

865.94.047: 536.7 = 60

transmisión del calor en el horno rotatorio para cemento*

MR. ALBERT FOLLIOU

de la S. A. Cales y Cementos de Lafarge y de Teil

1.—Objeto del estudio. Su carácter experimental

Un horno es el lugar en que el calor producido por un combustible debe cederse a un material dado. Esta cesión tiene lugar según ciertos mecanismos, que conviene conocerlos de antemano, para aumentar la intensidad de la misma, directamente relacionada con la capacidad de producción del horno. Hace algunos años, el inglés Hilbert estudió cualitativamente las características de los cambios específicos del horno rotatorio para cemento, pero, a falta de medidas, su cálculo perdía interés al basarse en gran número de hipótesis. El suizo Hans Gigy, al reanudar el estudio individual de los tipos de intercambio, y gracias a numerosas medidas de temperatura, logró disminuir el número de hipótesis.

Sin embargo, el fundamento del método era todavía demasiado arbitrario para que, a partir de los cálculos, pudieran extraerse datos que permitiesen la mejora de los intercambios térmicos. Por esta razón desarrollamos un programa muy amplio de medidas, en el cual se incluían, por primera vez, mediciones directas de la radiación en el interior de un horno de fábrica.

En esta Ponencia nos limitaremos a hablar de los estudios acerca de las variaciones térmicas, dejando aparte el establecimiento de balances térmicos.

2.—Breve descripción del horno

El horno (fig. 1) mide 45 m de longitud y 2,75 m de diámetro. Inferiormente va provisto

de un recubrimiento refractario sílico-aluminoso de 20 cm de espesor y gira a razón de una vuelta cada 50 segundos.

La materia cruda está constituida por una pasta acuosa de arcilla y caliza. Entra por la parte superior del horno y atraviesa la zona de secado, que tiene una longitud de 13 m, donde el agua se evapora. Esta zona va provista de cadenas, que alternativamente quedan expuestas a los gases que las calientan, o se sumergen en la pasta cruda, a la que ceden el calor acumulado. El material, a la temperatura de 100°C, sale de esta zona completamente deshidratado y en forma de gránulos y polvo.

Entra después en la zona intermedia, de 24 m de longitud, en la que es rápidamente calentada a 600°C, comenzando entonces la descarbonatación de la caliza. A 880°C dicha descarbonatación se ha verificado en sus dos terceras partes y, a la salida de la zona intermedia, el material se ha descarbonatado en un 95 por ciento, encontrándose a una temperatura de 950°C.

El material pasa entonces a la zona de cocción, de 6 m de longitud, donde la descarbonatación se completa; además, la sílice del componente arcilloso del crudo se combina con la cal liberada por la descomposición del componente calizo. Finalmente, el material, que ha alcanzado la temperatura de 1.400°C, sale del horno.

Según estas transformaciones, las cantidades de calor a transmitir al material referidas a 1 kg de clínker, son las siguientes: 600 kcal en

* Ponencia presentada en los II Coloquios de Directores y Técnicos de Fábricas de Cemento. I. T. C. C., marzo de 1957.

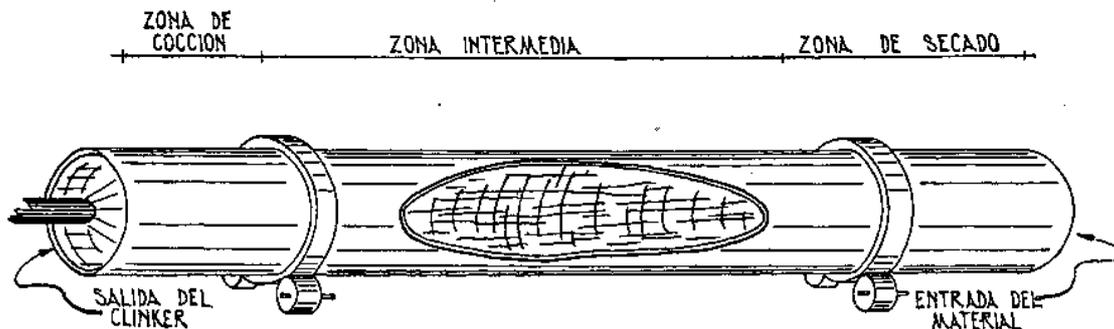


Fig. 1

la zona de secado, 700 kcal en la zona intermedia y 200 kcal en la zona de cocción, lo que corresponde, en el caso del horno estudiado, que produce 200 toneladas diarias de clínker, a transmisiones de 5.000.000, 5.800.000 y 1.800.000 kcal/h.

3.—Variaciones térmicas

En una sección del horno (fig. 2), represento por AB el talud del material. La masa gaseosa (que designa, bien sea a la llama propiamente dicha, la cual se extiende hasta el primer tercio de la zona intermedia, o bien a los gases de combustión que la acompaña) irradia hacia la pared

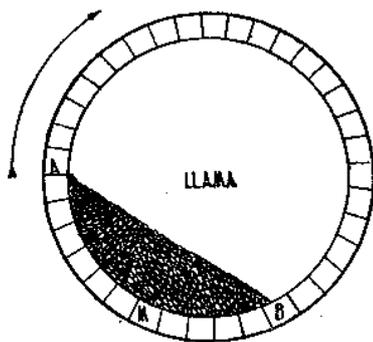


Fig. 2

AMB y hacia el talud del material. Este último recibe directamente, a través de la superficie AB, una cierta densidad de flujo de calor, esencialmente por radiación. Por otra parte, la pared acumula una cierta cantidad de calor que res-

tituye parcialmente al material cuando se pone en contacto con éste a lo largo del arco AMB, mecanismo específico del horno rotatorio al que hemos dado el nombre de efecto de pared.

