

estudio de los factores térmicos del horno en zigzag*

A. ALAMAN
Ingeniero Industrial

f) Calorías almacenadas en el material cocido al ser retirado del horno.

Las calorías almacenadas en el material cocido al deshornar dependerán, fundamentalmente, de la temperatura a que este material abandone el horno, y ésta, a su vez, de las características de la recuperación de calor, por aire, de los productos cocidos.

Puede suponerse—cosa que en la mayoría de los casos será la realidad—que los materiales que entran en el horno, aire, carbón y arcilla moldeada, lo hacen a temperatura ambiente, y tomar esta temperatura como referencia al evaluar las pérdidas por el calor almacenado en los productos que abandonan el horno—humos y material cocido—, con lo cual se ahorran algunos cálculos.

El calor perdido será:

$$Q = C(T_p - T_a) ,$$

siendo

C = calor específico de los productos cocidos;

T_p = temperatura de los productos al deshornar;

T_a = temperatura ambiente.

El calor específico medio de los productos cocidos, entre el de la temperatura a que se sacan del horno y la del ambiente, puede tomarse 0,21 kcal/kg°C.

La temperatura de salida de los productos cerámicos será la que resulte de los cálculos del apartado siguiente.

g) Calorías eliminadas por el aire de recuperación.

Interesa disponer de un apilado cuya capacidad de cesión o absorción de calor de los gases sea suficiente para que las temperaturas a que salen del horno tanto los gases como los materiales cocidos, sean económicas.

La transmisión de calor entre el aire y los apilados en el horno se efectúa principalmente por convección y radiación.

En un horno en zigzag la transmisión de calor entre el aire y los apilados se verifica en dos sentidos. En el período de precalentamiento del material, el aire caliente—los humos procedentes de la combustión—transmiten su calor al apilado, mientras que en el período de precalentamiento del aire—tanto de combustión como de recuperación—es el api-

* Este artículo es continuación del publicado en el número 94 de este Boletín.

lado el que cede las calorías almacenadas en él al material.

La transmisión de calor, de los apilados al aire, se efectúa principalmente por convección, siendo, por el contrario, la radiación la forma en que en mayor grado se transmite el calor de los humos al apilado.

Una y otra forma de transmisión de calor dependen de una serie de factores numerosa: calidad del apilado, temperatura, características de su superficie, características de los humos, velocidad de circulación del aire o de los humos, densidad y composición de los mismos, dife-

rencia de temperatura entre apilado y gases, forma del apilado, forma de los elementos que componen el apilado, etcétera, etc. Se comprende que el cálculo riguroso del intercambio de calorías sería impropio, teniendo que recurrir a coeficientes medios que, simplificando la labor, nos den resultados estimables. En todo caso esta simplificación puede conducirnos a unos tanteos previos, que son fáciles y siempre preferibles al cálculo riguroso que en muchos casos resulta imposible.

Siendo de orden muy secundario el calor transmitido por convección de humos a apilado, podemos prescindir de él sin

