

666.94.046 = 60

611 - 55

cementos y cales hidráulicas del Norte, S. A., en Haubourdin

diagramas de cocción

20.ª REUNIÓN TÉCNICA

Se puede distinguir en el estudio del horno rotativo una serie de etapas sucesivas que deben conducirnos, progresivamente, a un conocimiento de los fenómenos cada vez más profundo. Hemos de encontrar, en este estudio, una complejidad cada vez más grande hasta que lleguemos a un enredo complejo de factores, enredo tal que no se puede tocar uno de los elementos sin correr el peligro de provocar repercusiones sobre todo el conjunto.

La primera etapa puede ser un estudio de la marcha del horno. Es la que nos debe conducir al establecimiento del diagrama $Q(t)$ de la materia y de los humos.

Se puede considerar, a continuación, una segunda etapa que sería puramente experimental. Esta debería llevar al establecimiento del diagrama, $Q(x)$, que da la cantidad de calor de la materia y de los humos en función de la abscisa, x , de la sección del horno considerada. Se deducirían fácilmente de ello, los diagramas, $T(x)$, o los dos diagramas, $Q(u)$ y $T(u)$, funciones del tiempo u .

Se obtendría así un resultado, en cierta manera esquemático, valedero para un horno determinado que funcione en condiciones muy definidas; este resultado no sería válido más que para el horno estudiado y las condiciones de marcha del momento de la experiencia. No se puede transportar rigurosamente a condiciones diferentes.

Esto nos conduce a la tercer etapa que es el análisis de estos resultados; debería

consistir en determinar por el cálculo el diagrama $Q(x)$ establecido experimentalmente en la segunda etapa. Este resultado no puede ser alcanzado más que desenredando la madeja extremadamente compleja de leyes físicas, químicas y hasta matemáticas que rigen el conjunto de los fenómenos de la cocción.

Aquí nos hallamos en una etapa sin fin, en la que no podemos sino esperar roer, poco a poco, y las más de las veces en equipo, el edificio de leyes de las que ninguna puede estudiarse aisladamente, al influir todas unas sobre las otras.

Este estudio sería extremadamente extenso: englobaría no solamente los fenómenos térmicos propios a la cocción, sino que nos obligaría también a un estudio avanzado del crudo, de la cantera, de la molienda; debería, luego, ser completado por un estudio profundo de la naturaleza del clínker, de sus resistencias, de su aptitud a la molienda, etc...

Aunque abordamos modestamente esta tercer etapa en nuestros comentarios, vamos a limitarnos, en principio, a la primera etapa, es decir, el estudio del horno rotativo.

Queriendo hacer que este estudio sea aplicable, salvo caso excepcional, a la mayoría de los hornos, lo hemos presentado bajo forma de ábacos.

Para cada uno de estos ábacos, efectuaremos algunos comentarios para fijar los límites de sus aplicaciones y al mismo tiempo sacar algunas conclusiones.

Designaremos por:

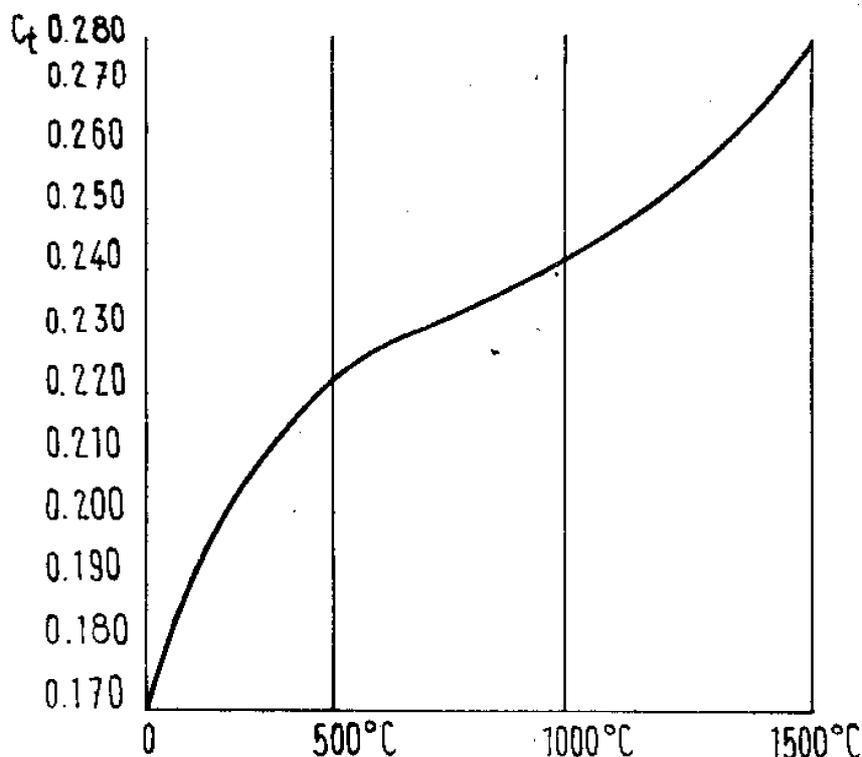
- x = el porcentaje de aire secundario en relación con el aire total de combustión neutra.
- Q_2 = el calor recuperado por el aire secundario en el enfriador.
- T_2 = temperatura del aire secundario.
- t_1 = temperatura del clínker a la entrada del enfriador.
- t_2 = temperatura del clínker a la salida del enfriador.
- (1) C_t = calor específico medio del clínker de 0 a t° (adoptaremos para esta

expresión los valores dados por Anselm representados por la curva siguiente).

p_2 = pérdida de calorías en el intercambiador (pérdida de la envoltura).

Convenimos en llamar enfriador al aparato en donde se efectúa el intercambio de calorías entre el aire secundario solo y el clínker.

Podremos incluir en el enfriador la parte baja del horno donde el clínker comienza a enfriarse. En este caso, naturalmente, adoptaremos por t_1 un valor más elevado que podrá ser superior a 1.400°C y la pér-



(1) Una cierta imprecisión se ciñe constantemente sobre el valor del calor específico del clínker. Los autores no están de acuerdo. Recordemos simplemente una fórmula un poco diferente y bastante utilizada: $C_t = 0,181 + 0,000070 t$.

Es verosímil que este calor específico varíe muy sensiblemente con la composición del clínker, lo que explica las divergencias entre los autores. Estimaremos que estas variaciones son de 2.º orden en relación al conocimiento muy impreciso que tenemos de las temperaturas y, en particular, de las temperaturas del clínker.

da del enfriador será también más elevada porque deberá comprender, además de la del enfriador propiamente dicha, la de la cabeza y la de la virola del horno en la porción considerada.

