cemento es la siguiente:

$$\begin{aligned} Q_c &= 247 \cdot D_s + 5300 \\ \psi &= 4,78 \cdot D_s + 50 \end{aligned}$$

y para los hornos verticales de cal:

$$\begin{aligned} Q_c &= 475 \cdot D_s + 3600 \\ \psi &= 8,6 \cdot D_s + 20 \end{aligned}$$

La recta correspondiente a la ley mencionada se desplazará hacia abajo o hacia arriba, si varía el valor de alguna de las magnitudes enumeradas, por ejemplo, el calor preciso para la vaporización del agua. Además, esta ley fundamental puede aplicarse a cada término del balance térmico, si bien esto se saldría de los límites de este trabajo.

Resulta muy interesante tener ante la vista este balance térmico en Kcal/Kg de C, particularmente en un estudio sistemático como el presente, en que se comparan los hornos antiguos con los modernos hornos de gran rendimiento. Para una mejor comprensión, se incluyen también los valores para el consumo de calor en Kcal/Kg de producto cocido y sus recíprocos en Kg de producto/Kg de C.

Con esto se consigue expresar el balance térmico por medio de una función uniforme, con lo que quedan especialmente claras las pérdidas debidas a la formación de CO. Ya en 1950, - (22) fig. 12, indiqué los balances térmicos en Kcal/Kg de material para los hornos verticales de cal, que se han transformado aquí en Kcal/Kg de C o Kg de material/Kg de C. Naturalmente, también se puede desarrollar la ley fundamental de un modo análogo a partir de estas expresiones. Se puede también afirmar que una cocción insuficiente del cemento es debida a no haberse alcanzado la temperatura necesaria de cocción o a una distribución no uniforme del cok y del aire, y que se tiene una cocción en atmósfera reductora cuando se produce una intensa reacción de Boudouard para una producción insuficiente, o si los tamaños de grano y la composición granulométrica no son adecuados. Se obtiene una cocción intensa del cemento aumentando la producción específica en Kg/Kg de C o disminuyendo el consumo de calor en Kcal/Kg de material. En el caso de la cal, las condiciones son distintas: aquí es la velocidad de los gases la que determina la calidad del producto cocido.

Los resultados del presente estudio, en particular los que se refieren a los tamaños de grano y a las pérdidas de presión, harán posible en un futuro próximo la instalación de hornos verticales de pequeña altura debajo de los hornos rotatorios, para el precalentamiento de los crudos.

La consideración de los factores estudiados nos presenta abierto el camino hacia una economía de calor y debe estimularnos no sólo a aumentar la producción, sino sobre todo a conseguir un verdadero ahorro de combustible y un mejoramiento de

la calidad. L.S.C.

- - -

Bibliografía citada

- (1) Anselm, W.: El horno rotatorio, determinación de sus dimensiones y analogías entre los distintos modelos (Der Drehofen, Dimensionsbestimmung und Modellähnlichkeit), Zement-Kalk-Gips, 6 (1953), 5, 151-164.
- (2) Anselm, W.: El horno vertical (Der Schachtofen), Zement-Kalk-Gips, Número especial, marzo 1953.
- (3) Anselm, W.: La calidad de los combustibles (Die Wertigkeit der Brennstoffe), Zement-Kalk-Gips, (1952), 6, 189-193.
- (4) Block, B.: La cocción de la cal (Das Kalkbrennen), editorial Otto Spamer, Leipzig 1924.
- (5) Guerin, H.: Aportación al estudio de la reactividad del cok (Contribution à l'étude de la carboxyreactivité des cokes). IV Congreso Internacional de Calefacción, 1952, - Gr. I, Sect. 12, nº 2.
- (6) Bannerje, S., Sarjant, R. J.: Reactividad del cok (Reactivity of coke), Fuel 30/1951, pág. 130-139.
- (7) Gumz, W.: Química y Física de la Combustión, Fabricación del gas y fundición (Chemie und Physik der Verbrennung, Vergasung und Verhütung). Conferencia, 12.3.1947, Haus der Technik, Essen.
- (8) Rohrbach, R.: La cocción de cemento en la cinta de sinterización (Das Zementbrennen auf dem Sinterband), TIZ.-Zbl. 77/1953, 9/10, pág. 159.
- (9) Anselm, W.: Técnica de la trituración y polvo (Zerkleinerungstechnik und Staub), DIV-Verlag, Düsseldorf 1950.
- (10) Anselm, W.: Los cálculos térmicos en los hornos para la cocción de cemento, cal, magnesita y dolomita (Die Wärmerrechnung bei Brennöfen für Zement, Kalk, Magnesit und Dolo