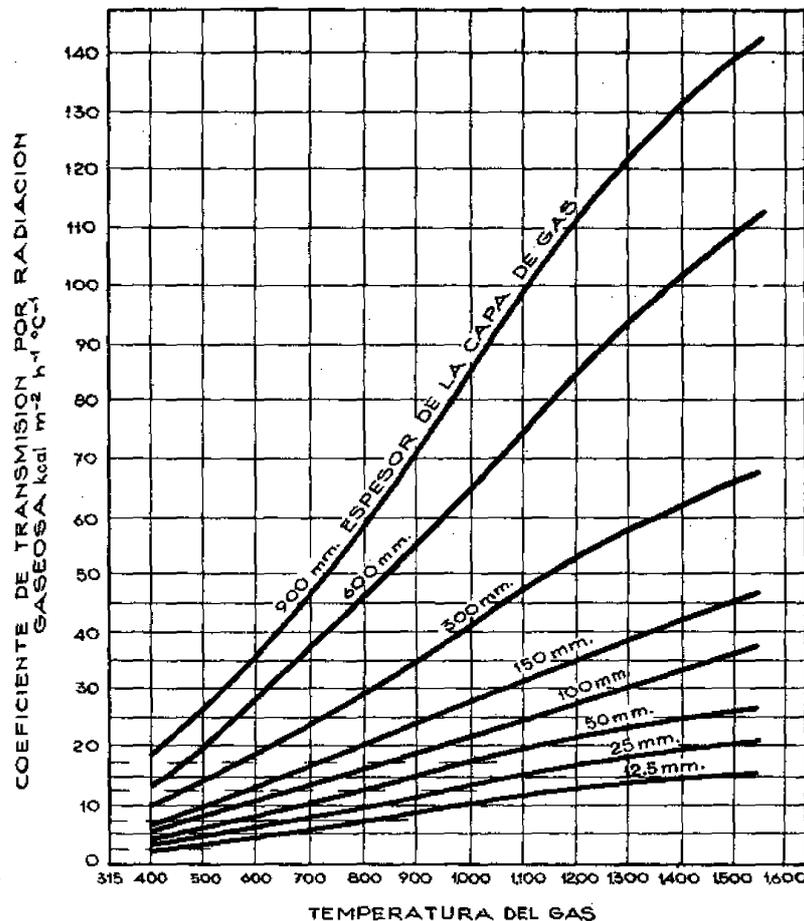


Fig. 4.—Transmisión calorífica por radiación de los gases.

que suponga un error digno de ser tenido en cuenta.

Para el coeficiente del calor transmitido por radiación del gas a los ladrillos, Thinks indica el ábaco de la figura 4.

En él, el espesor de la capa de aire será naturalmente la que existe entre dos ladrillos consecutivos. Estos valores hay que multiplicarlos por un coeficiente que depende de la característica del material del apilado y del apilado mismo. Para un apilado de ladrillos macizos, de la forma que se dispone normalmente, puede tomarse para este coeficiente de absorción el valor 0,7.

Para la transmisión del apilado al aire, el mismo autor da un ábaco que permite la obtención del coeficiente de transmisión por convección. La curva que se indica a continuación ha sido interpolada de acuerdo con los valores que hay que tener en cuenta para los apilados norma-

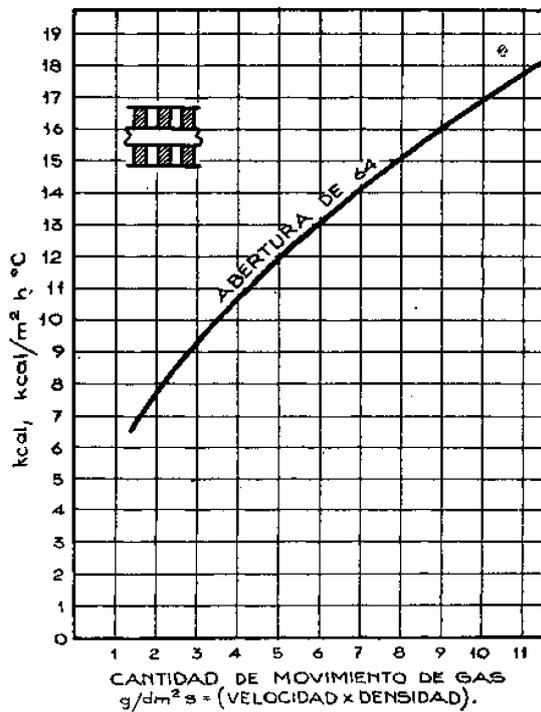
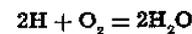
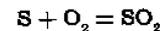
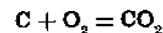


Fig. 5.—Coeficiente de transmisión apilado aire, por convección.

les en estos hornos, prescindiendo de las anomalías del apilado en las esquinas.

Para la determinación de la cantidad de movimiento podemos considerar el flujo de aire partiendo del consumo normal de carbón mencionado antes, de 48 kilogramos de carbón de 7.000 kilocalorías por tonelada de productos cocidos, volumen que se puede determinar de acuerdo con la composición del carbón.

Según las reacciones:



Por cada kilogramo de carbón, de composición $n\%$ carbono, $m\%$ S azufre $p\%$ H y $q\%$ O_2 , se necesitan teóricamente:

$$\frac{1}{21} (n \times 1,86 + m \times 0,7 + p \times 5,6 - 100q) \text{ m}^3$$

de aire en condiciones normales.

En caso de no conocerse la composición del carbón, podemos adoptar las cifras:

Carbón no coquizable (40 % volátiles), 7,05 m³/kg.

Carbón coquizable (30 % volátiles), 8,74 m³/kg.

Carbón pobre en volátiles (18 % volátiles), 9,24 m³/kg.

Antracita (4, % volátiles), 11,34 m³/kg.

Todos estos valores, a 15°C y 760 Torr.