3. 1.—Densidad de flujo de calor que incide sobre la superficie AB

Si se conoce el coeficiente de emisión ϵ de la masa gaseosa radiante y su temperatura absoluta θ , la radiación R viene dada por la expresión:

$$R = \sigma \epsilon \theta,$$

en la cual σ es la constante de Stefan.

La determinación de ϵ en el caso de una llama de carbón pulverizado responde a la fórmula:

$$\epsilon \theta = 1 - e^{-\frac{450 \text{ mol}}{\rho \theta d}},$$

resultando así, para el coeficiente de emisión, un valor del orden de 0,4 considerablemente inferior a los coeficientes medidos prácticamente en las llamas industriales; la desviación es debida, tanto a la radiación de las cenizas residuales, cuanto al cracking de los hidrocarburos, el cual no se tiene en cuenta.

En el caso de los gases de combustión que, sucediendo a la llama propiamente dicha, ocupan la mayor parte de la zona intermedia, el cálculo del coeficiente de emisión ϵ tiene en

cuenta los gases que poseen radiación térmica, aunque sean transparentes en el espectro visible; es decir, el anhídrido carbónico y el vapor de agua. Su radiación viene dada en tablas, en función de su temperatura y de su presión parcial.

Igualmente sería preciso tener en cuenta la radiación de los polvos que se producen en el talud del material por la rotación del horno, los cuales son arrastrados por la corriente gaseosa. Desgraciadamente, es imposible evaluar con precisión la densidad y las dimensiones de estos polvos. Sin embargo, veremos, por lo que sigue, que el papel que desempeñan es preponderante.

La determinación de la temperatura verdadera es complicada, no solamente en la llama, sino también en los gases quemados a alta temperatura. La técnica del pirómetro de aspiración es difícil de adaptar a un horno rotatorio y, además, mediciones efectuadas en una sección en que la temperatura media era de 1250°C, nos han demostrado que la temperatura verdadera podía variar en 150°C dentro de dicha sección; así pues, la temperatura a considerar en el cálculo de la radiación estaba mal definida.

Finalmente, la densidad de flujo de calor que incide sobre la superficie AB no comprende solamente la densidad de flujo de calor emitido por la masa gaseosa radiante, sino también la fracción de la misma emitida por la pared AMB que consigue atravesar la masa gaseosa. El cálculo de esta cantidad exigiría conocer la

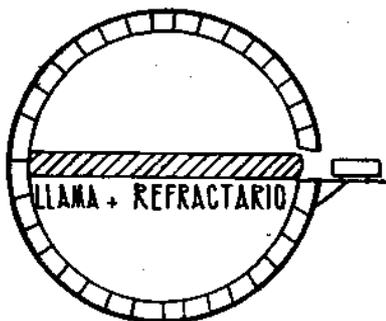


Fig. 3

temperatura superficial de la pared y su coeficiente de emisión, y también el coeficiente de absorción de la masa gaseosa para la radiación de la pared. Ninguno de estos términos puede evaluarse ni siquiera aproximadamente.

Por todas estas razones, hemos preferido medir directamente la radiación de la masa gaseosa. Para ello fué preciso perforar el horno mediante una serie de orificios (fig. 3), que per-

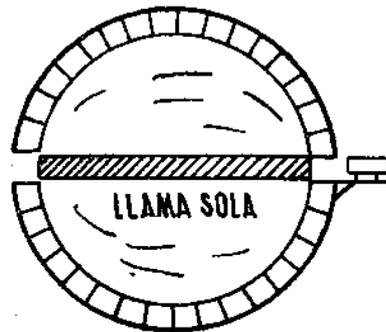


Fig. 4

miten ver el interior a través de un pirómetro de radiación total. Con tal fin hemos practicado aberturas en once secciones del horno: tres en la zona de cocción, cinco en la zona intermedia y tres en la zona de secado.

El pirómetro apuntado a través de estos orificios mide, no solamente la radiación de la masa gaseosa, sino también la emitida por el refractario que se encuentra detrás y que no es absorbida por dicha masa.

Para obtener únicamente la radiación de la masa gaseosa es preciso practicar otro orificio, diametralmente opuesto al anterior (fig. 4). El pirómetro dirigido a uno de ellos a través del otro recoge así la radiación de la masa gaseosa, si bien adicionada de la fracción de radiación del medio ambiente exterior al horno, que no es absorbida por aquélla; esta última cantidad es perfectamente despreciable.

Tan sólo se han utilizado estas aberturas opuestas en las cinco secciones de la zona intermedia. La rápida formación de escorias que tapan los orificios no nos ha permitido practicar más que tres pequeños agujeros de observación en la zona de cocción. En la zona de cadenas, éstas habrían ocultado el orificio opuesto. Así pues, en estas dos zonas nos hemos contentado con medir la radiación total. Por otra parte, la zona de cocción no intercambia más que 1.800.000 kcal, frente a 5.800.000 de la zona intermedia. En la zona de cadenas el intercambio

se efectúa esencialmente por convección, por lo que la medida de la radiación no tiene en este caso gran interés.

De este modo en la zona intermedia hemos medido la radiación de la llama, de zonas de llama de distintos espesores y de la llama con el plano posterior de refractario caliente.

Las medidas se han realizado con un micropirómetro de radiación total, especialmente construido para tal fin.