- mit), Radex-Rundschau (1950), 1, pág. 3 y 61.
- (11) Boehm, H.: Ensayos para la determinación de los coeficientes de transmisión del calor por convección en canales estrechos revestidos de obra de fábrica (Versuche zur Ermittlung der konvektiven Wärmeübergangszahlen an gemauerten engen Kanälen), Archiv für Eisenhüttenwesen 6 (1932/33), pág. 423-431.
 - (12) Brötz, W.: Estudio de la transmisión de calor, transporte de material y descenso de la presión en lechos porosos atravesados por corrientes de gases (Untersuchung über Wärmeleitung, Stofftransport u. Druckabfall in durchströmten Schüttgütern), Chemie-Ing.-Technik 23 (1951), 17/18, 408/496.
 - (13) Lydersen, A.: Estudios sobre la transmisión del calor y descenso de la presión en lechos de esferas al hacer pasar aire a su través (Untersuchungen über Wärmeübergang und Druckabfall in Kugelstapeln beim Durchblasen von Luft), Trondheim 1950, Norweg. Techn. Hochschule.
 - (14) Anselm, W., Koch, A.: Técnica de la cocción con oxígeno - (Brenntechnik mit Sauerstoff). Publicaciones Steine und Erden, tomo 7, 1944, Berlin.
 - (15) Piwowarsky, E., Krämer, K.: Neue Giesserei, techn. wissenschaftl. Beihefte, 1949, pág. 3/10.
 - (16) Jungbluth, H.: Neue Giesserei, techn. wissenschaftl. Beihefte 1949, pág. 11/16.
 - (17) Azbe, V. J.: Fabricación de la cal (Lime manufacture), Rock Products, mayo 1953, pág. 184.
 - (18) Schwarz v. Bergkampff, E., Modl, E.: Cálculos racionales de los distintos tipos de hornos industriales calentados con combustibles (Rationelle Modellberechnungen von brennstoffbeheizten Industrieöfen. Technische Mitteilungen. Haus der Technik, Essen 45 (1952), 11, 388-394.
 - (19) Hoff, H., Netz, H.: Die Hüttenwerksanlagen zur Gewinnung und Erzeugung der Werkstoffe. Berlin 1938.
 - (20) Anselm, W., Schindler, K.: Un procedimiento para determinar la calidad del clinker (Ein Verfahren zur Bestimmung der Klinkergüte), Zement 1937, 32, 33, 34.
 - (21) Gumz, W.: Generadores de gas y hornos altos (Gas Producers

and Blast Furnaces), New York 1950, pág. 277.

- (22) Anselm, W.: Economía térmica en los hornos verticales de cal (Wärmewirtschaft beim Kalkschachtofen), TIZ.-Zbl. 74 (1950), 5/6, 57/61.
- (23) V. Preen, W.: El balance térmico y el equilibrio de Boudouard como base para el tratamiento cuantitativo de los hornos verticales, ejemplificado en los hornos de cúpula (Die Wärmebilanz und das Boudouardsche Gleichgewicht als Grundlage für die rechnerische Behandlung von Schachtöfen, dargestellt am Kuppelöfen), Giesserei, Techn. wissenschaftl Beihefte, 1953, 11, 503/525.

- - -

HORNOS VERTICALES DE CAL

- N = CANTIDAD DE GASES EN Nm³/SEG. (CON FACTORES PARA EL 50 % DEL CO₂ PROCEDENTE DEL CaCO₃)
- v₀ = VELOCIDAD DE LOS GASES EN LA ZONA DE CALCINACION EN m/SEG.
- W_s = CONSUMO ESPECIFICO DE CALOR EN Kcal/Kg. CaO
- t_m = TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DEL MATERIAL
- d_i = DIAMETRO INTERIOR EN m.
- K = TAMAÑO DEL GRANO (MAXIMO)
- D = PRODUCCION EN TONELADAS DIARIAS
- H = ALTURA EN m.

