616 - 90

# combustión y combustibles

A. VIRELLA

de la Companhia Portuguesa de Cimentos Brancos "CIBRA"



#### Resumen

La ponencia trata de los combustibles generalmente empleados en los hornos rotativos de cemento Portland y, especialmente, de los problemas relacionados con los carbones pobres.

En cualquier caso, hay que tener un conocimiento previo del poder calorífico del combustible que se pretende emplear, siendo de considerar antes el coste por unidad de calor que el coste por unidad de peso.

Se describen el secado y la molienda de los carbones, señalando la tendencia actual de efectuar ambas operaciones simultáneamente, definiendo la aptitud para la pulverización y la determinación de la finura del polvo de carbón, por los métodos clásicos y por medio del permeabilimetro.

Se expone en qué medida influyen la finura del combustible, el sistema de inyección, el estado del aire primario, su poder comburente, el exceso de aire y la proporción de cenizas en la determinación de la temperatura de la llama, su poder radiante, el flujo térmico y la posibilidad de obtener un clínker bien cocido.

Se propugna por el empleo conjunto de aceites combustibles y carbones pobres como solución muy apropiada en la mayoría de los casos.

Por último, se menciona la posibilidad de que se formen anillos en los hornos rotativos como consecuencia del empleo de carbones de alto contenido de cenizas, indicando algunas soluciones para evitar dicha perturbación.

# 1. Combustibles empleados en la fabricación de cementos

Cuando José Aspdin descubrió el producto por él llamado cemento Portiand, patentado en 1824, lo obtenía, según se sabe, en hornos de cuba—idénticos a los que entonces se aplicaban a la fabricación de cal hidráulica—y empleaba en ellos coque como combustible.

El coque fue luego sustituído por otros carbones minerales, y durante algunas décadas se emplearon exclusivamente los combustibles sólidos en la industria cementera.

En 1885 Ransome patentó un horno rotativo destinado a la producción de cemento Portland, provisto de un quemador para combustibles gaseosos. El sistema prosperó poco en Inglaterra, su país de origen. Fue necesaria la audacia del español José de Navarro para que fuera trasplantado, en 1888, el horno rotatorio al Continente americano. En los Estados Unidos comenzaban las primeras aplicaciones industriales del petróleo, y fue precisamente petróleo bruto el combustible que hizo funcionar, en 1892, los dos primeros hornos rotativos de Navarro.

La relativa facilidad con que eran inyectados los combustibles gaseosos o líquidos hizo que éstos se aplicaran antes que los carbones al calentamiento de los hornos de cemento. Pero, desde 1866, en que el inglés Crampton y los americanos Whelpley y Storer estaban trabajando sobre las posibilidades de quemar carbón en polvo en los hogares ordinarios, las tentativas fueron tantas como los fracasos, hasta que en 1896 se consiguió el primer éxito al inyectar carbón pulverizado en un horno rotativo de cemento.

Durante un cuarto de siglo fue paraleia la evolución de los hornos rotativos y de los quemadores de carbón pulverizado. Los hornos se multiplicaron y la industria cementera tomó un insospechado impulso al contar con el poderoso auxilio de un combustible en aquel tiempo barato, como era el carbón en polvo. Este combustible, por su parte, era un subproducto sin cualquier aplicación industrial importante con excepción de los hornos de cemento. Hasta el año 1920 no se consiguió quemar carbón pulverizado en las calderas de vapor.

La entrada del carbón en polvo en otros campos de aplicación, con la escasez de combustibles que acompañó y siguió a las varias perturbaciones que ha sufrido el mundo y la orientación necesariamente autárquica de ciertas economías nacionales obligó a los cementeros a emplear combustibles tan pobres que, sin la menor duda, habrían sido rechazados unos pocos años antes.

En muchos casos, los combustibles de emergencia eran de tan baja calidad que no se podía obtener con ellos solos la temperatura necesaria para el funcionamiento de los hornos. Fue necesario acudir a las mezclas, bien sea de combustibles sólidos, bien de sólidos con líquidos y aún de sólidos con gases. Todo ello vino a complicar el ya confuso cuadro de los combustibles empleados en la fabricación de cemento.

Hoy en día, 136 años después de la invención del cemento Portland, y a los 75 años de la aplicación de los hornos rotativos a la cocción del cemento, puede muy bien decirse que se ha intentado, por lo menos, aplicar todos los combustibles imaginables a la fabricación de cemento. No siempre el éxito acompañó a la buena voluntad, porque las posibilidades humanas tienen su límite.

No vamos a ser tan ingenuos como para suponer que en la elección del combustible entren muchos factores dependientes de la voluntad del consumidor. En muchos casos no existe otra alternativa que el consabido "lo toma o lo deja"; pero, aún así, no podemos eludir la obligación de estudiar con atención e interés las propiedades y las posibilidades para una mejor aplicación de los poco gratos combustibles que nos veamos en la necesidad de emplear.

Tampoco vamos a tener la pretensión de que se pueda decir algo nuevo u original sobre la combustión y los combustibles. Tiene el tema un tan rancio abolengo, y ha sido exprimido por tantas y tan expertas manos que poco o ningún jugo podrá hoy sacar el exprimidor de turno. Apenas con la buena intención de dar un repaso a cosas que de tan sabidas ya las habíamos olvidado nos atrevemos a penetrar en una selva que, no por ser muy frondosa, ha dejado de ser hollada en todos los sentidos.

#### 2. Poder calorífico de un combustible

El primer criterio que preside la aceptación de un combustible es su poder calorífico, o sea, la cantidad de calor que se puede obtener con la unidad de peso.

Importa saber, en todo caso, no el precio que pagamos por una tonelada de combustible (carbón, petróleo o gas), sino el precio de la kilocaloría o de la termia. Y éste es el primer escollo que se atraviesa en nuestra derrota.

Porque la mayoría de las fábricas de cemento no tienen una bomba calorimétrica apta para la determinación del poder calorífico de los combustibles con un decoroso grado de aproximación. Ante tan frecuente falta del material indispensable, tenemos que aceptar por buenos los datos que nos presentan los abastecedores de combustibles, enviar una muestra para ser analizada en un laboratorio oficial en caso de duda, o calcular por aproximación el poder calorífico a partir del análisis elemental o del análisis inmediato.

Otro punto que no está muy claro, es la pronunciada diferencia que existe entre el poder calorífico superior y el inferior. Se nos puede ofrecer, por ejemplo, un carbón de 6.000 calorías, sin más datos, y nos quedamos sin saber nada concreto de la bondad del susodicho combustible. Por la bomba calorimétrica determinamos el poder calorífico superior, o sea, la cantidad de calor liberada por la combustión

en vaso cerrado, a volumen constante, y con condensación de la totalidad de agua existente, sea higroscópica, sea combinada, o sea formada por la combustión del hidrógeno. En los hornos rotativos, sin embargo, trabajamos en un recinto abierto, con pocas variaciones de presión y, en cambio, con una variación de volumen proporcional a la temperatura absoluta. El agua existente o formada permanece en estado de vapor. El combustible, en suma, desarrolla apenas su poder calorifico inferior, o sea, bastantes calorías a menos en relación con las obtenidas por el calorimetro.

Esta diferencia viene expresada por la fórmula:

$$\mathbf{H}_{t} = \mathbf{H}_{e} - \mathbf{Q} \mathbf{W} \tag{1}$$

donde:

 $H_i = Poder calorifico inferior de un combustible en kcal/kg.$ 

H. = Poder calorifico superior en kcal/kg.

Q = Calor de evaporación del agua a la temperatura t°C.

W = Agua total presente en los productos de la combustión.

Corrientemente, se suelen descontar 600 calorías por cada gramo de agua formada. Esta corrección es tan sólo aproximada. La Institución de Ingenieros Civiies de la Gran Bretaña consideran 586 cal/g. Por la norma DIN 51708 debe emplearse la corrección de 585 cal/g. Finalmente, la norma ASTM: D 407-44 establece la corrección en 572 cal/g (20°C), anotando que esta corrección no es igual al calor latente de evaporación del agua porque se reduce el poder calorífico superior a volumen constante a poder calorífico inferior a presión constante. Si damos algún valor a este argumento, debemos adoptar la corrección establecida por la A.S.T.M.

El agua total W, a su vez, vale:

$$W = H_2O + 8,9365 H_2 \simeq H_2O + 9 H_2$$
 [2]

Supongamos un carbón totalmente desprovisto de agua higroscópica o de constitución ( $H_2O$ ) y con un contenido de hidrógeno  $H_2$ . En este combustible la ecuación [1] se transformaría en:

$$H_1 = H_s - 5.72 \times 8.9365 H_1 = H_s - 51.12 H_2$$
 [3]

o sea, tendremos una disminución de 51 calorías por cada  $1\,\%$  de hidrógeno que aparezca en el análisis elemental, mientras que para  $1\,\%$  de humedad la disminución no llega a 6 calorías.