En efecto, para no perturbar el régimen de intercambios térmicos, interesa efectuar las medidas durante la rotación del horno (una parada de un minuto produce un aumento de 150°C en las temperaturas de radiación de la

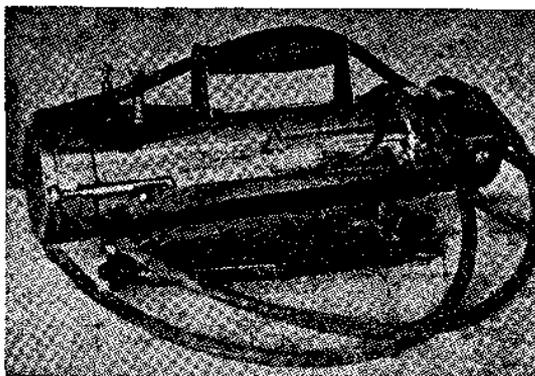


Fig. 5

suciedad del medio ambiente, y deliberadamente hemos detectado muy débiles calentamientos de la termopila mediante un galvanómetro muy sensible. Con tal objeto hemos construido un micropirómetro (figs. 5 y 6) que, con su galvanómetro, constituye un sistema cuyo tiempo de indicación es de 3 segundos y permite medir un flujo energético de 100 microvatios, con una precisión aproximada de 1 microvatio. Antes de cada experiencia se calibraba el aparato frente a un cuerpo negro esférico, a una temperatura preferentemente próxima a la de radiación probable a medir. El galvanómetro se instaló a cierta distancia del horno en una cámara oscura y sobre soportes antivibrantes, y sus desviaciones se registraron sobre papel fotográfico arrollado sobre un tambor que gira en sincronismo con el horno.

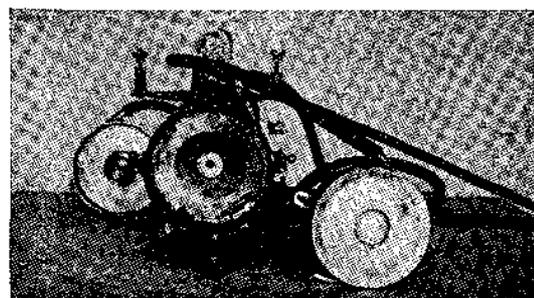


Fig. 6

sección 6). No ha sido posible colocar, en posición fija, un pirómetro que hubiera actuado al pasar los orificios frente a él, pues un punto del horno se desplaza a la velocidad de 15 cm/seg, y el tiempo durante el cual es posible dirigir una visual es del orden de una décima de segundo. Siendo, por tanto, inferior al tiempo necesario para equilibrar los elementos detectores utilizables en el pirómetro (termopilas), esta solución se descartó y se trató de fijar el pirómetro al horno durante una fracción de vuelta (alrededor de 10 segundos), tiempo suficiente para efectuar una medición. Siendo los agujeros practicados en la pared necesariamente pequeños, el pirómetro debía poseer una gran sensibilidad. A causa de las vibraciones a las que está sometido el horno y del polvo existente en el ambiente, hemos renunciado a los sistemas amplificadores de espejo, frágiles y sensibles a la

En el gráfico de la fig. 7 se representan las temperaturas de radiación de la llama y las de la llama con el plano posterior de refractario calentado; la temperatura de radiación es, por definición, la temperatura del cuerpo negro que tiene la misma radiación que la fuente considerada.

La pequeña diferencia entre la radiación de la llama sola y de la llama con el plano posterior de refractario caliente indica que el coeficiente de emisión de la masa gaseosa es muy elevado y del orden de 0,8 en la sección 6; se sabe por otras mediciones que la temperatura del refractario es elevada y muy poco inferior a la de radiación de la llama. Ahora bien, si se calcula el coeficiente de emisión no teniendo en cuenta más que la radiación del anhídrido carbónico y del vapor de agua, según sus presiones parciales en esta sección 6, se encuentra