La medida de T_2 , temperatura de aire secundario, llega a ser entonces práctica-

mente imposible, puesto que, en la sección considerada, se puede tener una mezcla no homogénea de aire caliente que proviene del enfriador y de aire frío procedente de todas las entradas de aire parásito de la cabeza.

Será, en general, más cómodo hacer el balance del enfriador adoptando t_1 en el punto en que se puede medir T_2 .

Se observará que, si bien la medida de T_2 es relativamente fácil, para t_1 y t_2 (temperaturas de entrada y salida del clinker), nos veremos obligados, la mayor parte de las veces, a hacer hipótesis, y esto tanto más cuanto más grueso sea el módulo de clinker.

La cantidad de calor recuperada por el aire secundario puede escribirse para el ejemplo considerado:

$$Q_2 = 1.600 \times 0,32 T_2 x$$

Dando a Q_2 una serie de valores, obtenemos así una familia de hipérbolas que da, para cada valor de Q_2 , la variación de T_2 en función de x .

Hemos construido sobre el ábaco, una serie de estas hipérbolas correspondientes a una temperatura de clinker t_1 de 1.200°C , y a temperaturas t_2 escalonadas de 100°C en 100°C , supuesta la pérdida del enfriador de 40 calorías.

Siendo el calor recuperado del clinker por el aire:

$$Q_2 = 1.200^\circ\text{C} \times 0,246 - C_t \times t_2 - 40,$$

la ecuación general de estas hipérbolas es:

$$Q_2 = 1.600 \times 0,32 T_2 x = 256 - C_t \times t_2.$$

Luego se extienden estos resultados a un valor cualquiera de t_1 y de la pérdida p_2 volviendo a las curvas trazadas en la parte superior del ábaco que, a partir del punto correspondiente a $t_1 = 1.200^\circ\text{C}$ y $p_2 = 40$ calorías, permiten transformar las variaciones de t_1 y p_2 en variaciones de t_2 del ejemplo considerado.

Estas curvas de correspondencia permiten así referirse a una hipérbola del ejemplo considerado o interpolar entre estas hipérbolas.

Finalmente, se podrán extender estos resultados a un consumo calorífico cualquiera leyendo la ordenada T_2 de un punto de la hipérbola, no ya sobre el eje de las ordenadas T_2 , valedero solamente para un consumo de 1.320 calorías, sino sobre una familia de rectas concurrentes de igual temperatura T_2 .

Para un mismo valor de x y de Q_2 , T_2 es, en efecto, inversamente proporcional al volumen de aire de combustión, es decir, al consumo calorífico.

A título de ejemplo, hemos representado en A, B, C, D, la utilización del ábaco para las condiciones de marcha siguientes:

A $t_1 = 1.250^\circ\text{C}$

$p_2 = 30$ calorías

B $t_2 = 450^\circ\text{C}$

$Q_2 = 182$ calorías

C $Q_2 = 182$ calorías

$T_2 = 550^\circ\text{C}$

Consumo calorífico = 1.400 calorías.

2. Diagrama de combustión neutra en el aire

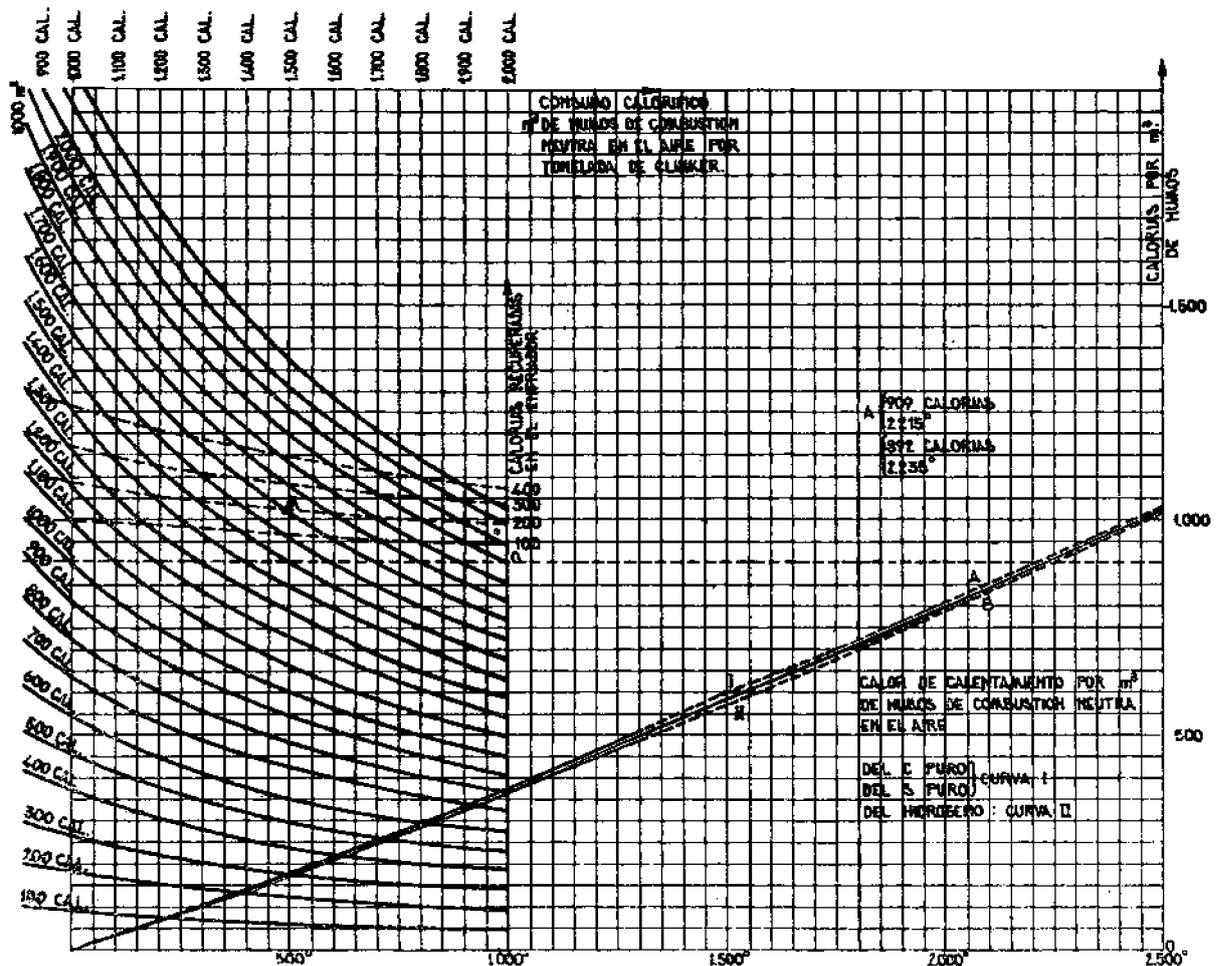
Sobre este ábaco, hemos representado primero dos curvas que expresan:

- una (curva I): el calor de calentamiento por m^3 o entalpía de los humos de combustión neutra en el aire del C puro;
- otra (curva II): la entalpía de los humos de combustión neutra del hidrógeno.