De acuerdo con este resultado, y para carbones secos, tendremos las siguientes diferencias entre los poderes caloríficos superior e inferior:

COMBUSTIBLES	H <sub>2</sub> 1/0	Hs - Hi		
Antracitas	3,0	153 cal/g		
Hulla magra	4,0	204 "		
Hulla grasa	5,0	256 "		
Lignitos	5,5	281 "		
Fuel-oil	12,0	613 "		
Gas natural	24,0	1.227 "		

Estas correcciones se pueden aplicar, en primera aproximación, si no se sabe exactamente el contenido de hidrógeno del combustible.

# 3. El poder calorífico y el análisis elemental

Cuando no se dispone de bomba calorimétrica, pero sí de los medios indispensables para el análisis elemental de un combustible, es sabido que podemos calcular el primero en función del segundo.

Tres elementos combustibles encontramos en todos los análisis de carbones, aceites o gases. Los elementos combustibles, por orden de importancia, son: el carbono, el hidrógeno y el azufre. Algunas características de estos elementos aparecen en el cuadro I. De conformidad con diche cuadro, podemos corregir la antigua fórmula de Dulong:

$$H_1 = 80.8 \text{ C} + 287.92(\text{H}_2 - 0.126 \text{ O}_2) + 22.1 \text{ S} - 5.72 \text{ H}_2\text{O}$$
 [4]

#### 4. El poder calorífico y el análisis inmediato

Lo más corriente en nuestra industria es ensayar la calidad de los carbones por medio del análisis inmediato, determinando la humedad, la materia volátii (MV), las cenizas (A) y el carbón fijo (CF). Suelen completar estas determinaciones el análisis químico de las cenizas y el azufre total del combustible. Cuando se trata de combustibles líquidos se efectúan algunas mediciones de la viscosidad, para obtener el correspondiente indice, peso específico y API.

Importa mucho puntualizar, en todos los casos, la forma de expresión del análisis inmediato. Recordamos, como de mayor importancia, las siguientes:

- a) Carbón recibido.
- b) Secado al aire.
- c) Carbón seco (sin agua higroscópica).
- d) Carbón puro (sin humedad ni materias minerales).

El contenido de materias minerales, según Seyler, se calcula por la fórmula:

$$M = 1,08 A + 0,55 S + 0,8 CO_2$$
 [5]

en la cual:

1,08 A = Cenizas más el agua de hidratación, que vale, aproximadamente, 0,08 A.

S = Azufre total del combustible.

CO<sub>2</sub> = Dióxido de carbono procedente de los carbonatos.

En la práctica corriente, sin embargo, se suele tomar por carbón puro la suma de las materias volátiles y el carbono fijo reducida a cien.

El poder calorífico de los combustibles se suele referir al carbón puro, o sea, al que corresponde al conjunto de materias volátiles y carbono fijo, con exclusión de la humedad y de las cenizas.

Existen algunas fórmulas empíricas que nos dan el poder calorífico aproximado de un combustible en función de su análisis inmediato. Entre los cementeros quizá la fórmula más conocida sea la de Goutal, pero no quiere esto decir que por ser la más conocida sea la más exacta.

Según Goutal, se tiene:

$$H_{\bullet} = aCF + bMV$$
 [6]

en la cual a y b son, respectivamente, los poderes caloríficos del carbón fijo y de las materias volátiles. Goutal suponía a=8.200 cal/g para el carbón fijo, cantidad que hoy tenemos que considerar muy elevada, ya que el poder calorífico del carbono amorfo no es más que 8.080 cal/g. También Goutal suponía b variable, o sea: b=f(MV), presentando una curva de variación que iba desde las 14.500 cal/g para una antracita con 5 % de volátiles, hasta 8.000 cal/g para una hulla con 40 % de gases. Como que, salvo en muy raros casos, las materias volátiles de los carbones no llegan a tan altos poderes caloríficos, resulta que por la fórmula de Goutal se obtienen unos calores de combustión bastante más elevados de lo que son en la realidad.

Existen otras fórmulas empíricas, entre las cuales podemos citar la norma DIN 51708 para los carbones del Ruhr:

$$H_s = 3.790 + 116CF - 0.68CF^c \text{ cal/g}$$
 [7]

$$H_1 = 0.966675H_s = 3.664 + 112,1CF - 0.6574CF^2 \text{ cal/g}$$
 [8]

Seyler, además del análisis inmediato, utiliza el contenido de hidrógeno y da la ecuación siguiente:

$$H_s = 123,9CF + 388,12H_2 - 4,269 \text{ cal/g}$$
 [9]

Para Gumz, se tiene:

$$H_1 = 8.150 + 38,33MV - 1,1806MV^2 \text{ cal/g}$$
 [10]

Si construimos un gráfico situando los poderes caloríficos reales en función del tanto por ciento de materias volátiles de los combustibles puros y sobre él trazamos las curvas representativas de las anteriores ecuaciones, podremos ver cuál es aquella que se adapta mejor a los carbones utilizados.

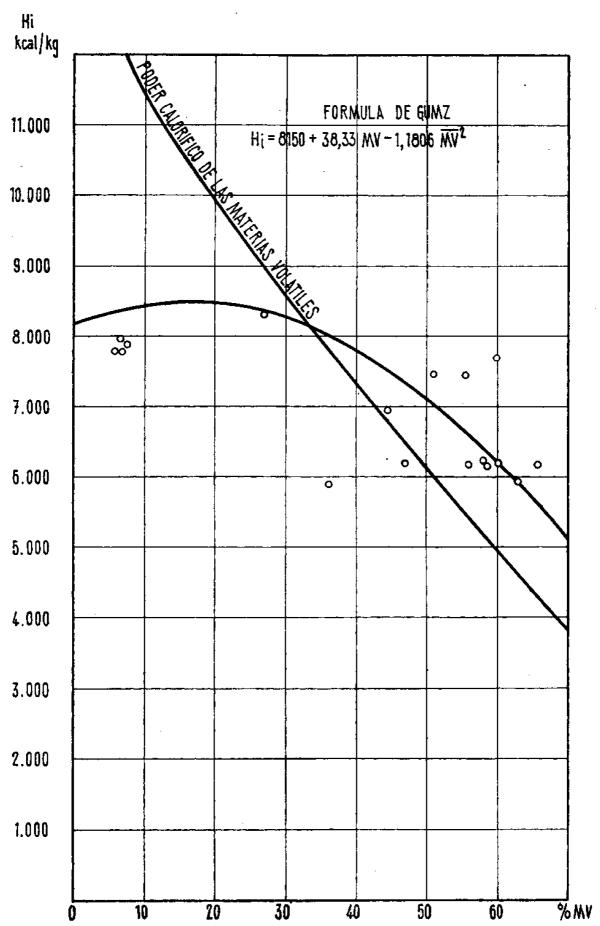
En el caso particular de los carbones portugueses se aprecia (fig. 1) una grande dispersión de resultados. Así y todo, la expresión [10] parece dar un mayor grado de aproximación que cualquiera de las anteriores. Una importante excepción la constituye el poder caiorifico de las antracitas portuguesas, menor que el dado por la fórmula de Gumz y, en cambio, más ajustable al que proporciona la ecuación:

$$H_s = 91.8(MV + CF) - 850 \text{ cal/g}$$
 [11]

Con estos datos, no pretendemos más que hacer notar la complejidad del problema y lo aleatorio que resulta admitir para un determinado combustible un poder calorífico calculado por apreciación. Si sobre este cálculo basamos después determinaciones de rendimientos térmicos de hornos rotativos, por ejemplo, nos expondremos a errores de capital importancia.

#### 5. Materias volátiles

La discusión sobre el poder calorífico de los combustibles nos ha conducido, irremediablemente, al interesante problema de las materias volátiles.



Pig. 1/-Poder calórico en función de las materias volátiles.

Decimos interesante porque, muchas veces, se ha tomado el contenido de materias volátiles de un carbón como uno de los datos fundamentales en que se basa el juzgarlo apto o no apto para ser empleado en la industria del cemento.

Hemos pasado una ligera revista en la bibliografía que se ocupa del tema y hemos constatado que la mayor parte de los autores fijan en un 15 % el límite inferior del contenido de materias volátiles. El límite superior oscila entre 20 y 30 %, de modo que, en general, hay una cierta concordancia en recomendar el empleo de carbones con un contenido de volátiles comprendido entre 15 y 25 %. Sin embargo, ya sabemos que estos límites no son barreras infranqueables, y que, hoy en día, no se siente un exagerado respeto para ellos. Son numerosas las fábricas que, adaptándose a las características de los carbones disponibles y a imperativos de orden económico, funcionan quemando combustibles bastante alejados de los antedichos límites.

En la bibliografía consultada, salvo raras excepciones, apenas se hace mención de la composición de las materias volátiles. Parece sobreentenderse que en ellas todo es combustible, cuando, desgraciadamente, sucede lo contrario. Una de las pocas voces de alarma fue, sin duda, la del distinguido ingeniero portugués, señor Rocha y Melo, el cual, hace unos años, proclamaba: "Hay que tener en cuenta, también, el poder calorífico de las materias volátiles si se quiere tener una llama capaz. Existen lignitos, en Portugal, en los cuales el poder calorífico de las materias volátiles está próximo a las 2.500 kcal/kg..." Creemos que este problema es el caso bastante generalizado en los carbones peninsulares. Y es precisamente por este motivo que, como dijimos antes, no nos podemos confiar de los cálculos basados en la fórmula de Goutal, por dar resultados absolutamente disparatados.