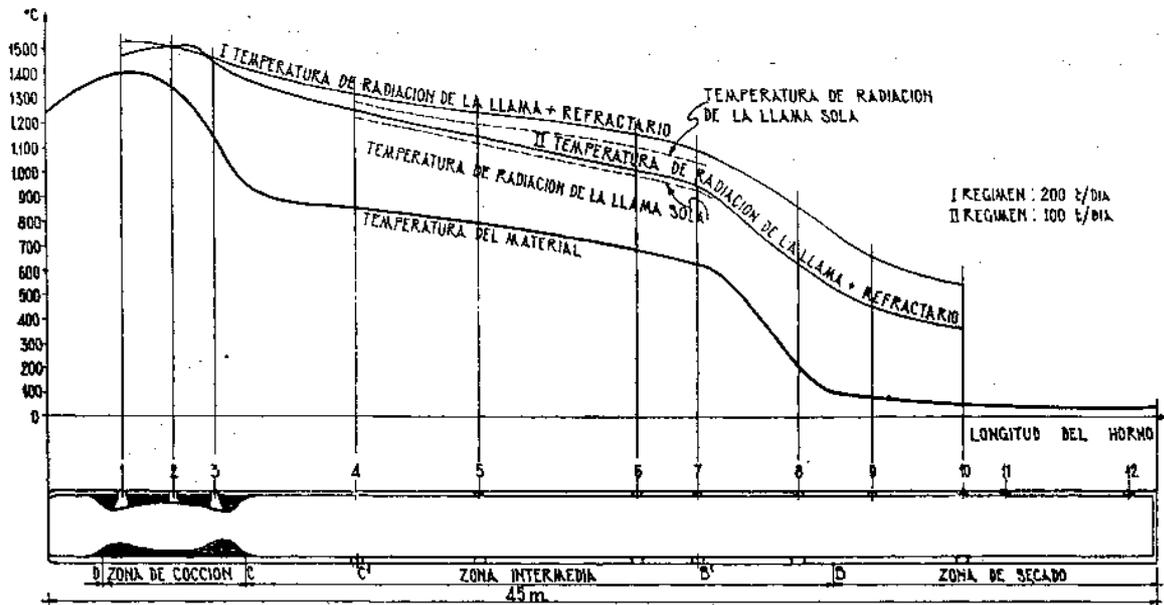


Fig. 7

el valor 0,26. Esta considerable desviación es debida al polvo. Interrumpiendo la inyección de carbón (fig. 8), se comprueba que la radiación de la masa gaseosa que no contiene sino muy pequeñas cantidades de anhídrido carbónico y de vapor de agua mantiene un valor muy elevado; en la sección 4 desciende a 30 % de su valor inicial y en la sección 7 a 68 %. Si se tiene en cuenta que las cifras obtenidas son inferiores a las reales, dada la perturbación introducida por el corte de la inyección de carbón, se comprueba que la radiación del polvo es considerable y mayor que la radiación térmica gaseosa. La radiación total no es la suma algebraica de las dos, puesto que existe absorción parcial de una por la otra.

El hecho esencial en la radiación de la llama y de los gases quemados en un horno de cemento lo constituye ciertamente el importante papel que los polvos desempeñan en la emisión. El elevado coeficiente de emisión que resulta de la presencia de polvo en la corriente gaseosa condiciona estrechamente la transmisión de calor a la pared y al material. Este hecho justifica el funcionamiento de los cambiadores que hemos propuesto para aumentar la potencia de intercambio de la zona intermedia. En efecto, en la sección 6 (fig. 9) la medida de la radiación de fajas de espesor variable de la masa gaseosa nos ha demostrado que el coeficiente de emisión era sen-

siblemente una función exponencial del espesor:

$$\epsilon = 1 - e^{-kl}$$

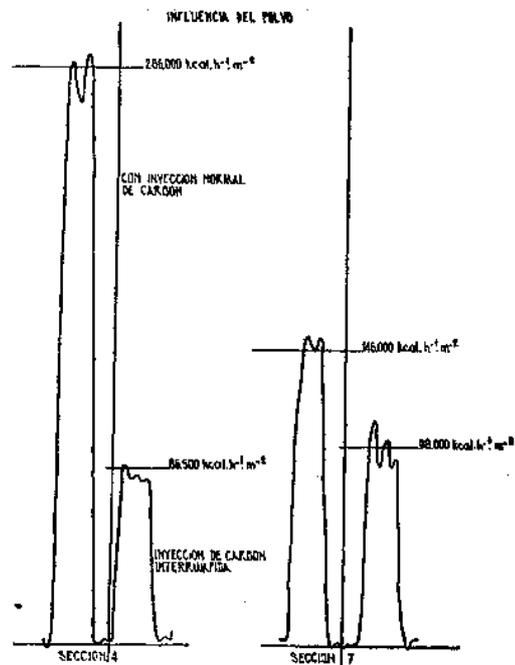


Fig. 8

expresión en la que k es el coeficiente de absorción de la masa gaseosa, que en este caso tiene el valor 1,72.

Sin embargo, si se calcula la transmisión de calor de una masa gaseosa radiante cilíndrica,

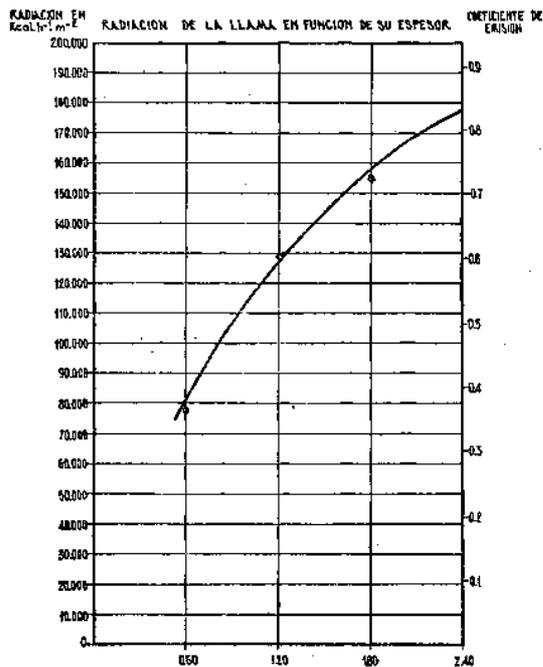


Fig. 9

supuesta animada de una velocidad axial sin desplazamiento transversal, a la superficie radiante que la limita, se encuentra que es máxima para un valor del producto $k.l$ igual a 1,4.

Un valor más elevado lleva consigo, teóricamente, una disminución del calor transmitido, formando las capas exteriores, muy absorbentes, una pantalla que impide a las capas centrales perder su calor.

En un horno de cemento, el valor de k es siempre muy elevado; en algunos casos en que el material es muy pulverulento, puede alcanzar un valor tal, que un aumento del diámetro, al exagerar el valor del producto $k.l$, no aumente la transmisión de calor.

Las radiaciones de la masa gaseosa obtenidas por el micropirómetro de radiación total representan la energía que aquella puede transmitir a un cuerpo perfectamente absorbente a

la temperatura ambiente; dicha energía sería, más o menos, por ejemplo, la que captaría el agua circulante en una camisa que revistiese interiormente al horno.