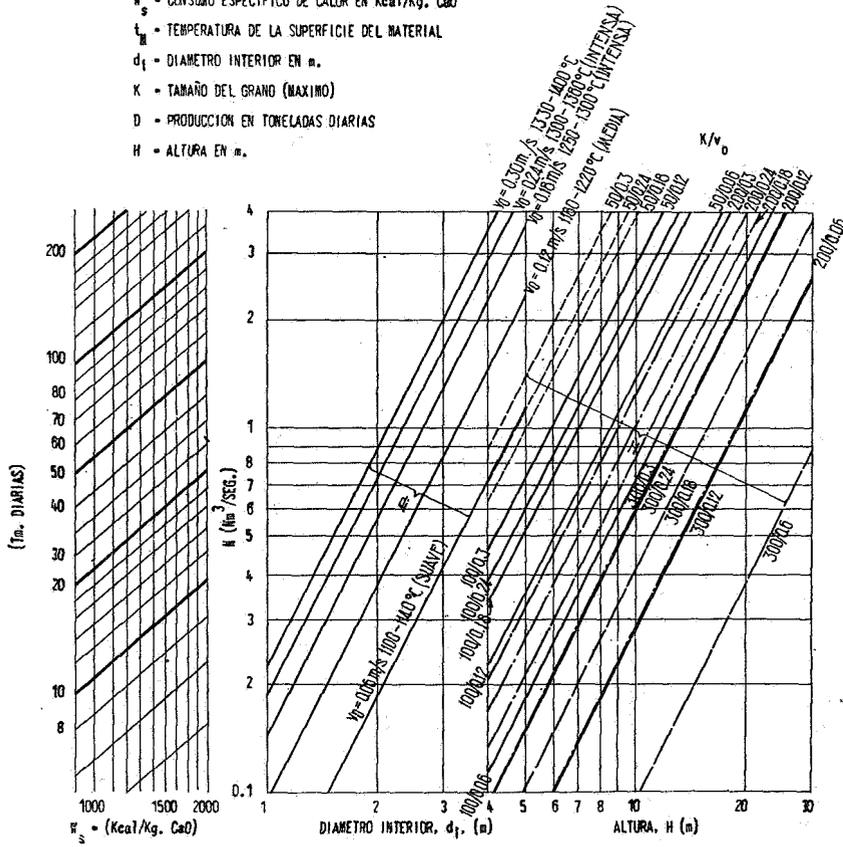


Fig. 1

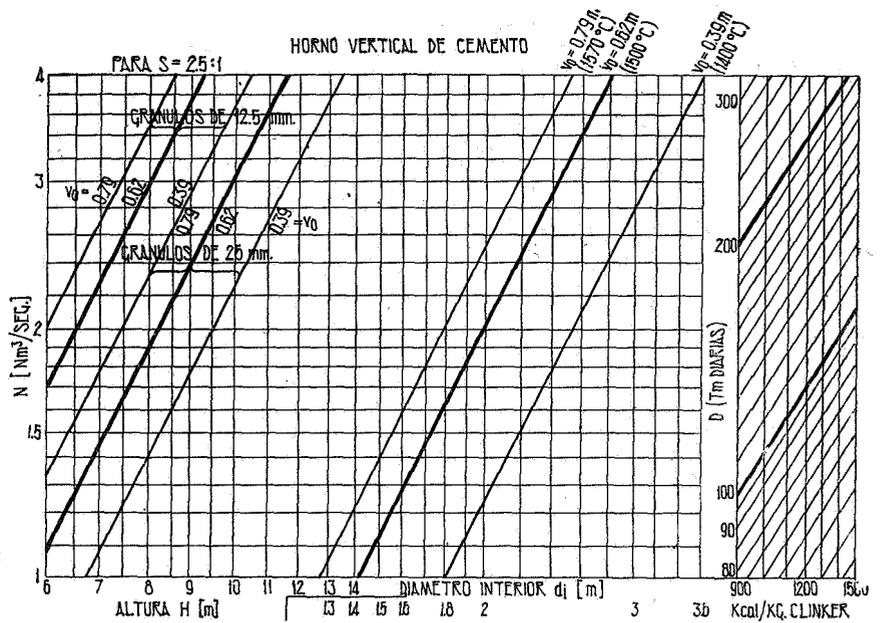


Fig. 2

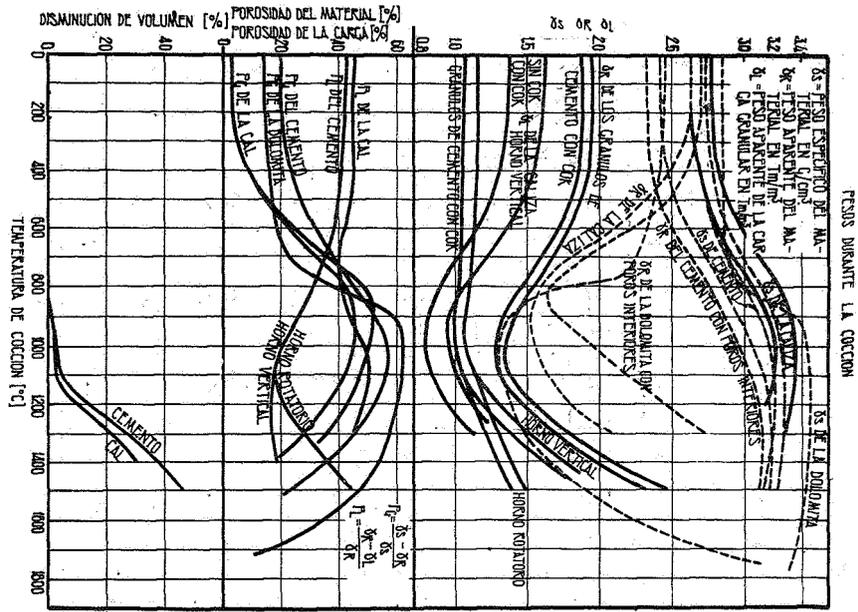


Fig. 4