Como primera aproximación, podemos orientarnos bastante admitiendo que la calidad de los combustibles es una función de su edad geológica. Se supone que la carbonización ha sido más completa cuantos más años, o mejor diríamos, millones de años, han transcurrido desde que se formó el yacimiento. Los carbones del período antracolítico serían los que contendrían menos volátiles inertes: Es el caso de las antracitas y de las hullas. Menos antiguos son los carbones de la era secundaria, principalmente de los períodos jurásico y trásico, entre los cuales se encuentran los mejores lignitos. Finalmente, nos encontramos con las formaciones de lignitos terciarios, que van del eoceno al plioceno, poco mineralizados, con 10 % o más de oxígeno y alto contenido de azufre. Son éstos, los combustibles de peor calidad con que podemos tropezar en nuestra industria.

Una mayor aproximación se consigue con la destilación seca del combustible. Por de pronto, se obtienen productos líquidos y gases incondensables. Entre los líquidos aparece el agua, y entre los gases se obtienen los del aire: nitrógeno y oxígeno, monóxido y bióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, metano, propano, etileno y otras olefinas y también hidrógeno no combinado. Por el cuadro I vemos que los principales hidrocarburos gaseosos poseen un poder calorífico inferior entre los 11.000 y 12.000 kcal/kg. Si no hubiese otros gases no combustibles en las materias volátiles, éstas aumentarían el poder del combustible con relación a las 8.080 kcal/kg que posee el carbono.

En los hornos rotativos la destilación seca se efectúa en condiciones muy diferentes, porque el carbón pulverizado, al entrar en la cámara de combustión, se encuentra ante temperaturas superiores a los 1.500°C, las cuales no pueden soportar las parafinas u olefinas sin disociarse en sus elementos constituyentes. Para el metano, a los 1.100°C, tan solamente un 0,8 % permanece no disociado. Así, pues, y en definitiva, será la cantidad de hidrógeno combustible el importante factor que determinará la calidad de las materias volátiles.

El análisis elemental será un buen camino para expresar cuantitativamente la calidad de las materias volátiles.

El contenido de hidrógeno aumenta gradualmente con la proporción de materias volátiles, pero hay que distinguir entre el hidrógeno total y el hidrógeno combustible. Para los carbones puros con menos de 85 % de carbón fijo, el hidrógeno se estabiliza entre 5,35  $\pm$  0,3 %, bajando para menos en los lignitos de formación reciente.

El contenido de oxígeno también aumenta de las antracitas a los lignitos. En estos últimos, en general, es superior a 10 %; y no se crea que se trata de oxígeno libre, ya en disposición de servir de comburente, sino casi siempre se trata de oxígeno combinado, y no pocas veces en forma de CO<sub>2</sub>, procedente de la descarbonatación de las cenizas calcáreas.

El nitrógeno, ya menos importante, se encuentra en proporciones que no suelen pasar del 1 % referido al combustible puro.

El azufre, muy variable, es, sin duda, uno de los huéspedes menos deseables en nuestras fábricas. Sus interferencias en las combustiones espontáneas de los combustibles almacenados y en las corrosiones de partes metálicas de los hornos rotativos son bastante conocidas y, por ello, poco recomendables. Por otra parte, en los laboratorios, por poco equipados que estén, se dispone de medios sencillos y bastante aproximados para la determinación rápida del contenido de azufre.

A pesar de todo, los combustibles con una cierta proporción de materias volátiles son bastante inflamables. A veces demasiado, porque su destilación comienza ya a temperaturas relativamente bajas, a poco más de 300°C, o sea, que pueden darse casos de desvolatilización durante las operaciones de molienda y secado con el consiguiente peligro de explosión.

Cuando se inyecta en un horno rotativo, se puede creer que el carbón se desprende de sus volátiles muy cerca del quemador. Casi inmediatamente el metano y los demás hidrocarburos se disocian en sus elementos. El carbono así formado aparece muy finamente dividido y posee un alto poder radiante. El hidrógeno arde en seguida, con mayor rapidez que el carbono. Si la llama es oxidante, los hidrocarburos

CUADRO I - Datos correspondientes a algunos combustibles puros

COMBUSTIBLES	Azufre (S)	Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	Carbono (C)	Oxido de carbono (CO)	Sulfuro de hidrógeno (SH <sub>2</sub> )	Etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	Propano (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	Etano (C <sub>2</sub> H <sub>0</sub> )	Metano (CH <sub>1</sub> )
Peso molecular	32,060 [1,4305]	2,016 0,08995	12,0114 [0,5359]	28,0114 1,2498	34,076 1,5204	28,0548 1,2518	44,0982 1,9676	30,0708 1,3417	16,0434 0,7158
Composición centesimal: S $\%$	100,00	100,00	<u> </u>	<u> </u>	94,08 5,92 —	14,37 85,63	18,29 81,71	20,11 79,89	25,13 74,87
Poder calorífico superior.									
kcal/molkcal/kgkcal/m²	70,852 2.210 3.161	68,351 33.904 3.050	97,052 8.080 4.330	67,636 2.415 3.018	134,780 3.955 6.014	337,234 12.019 15.047	530,605 12.032 23.675	372,820 12.398 16.635	212,798 13.264 9.495
Poder calorífico inferior.									
kcal/mol	70,852 2.210 3.161	58,046 28.792 2.590	97,052 8.080 4.330	67,636 2.415 3.018	124,475 3.653 5.554	316,624 11.286 14.127	489,385 11.098 21.836	341,905 11.370 15.255	192,188 11.979 8.575
Combustión neutra.									
O <sub>2</sub> kg/kg	0,9981 3,3061 5,3062 417	7,9365 26,2889 35,2254 817	2,6641 8,8246 12,4887 647	0,5712 1,8920 3,4632 698	1,4086 4,6658 7,0744 517	3,4219 11,3347 15,7566 716	3,6283 12,0183 15,6466 709	3,7246 12,3374 17,0620 666	3,9892 13,2138 18,2030 658
Gases de la combustión.									
SO <sub>2</sub> m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> N  H <sub>2</sub> O m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> N  CO <sub>2</sub> m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> N  N <sub>3</sub> m <sup>5</sup> /m <sup>3</sup> N  Total m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> N  Total m <sup>3</sup> /kg  kcal/m <sup>3</sup> N	1,0000  3,7617 4,7619 3,3288 664	1,0000 1,8810 2,8810 32,0289 899	1,0000 3,7619 4,7619 8,8858 909		1,0000 1,0000 5,6428 7,6428 5,0268 727	2,0000 2,0000 11,2857 15,2857 12,2110 924	4,0000 3,0000 18,8095 25,8095 13,1173 846	3,0000 2,0000 13,1666 18,1666 13,5400 840	2,0000 1,0000 7,5238 10,5238 14,7022 815
Temperatura máxima teórica.									
t°C	1.673° 0,249	2.246° 0,364	2.231° 0,290	2.372° 0,2 <del>94</del>	1.837° 0,281	2.274° 0,315	2.117° 0,335	2.089° 0,319	2.037° 0,323
Volumen de gases a t°C.									
m³/kg a t°C	23,728 93	295,534 97	81,502 99	22, <b>334</b> 108	38,852 94	113,925 99	114,836 97	117,148 97	124,403 96

se disocian dando CO y H2 y, luego, CO2 y vapor de agua, no apareciendo casi nada de carbón libre. Como veremos, estos fenómenos tienen mucha importancia en las propiedades de las llamas.

En el polo opuesto a los lignitos nos encontramos con las antracitás, con 5 a 8 % de volátiles. Estos carbones sólo comienzan a destilar a 750°C, lo cual ya es una dificultad para el encendido del horno. No se puede contar con la fácil inflamabilidad de sus escasos volátiles, por lo que se tiene que acentuar su finura al efecto de que sea el propio carbón en polvo capaz de arder con cierta facilidad. Puede también ocurrir el caso que se da en Portugal, donde las materias volátiles de las antracitas contienen una gran proporción de no combustibles, lo que aumenta todavía las dificultades de inflamación y, según algunos autores, exige un volumen específico de cámara de combustión mayor que otros carbones de me-jor calidad.

Ante estas dificultades, se ha ensayado, y no sin éxito, el sistema de las mezclas; y no nos referimos solamente a las ya muy antiguas mezclas de antracitas con carbones bituminosos, sino a las más recientes de antracita y aceites pesados, o bien a la de coque de petróleo y gas natural, hasta ahora solamente aplicada en los Estados Unidos, pero quizá el día de mañana la veamos funcionar en países donde las perforaciones de petróleo o de gas natural pueden proporcionar, todavía, muy agradables sorpresas.