3.2.—Densidad de flujo de calor recibido efectivamente por la superficie AB

La superficie receptora tiene una temperatura muy elevada y un coeficiente de absorción muy alejado de la unidad. En este caso, el cálculo nos ha parecido igualmente carente de interés, dado el número de hipótesis aventuradas que exige. Hemos tratado de determinar, por medio de una medición directa, la energía emitida por la unidad de superficie del talud del material R_M . Conociendo por mediciones precedentes la radiación del conjunto llama y pared R_{F+P} , es decir, la densidad de flujo de calor que incide sobre la superficie del talud, la densidad de flujo de calor transmitida por el horno a la superficie del talud está definida por la diferencia:

$$R_A = R_{F+P} - R_M$$

Por este método se reduce considerablemente el número de hipótesis, y el cálculo del in-

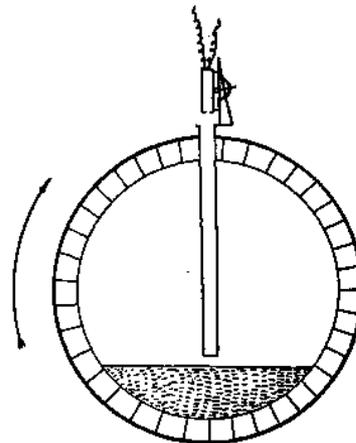


Fig. 10

tercambio adquiere por ello una gran seguridad.

Para medir la radiación del material se introduce radialmente en una sección del horno (fig. 10) un tubo de acero especial que permite

eliminar la llama, de tal manera que el pirómetro de radiación total puede «ver» la superficie del material sin interposición de aquella. Simultáneamente se mide la temperatura en el seno del talud del material. Se comprueba que hay una diferencia de 200 a 300°C entre la temperatura de la masa y la temperatura de radiación de la superficie.

Esta radiación aparente, muy elevada, de la superficie, consta de la radiación que, procedente del horno, es reflejada por ella (pues el coeficiente de absorción del material es considerablemente inferior a la unidad), y la radiación propiamente emitida por éste, como consecuencia de su temperatura superficial. Esta es más elevada que la de la masa, puesto que el material es un aislante, de tal manera que la energía que incide sobre la superficie no se difunde inmediatamente hacia el interior de la masa, sino que se acumula en una delgada capa superficial.

Cuando el horno gira, los granos que en la superficie han alcanzado una temperatura elevada se mezclan con la masa del talud, cediendo a ésta, por conducción, la energía recibida. La calefacción se verifica, por consiguiente, en virtud de una especie de convección granular.

El problema del cálculo de la temperatura alcanzada por la capa superficial es complejo en el sentido de que depende del tiempo de permanencia en la superficie de los granos que la forman. Este tiempo es función de la mezcla del material como resultado de la rotación del horno y, en definitiva, de la granulometría.

No hemos estudiado la ley que liga la granulometría, la velocidad de rotación y la temperatura media superficial. Sin embargo, puede calcularse el valor del calentamiento superficial del material supuesto inmóvil. La ley de calentamiento a flujo constante es, según una conocida fórmula:

$$\Delta \theta_0 = \frac{2 \Phi}{\sqrt{\pi \lambda \rho c}} \sqrt{t}$$

en la que $\Delta \theta_0$ es el calentamiento; Φ el flujo constante; λ , el coeficiente de conductividad térmica; ρ , la masa específica; c , el calor específico del material en masa, y t , el tiempo en horas. Resulta así, para la sección 6, en la que el material se encuentra por término medio a 680°C:

$$\Delta \theta_0 = 16.400 \sqrt{t}$$

Esto indica que el calentamiento superficial es de 80°C al cabo de una décima de segundo y 270°C al cabo de un segundo. Así, pues, el material adquiere en la superficie una temperatura de 950°C al cabo de un segundo, si bien esta temperatura es, por término medio, de 680°C en la masa. Al mismo tiempo el cálculo indica que a 1 mm de profundidad, el calentamiento no es sino la centésima parte de su valor en la superficie; por tanto, este calentamiento no afecta más que a una película superficial.

Cuanto más aislante sea el material, tanto más importante será su calentamiento superficial y menor la densidad de flujo efectivamente absorbido por aquél. El mismo resultado ejercerá un índice de reflexión elevado. Por tanto, el índice de reflexión y el coeficiente de conducción térmica son, de por sí, función de la granulometría.

Esta tiene, pues, una gran importancia por el papel que desempeña en la entremezcla del material y por su influencia sobre las características térmicas del talud del mismo.

Hemos estudiado experimentalmente en el laboratorio la calefacción del material inmóvil sometándolo a la acción de un radiador hemisférico (figs. 11, 12 y 13).

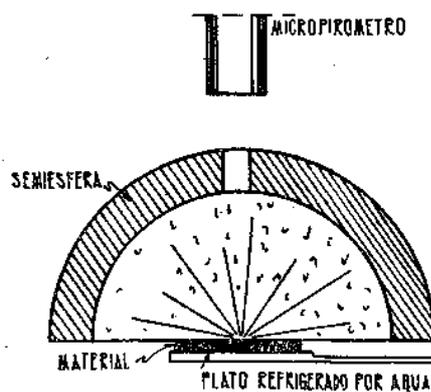


Fig. 11

Un orificio permite seguir, mediante el micropirómetro de radiación total, la densidad de flujo de calor emitido por el material. En función del tiempo la curva registrada (fig. 14)

comprende dos partes distintas. La primera está constituida por una subida muy rápida hasta una ordenada proporcional al índice de reflexión del material, seguida de un ascenso mucho más lento, y tanto más, cuanto más aislante es el material. Con una materia muy conductora, como el acero o el carborundum, se obtiene un tramo horizontal. Por el contrario, con un aislante como la vermiculita se obtiene una ascensión rápida, si bien ligada a la primera parte de la curva por un punto anguloso lo suficientemente neto para determinar con precisión el índice de reflexión.