Siendo la densidad del aire 1,293 kg/m³ en las condiciones standard—°C . 760 mm Hg—puede determinarse la densidad a una temperatura absoluta T, haciendo despreciables las variaciones de presión por:

$$D = \frac{1,293 \times 273}{T}$$

El volumen de los gases de combustión, en condiciones standard es aproximada-

mente igual al volumen del aire necesario. La densidad es fácilmente calculable, si se conoce la composición porcentual del carbón.

En caso contrario, puede adoptarse la cifra 1,04 con respecto al aire.

La velocidad media del fluido en cada sección vendrá determinada por la relación entre el gasto y la sección útil. Esta sección útil será la sección de la cámara, disminuída en la sección ocupada por los ladrillos, sección que se determinará en cada caso de acuerdo con el tipo de encañado que se prevea. Como espesor de la capa de los gases, puede tomarse la dimensión del hueco entre dos ladrillos (distancia entre sus caras verticales).

La transmisión de calorías, utilizando los coeficientes encontrados en los gráficos anteriores, es proporcional a la superficie en contacto con los gases, a la diferencia de temperaturas y al tiempo. Por unidad de tiempo, pues, el calor transmitido en una porción de cámara de 1 metro de longitud es:

$$Q_1 = C(T - t)S,$$

siendo:

C = coeficiente de transmisión—de radiación, convección o suma de ambos si se quiere hacer con mayor precisión en cada caso—.

T = temperatura superior (del fluido o del apilado, según el caso).

t = temperatura inferior.

S = superficie de contacto entre apilado y gases.

La superficie libre, por metro de longitud de una cámara, será igual a la superficie total de las piezas que existen en esa cámara deducida la superficie de contacto de unas con otras. Esta superficie de contacto puede hallarse fácil y rápidamente con cálculos cuidadosos y ordenados.

Si desarrollamos la longitud del horno podemos suponer sin gran error, como lo demuestran las medidas efectuadas, que la temperatura del apilado decrece linealmente a partir de la alimentación del horno lo mismo en el material crudo que en los productos que ya están cocidos.

Llamando:

T_o = temperatura inferior del material

T_t = temperatura superior del material

t_o = temperatura inferior del aire

t_t = temperatura superior del aire

x = distancia al origen

C = coeficiente de transmisión

S = superficie libre de apilado por unidad de longitud

v = velocidad del aire

γ = calor específico del aire

Q_x = calor cedido en la longitud x en la unidad de tiempo

L = longitud del horno ocupada por el material en sus distintas fases.

La repartición de temperaturas podemos esquematizarla del modo siguiente:

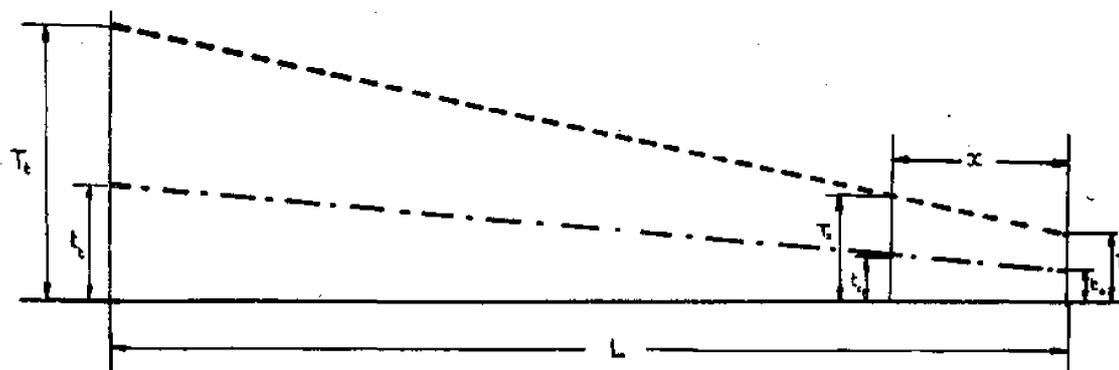


Fig. 6.