#### Secado y molienda de los carbones

No hay por qué ocultar la gran importancia que tienen las operaciones preparatorias de los carbones y lo mucho que de ellas depende si nos referimos a los resultados conseguidos.

El secado puede efectuarse antes de la molienda o simultáneamente con ella. La molienda, en todos los casos, se efectúa en molinos ventilados, pocas veces funcionando en circuito abierto. Los sistemas más usados son dos: de inyección directa y de inyección indirecta. En el primer caso el molino descarga su producción, directamente, al quemador. En el segundo caso la descarga se efectúa a unos silos o tolvas, de donde es extraido, después, por medios adecuados y conducido al quemador.

Recordados estos principios generales nos permitimos, seguidamente, entrar en algunos detalles.

#### 6.1. Secado preliminar

El secado previo de los carbones se recomienda siempre que la humedad del combustible sea superior a 15 %. También es necesario secar los carbones antes de la molienda cuando no se dispone de un apropiado sistema de secado y molienda en una sola operación y, por último, se recomienda el secado preli-minar cuando se emplean los citados sistemas de inyección directa que, aun en el caso de molienda y secado simultáneos, introducen en el horno la totalidad del agua eváporada.

En el secado de carbones para la industria del cemento se emplean varios tipos de secadores. Recordamos los siguientes:

- Secadores rotativos.
- b) Secadores horizontales con agitadores rotativos.
- Secadores verticales. C)
- d) Secadores asociados a la molienda.

En cualquiera de estos secadores, se pueden emplear los siguientes sistemas de calentamiento:

- Gases calientes de un hogar.
- II) Vapor recalentado.
- III)
- Gases recuperados del horno rotativo. Gases recuperados del enfriador de clinquer.

En general, todos los secadores que hemos visto poseen un hogar auxiliar (sistema I), el cual, a veces tan sólo se utiliza para la puesta en marcha. El secado por vapor recalentado sólo lo conocemos por retan solo se utiliza para la puesta en marcha. El secado por vapor recalentado solo lo conocemos por referencias de la literatura consultada. El sistema III, lo hemos visto aplicado en algunos casos de calentamiento por inyección directa, en los cuales, estando situado cada molino individual frente a su horno respectivo, se efectúa una extracción de alre caliente de la cabeza del horno y se introduce en el sistema de secado y molienda. También es posible utilizar los gases salientes de los hornos rotativos, siempre que su temperatura no sea excesiva. Por último, el sistema IV, asociado al I, es el que hemos visto más frecuentemente empleado en las instalaciones modernas. En efecto, los enfriadores de clínquer sistemas Fuller, Allis-Chalmers, Folax, Recupol, etc., emplean una cantidad de aire algo mayor que la necesaria para la combustión del carbón inyectado en el horno. El exceso de aire, que no va al horno, tiene un buan empleo si se utiliza para el secado del combustible. buen empleo si se utiliza para el secado del combustible.

Cuando el aire caliente se extrae de la cabeza del horno, o de los enfriadores de clinker, es conveniente someterlo a una operación de despolvoreamiento, haciéndole atravesar un ciclón, al efecto de separar los finos de clinker arrastrado.

El secado de los carbones es una operación más difícil que el secado de materias primas. Los carbones suelen ser higroscópicos y presentar elevados contenidos de agua. Asimismo, muchos de ellos comienzan a destilar sus materias volátiles a temperaturas relativamente bajas. El riesgo de inflamación y de explosiones es tan conocido de todos que no precisa comentarios. Se aconseja la instalación de pirómetros y de una serie de dispositivos termo-reguladores que no permitan subir la temperatura de los gases a más de 300 ó 350°C.

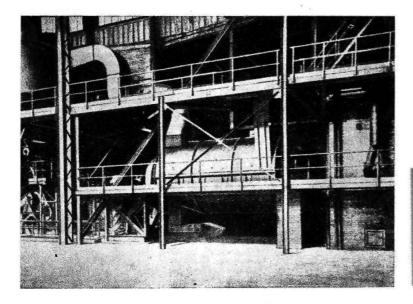
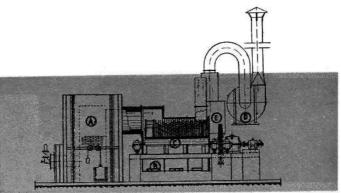


Fig. 2.—Secador de contacto Haas, instalado en una fábrica de cemento belga para secado de «schlamms» pegajosos.

Fig. 3.—Esquema de un secador de contacto Haas. A. Hogar de calentamiento.—B. Secador de contacto. C. Elemento rotativo transmisor de calor.—D. Ventila-dor.—E. Separador de polvo.



En tales condiciones, o sea, utilizando forzosamente gases a temperaturas relativamente bajas, no se puede esperar un gran rendimiento térmico. Con un 10 % de humedad inicial y 1 % de humedad final se consumen, en los secadores rotativos corrientes, unas 1.300 kcal por cada kilogramo de agua evaporada. El rendimiento es inferior al 50 %. Para los secadores verticales se dan rendimientos todavía menores. Se admite un consumo medio de 1.750 kcal por cada kilogramo de agua, lo que representa un aprovechamiento de 34 %. Los secadores modernos son presentados con rendimientos algo mejores. Así, para el secador de contacto Haas (figs. 2 y 3) se indica un 68 % de rendimiento. Un rendimiento parecido proporciona el secador rápido sistema Andreas (figs. 4 y 5).

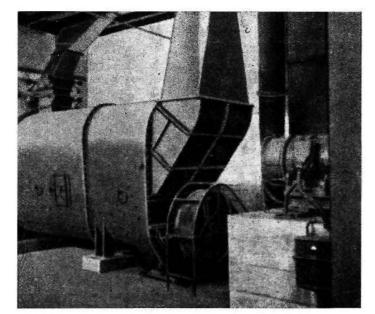
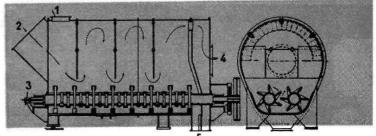


Fig. 4.—Secador rápido Hazemag (sistema Andreas).

Fig. 5.—Esquema de un secador sistema Andreas.

Orificio de alimentación.—2. Entrada de los gases calientes.—3. Agitador doble de paletas.—4. Salida de los gases.—5. Salida del carbón seco.



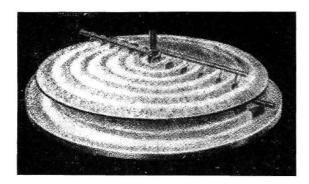


Fig. 6.—Esquema de funcionamiento de un secador vertical de platos rotativos Haas.

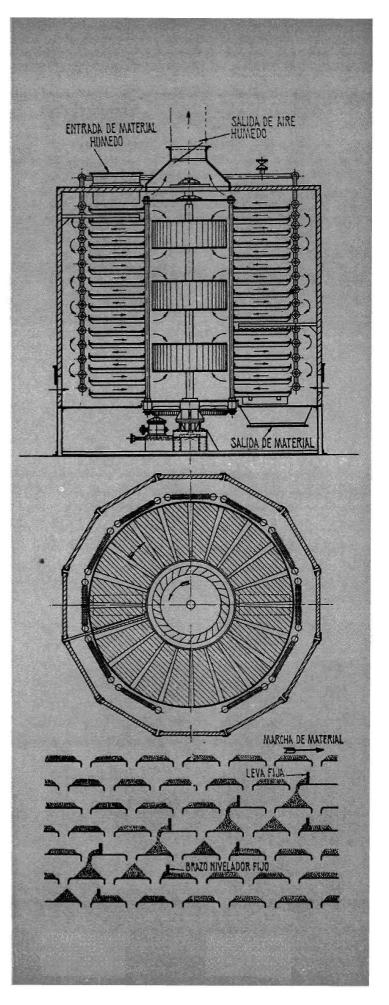
Estos dos secadores corresponden al tipo b), ambos son estacionarios, horizontales y provistos de elementos agitadores y transmisores de calor rotativos. La figura 6 esquematiza el funcionamiento de un secador vertical de platos rotativos. En la figura 7 se representa un interesante modelo de secador vertical, el "Turbo" Buell, con tres elementos de turbina de aire en un canal axial que imprimen a los gases calientes una trayectoria serpentina y en contra-corriente con el combustible a secar. Un secador de este tipo puede alcanzar un 75 % de rendimiento térmico.

En las operaciones de secado y molienda simultáneas, el rendimiento térmico del sistema es de  $50\,\%$  para un  $10\,\%$  de agua y de  $60\,\%$  para un  $15\,\%$  de humedad inicial.

Hay que contar, además, con la energía necesaria para el secado preliminar. Esta energía varía poco, pero hay que contar con los aparatos anexos, muy variables en cada instalación, como son: elevadores, cintas transportadoras, mesas alimentadoras y ventiladores. En todo caso, el consumo referido a una tonelada de combustible varía de 1 a 1,5 kWh/t.