Así se ha encontrado que la naturaleza del material, distinta según la zona del horno, tenía una influencia: el índice de reflexión pasa de 0,20 para el material gris, a 0,30 cuando, descarbonatado rápidamente, comienza a blanquear. En estado de clínker negro, a la salida de la zona de cocción, el índice de reflexión desciende a 0,12.

La granulometría no tiene influencia por lo que respecta a los diámetros comprendidos entre 3 cm y 0,1 mm, pero el índice de reflexión crece súbitamente cuando el diámetro de los granos de polvo llega a ser inferior a 0,1mm.

Los materiales procedentes de distintos

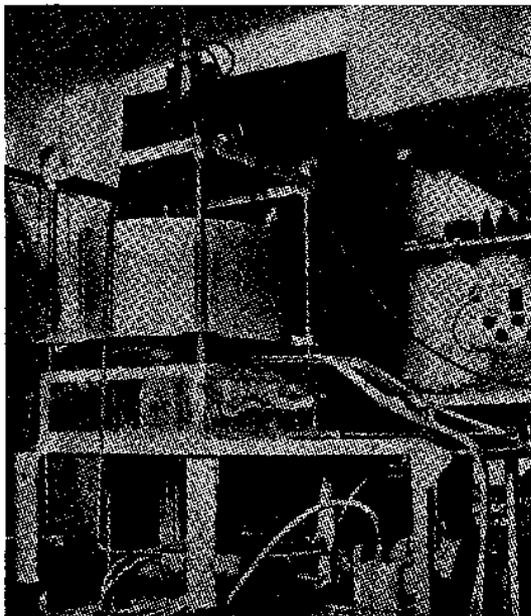


Fig. 12



Fig. 13

hornos tienen índices de reflexión que varían entre 0,10 y 0,35.

Si se aplican estas consideraciones y estos resultados al cálculo del intercambio de calor en la sección 6, se encuentra que al cabo de medio segundo la superficie del talud llega a alcanzar 920°C, y si se utiliza el índice de reflexión 0,2 debería aparecer ante el pirómetro de radiación total como un cuerpo negro a 980°C. Esto es, más o menos, lo que se comprueba experimentalmente. Como el promedio del material está a 680°C, hay un calentamiento aparente de la superficie de 300°C.

Debido a la complejidad del movimiento del talud, no se puede pensar en calcular la radiación aparente del material. Sin embargo, de lo precedente se saca en conclusión la importancia de una entremezcla del mismo en el término de una fracción de segundo, lo cual disminuiría notablemente la radiación aparente.

Como quiera que ello sea, las mediciones hechas a lo largo de la zona intermedia indican que la temperatura media superficial de radiación es 250°C más elevada que la de la masa del material, de lo que resulta que, a un régimen de 200 toneladas por día, por radiación de la llama se ceden al material 4.000.000 de kcal por hora.

3.3.—Calor transmitido por efecto de pared

Vamos a estudiar ahora el intercambio de calor que tiene lugar entre la pared y el material en el momento en que están en contacto.

De la energía recibida de la masa gaseosa radiante por la pared durante su recorrido

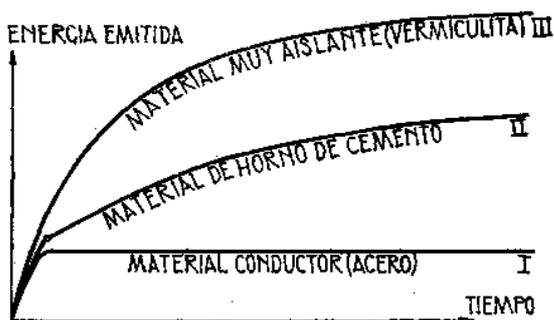


Fig. 14

fuera del contacto con el material, una fracción se pierde al exterior del horno por conducción y la otra se almacena en el refractario en una estrecha capa cuyo espesor es del orden de 1 cm. Durante su recorrido en contacto con el material, una parte de la energía almacenada por el elemento de pared se pierde hacia el exterior, por conducción a través de la misma; la otra parte es cedida al material reproduciéndose el ciclo a cada vuelta del horno, cada 50 segundos. Este mecanismo es particular del horno rotatorio y le hemos llamado efecto de pared. Su cálculo requiere el conocimiento previo de la energía que se pierde hacia el exterior del horno por conducción a través de la pared; a esta energía la hemos llamado, específicamente, la pérdida.

Hemos determinado experimentalmente la pérdida apoyándonos en las siguientes consideraciones: el flujo que atraviesa por conducción la pared se disipa hacia el exterior del horno por radiación y convección. Conociendo el coeficiente de conducción térmica de la pared, para determinar este flujo sería suficiente fijar el gradiente térmico en aquélla. Este método sencillo tropieza con grandes dificultades prácticas y no lo hemos aplicado más que en dos lugares: antes y después de la zona intermedia.

Igualmente podría determinarse en cualquier punto de la chapa exterior la pérdida por radiación y la pérdida por convección. Para ello sería preciso determinar en cada punto la temperatura, la cual es difícil de conocer con precisión, pues son numerosas las causas de error. Además, suponiendo que se conociese, el cálculo de la energía disipada por radiación hace intervenir el coeficiente de emisión de la chapa, siempre mal definido; el cálculo de la energía disipada por convección es delicado, pues son escasos los datos sobre fenómenos de convección natural alrededor de cilindros giratorios de grandes diámetros.