La curva I representa también la entalpía de los humos de combustión del S puro, la cual se confunde prácticamente con la de los humos del C puro.

Las temperaturas se leerán en estas curvas sobre la abscisa, y las cantidades de calor por m^3 sobre la ordenada: en realidad se trata de kcal.

En primer lugar observaremos que, a partir de 1.300°C , hemos señalado estas curvas con puntos para indicar que, después de



Abaco n.º 2
DIAGRAMA DE COMBUSTIÓN NEUTRA EN AIRE
(Referido a 1 tonelada de clínker)

este momento, no se conocen ya bien los calores de calentamiento por modificarse por fenómenos de disociación.

Se observará, además, que las curvas I y II se confunden prácticamente. Ahora bien, todos los humos de los hornos pueden, en principio, ser considerados como mezclas de humos de combustión del C puro, del S puro y del hidrógeno en proporciones más o menos variables. Las fracciones muy débiles de nitrógeno y de oxígeno contenidas en los combustibles no son las que pueden modificar esta curva de manera sensible.

Los humos de combustión neutra en el aire de todos los combustibles (fuel o carbón) utilizados habitualmente tienen, pues, una curva de calentamiento por m³ comprendida entre las curvas I y II sobre el diagrama adjunto.

Hemos trazado arbitrariamente una de estas curvas, la cual supondremos ulteriormente valedera para todos los combustibles.

Con objeto de construir ulteriormente el diagrama Q (t), hemos representado, sobre la izquierda del ábaco, una familia de curvas que nos permiten leer directamente para cada temperatura la cantidad de ca-

lor de los humos de combustión referida ésta a la tonelada de clínker para los diversos consumos caloríficos.

Por esto, observaremos que la curva de calentamiento adoptada acusa para una combustión en aire no calentado una temperatura teórica de combustión de 2.225°C, que corresponde a una producción de calor de 900 calorías por m³ de humos.

Este punto está comprendido entre los puntos A y B correspondientes de las curvas I y II, cuyas coordenadas son:

- (1) A 2.215°C = t° teórica de combustión del C puro en el aire
909 calorías suministradas por m³ de humos.
- B 2.235°C = t° teórica para el hidrógeno
892 calorías suministradas por m³ de humos.

Llamando C al consumo calorífico por kg de clínker, tendremos, por kg de clínker, $\frac{C}{900}$ m³ de humos.

La ordenada de la hoja que da la entalpía del m³ corresponde, por tanto, a un consumo C de 900 calorías.

Partiendo de este valor, llevando en abscisas C, hemos construido las hipérbolas adiabáticas que dan, volviendo al punto de igual ordenada de la curva de calentamiento, la temperatura de los humos correspondientes.

Para una hipérbola correspondiente a una cantidad de calor de los humos Q900 leída directamente sobre la derecha de abscisa 900 calorías, y llamando y la ordenada de un punto de esta curva de abscisa C, la ecuación de esta curva es:

$$\frac{C}{900} y = Q900$$

Por otra parte, hemos construido con rayas — — — las curvas de igual cantidad de calor recuperado en el enfriador clínker.

Estas curvas permiten determinar la temperatura teórica de combustión y podemos

(1) Se observará que, para la combustión neutra en el aire sin precalentamiento, las temperaturas teóricas de combustión del hidrógeno y del carbono puro son prácticamente idénticas; siendo, por lo tanto, prácticamente idénticas para todos los combustibles orgánicos.

observar que ésta sube de manera sensible cuando crece el calor recuperado en el enfriador.

Ej.: el punto M corresponde a un consumo de 1.400 calorías, es decir, a un volumen de humos de 1.550 m³ por tonelada de clínker. Los humos correspondientes, gracias a la aportación de 200 calorías del enfriador, contienen 1.600 calorías y tienen una temperatura teórica de combustión de 2.500°C.

Para este consumo, una variación de 100 calorías recuperadas en el enfriador hace variar en 160°C la temperatura teórica de combustión.

3. Combustión con oxígeno puro

No hemos representado, aquí, este diagrama por no tener más que un interés limitado.

Se observará solamente que, contrariamente a la combustión en el aire, las curvas de calentamiento de los diversos combustibles son muy diferentes según sus proporciones respectivas de hidrógeno y de carbono.

A título de indicación, la entalpía de 1 m³ de CO₂ a 2.500°C es de 1.500 calorías, mientras que la de 1 m³ de H₂O no es más que de 1.230 calorías.

Además se observará que el calor desprendido por la combustión neutra en oxígeno puro no calentado, del hidrógeno referido a 1 m³ de humos, es de 2.565 calorías; mientras que el del carbono puro es de 4.360 calorías.

Las temperaturas teóricas de combustión correspondientes serían: para el hidrógeno, de 4.800°C; y para el carbono puro, de 7.000°C. A decir verdad, estas temperaturas no significan ya nada debido a las disociaciones que comienzan a ser importantes a partir de 2.000°C.

Se recordará simplemente que, en el caso de la combustión en oxígeno puro, para una misma cantidad de calor, los humos ricos en CO₂ tendrán una temperatura más elevada que los humos ricos en H₂O; de ahí el interés, cuando se efectúa la sobreoxigenación, de emplear, por lo menos para este punto de vista, combustibles de alto contenido en carbono.

Más adelante hablaremos —a propósito del diagrama Q (t)— de nuevo sobre la sobreoxigenación.

4. Diagrama Q (t) de la materia

Hemos tratado de establecer una especie de diagrama partiendo de un balance-tipo al que es fácil añadir todos los balances que se puedan hacer.

Por esto, hemos separado el balance en dos partes. Estas comprenden:

—una: los elementos esencialmente variables como el contenido en agua y las pérdidas;

—otra: los elementos que suponemos fijos.

En realidad, estos elementos fijos son bastante variables, y precisaremos para cada uno de entre ellos la amplitud de sus variaciones en la medida en que podemos conocerlos, lo que es difícil.