Por último, hay que mencionar el discutido problema de la humedad residual. De una parte, este problema se relaciona con la facilidad para la molienda. En general, el carbón se seca hasta 1 % de agua, y con este secado se consigue una molienda excelente. Puede llegarse según Ferrer y Vidal a 1,5 %, y todavía se trabaja satisfactoriamente. Otro problema va relacionado con la introducción del vapor de agua en el horno. Algunos autores, entre ellos VEH, señalan que una pequeña proporción de humedad favorece la inflamación de los carbones. Otros hacen notar la pérdida de calor que acompaña al vapor de agua inyectado. Esta pérdida de calor puede cegar a 1,7 % del calor de combustión si toda la humedad inicial del carbón, supuesta en un 10 %, entra en el horno a través de un sistema de inyección directa.

Fig. 7.—Secador vertical «Turbo» Buell, construído por Edgar Allen.



En el sistema de inyección indirecta, el aire húmedo acompaña, en parte, al carbón pulverizado, y éste, en las tolvas, puede reabsorber parte de la humedad que le fue antes sustraída. Cuando esto ocurre el carbón embola y después de inyectado en el horno quema mal, dando lugar al fenómeno que observamos con el nombre de bolas azules.

#### 6.2. Molienda

Para la molienda del carbón se emplean molinos trabajando por principios bastante diferentes:

- a) Por percusión (martillos, paletas, turbinas, etc.).
- b) Por aplastamiento (mue'as, rodillos, péndulos, bolas, etc.).

Lo que importa es conseguir un producto pulverulento a la finura deseada y que esta finura se mantenga constante. La elección de uno u otro sistema debe tener en cuenta las características del carbón o carbones a tratar, la finura pretendida, la energía consumida y los gastos de conservación.

En las instalaciones antiguas el problema de elección puede obviarse. El material fue escogido hace tiempo y apenas nos incumbe defendernos lo mejor posible con los elementos que se poseen. De todas formas, se impone un estudio económico serio, para ver si el gasto de instalación de una moderna sección de molienda no sería compensado en poco tiempo por la economía obtenida.

Por lo tanto, parece justificado, antes de entrar en la descripción de tipos y sistemas de molienda, tratar de las dificultades que presentan los materiales ante la trituración.

#### 6.2.1. Aptitud para la molienda

Todos los autores están de acuerdo en que el material que mejor se muele es una buena hulla, previamente seca. Pero como este combustible, si existe, no lo encontramos precisamente en las fábricas de cementos peninsulares, tenemos que equiparnos para moler otros carbones más difíciles, como son la antracita y el lignito.

La antracita es menos friable que la hulla; y como conviene molerla más finamente, resulta mucho menos apta que la hulla. El rendimiento de los molinos disminuye y aumentan proporcionalmente los gastos de conservación del material.

Los lignitos son de calidad bastante desigual. Algunos de ellos contienen una importante cantidad de madera fosilizada, todavía fibrosa, y son prácticamente ineptos para la molienda. En todo caso son siempre difíciles de moler porque se apelmazan sin pulverizar perfectamente, y además, porque siendo higroscópicos, contienen siempre una cierta humedad, la cual también es causa de disminución del rendimiento.

La facilidad para la molienda puede ser evaluada por medio de la máquina de Hardgrove, de acuerdo con la norma ASTM D 409-51, aprobada en 1951 y reaprobada, sin cambios, en 1958.

Este método sirve para determinar la aptitud relativa que presenta un carbón a la pulverización, usando como término de comparación un carbón tipo con índice igual a 100.

El método se basa en la ley de Rittinger, según la cual el trabajo dispendido en la pulverización es proporcional a la superficie producida.

La máquina de Hardgrove consiste en un pequeño molino con ocho bolas de 25 mm de diámetro, que ruedan sobre un aro fijo, accionadas por otro anillo superior rotativo. Sobre las bolas gravita una carga de 29 kg ± 225 g, constituída por el peso del anillo superior, eje motor, transmisión y unos pesos suplementarios. El ensayo consiste en someter una muestra de finura conocida a 60 revoluciones del molino de Hordgrove, determinando después la finura del producto resultante. La muestra de carbón a ensayar se tritura en una especie de molinillo de café, y se prepara de modo que en su totalidad pase por el tamiz núm. 16 (1,19 mm) y sea retenida por el tamiz núm. 30 (0,59 mm). Se toman 50 gramos de carbón así preparado y se someten al trabajo de 60 vueltas en la máquina de Hardgrove. El índice de aptitud se calcula por la fórmula:

$$IH = 13 + 6.93 p$$
 [12]

donde:

P= Peso del carbón fino que atraviesa el tamiz de 0,074 mm de abertura de malla (núm. 200 - ASTM).

Para un indice igual a 100, p = 12,5 gramos.

Si en el ensayo se obtiene una cantidad de polvo fino superior a 12,5 gramos (sobre 50 gramos de muestra), el índice de aptitud será mayor que 100; en caso contrario, un carbón menos apto, proporcionando una cantidad de polvo inferior a 12,5 g, tendrá un bajo índice (menor que 100). Supongamos que el ensayo de Hardgrove ha dado para una antracita 9,5 gramos de polvo fino, pasando por el tamiz número 200. Su índice correspondiente será:

$$IH = 13 + 6.93 \times 9.5 = 78.8.$$

#### 6.2.2. Finura de los combustibles

Sucede frecuentemente en nuestra industria que, preocupados por el vital problema de la finura de molienda del cemento acabado, relegamos a un segundo plano la finura de los carbones y nos quedamos muy satisfechos después de unas determinaciones más o menos sistemáticas de residuos sobre los tamices normales.

Sin embargo, es tanta la importancia teórica y práctica de este problema que fue, precisamente, del estudio de la granulometria de los carbones, que se pudo formular, por Rosin y Rammler, su tan famosa ley de la distribución de los gránulos por sus pesos y tamaños de partícula. Esta ley, según se sabe, se puede representar por la siguiente ecuación:

$$R_{x} = 100e^{-\left(\frac{x}{d'}\right)^{n}}$$
(13)

representando:

 $R_x = Residuo$  sobre un tamiz de paso igual a x micras.

e = Base de los logaritmos naturales (e = 2,71828).

d' = Grado de finura (valor de x correspondiente a R = 36,788 %).

n = Constante de dispersion.

Si en [13] hacemos x = d', se tiene:

$$\mathbf{R}_{a'} = 100/e = 36,788 \%$$
 [14]

Como se sabe, representando esta ecuación en papel cuadriculado a las escalas logarítmica y doble logarítmica, según la ecuación

$$\log \left(\log \frac{100}{R_x}\right) = \log (\log e) - n \log d' + n \log x$$
 [15]

obtenemos una línea recta en la cual n es la tangente del ángulo que forma con el eje de las abscisas. He aquí algunas características granulométricas de varios carbones, según Anselm.

CARBONES	d' (micras)	n,	are tg n
Hulla calibrada 0-80 mm	12.000	0,572	30°
Antracita	4.000	0,625	32°
Finos de hulla	3,250	0,933	43°
Lignito pardo	2.000	0,727	36°
Carbón pulverizado, blando	44	1,150	49*
Carbón pulverizado, semi-duro	45	1,192	50°
Carbón pulverizado, duro	46	1,235	51°
Polvo de los filtros, antracita	16,8	0,840	40°
Polvo de los filtros, lignito	3.8	0,840	40°

En general, la finura de los carbones se determina por medio de los tamices normales y se expresa por los residuos sobre uno o varios de ellos. Sería más correcto emplear la superficie específica como medio de expresión de la finura de los carbones. La superficie específica, según sabemos, se define por la ecuación:

$$S_{\bullet} = \frac{600}{\rho} \int_{-x_0}^{x_0} \frac{\Delta P}{\Delta x} d \log x$$
 [16]

Como sea que la determinación analitica de la superficie especifica es poco práctica, se ha empleado, con éxito, el permeabilímetro de Blaine. Recordemos la ecuación fundamental del permeabilímetro:

$$S_{s} = k \frac{V_{s}^{3} V_{t}^{T}}{\rho (1-s) V_{\eta}^{T}}$$
[17]

por la cual vemos que la superficie específica es función inversa de la densidad del material. Así, pues, a igualdad de granulometría, tendremos para el carbón una superficie específica 2,4 veces mayor para el cemento.

	MATERIALES	Peso específico (g · cm <sup>-3</sup> )	Sup esp	erficie ecifica
ė	Cemento Portland	3,15	3.600	$\mathrm{cm^2}$ . $\mathrm{g^{-1}}$
	Crudo para cemento	2,7	4.200	"
	Coke	1,8	6.300	22
	Antracita	1,7	6.670	.,
	Lignito	1,4	8.100	30
	Hulla	1.3	8.723	**

En todos los ejemplos anteriores se ha supuesto un diámetro medio constante, definido por la ecuación:

$$d_{\text{med}} = \frac{6 \times 10^4}{o \text{ S.}} = 5,29 \text{ micras}$$
 [18]

La finura de molienda que se recomienda es, en definitiva, muy variable. En general, se suele especificar un 10~% de residuo sobre el tamiz de 4.900~mallas/cm², o sea, 90~% de partículas de tamaño inferior a 90~micras. Sin embargo, sabemos que son muchos los hornos que funcionan correctamente inyectando carbón a menor finura. Algunos autores creen suficiente moler con un residuo de 15~% y para algunos lignitos se admiten residuos de hasta 20~%.