El calor cedido en la unidad de tiempo por un elemento diferencial de longitud será, de acuerdo con la ley de transmisión de calor lineal que hemos supuesto al señalar los coeficientes de transmisión:

$$dQ_x = C(T_x - t_x)S \cdot dx ;$$

la temperatura T_x , como se deduce fácilmente de la figura, será:

$$T_x = T_o + \frac{T_t - T_o}{L} x .$$

La temperatura t_x será igual a la de origen más el incremento correspondiente a las calorías que ha recibido, es decir:

$$t_x = t_o + \frac{Q_x}{v \cdot \gamma} ;$$

sustituyendo valores en [1] tendremos:

$$dQ_x = C \left[T_o + \frac{T_t - T_o}{L} x - \frac{Q_x}{v \cdot \gamma} - t_o \right] S dx ;$$

haciendo:

$$Z = \frac{T_t - T_o}{L} x - \frac{Q_x}{v \cdot \gamma} ;$$

por tanto,

$$dz = \frac{T_t - T_o}{L} dx - \frac{dQ_x}{v \cdot \gamma}$$

y

$$dQ_x = v \cdot \gamma \left(\frac{T_t - T_o}{L} dx - dz \right) ;$$

sustituyendo y operando queda:

$$\frac{dz}{z(T_o - t_o) - \frac{T_t - T_o}{L} \frac{v \cdot \gamma}{SC}} = \frac{SC}{v \cdot \gamma} dx ,$$

e integrando:

$$l \left(z + T_o - t_o - \frac{T_t - T_o}{L} \cdot \frac{v \cdot \gamma}{SC} \right) = - \frac{SC}{v \cdot \gamma} x + K ,$$

siendo K una constante de integración.

Como para $x = 0$, $z = 0$, sustituyendo y operando obtenemos el valor:

$$K = l \left[(T_o - t_o) - \frac{T_t - T_o}{L} \frac{v \cdot \gamma}{SC} \right]$$

Si bien la expresión aparece en forma un tanto molesta para efectuar tanteos con ellas, éstos se simplificarán notablemente al sustituir datos numéricos, puesto que, en general, los términos exponenciales podrán despreciarse en el caso presente.

La temperatura T_t del apilado, una vez ha cesado la alimentación en esa cámara, suele ser, como cifra más corriente, de 150 a 200°C inferior a la máxima alcanzada. La temperatura T_o de los productos listos para deshornar, tiene como valor medio—varía con su posición en la sección de la cámara—en un horno normal, 60°C. t_o es la temperatura ambiente. Como las condiciones de transmisión entre el aire o humos y los ladrillos en un horno zigzag son excelentes, las diferencias de temperatura entre el elemento transmisor de calorías y el receptor es relativamente pequeña, como se comprobará en los cálculos, si se aplican a un caso concreto.

La temperatura del apilado al ser introducido en el horno es la del ambiente; y cuando llega a la última cámara de precalentamiento—la anterior a la que empieza la alimentación—, la temperatura es del orden de 250 ó 300° inferior a la máxima que alcanza el apilado en la cocción. La temperatura de los gases a la salida de la nueva cámara de alimentación es fácil de calcular haciendo un sencillo balance térmico, en el que se tenga en cuenta la temperatura del aire a la entrada de las cámaras de alimentación de combustible, el volumen de aire y las calorías aportadas a éste en estas cámaras.

El calor aportado será igual al suministrado por el carbón, descontando de él el absorbido por el apilado, que es igual al producto de la diferencia de temperaturas a la entrada y salida de las cámaras de alimentación por el calor específico a esas temperaturas — aproximadamente

0,29 kcal/kg°C—y por el peso del material que ha pasado por allí en la unidad de tiempo que se considere. Hay que deducir también el calor perdido por paredes y suelo, que puede suponerse igual al perdido por estas cámaras funcionando en régimen permanente, y cuya expresión se da más arriba.

Naturalmente, el calor ganado por los gases en la fase de enfriamiento del apilado debe ser igual al calor que han perdido los ladrillos en el mismo tiempo. Esta igualdad será la que nos valdrá de comprobación de los cálculos anteriores; y en el caso de que los valores no coincidan, habría que variar la temperatura de salida del apilado. Si ésta fuese superior a una cifra módica, entonces los ladrillos saldrían demasiado calientes; esto dificultaría la operación de extracción del horno de los mismos y aumentaría las pérdidas por este concepto. Esto querría decir que el aire que recorrería el apilado antes de hacer de comburente, sería escaso para enfriar el apilado, por lo que habría que introducir más aire con el fin de que las calorías absorbidas fuesen mayores.