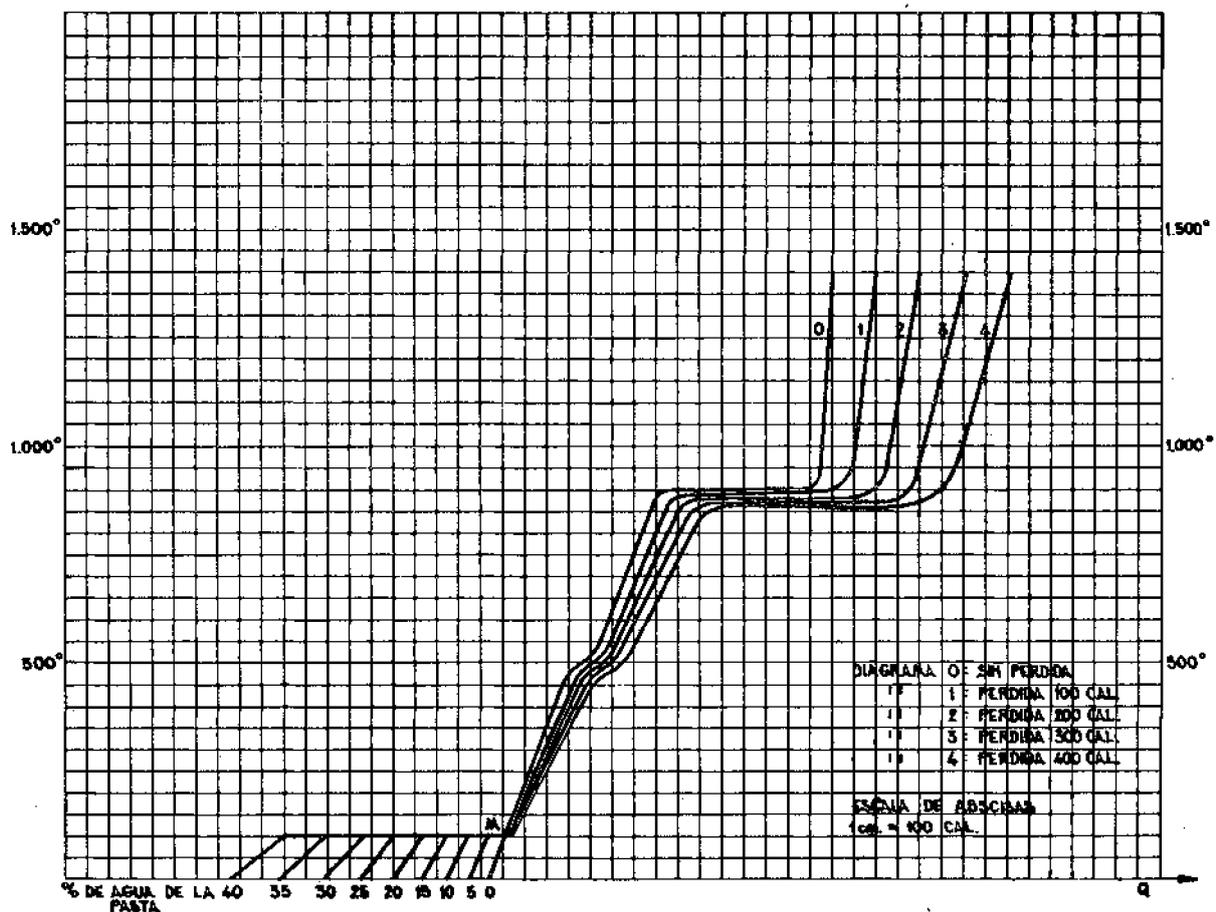
BALANCE.—Elementos fijos

Para hacer invariables ciertos elementos, hemos adoptado los elementos de base siguientes:

(+) Título de carbonato = 80,0 %.

Composición del crudo seco reducido a 1 kg de clinker.

(+) El título de carbonato varía, en realidad, muy poco de un horno a otro. Una variación de 1 % del título representa alrededor de 5 calorías sobre la descarbonatación.



Abaco n.º 3

DIAGRAMA Q (t) DE LA MATERIA

1,500 kg de crudo seco contienen: 0,300 kg de sílice-arcilla y 1,200 kg de CO_2Ca , o sea, 0,528 kg de CO_2 y 0,672 kg de CaO .

El kilogramo de clínker así obtenido contiene, en realidad:

0,972 kg de clínker que proviene del crudo y

0,028 kg de cenizas de combustibles.

Suponemos, pues, que este kilogramo de clínker no contiene ni H_2O (habitualmente, hay que contar 10 gr), ni CO_2 (habitualmente, hay que contar 5 gr).

Por otra parte, para simplificar el problema, supondremos que no hay producción de polvo, ni «recyclage» en el interior del horno.

- | | | | |
|-----|--|-----|----------|
| (1) | 1.—Calentamiento de 0 a 100°C de 1,500 kg de crudo seco | 30 | calorías |
| (2) | 2.—Deshidratación del caolín a 500°C | 35 | » |
| (3) | 3.—Calentamiento de 100° a 900°C de 1,500 kg de crudo seco | 327 | » |
| (4) | 4.—Disociación de 1,200 kg de CO_2Ca | 476 | » |
| (5) | 5.—Calentamiento de los óxidos de 900°C a 1.400°C | 115 | » |
| (6) | 6.—Efecto endotérmico de formación de clínker.. | 26 | » |
| (7) | 7.—Reacción exotérmica de clinkerización | 100 | » |

(1) Hay pocas desviaciones sobre este punto, todo lo más algunas calorías.

(2) Este calor de deshidratación de las arcillas es verdaderamente bastante variable de un crudo al otro, y se pueden tener seguramente desviaciones de 30 a 50 calorías por lo menos entre crudos diferentes.

(3) El calor de calentamiento del crudo puede ser variable según la composición del mismo. Observemos, como ejemplo, que a 400°C, el calor específico medio de 0 a 400°C del caolín es de 0,275, mientras que este mismo calor específico es de 0,243 para la caliza. Seguramente sobre esta parte del balance se pueden tener desviaciones de 20 a 30 calorías entre los crudos.

(4) Como ya lo hemos indicado, 1 % de CO_2Ca , de más o de menos, representa alrededor de 5 calorías. Las desviaciones sobre esta parte son, pues, muy débiles.

(5) Este varía, esencialmente, con la composición de los clínkeres. Observemos, como una indicación, que el calor específico medio de 0 a 1.400°C de CaO es de 0,218, mientras que el de la sílice es de 0,270.

(6) Este representa la diferencia entre el calor de calentamiento del clínker y el del de C_2S . En realidad, las desviaciones sobre éste no pueden ser más que de algunas calorías.

(7) Sobre el calor exotérmico de clinkerización, las medidas no son muy concordantes. Esta cantidad de calor depende, naturalmente, de los constituyentes formados, y para cada uno de estos constituyentes formados se encuentran divergencias sensibles. Para Léa, el calor de clinkerización sería de 129 cal/gr para el C_2S , y de 173 cal/gr para C_3S β, mientras que para Johansson el calor sería de 143,5 cal/gr para C_2S y 193 cal/gr para C_3S β.