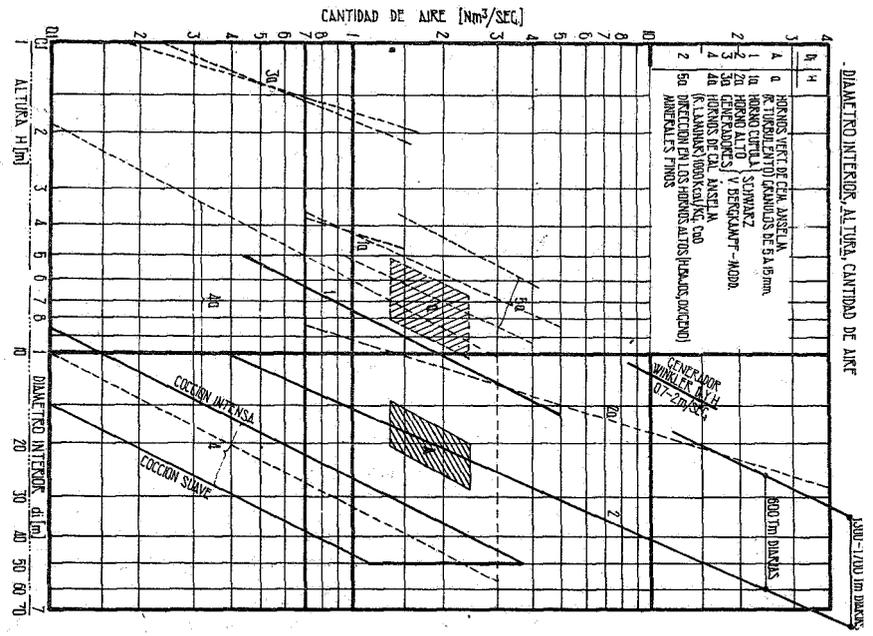


Fig. 3

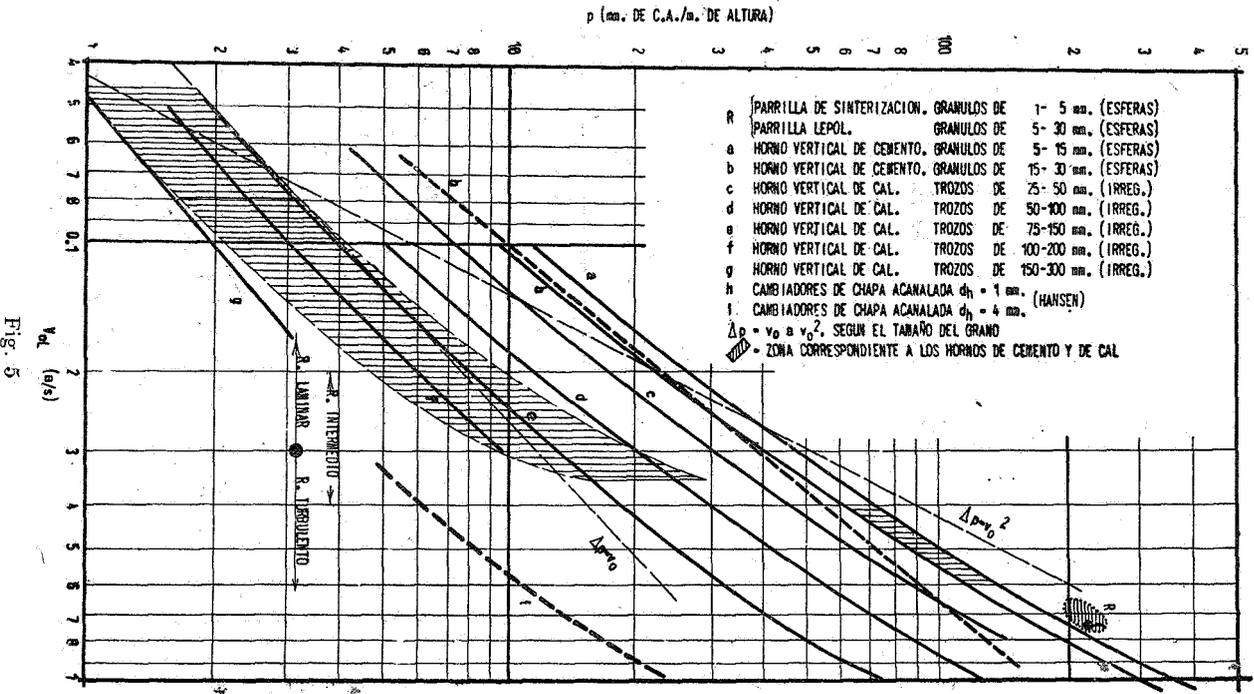


Fig. 5

HORNOS VERTICALES DE CEMENTO Y DE CAL. PERDIDA ESPECIFICA DE PRESION, Δp , EN mm. DE C.A./m. DE ALTURA, EN FUNCION DE v_0 Y DEL TAMAÑO DE GRANO, $S = 2:1$ (PARA LAS TEMPERATURAS RECOMENDADAS EN EL HORNO; CASO DE CALOR CONSTANTE, 1000 kcal/kg.).