Para Simon, un carbón grueso proporciona mayor constancia en el factor de emisión, pero se corre el peligro de que aparezcan fracciones no quemadas. Para evitar este peligro se debe aumentar la finura de molienda en función inversa de la inflamabilidad del combustible. El desprendimiento de las materias volátiles y la velocidad de combustión del coke aumentan con la finura del carbón. Si las materias volátiles son escasas, como sucede con las antracitas, se debe apurar la finura más que con carbones bituminosos. Los carbones densos, además de ser de mayor dureza, por razón de su elevado peso específico, exigen mayor finura si se quiere obtener la misma superficie específica. El mismo caso se da con los carbones pobres, de alto contenido de cenizas, pues, como certeramente apuntó López Peciña, en los Coloquios de 1957, una parte de la superficie creada no está formada por elementos combustibles, sino por cenizas que no intervienen en la combustión, lo que equivale a una molienda más grosera del carbón.

Se ha observado que aumentando la finura de molienda del carbón pulverizado, se acorta el tiempo de combustión, aumentando la temperatura de la llama. Así, pues, siempre que haya dificultades para la inflamación del combustible, o que se desee una llama más corta y caliente se deberá actuar, si es posible, en el sentido de inyectar un carbón de mayor finura.

# 6.2.3. Rendimiento en la molienda de los carbones

Las operaciones de molienda de carbón—como consecuencia de lo antedicho—deben presentar rendimientos muy variables, que dependerán tanto del material a moler como de las máquinas empleadas. La aptitud de molienda y el rendimiento de un molino no dependen exactamente de la dureza del material a moler. El clínker de cemento Portland es unas 2,5 veces más duro que los carbones; sin embargo, el consumo de energía por tonelada de material es casi del mismo orden de magnitudes.

Se admite que las buenas hullas se muelen mejor que las antracitas y los lignitos. La facilidad de molienda en los lignitos está sujeta a fluctuaciones mucho mayores que en los demás combustibles. Influye mucho la cantidad de agua higroscópica del combustible a la entrada del molino. Se admite que la producción de un molino-secador disminuye, operando con carbones excesivamente húmedos, de acuerdo con la ecuación:

$$P = P_n - 140(H - H_n) kg/h$$
 [19]

en la cual:

P<sub>v</sub> = Producción en kg/h del molino en condiciones normales.

 $\mathbf{H}_n = \text{Tanto por ciento de humedad considerada "normal"}.$ 

P = Producción en kg/h del molino alimentado con H % de humedad.

Según esta fórmula, un molino con una producción de 5 t/h con 10 % de humedad, vería mermada su producción en 700 kg/h si la humedad aumentase hasta 15 %.

La influencia que tienen los sistemas de molienda para un mismo material molido a igual finura, la demuestran los siguientes consumos, tomados de Anselm, para carbones finos, con 10 % de residuo sobre el tamiz de 4,900 mallas:

	Molino de rodillos	Molino ventilado	Molino compuesto
Antracita	14,0 kWh/t	22,0 kWh/t	28,0 kWh/t
Hulla	12.5 kWh/t	18.0 kWh/t	24.5 kWh/t

Hay que tener en cuenta que la energía consumida por el molino es una parte del total consumido por todo el sistema de molienda. Una instalación de molienda y secado, por circuito cerrado e inyección indirecta, tiene un 80 % de potencia suplementaria instalada en relación a la potencia del molino propiamente dicha. Así, pues, admitiendo un consumo de 18 kWh/t en el molino, hay que contar, por lo

menos, con 15 kWh/t más para las restantes máquinas que componen el sistema, incluída la inyección. Dos ejemplos, tomados de Bodmer-Nisolle, nos proporcionan los siguientes datos comparativos:

SISTEMA DE INVECCION	Directa	Indirecta
Molino	16,60 kWh/t	15,50 kWh/t
Total	17,70 kWh/t	27,38  kWh/t

De acuerdo con la ley de Rittinger, ya citada, el consumo de energía es proporcional a la superficie específica creada, e inversamente proporcional al peso específico. Esta ley es válida entre ciertos límites. Para un material con una superficie específica  $S_{\rm e}({\rm cm^2g^{-1}})$  y un consumo de  $J_{\rm t}(kWh/t)$ , se tendrá una superficie creada de:

$$S_i = 10^6 S_e / J_i (em^2 \cdot kWh^{-1})$$
 [20]

siendo necesario un trabajo de afinación de:

$$J_s = 10^{-6} J_t / S_c (kWh/cm^2)$$
 [21]

Como sea que el kWh y el cm² son unidades de muy distinto orden, Anselm propuso usar, en lugar del kWh como unidad de trabajo, el gramo centímetro, o sea, la cienmilésima parte del kilográmetro. Las equivalencias mutuas se deducen según sigue:

1 kWh = 3,6 × 16° julios. 1 Julio = 1/9,8 kgm. 1 kgm = 10° gcm. 1 kWh = 36,735 × 10° gcm. 1 gcm = 27,22 ×  $10^{-12}$  kWh.

# CUADRO II. - Molienda de Carbón. Rendimientos

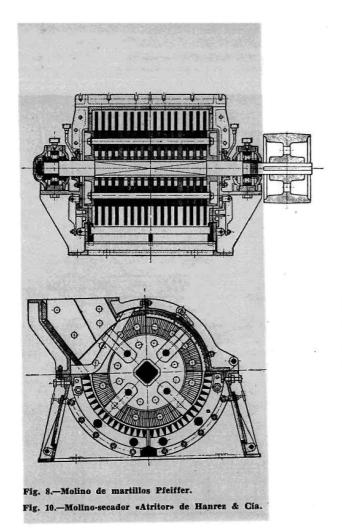
CARACTERISTICAS DEL CARBON	Molino (	de rodillos	cónicos	Mol	ino ventila	ıdə	Moli	no combin	ado
Dureza	Blando	Semiduro	Duro	Blando	Semiduro	Dure	Biando	Semiduro	Duro
Peso específico: g/cm³	1,25	1,30	1,35	1,25	1,30	1,35	1,25	1,30	1,35
Superficie especifica: cm²/g	8.700	7.900	7.300	8.700	7.900	7.300	8.700	7.900	7.300
Grado de finura: $d' = \mu \alpha \dots \dots \dots$	44	45	46	44	45	46	44	45	46
Constante de dispersión: $n \dots \dots \dots$	1,150	1,192	1,253	1,150	1,192	1,253	1,150	1,192	1,253
Angulo de inclinación: $\alpha$	49°	50°	51*	49°	50°	51°	49°	50°	51°
Rendimiento del molino: kg/kWh	94	80	70	56	53	46	41	38	36
Energia especifica: kWh/t	10,64	12,50	14,29	17,86	18,87	21,74	24,39	26,32	27,78
Superficie creada; 10°cm²/kWh	820	632	510	487	418	348	356	300	256
Superficie creada: 10-cm²/gcm	223	172	139	133	114	95	97	82	70
Trabajo de afinación: 10°kWh/cm²	1,22	1,58	1,96	2,05	2,39	2,87	2,80	3,33	3,86
Trabajo de afinación: gcm/cm²	44,8	58,0	72,0	75,3	87,8	105,4	102,8	122,3	141,8

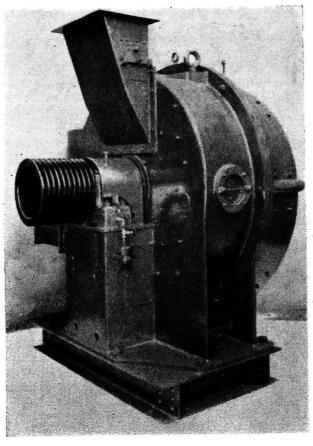
El cuadro II, basado en datos tomados—en parte—de Anselm, da las superficies creadas y los trabajos de afinación en unas y otras unidades. El trabajo de fragmentación de los carbones es muy inferior al consumido en la molienda. Para un carbón semi-duro es de 1,5 gcm cm<sup>-2</sup>. Un consumo de 87,8 gcm cm<sup>-2</sup> equivale a 1,7 % de rendimiento.

La influencia de la finura en la molienda de un carbón semiduro, con peso específico de 1,25 g cm<sup>-\*</sup>, supuesta una constante de dispersión n=1,192 (arc tg  $n=50^{\circ}$ ), es, también según Anselm:

CARAC	TERISTICAS DE F	TIPO DE MOLINO				
R 4900 Se (cm <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup> )		ď,	De rodillos (gem . em <sup>-2</sup> ).	Ventilado (gcm . cm-²)		
5	6.880	36	68	91		
7,5	6.190	40	64	88		
10	5.500	45	64	88		
12,5	5.100	48,5	64	88		
15	4.770	52	64	88		
20	4.160	59,5	64	91		
25	3,640	68	67	97		
36,8	2.750	90	80	111		

Por este cuadro vemos que, dentro de los límites de validez de la ley de Rittinger, el trabajo de afinación es constante, para finuras mayores, o para carbones muy groseros, el trabajo de afinación es mayor en ambos sistemas de molienda.