Por el contrario, nos ha sido relativamente fácil determinar directamente la pérdida por radiación en todos los puntos del horno, mediante el empleo de un pirómetro de radiación total construido por nosotros. En dos puntos en que conociamos la pérdida total determinamos, por diferencia, la pérdida por convección y, finalmente, una relación entre la pérdida por radiación y la pérdida por convección. Así, hemos podido evaluar la pérdida total en toda la zona intermedia, la cual se eleva a 800.000 kcal por hora.

Al estudiar el efecto de pared indicaremos

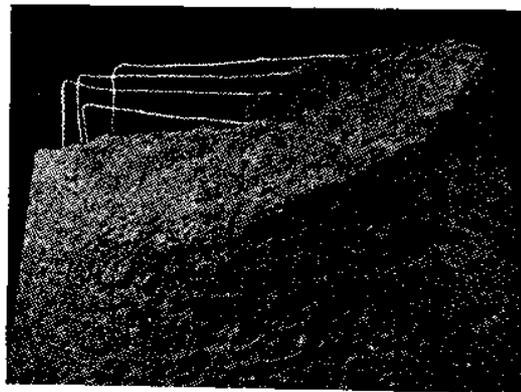


Fig. 15

de antemano, que el elemento de pared del ladrillo refractario pasa a cada vuelta por el mismo estado, cada vez que se encuentra en el mismo azimut. De ello se deduce que en cada elemento de ladrillo refractario tiene lugar una variación periódica de temperatura. De esta variación y

de la pérdida determinada anteriormente se puede deducir el valor de la energía cedida al material.

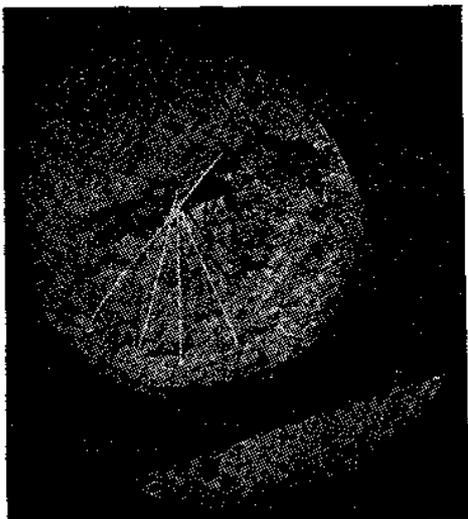


Fig. 16

Para comenzar supongamos que la variación de temperatura en la superficie sea sinusoidal. La ley de variación a una cierta distancia de la pared tiene una amplitud, que decrece exponencialmente, y una fase, que varía proporcionalmente a la profundidad. Si se conoce la ley de variación en un punto de la pared, puede determinarse la ley de variación del campo térmico en función de la profundidad. El campo térmico real es el resultado de la superposición de este campo térmico variable y del campo térmico permanente que ocasiona la pérdida.

Una vez conocido el campo térmico, se conoce el gradiente de temperatura y, en consecuencia, la densidad de flujo de calor. Se trata, pues, de conocer la variación térmica en un punto.

La idea más sencilla es la de determinarla en la superficie, pero este método está sujeto a serias críticas, siendo la principal que, en la superficie de separación de dos medios, la temperatura está mal definida. También hemos medido la variación térmica en el interior de la pared, a 3 mm y a 5,2 mm de profundidad. Esta determinación ha exigido la fabricación de un ladrillo especial en el que van enterrados termopares sensibles (figs. 15, 16 y 17).

La medición de las fuerzas electromotrices engendradas por los termopares presenta el problema de su transporte, pues es imposible interrumpir la rotación del horno. La conexión se hace mediante un cable de compensación, que se arrolla alrededor del horno y al cual se fija provisionalmente mediante imanes potentes.

Las curvas que se obtienen no son sinusoides, a pesar de lo cual puede aplicarse el método descrito. Basta descomponer la función periódica obtenida, en serie de Fourier y seguir la propagación de cada término.

Se encuentra así que la energía recibida por el material en la zona intermedia se eleva a 800.000 kcal por hora.

Hemos podido establecer la influencia de algunos factores sobre el efecto de pared.

a) La energía puesta en juego por el efecto de pared es proporcional a la raíz cuadrada de la velocidad de rotación; este resultado, obtenido por el cálculo, ha sido confirmado experimentalmente.

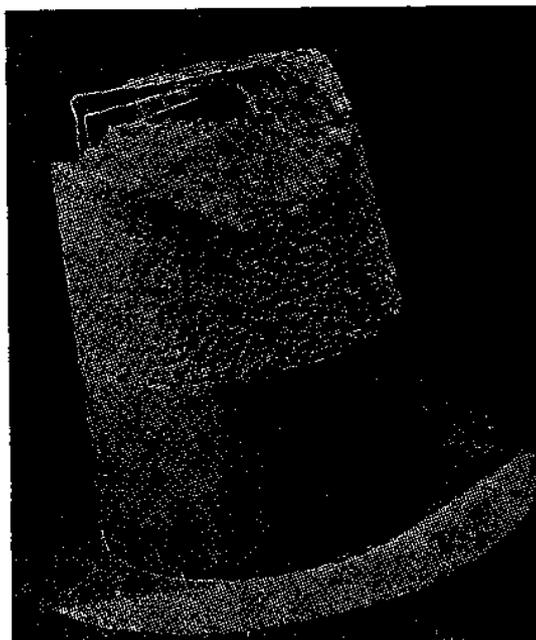


Fig. 17

b) La naturaleza de la pared no influye sobre el intercambio térmico; la conducción térmica del material es, en efecto, muy pequeña,

y muy inferior a la de los refractarios que guardan el interior del horno, siendo dicha conducción, en definitiva, la que limita el calor cedido por la pared. Por ello, resulta completamente inútil tratar de reemplazar los refractarios empleados actualmente por otros más conductores, con la esperanza de aumentar la transmisión de calor por efecto de pared.