Este aire suplementario no es conveniente que entre en las cámaras de combustión, por lo que cuando está a una temperatura conveniente se puede eliminar para utilizar sus calorías en otros fines que puedan interesar. Para los cálculos, dividiríamos la parte del horno en que pierde calor el apilado en dos partes: una de ellas por la que circule el aire de combustión, y otra por la que circule, además, el aire de recuperación. Los cálculos para cada una de estas partes serían análogos a los establecidos para el caso en que no existiese aire de recuperación.

En el caso de la etapa de recuperación del calor de los humos en calentamiento del apilado, si después de la comprobación las cifras indican una temperatura de salida de humos muy alta, sería aconsejable aumentar la longitud desarrollada del apilado que está absorbiendo el calor de los humos, o bien, si se comprobase que la capacidad de intercambio de

calor era superior a la supuesta, reducir esa longitud, en la medida necesaria, teniendo en cuenta el tiempo mínimo en que se debe efectuar el calentamiento del material para evitar las roturas del mismo.

Hay que tener en cuenta que un porcentaje considerable del calor consumido en el calentamiento del material se dedica a la evaporación del agua que no ha sido eliminada en el secado. La eliminación del agua del material es un fenómeno complejo que escapa al alcance de estas líneas. Para el cálculo de la distribución de temperaturas a lo largo de la zona de precalentamiento del material, podemos suponer que esta eliminación se efectúa hasta que el material alcanza los 300°C y que el agua perdida por cada pieza es proporcional al tiempo que permanece en esta zona. Para los cálculos, el agua en esta zona hace, en cierto modo, un papel análogo al desempeñado por el aire de recuperación en la zona de recuperación de las calorías del material cocido.

Las calorías eliminadas del horno por el aire de recuperación serán las resultantes de los cálculos precedentes.

h) Pérdidas por inquemados.

Las pérdidas por inquemados son difíciles de evaluar a priori, y en un balance térmico que se quisiese hacer esta medida, analizando los inquemados en las cenizas, se encontraría una dispersión notable. Sin embargo, para los cálculos previos puede tomarse como pérdidas por inquemados la cifra del 3 ó el 5 %.

II. EL BALANCE TERMICO

Entre los gastos de una fábrica de material cerámico de construcción, el consumo de carbón figura como uno de los apartados más importantes; su importancia relativa crece en cuanto la productividad de la fábrica se incrementa y de-

creta el número de operarios, pudiendo llegar a ser el capítulo que origina mayores gastos.

Se comprenderá, pues, que el consumo de carbón debe ser aquilatado al máximo, y controlando, con el mayor cuidado, los factores que intervienen en este consumo.

Técnicamente, la distribución de las temperaturas en el horno, así como la atmósfera que en él reina, tienen una influencia decisiva en la calidad y homogeneidad de los productos cocidos en él, tanto desde el punto de vista resistente como en lo referente al estético del color de estos productos.

En este sentido, por mucha que sea la pericia del hornero, o la perfección del encañado, un sistema de control adecuado tiene, sin duda, una utilidad extraordinaria, al permitir corregir adecuadamente los defectos que pudiera originar una cocción defectuosa y, desde luego, el dinero invertido en material adecuado para control de las diferentes variables de la cocción puede asegurarse que es remunerativo para la Empresa que explota la fábrica. Nunca se insistirá bastante en la utilidad de estos aparatos de control, que haciendo una "radiografía" del horno permiten controlar elementos y partes de él que se escapan al control óptico directo, y diagnosticar con seguridad y rapidez las causas de las anomalías que en él puedan ocurrir, simplificando las operaciones de tanteo en cualquier modificación que se quiera introducir en el horno.

El hornero es factor primordial del horno. Su pericia, su sentido de la conducción del mismo y su experiencia son cualidades de un valor extraordinario. Si a éstas se le ayuda proporcionándole datos que necesariamente escapan a su alcance, puede asegurarse que la marcha del horno será muy próxima a la adecuada.

Para obtener un índice de la distribución del gasto de calorías en un horno, el procedimiento del balance térmico es rápido y muy aproximado. En él—que se efectúa a posteriori, es decir, con el hor-

no en funcionamiento—, las variables que podemos comprobar son:

Calorías que entran:

- a) Calorías aportadas por el combustible: Utilización de esas calorías.
- b) Calorías necesarias para la cocción.
- c) Calorías eliminadas por los humos.
- d) Calorías eliminadas por paredes, suelo y bóvedas.
- e) Calorías por carbón inquemado.
- f) Pérdidas por los productos cocidos al deshornar.

a) Conociendo el carbón que se va a utilizar, su poder calorífico inferior puede hallarse del modo más inmediato por medio de la bomba calorimétrica.