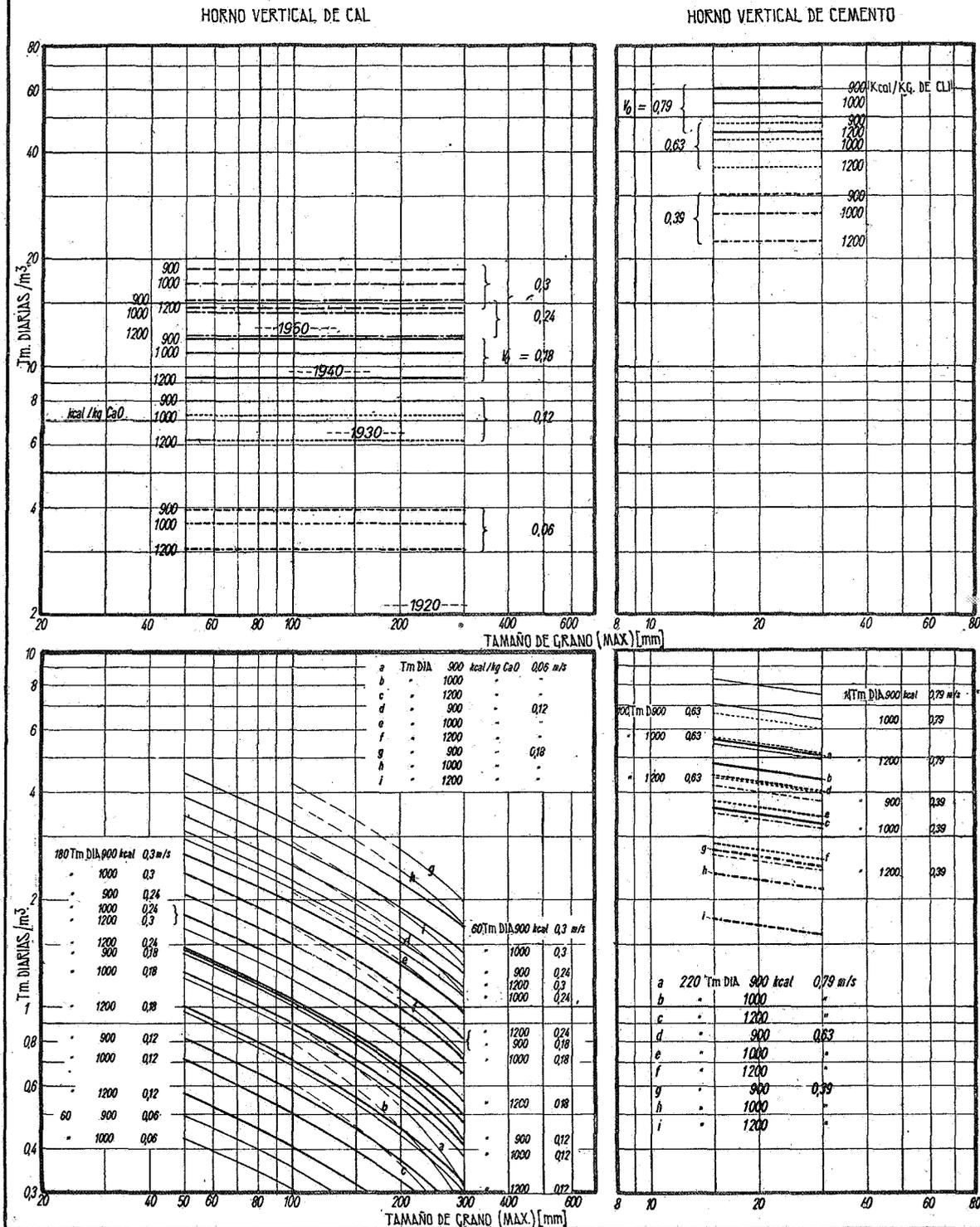


Fig. 6

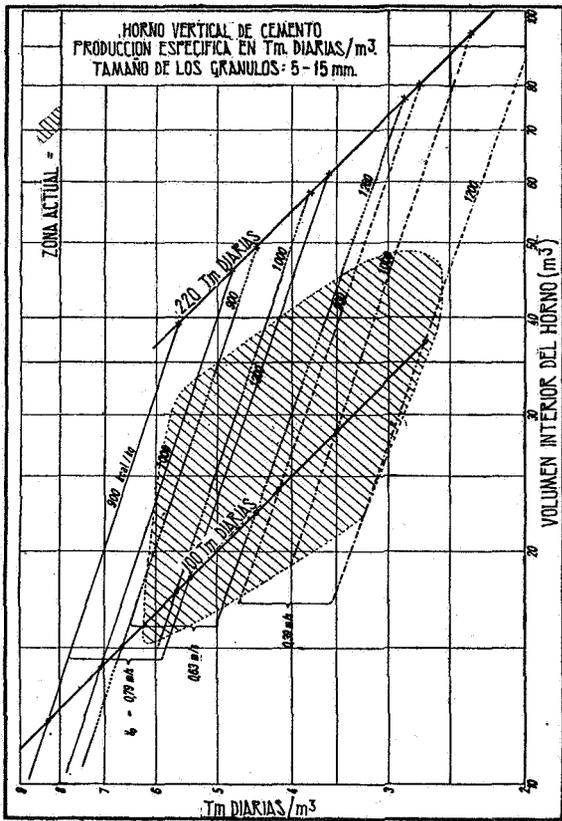


Fig. 7

EQUILIBRIO DE BOUDOUARD

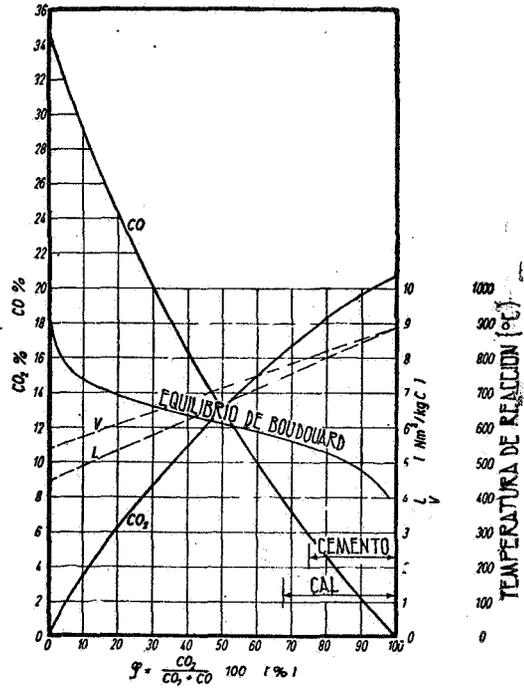


Fig. 8