Esta parte fija del balance representa, por consiguiente, en total 909 cal.

Elementos variables

Estos elementos comprenden el calor necesario para el calentamiento y para la vaporización del agua y las pérdidas.

1) Calentamiento de 0° a 100°C de H % de agua:

$$150 \frac{H}{1-H} \text{ calorías}$$

2) Vaporización a 100°C de H % de agua:

$$1,5 \frac{H}{1-H} \times 539 = 808 \frac{H}{1-H}$$

3) Pérdidas:

Estas pérdidas comprenden: las que son fáciles de valorar (las pérdidas de los humos), y por otra parte las difíciles de calcular y que se valoran, generalmente, por diferencia (las pérdidas por radiación y convección de la envoltura del horno).

En el establecimiento del diagrama Q (t), construiremos varias curvas correspondientes a valores diferentes de estas pérdidas escalonadas de 100 a 400 calorías.

Por otra parte, hemos tenido que fijarnos arbitrariamente un reparto de estas pérdidas a lo largo del horno o, dicho de otra manera, hemos valorado en exceso arbitrariamente cada componente del balance para tener en cuenta las pérdidas de la envoltura del horno en la zona correspondiente.

Entonces hemos adoptado para estas 4 curvas que corresponden a 100, 200, 300 y 400 calorías perdidas, el reparto siguiente de las pérdidas (8):

Las desviaciones pueden ser más grandes si se trata de precisar lo que se entiende por proporción de C_2S o de C_3S β, mientras que la mayor parte de las veces no se dispondrá más que del cálculo de la composición potencial.

Volveremos a hablar sobre esto más adelante, estudiando el mecanismo de la clinkerización bajo el punto de vista térmico. Se concibe, sin embargo, que, sobre éste, se puedan tener desviaciones de 20 a 30 calorías.

(8) Precisamos que esta repartición de las pérdidas a lo largo del horno es puramente arbitraria; por otra parte, varía sensiblemente según los hornos, según la llama, según el estado y la naturaleza del refractario, según la formación de costra, las condiciones de enfriamiento exterior de las virolas, etc.

zona de secado .	10	10	15	20
zona de 100° a 900°C	25	50	75	100
zona de descarbonatación ..	40	90	130	180
zona de calentamiento y clinkerización ...	25	50	80	100
Total ...	100 cal	200 cal	300 cal	400 cal

La pérdida por calor sensible de los humos depende del contenido en agua de la pasta y del consumo calorífico C. Adoptando para los calores específicos valores en el entorno de 200°C, es decir, para los humos de combustión neutra 0,336 calorías/m³, para el vapor de agua 0,46 calorías/m³ y para el CO₂ 0,430 calorías/m³, se puede poner esta pérdida por calor sensible de los humos bajo la forma:

$$P_f = T_f \left(0,373 \times \frac{C}{1.000} + 0,115 \right) + 0,69 \frac{H}{1-H} (T_f - 100^\circ\text{C})$$

T_f es la temperatura de los humos en °C.

C es el consumo en kcal por kg de clinker.

H es el contenido en agua de la pasta.

ESTABLECIMIENTO DEL DIAGRAMA Q (t)

Sobre el establecimiento del diagrama Q (t) de la materia, haremos solamente las siguientes observaciones:

a) Hemos construido 5 curvas, de las cuales 4 corresponden a pérdidas de 100, 200, 300 y 400 calorías; y la quinta curva, a pérdidas nulas por la chapa del horno. Estas pérdidas están repartidas entre las diversas zonas como acabamos de indicar más arriba.

b) No hemos usado escala en las abscisas, pues el origen de estas abscisas varía con el porcentaje de agua de la pasta. Se verá, sin embargo, que 1 cm representa 100 calorías.

Hemos adoptado para todas estas curvas un punto común, M, que es el que corresponde al final de la deshidratación,

suponiendo nulas las pérdidas en esta zona para este punto. A la derecha de este punto hemos llevado las pérdidas de las diversas curvas en la zona de secado.

La parte del diagrama a la izquierda de M es, entonces, común a las 5 curvas y corresponde, por otra parte, a contenidos en agua de la pasta diferentes. Estos contenidos en agua son llevados sobre la escala de las abscisas y fijan así el punto origen del diagrama Q (t) de la materia.

c) Hemos supuesto arbitrariamente que el calor de clinkerización se desprendía al mismo tiempo que se realizaba el calentamiento del clinker de 900° a 1.400°C.

Igualmente hemos limitado arbitrariamente a 1.400°C la temperatura alcanzada por el clinker, lo que nos obligará en el balance del enfriador clinker a adoptar 1.400°C como temperatura límite del mismo.

d) En el balance, hemos contado como calor de descarbonatación: 476 calorías.

En el diagrama, hemos tomado para esta zona 350 calorías para tener en cuenta las 126 calorías arrastradas por el CO₂ desprendido y que van a agregarse progresivamente al calor que los humos arrastran en esta zona. Esta disposición nos permite, en la superposición del diagrama de la materia y del de los humos, conservar la correspondencia entre los puntos de la misma abscisa, que dan entonces el estado del fluido caliente y del fluido frío en una misma sección.