Los calores de combustión del carbono, hidrógeno y azufre—principales elementos combustibles que intervienen en el carbón—son conocidos, y de acuerdo con los porcentajes de estos elementos en el combustible existen una serie de fórmulas que permiten calcular el poder calorífico de los carbones. Partiendo del análisis elemental no puede conocerse con exactitud la potencia calorífica de los carbones, puesto que parte del carbono y el hidrógeno se encuentran en forma de hidrocarburos, y la potencia calorífica de estos compuestos no es la suma de los calores de combustión de sus componentes.

Dulong da la fórmula del poder calorífico superior de un carbón como la suma de los calores de combustión de los elementos componentes, suponiendo que el oxígeno está completamente combinado con hidrógeno. Su fórmula es:

$$P_{c.s.} = 80,8 C + 344,6 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 25 S$$

Esta fórmula da resultados excelentes para los combustibles de clase superior. Para los de rango inferior, las discrepancias llegan a ser del 7 a 8 % para las tur-

bas y más del 10% para las maduras. W. Boie propone la fórmula:

$$P_{cs} = 84C + 277,65H - 26,50 + 25S + 15N,$$

que para los carbones inferiores a las antracitas da resultados con una aproximación mayor del 1,5%. Como el valor que interesa es el del poder calorífico inferior entre ambos existe la relación:

$$P_{ct} = P_{cs} - 53,5 \cdot H$$

Si el análisis elemental del carbón fuese difícil de obtener, por no tener laboratorio la fábrica y por no existir en las cercanías un laboratorio apropiado, puede deducirse con cierta aproximación partiendo de la calidad del carbón y del análisis inmediato—carbono fijo y materias volátiles—.

La revista *Acero y Energía*, en un estu-

dio de las condiciones de combustión en hornos industriales, publica el ábaco que se reproduce a continuación, que permite calcular el contenido de carbono del carbón partiendo del análisis de gases. Es un ábaco de puntos alineados, cuya sencillez no requiere explicación detallada. Conociendo el porcentaje de nitrógeno, anhídrido carbónico y oxígeno mediante un análisis de los humos, la recta que une estos tres puntos nos da en su intersección con la correspondiente al porcentaje del contenido en carbono del carbón. El complemento a 100 de las de los demás elementos constituyentes del carbón se puede distribuir de acuerdo con el tipo de carbón, después de haber hecho la corrección de aumentar el porcentaje de carbono en la cuantía que indique el carbono que queda en los inquemados de las mismas, deducido del correspondiente análisis.