BALANCE TERMICO EN KCAL/KG. DE C, PARA UNA CANTIDAD DE AIRE CONSTANTE

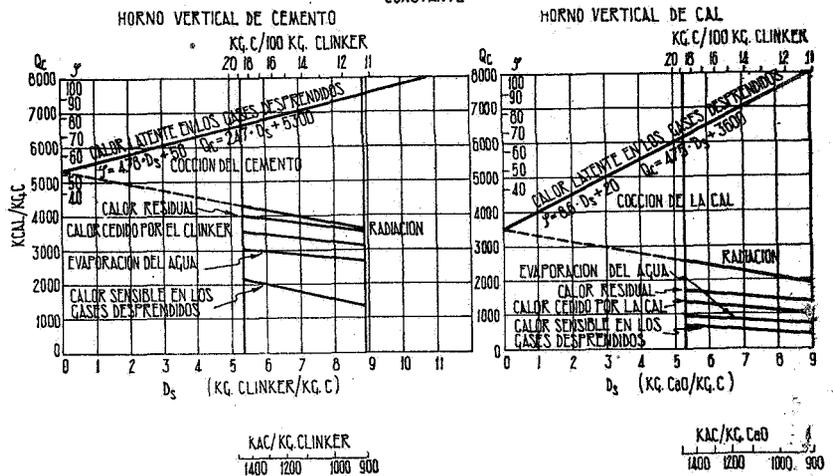


Fig. 9

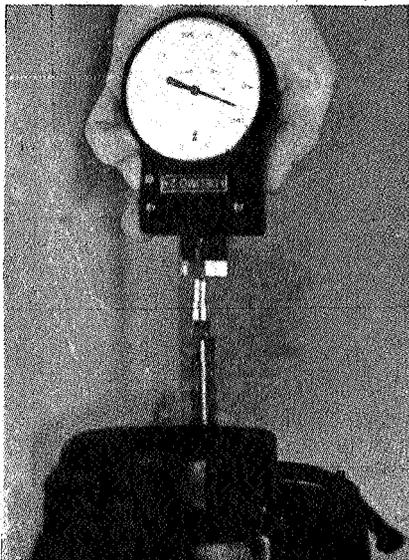


Fig. 10

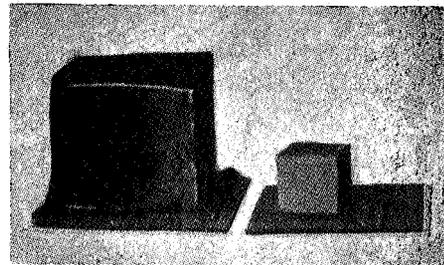


Fig. 11