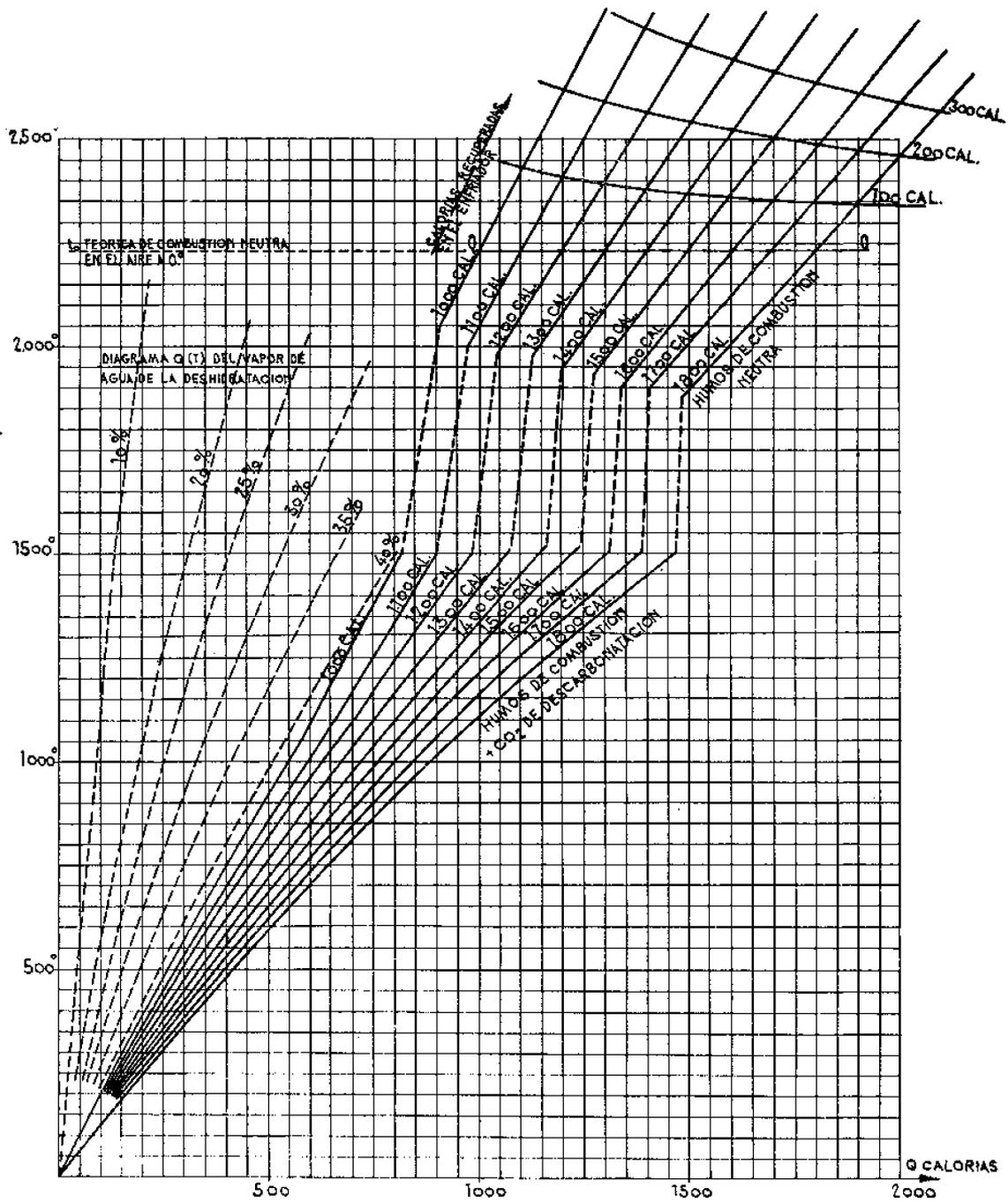
La misma disposición ha sido adoptada para la zona de secado, en que el eje horizontal representa la cantidad de calor,

$$808 \frac{H}{1-H},$$

necesaria para la vaporización del agua, disminuída en la cantidad de calor arrastrada por el vapor de agua que se supone desprendido a 100°C y que sería:

$$1,5 \frac{H}{1-H} \times 44,5.$$

e) Es fácil, partiendo de estos diagramas de base y aportando eventualmente algunas correcciones propias a la materia estudiada, construir por transparencia el diagrama de cualquier horno.



Abaco n.º 4

DIAGRAMA Q (T) DE LOS HUMOS CON COMBUSTIÓN NEUTRA EN AIRE

f) Finalmente, suponemos que se trata aquí de un diagrama teórico. Siendo la realidad, como precisaremos más adelante, muy diferente.

5. Diagrama Q (T) de los humos

Estudiaremos, primero, el caso de combustión neutra en aire.

Hemos establecido este diagrama para una serie de consumos caloríficos, C, escalonados de 100 en 100 calorías entre 1.000 y 1.800 calorías.

Debido a que la aportación de vapor de agua en la zona de secado depende del contenido en agua H de la pasta, no hemos podido establecer cada curva completamente.

Cada curva del diagrama se compone de 4 partes:

1) la zona de combustión neutra, que es una curva teórica que supone la combustión instantánea o, en otros términos, que da para cada temperatura la cantidad de calor de los humos de combustión;

2) la zona de descarbonatación representada por puntos; estas curvas trazadas son puramente ficticias y dependen del diagrama Q (t) de la materia;

3) la zona de abajo, donde los humos de combustión están mezclados al CO₂ procedente de la descarbonatación. En esta zona, las curvas señaladas corresponden un poco mejor a las curvas reales, por lo menos en la zona de las temperaturas bastante bajas para que la combustión se termine, y suficientemente elevadas para que no se alteren por la aportación del vapor de agua del secado. Hemos omitido el vapor de agua procedente de la deshidratación de las arcillas;

4) la zona de secado no ha sido representada; hay que realizarla añadiendo para cada temperatura una cantidad de calorías que corresponde al contenido en vapor de agua de los humos. Estas cantidades de calor están indicadas por una serie de curvas punteadas a la izquierda del diagrama.

Utilización de los dos diagramas

Es fácil superponer los dos diagramas establecidos sobre calcos transparentes, y

también se puede, para hacerlos más legibles, recortar toda la parte inferior derecha del diagrama Q (T) de los humos, guardando simplemente el eje de las abscisas con la escala correspondiente.

Se superponen los dos ejes de las abscisas Q de los dos diagramas. Basta entonces, para determinar la posición exacta del diagrama Q (T) de los humos en relación al diagrama Q (t), determinar gráficamente o por cálculo la pérdida de calor de los humos a la salida del horno para la temperatura T_f supuesta conocida. Para esto se puede aplicar la expresión aproximada dada más arriba:

$$P_f = T_f \left(0,373 \frac{C}{1.000} + 0,115 \right) + 0,69 \frac{H}{1-H} (T_f - 100^\circ\text{C})$$

Por otra parte, hemos construido sobre este ábaco Q (T) las curvas de calorías iguales recuperadas en el enfriador, las cuales permiten determinar el límite de la curva que debe hallarse sobre la misma abscisa que el límite de la curva del diagrama Q (t) de la materia. Esta puede, llegado el caso, prolongarse más allá de 1.400°C.

6. Diagrama Q (T) de los humos con enriquecimiento de oxígeno

Con objeto de determinar el interés de la sobreoxigenación, hemos establecido, para un consumo C de 1.300 calorías, una serie de diagramas Q (T) de los humos correspondientes a tantos por ciento diferentes de sobreoxigenación.

Siendo diferente el diagrama para un mismo porcentaje de oxigenación según el contenido en C y en H₂ del combustible, como ya hemos visto más arriba, hemos adoptado la disposición siguiente:

Si suponemos que, sobre el consumo de 1.300 calorías, x % proviene de la combustión del hidrógeno en el oxígeno puro, el resto, es decir, 1.300 (1 - x), provendría de la combustión neutra en el aire de un combustible cualquiera.