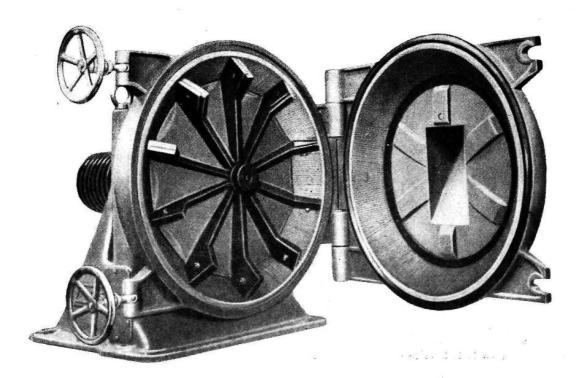


Fig. 9.—Turbo-molino Pallmann.

# 6.2.4. Molinos de carbón de gran

Hay una gran variedad de equipos para la molienda de carbón. Señalar las ventajas e inconvenientes de cada máquina sería muy provechoso; pero no nos atrevemos a hacerlo, por temor a pecar de partidistas al no poder disimular nuestras preferencias para un sistema determinado. Sin embargo, creemos que nuestro trabajo sería incompleto si no hiciera, por lo menos, una breve referencia a los aparatos más usados y a algunas de sus características.

Comenzaremos por los molinos que comprenden un rotor o varios cuerpos móviles, animados de gran velocidad. En estos molinos se puede obtener la afinación: por percusión, por aplastamiento o por combinación de ambos sistemas.

No todos los molinos conceptuados como de gran velocidad giran con el mismo número de vueltas. Algunos, como el "Atritor", tienen su rotor directamente acoplado a un electromotor de 1.350 v/mn (fig. 10). El molino "Raymond", en cambio, trabaja a unas 150 v/mn.

Se pueden citar, como bastante empleados, los molinos de martillos, siendo el "Pfeiffer" (fig. 8) un conocido ejemplo de los que actúan por percusión o por impacto. El turbo-molino de la figura 9 trabaja por abrasión con un consumo de energía sumamente bajo (6 kWh/t), pero tan sólo apto para pequeñas producciones.

El "Atritor"—del cual ya hemos hablado—se emplea en Inglaterra y Francia (figura 10), teniendo noticia de haberse empleado en una modernísima instalación cementera en la primera de dichas naciones. Al mismo tipo de molinos se pueden referir los aparatos denominados "Aero-Pulverizador", "Pulvero-Quemador" y "Resolutor". Este último se utiliza en fábricas francesas, belgas y españolas. En general, los molinos de impacto consumen poca energía, de 16 a 23 kWh/t, sin proporcionar grandes finuras. Por término medio, se considera aceptable un residuo de 15 % sobre el tamiz de 4.900 mallas, pero este residuo sube hasta 20 % cuando la humedad del carbón a la entrada es superior al 10 %.

Tiene gran aceptación en Alemania y otros países de la Europa Occidental el molino Loesche, de muelas cónicas. Según Rezola, este molino se extiende cada vez más para el tratamiento de carbones "normales" (fig. 11). En el cuadro II se dan algunos resultados—tomados de Anselm—que se pueden referir a un molino "Loesche". El consumo, bastante variable, oscila entre 15 y 20 kWh/t.

En el molino de rodillos "Wedag", el plano orbital de los rodillos está en la vertical (figura 12). Por el contrario, en los molinos del tipo "ruleta", como el Babcock & Wilcox (figura 13), se tiene una circunferencia de bolas, dispuesta en un plano horizontal, entre los aros de un cojinete, siendo impulsadas por el aro inferior, giratorio, a velo-

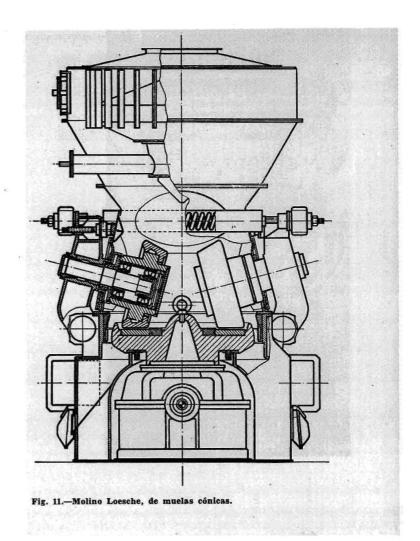
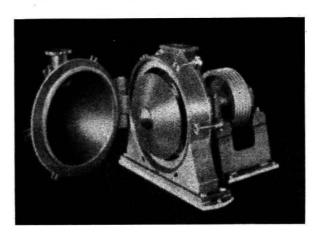
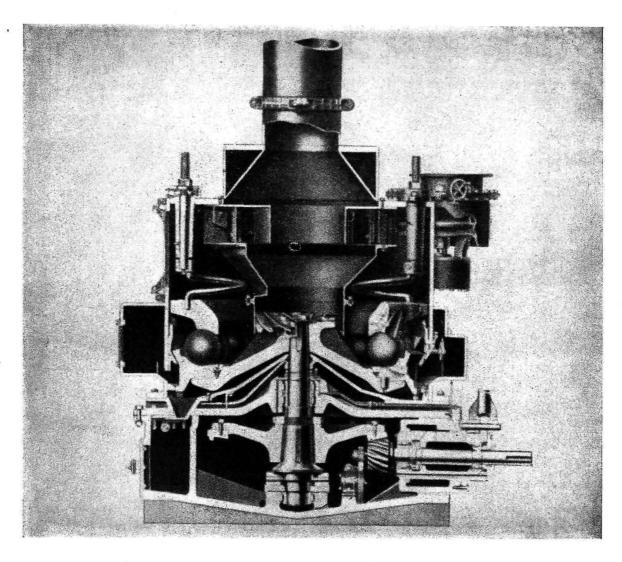


Fig. 12.-Molino de rodillos Wedag.





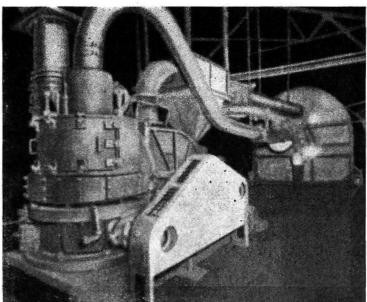


Fig. 13.-Molino Babcock & Wilcox, tipo ruleta.

Fig. 14.-Molino B. & W. de inyección directa.

cidad relativamente baja. El molino de laboratorio de Hardgrove es del tipo "ruleta", como el "B. & W." El molino tipo "Fuller", todavía muy usado en los Estados Unidos, comprende tan sólo cuatro grandes bolas de hasta 32 cm de diámetro. Estos molinos son de bajo consumo, unos 12 kWh/t, y tampoco suelen proporcionar grandes finuras. Se emplean, generalmente, para la inyección directa de carbones de buena calidad (figura 14).

Lo mismo se puede decir del molino de péndulos "Raymond" (fig. 15), que, sin duda, es el más usado en las fábricas americanas. Consume de 11,5 a 14,5 kWh/t con residuos del 20 al 25 %. En Inglaterra se tiene el molino de rodillos verticales "Rema", construído por Edgar Allen (fig. 16), con un consumo de unos 15 kWh/t.

En resumen, los molinos de gran velocidad son de menor coste de instalación, la mitad o menos, aproximadamente, que los molinos convencionales. También son de menor consumo específico en kWh/t. Hoy en día se construyen, algunos modelos, para producciones bastante elevadas. Sin embargo, su empleo no se ha extendido, al parecer, por ser poco indicados para el tratamiento de los carbones de inferior calidad, como son los peninsulares, en los cuales se tiene que conseguir una gran finura y un cuidadoso secado. Otro inconveniente es el desgaste de las piezas sujetas a abrasión, que suelen ser caras, por ser de aceros duros que no siempre se pueden conseguir en las fundiciones que habitualmente suministran los accesorios de las fábricas.

#### 6.2.5. Molinos de carbón de pequeña velocidad

La molienda del carbón en molinos tubulares de bolas, con secado simultáneo o independiente, es todavía el sistema insustituíble cuando se deben tratar carbones difíciles de moler en los cuales se exige una elevada finura. En estos molinos, como es sabido, la velocidad se determina por una ecuación del tipo:

$$n = \frac{k}{\sqrt{D}} \text{ vueltas/minuto}$$
 [22]

donde la constante k vale 32 ó poco menos. Así, con 2 m de diámetro interior de un molino se tendrían 22,5 vueltas por minuto.

Como cuerpos moledores se emplean bolas de acero fundido de poco diámetro, de 30 a 50 mm de diámetro, y el consumo normal es de 30 a 40 gramos por tonelada de carbón molido. Las corazas que constituyen el blindaje interno del molino tienen también su desgaste, algo menor que el de los cuerpos moledores y un revestimiento de buena calidad puede durar algunos años de trabajo.