4.—Conclusiones de los estudios precedentes

El estudio de la zona intermedia nos ha puesto de manifiesto que, por radiación a través de la superficie del talud y por efecto de pared, se intercambian 4.800.000 kcal por hora. No obstante, el material absorbe, como hemos visto, 5.800.000 kcal. El millón de calorías que falta proviene, en parte, de la convección de los gases sobre la superficie del talud (400.000 kcal), y en parte, de la combustión, en la parte superior de la zona intermedia, de materias combustibles contenidas en el material (600.000 kcal).

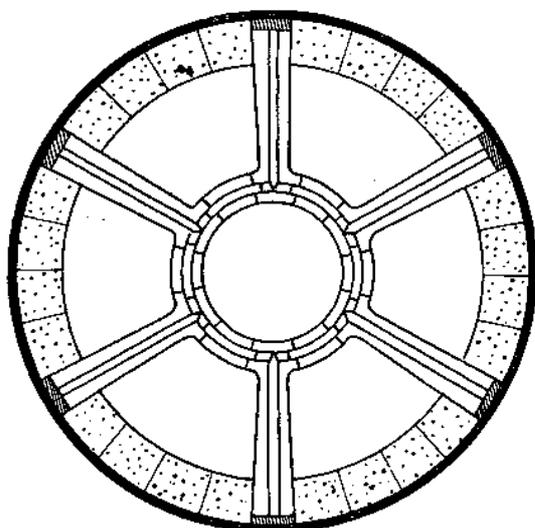


Fig. 18

Los métodos empleados han expresado bien el orden de magnitud de los fenómenos estudiados. Por otra parte, nos permiten extraer un

cierto número de conclusiones que interesan en cuanto a la marcha de los hornos y a las mejoras a introducir en la misma.

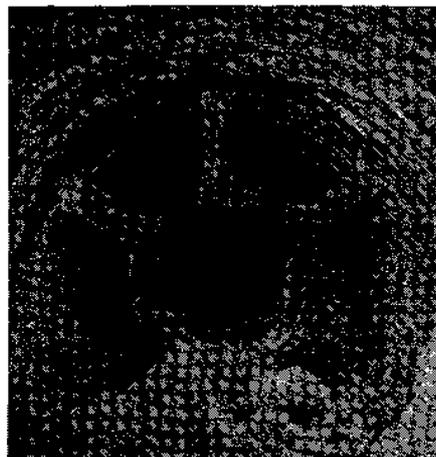


Fig. 19

De la preponderancia de la transmisión por radiación en la zona intermedia y, a priori, en la zona de cocción, se deduce la regla fundamental de que el aumento de producción de un horno dado no puede lograrse sino es por aumento de las temperaturas de radiación, lo que se traduce en una elevación de la temperatura de los humos*.

Hasta aquí, la tendencia era expulsar humos lo más fríos posible, indicando el balance que, en tales condiciones, las pérdidas por los humos eran mínimas.

Se ignoraba entonces que las pérdidas por la envoltura del horno eran, más o menos, independientes de la producción, lo cual demostraron después nuestras mediciones. En estas condiciones las mayores pérdidas por los humos se vieron compensadas por la disminución, proporcional a la producción, de las pérdidas por las paredes. Lo más interesante fué el haber podido aumentar el rendimiento horario de los hornos.

El estudio analítico de los procedimientos de intercambio de calor nos ha inducido a pro-

* A la aplicación inconsciente de esta regla, con anterioridad a nuestro estudio, fué debido un aumento considerable de producción de los hornos, obtenido en la fábrica de VALDONNE, perteneciente a la S. A. de Cales y Cementos de Lafarge y de Teijl.

poner, para la zona intermedia, los siguientes dispositivos intercambiadores:

Efectuándose la transmisión del calor preferentemente por radiación de los gases sobre el material, un intercambiador alveolar (figs. 18 y 19) que divide longitudinalmente al horno en varias células, aumentará por un lado la superficie ofrecida por el material y por otro dividirá la corriente gaseosa en columnas cuya emisión total es muy superior a la emisión de la columna inicial que tiene por diámetro el del horno*.

Por añadidura, proveyendo al refractario de una tupida red de puntas de acero refractario

que multiplica por tres la superficie de contacto con el material, se aumenta considerablemente el efecto de pared.

Es evidente que la experimentación de estos sistemas es muy larga, pues, por principio, los hornos no se paran jamás. Es preciso esperar muchos meses antes de decidirse a la adopción del dispositivo y es preciso que su duración sea suficiente para que resulte rentable. No es preciso insistir demasiado sobre el hecho de que las temperaturas muy elevadas que reinan en el horno ejercen una enorme acción destructora, lenta pero continua, incluso sobre productos que, como el acero o la tierra refractaria, parecen presentar, durante cortos períodos de marcha del horno, cualidades reales de duración.

* Patente francesa n.º 669.199 del 17 de mayo de 1954.