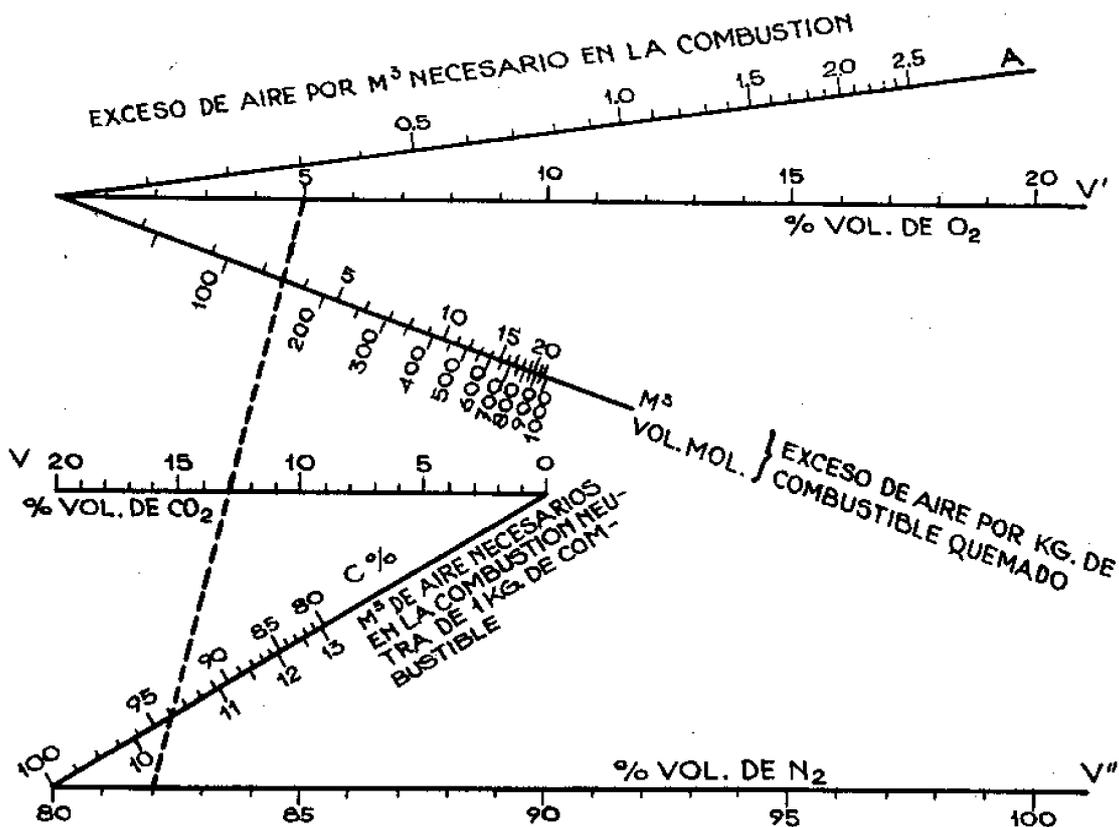


Fig. 7.

El porcentaje de carbono del carbón será, como se puede deducir fácilmente,

$$C_o = \frac{C \left(100 - A - Z - \frac{2x}{100} \right) + 2x}{100}$$

en donde:

C = lectura en el ábaco.

A = humedad del carbón.

Z = porcentaje de cenizas.

x = parte del carbono del carbón que ha pasado a las cenizas.

b), e) y f) El cómputo de estas calorías puede, conociéndose ya el material concreto, determinarse experimentalmente, con técnicas generalmente sencillas para los valores de inquemados en las cenizas. Una vez determinadas estas proporciones, las calorías eliminadas por estas causas pueden hallarse según se indica más arriba. Hay que tener cuidado en que el muestreo sea representativo, para lo cual debe estudiarse previamente la forma y lugares en donde obtener las muestras.

El calor necesario para eliminación del agua de cristalización y el agua zeolítica puede determinarse por distintos medios

más o menos cuidados que, en general, requerirán una técnica más complicada. Sin embargo, es mayor la uniformidad de este valor para el material que constituye la cantera, por lo que no es preciso determinarlo con la misma frecuencia que otros.

Para los productos deshornados puede procederse como se explicó en los cálculos teóricos.

c) Las pérdidas por los humos se deducirán fácilmente partiendo del análisis de los mismos, teniendo en cuenta la cifra del porcentaje de CO₂, CO y de O₂ que pueden hallarse con un aparato Orsat. En principio, si no se quiere hacer un análisis más completo, puede suponerse que los inquemados en los humos se componen de CO y H₂ en partes iguales.

Reproducimos los ábacos de la revista *Acero y Energía* para las pérdidas por calor sensible en los humos de una combustión con el aire teóricamente necesario y el calor evacuado por el aire en exceso.

El valor de este exceso de aire se puede obtener en el ábaco anterior.

No se incluye en los apartados anteriores el calor que lleva consigo el vapor de agua. Puede medirse la humedad de los humos por medio del psicrómetro.

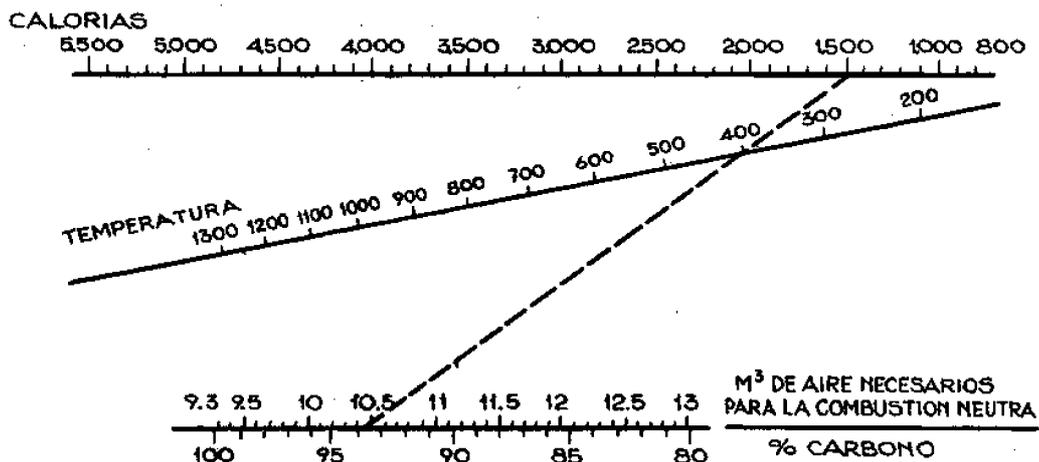


Fig. 8.—Calor sensible en los humos.