Tal sobreoxigenación sería la que se pudiese realizar a partir de la electrólisis

del agua. Los desarrollos futuros de la energía atómica podrían así, al pasar por el intermediario de la electrólisis del agua, encontrar una aplicación en la cocción del cemento.

Con esto se evitaría un trastorno radical de nuestra industria, al reducirse a un problema de horno clásico utilizando un combustible gaseoso, pudiendo ser realizada en proporciones muy variables la dosificación de aire y de oxígeno.

Es inútil insistir sobre las posibilidades increíbles que podría dar un porcentaje de sobreoxigenación aun reducido, a condición de que el oxígeno esté a un precio aceptable. Actualmente cocemos cemento a una temperatura próxima a los 1.500°C con llamas que apenas sobrepasan esta temperatura; y en caso de desreglado del horno se tienen enormes dificultades para recuperar la cocción, dificultades acrecentadas, por otra parte, debido a que, en una zona enfriada, la combustión tiene tendencia a ser más lenta y la llama a alargarse irradiando menos.

No hay duda de que una inyección de oxígeno en tal momento restablecería la buena marcha en un tiempo record y, de esta manera, la conducción del horno sería mucho más regular y fácil.

Desgraciadamente, en las condiciones actuales, el precio del oxígeno es muy elevado.

Superpongamos los dos ábacos de combustión en el aire y de combustión con sobreoxigenación.

Comprobaremos que la curva 1.300 calorías con $x = 10\%$ de sobreoxigenación se confunde sensiblemente con la curva de combustión neutra en el aire correspondiente a un consumo de 1.220 calorías. Esto significa que, en primera aproximación, se debería obtener el mismo resultado con un consumo de 1.220 calorías recuperando en el enfriador clínker 80 calorías suplementarias (1).

Esta observación es bastante teórica porque, de hecho, es verosímil que, con sobreoxigenación, la combustión sería más rápida y las curvas de los humos reales

serían, sin duda, en los dos casos bastante diferentes. Solamente se puede decir que fuera de la zona de radiación, es decir, en toda la parte de arriba del horno, el comportamiento de los dos humos sería sensiblemente análogo.

Parece, por lo tanto, prudente, antes de lanzarse a la sobreoxigenación permanente, agotar antes todos los recursos del enfriador de clínker donde, con frecuencia, tenemos por recuperar de 100 a 200 calorías.

Esto no quita nada el interés de una sobreoxigenación momentánea, como hemos dicho antes, para reanimar rápidamente un horno desreglado. En este caso, una utilización de oxígeno, aun costosa, es quizás muy rentable (para hacer el balance de esto, sería necesaria una experiencia).

Hemos representado sobre el ábaco el diagrama Q (T) en el caso de la combustión de hidrógeno en el oxígeno puro (raya gruesa) y el de la combustión del carbono puro.

Se observará, a este respecto, que con los combustibles ricos en carbono, se deberían obtener humos más calientes fuera de la zona de combustión que con combustibles ricos en hidrógeno.

Es difícil de llevar más adelante este estudio puramente teórico mientras no se haya realizado la experiencia que ahora es corriente en metalurgia.

7. Campo de aplicación de los diagramas Q (t)

La superposición de los dos diagramas materia y humo da, para cada abscisa, el estado de la materia y de los gases en una misma sección.

Ya hemos visto que, debido a la combustión, la curva real de los gases era, en realidad, bastante diferente de la curva teórica.

Allí donde la combustión termina, sucede lo contrario, es decir, la curva real se confunde prácticamente con la curva teórica en la medida en que se puede admitir el valor de los calores específicos adoptados en nuestro cálculo.

Las medidas de temperaturas de gases efectuadas en una sección del horno con

(1) Se encontraría de la misma manera que 20% de sobreoxigenación correspondería a una curva a 1.150 calorías, es decir, a una recuperación suplementaria de 150 calorías en el enfriador.

una caña de aspiración acusan temperaturas bastante variables, estando la temperatura máxima, en principio, hacia el centro de la sección y la temperatura mínima en los alrededores del talud de materia.

Estas desviaciones de temperatura pueden ser del orden de 150° a 200°C (confer. tesis de M. Folliot y ensayos en el Horno I de Nicole), pudiendo ser, por otra parte, mucho más elevadas en la zona de combustión propiamente dicha donde hay todavía mezcla de aire a temperatura relativamente baja con gases parcialmente quemados y a temperatura ya elevada.

Por otra parte, si se considera el material, se comprueba que la noción de temperatura del material en una sección es todavía mucho más imprecisa que para los gases. En efecto, se encuentran variaciones sensibles entre el corazón del talud, la superficie del talud y la parte en contacto con el refractario. Por otra parte, para una misma zona del talud, se podrán encontrar diferencias importantes según el grosor de la partícula del material y, finalmente, se encontrarán desviaciones importantes para un mismo gránulo entre su corazón y su superficie.

En definitiva, si se estudia un volumen elemental de gas o de material en la sección considerada, se obtendrá para el gas un punto que se encuentre sobre el diagrama $Q(T)$ de los humos, teniendo este punto una posición sobre este diagrama que depende de su temperatura, y todos los volúmenes elementales de una misma sección se hallan sobre un elemento de curva de diagrama más o menos largo según que la temperatura de los gases sea más o menos variable en una sección.

Para el material, esta descomposición en volúmenes elementales es mucho más compleja y obliga a considerar, no solamente elementos de curvas, como hemos ya indicado, función de las desviaciones de temperaturas, sino también diagramas $Q(t)$ diferentes con la composición química de los volúmenes elementales considerados que pueden tener títulos muy diferentes. Se obtienen así, para representar el material, haces de diagramas cuyo diagrama considerado no es más que la representación media (media ponderada).

Llevar más adelante este estudio nos

conduciría a desarrollos complejos. Nos limitaremos, por consiguiente, a hacer una observación sobre la parte del diagrama comprendida entre 900°C y 1.400°C, es decir, sobre la zona de clinkerización.

8. Clinkerización

Esto debería ser tema de un estudio muy avanzado, mucho más al alcance del Laboratorio Central que de una fábrica.

¿Cómo se efectúa la clinkerización?

A decir verdad, los informes poco concordantes recogidos de diversos autores parecen indicar que se conocen pocas cosas relativamente sobre este tema, o, como parece indicárnoslo la observación, hay que admitir que la clinkerización puede hacerse según los casos de maneras muy diferentes.

La clinkerización variaría con la composición química del crudo, con la naturaleza física del crudo, con su granulometría, con la compacidad de los gránulos de material, con las desviaciones más o menos importantes de composición entre los elementos que forman el crudo, facilitando más o menos la aparición de líquidos a baja temperatura.