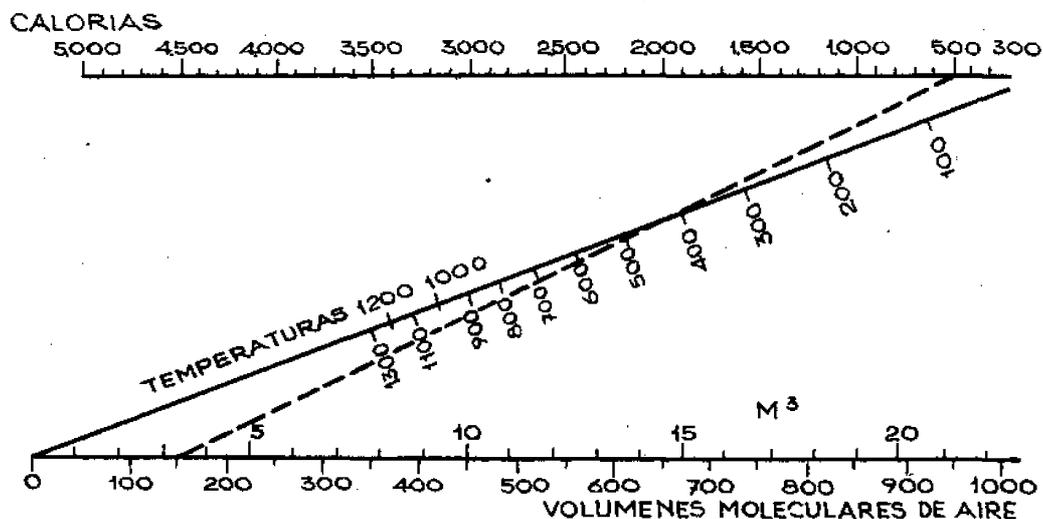


Fig. 8.—Calor en el aire en exceso.

En el caso de que no se pudiera hallar fácilmente la humedad de los humos, podría ésta ser calculada partiendo del agua que entra en el horno con el carbón, los ladrillos y el aire ambiente.

Hay que descontar, si se mide la humedad en los humos, la procedente del agua de cristalización y el agua zeolítica, consideradas ya en el apartado correspondiente.

Las pérdidas totales por calor sensible de los humos serían la suma de los valores hallados.

Para hallar el valor del calor latente de los humos habría que hacer un análisis más completo que el Orsat sencillo, determinando el porcentaje de hidrógeno y metano, con lo cual nos acercaríamos más a la realidad. Sin embargo, suponiendo que no existe más que CO y H₂ como inquemados, y que están en la misma proporción, no se comete un error grosero.

Los porcentajes representarán los volúmenes parciales de estos gases que, reducidos a las condiciones standard (0° y 760 mm/Hg) y multiplicados por su poder calorífico, nos darán las pérdidas en los humos en forma latente.

Los poderes caloríficos son:

Monóxido de carbono, CO: 2830 kilocalorías/metro cúbico.

Hidrógeno, H₂: 2.850 kcal/m³.

d) Estas calorías, en general, no dependen de la marcha del horno, sino de su construcción. Su evaluación es—como vimos—engorrosa y la más difícil de obtener en un balance térmico. Por ello, una vez realizadas las medidas de los anteriores apartados, que puede realizarse con precisión muy aceptable, se halla el valor de estas pérdidas por diferencia.

ACERO Y ENERGÍA. Número extraordinario, diciembre 1953.

F. ARREDONDO: *Ladrillos*. I. T. C. C. Madrid, 1951.

H. ETHERINGTON: *Modern furnace Technology*. Charles Griffin and C. Ltd. Londres, 1944.

J. GRISWOLD: *Fuels, Combustion and Furnaces*. McGraw-Hill Book C. Inc. Londres, 1946.

M. RASE: *Etude comparative des four zig-zag et des fours à galeries paraleles*. La Terre cuite, 28, 1.º Tri. 1954.

W. TRINKS: *Les fours industriels*. Dunod. Paris, 1957.