Por fin, variaría, sobre todo, con el gradiente de temperatura en el material, gradiente que depende de la ley de calentamiento de la materia, del coeficiente de conductibilidad λ y de las dimensiones, es decir, respecto al radio de la esfera elemental de materia considerada.

Esta complejidad explica fácilmente que ciertos autores consideren que la clinkerización, es decir, la formación exotérmica de C_2S , comenzaría hacia los 900°C. Otros hacen comenzar la clinkerización en fases sólidas hacia los 700°C, en que la sílice desplaza la cal de la caliza liberando el CO_2 y formando bicálcico. El C_3S se formaría muy lentamente hacia los 1.400°C a partir de la acción del C_2S sobre la cal.

Para Jander, esta reacción de formación del C_3S no sería exotérmica más que entre 1.300° y 1.900°C, y sería endotérmica fuera de estas temperaturas.

Hemos intentado estudiar este problema experimentalmente, analizando la curva de calentamiento de gránulos de crudo en un horno de mufla a temperaturas crecientes a

partir de 800°C. Desgraciadamente, no hemos podido proseguir estas experiencias, debido a incidentes materiales y falta de tiempo.

El estudio matemático del fenómeno no puede ser llevado muy lejos, pues hay que detenerse enseguida por la obligación de conocer las leyes de calentamiento de la materia en función del tiempo, así como las leyes de desprendimiento del calor de clinkerización en función también del tiempo. Reconocemos no tener sobre esto último ninguna noción. En cuanto a la ley de calentamiento de la materia, se puede considerar una expresión aproximada señalando que, en una sección dada del horno, el estado del material es sensiblemente idéntico, cualquiera que sea el grosor de las partículas consideradas. Esto evidentemente no es más que una aproximación muy inexacta, puesto que las desviaciones de temperatura pueden ser de varias centenas de grados, pero, de hecho, esto representa, en calorías, un error pequeño.

No hemos reproducido aquí estos cálculos, debido a que son incompletos y que merecen ser apoyados por algunas experiencias de laboratorio.

De hecho, en la ignorancia en que nos encontramos de las leyes que rigen este fenómeno, no tenemos más que observar sus efectos. Ahora bien, éstos son extremadamente claros. Es así como hemos podido observar sobre los hornos 1 y 2, de La Corona, dos comportamientos absolutamente diferentes desde el punto de vista de la clinkerización.

El horno 1, con una producción de 400 t y 25 % de aire primario, tiene una zona de cocción que aparece muy caliente y muy corta. A la entrada de la zona, la descarbonatación apenas ha comenzado. En algunos metros, se efectúan al mismo tiempo la descarbonatación y la clinkerización de una manera muy brusca, que se traduce, al observarla, en una ola negra muy marcada de productos mal cocidos. Es un funcionamiento en *llama corta*, para volver a tomar la expresión habitual. Es probable que la formación de líquido sea importante, lo que tiende a suministrar una densidad de clínker más elevada y una cal libre más débil.

El horno 2, con una producción de 600 t y con menos de 20 % de aire primario, fun-

cionaría, por el contrario, en *llama larga*. Su zona de cocción parece muy larga y poco cortada, en relación a la parte de arriba de la zona. Se pasa muy progresivamente de los productos mal cocidos al clínker muy caliente. La descarbonatación se realiza sobre una gran extensión y comienza en el centro del horno (Confer. nota de La Couronne en la 19.ª Reunión Técnica sobre las producciones de hornos). Es posible que, en este horno, la descarbonatación y la clinkerización empiecen hacia los 700°C y se prosigan durante un tiempo bastante largo, y la reacción endotérmica de descarbonatación absorbe las calorías desprendidas por la clinkerización, moderando esta reacción. La cocción se efectúa a una temperatura relativamente baja, hay menos líquido, y las densidades son más pequeñas y se tiene, en general, un poco más de CaO libre que en el horno 1.

NOTA: Estas observaciones se hacen sobre el horno 2, según funcionaba en 1954, antes de las últimas modificaciones de conjunto de cadenas y las últimas modificaciones de tobera y de crudo, que han podido modificar su modo de clinkerización.

El primer caso, el del horno 1, es de un gradiente de temperatura elevada, mientras que el caso del horno 2 es de gradiente de temperatura débil.

Entre estos dos casos muy distintos se pueden imaginar, naturalmente, todos los intermedios posibles, donde se suelen clasificar la mayoría de los hornos con probables modificaciones de comportamiento, aproximándolos, más o menos, a estos dos casos extremos.

Si no tenemos la posibilidad de analizar estos dos mecanismos, sí podemos, sin embargo, imaginar algunas consecuencias.

La influencia sobre el consumo calorífico no es seguramente despreciable, sin que podamos indicar en que caso es más favorable. Caeríamos de nuevo en el eterno dilema de las llamas largas y de las llamas cortas, para el que es verosímil que no se pueda dar regla general, ya que condiciones muy diferentes nos podían inclinar hacia una u otra solución.

Por otra parte, este fenómeno hace extremadamente sensible y peligrosa toda acción sobre la turbulencia de la llama (diámetro de tobera y velocidad del aire en

la nariz de la tobera). Cuando se calienta la zona aumentando la turbulencia de la llama, se puede abordar un régimen de clinkerización muy brusco a alta temperatura; la elevación de temperatura del clinker puede entonces, a su vez, reaccionar sobre la llama acelerando la combustión; la llama se acorta más, y es, de esta forma, como se hacen sobrecocciones y se quema el refractario.

A la inversa, este fenómeno exotérmico permite funcionar en llama larga con temperaturas de llama relativamente bajas. Se hace entonces trabajar la llama por radiación en la zona central del horno, y se obtiene, de esta manera, una marcha del horno incomparablemente más estable y menos peligrosa (1).

Finalmente, además de su acción sobre el consumo calorífico y la estabilidad del horno, el mecanismo de clinkerización desempeña una influencia preponderante sobre la naturaleza física del clinker (porcentaje de líquido), sobre su composición química (porcentaje de C_3S), sobre su dureza, sobre sus resistencias y sobre su tendencia a la expansión.

Todo el problema de la cocción del cemento está, de este modo, planteado por el estudio de este fenómeno que, en el diagrama $Q(t)$, casi desaparece, velado por el aspecto puramente teórico de este diagrama.

(1) Suponemos que no haya, por otra parte, otros inconvenientes, desde el punto de vista de polvos o consumo calorífico. Nos limitamos aquí al estudio de la zona de cocción.

REFRACTARIO
RESISTENTE A
ALTAS
TEMPERATURAS

GRES
DE ALTA CALIDAD,
PARA INDUSTRIAS
QUÍMICAS

TUBERIA
DE GRES,
INATAKABLE
A LOS ÁCIDOS

CUCURNY
CALLE PRINCESA, 58 Y 61
BARCELONA