Las instalaciones modernas son de molienda y secado simultáneo y, en general, trabajan por circuito cerrado, constando: de un molino-secador, un hogar auxiliar, un seleccionador de finos y gruesos, un ciclón y un filtro.

Los molinos-secadores de F. L. Smidth comprenden una cámara de secado y otra de molienda. En el "Pyrator", ya en desuso, el secado se conseguía por medio de bolas calentadas separadamente. En el "Tirax", los gases calientes de un hogar auxiliar, del horno o del enfriador de clínker entran al molino a una temperatura cuidadosamente regulada para evitar los riesgos de incendio. El molino ventilado de "Polysius" también es de dos cámaras (figs. 20 y 21), mientras que en los molinos de bolas "Rema" (fig. 17) y "Humboldt" la molienda y secado se efectúa en una sola cámara. El molino secador "Self", construído por Fives Lille (fig. 22), difiere de los anteriores en tener el separador inmediatamente después del molino y devolver el rechazo a través de una envolvente periférica.

En estos molinos el consumo de energía es algo superior al consumo de los molinos de gran velocidad. Varía entre 22 y 30 kWh/t, pero, en compensación, están habilitados para obtener elevadas finuras unidas a un casi perfecto secado. Gozan de general preferencia en las grandes instalaciones cementeras de Europa y proporcionan una seguridad en la marcha que no consiente graves objeciones.

#### 6.2.6. Sistemas de inyección

Como ya hemos dicho, se emplean actualmente dos sistemas de inyección: directa e indirecta.

La inyección directa ejecuta en una misma unidad las operaciones de secado, molienda y envío al horno del carbón recién salido del molino. El carbón se prepara a medida de las necesidades del horno. Es arrastrado por una fuerte corriente de aire sin necesidad de separador. Esta corriente de aire arrastra, además, el vapor de agua desprendido por secado del carbón. Se asegura que la presencia de esta humedad, aun representando un inconveniente desde el punto de vista del consumo de calor, mejora la combustión y proporciona una mayor facilidad en la regulación de la llama.

Trabajando estas instalaciones bajo una cierta depresión son más limpias y menos ruidosas que las de inyección indirecta. El problema del polvo tiene poca importancia y los gastos de instalación muy ventajosos. No es de desdeñar el hecho de ser estas instalaciones menos voluminosas. Este sistema—que emplean algunas fábricas peninsulares—tiene una gran aceptación en los EE. UU. Según Clausen, lo utilizan el 63 % de las fábricas de cemento.

El sistema de inyección directa suele basarse en un molino rápido (Raymond, ruleta o Loesche), con separador, trabajando en circuito cerrado. El aire aspirado del horno pasa por un ciclón que lo limpia de las partículas de clínker (figs. 14 y 15). Pueden también aplicarse los molinos lentos al sistema de in-

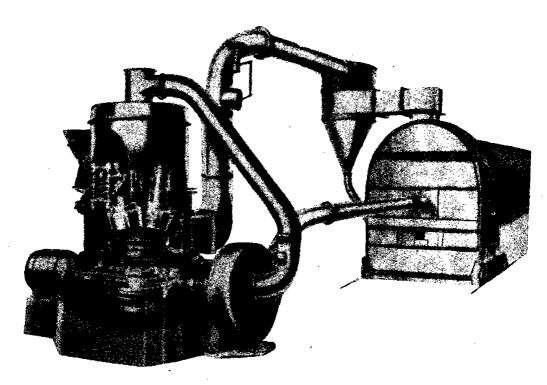
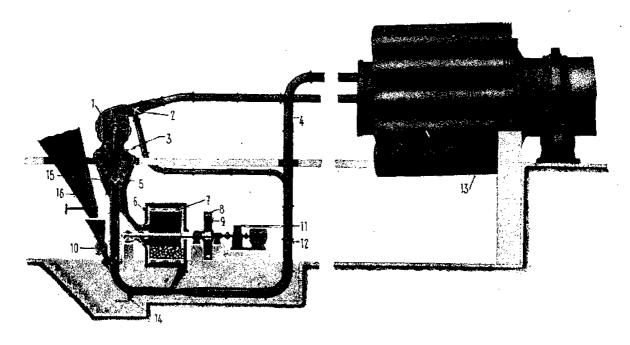


Fig. 15.-Molino Raymond, de péndulos.

#### Fig. 17.-Molino e inyector de carbón, sistema Rema.

1. Ventilador de aire primario.—2. Válvula by-pass.—3. Regulador a mano para controlar la finura.
4. Tubería de aire caliente procedente del horno.—5. El material a moler se seca por el aire caliente mientras se arrastra por la tubería.—6. Carcasa del molino de bolas.—7. Horno del molino de bolas.

8. Caja de engranajes.—9. Transmisión.—10. Alimentador rotatorio.—11. Reductor.—12. Motor.—13. Horno rotatorio con enfriadores satélites.—14. Trampilla para eliminar partículas de hierro.—15. Clasificador.—16. Totva de carbón.



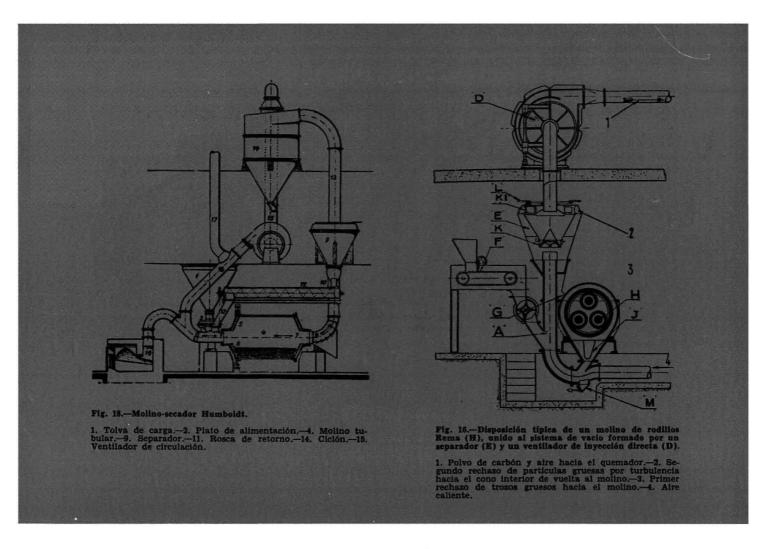
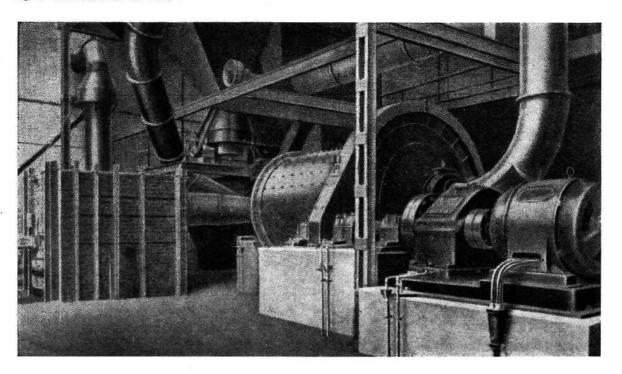


Fig. 19.-Molino-secador Humboldt.



yección directa (fig. 17). Este sistema se recomienda para buenos carbones bituminosos, siendo su principal inconveniente la sujeción de la marcha del horno a la marcha del molino. Si se quiere evitar el paro del horno cuando ocurre cualquier avería en el molino, hay que tener otro molino de reserva.

Esta desventaja se evita introduciendo en el circuito un silo de almacenamiento de carbón pulverizado. Se tiene, entonces, el sistema de inyección indirecta. En los molinos ventilados, el carbón se separa del aire que lo transporta mediante un ciclón que descarga en el silo. El vapor de agua no pasa al silo y el aire despolvoreado por el ciclón pasa todavía a un filtro, que lo descarga a la atmósfera. De la eficacia del sistema de despolvoreamiento depende que se emitan al exterior cantidades importantes de carbón en polvo.

El sistema de inyección indirecta es, por varios motivos, muy empleado en los casos en que se emplean carbones de baja calidad.

# 7. Despoivoreamiento

Siquiera sea de paso, nos tenemos que referir al despolvoreamiento de las instalaciones de secado y molienda de carbón. Es bien sabido que estas instalaciones suelen ser unas fuentes de polvos emitidos al exterior cuando no son recuperados eficazmente.

Según Anselm, las características granulométricas de los polvos emitidos por los secadores y molinos de carbón son las siguientes:

$$n = \text{de } 0.93 \text{ a } 1.2.$$
  
 $d' = \text{de } 5 \text{ a } 12 \text{ micras.}$ 

Recordemos que, según se dijo en el párrafo 6.2.2, la finura del carbón pulverizado presenta para d'valores próximos a 45 micras, lo cual nos indica que los polvos emitidos son de una finura de 4 a 9 veces mayor.

Los sistemas de filtros más empleados son los eléctricos y los de mangas. Unos y otros deben tener una conveniente regulación de temperatura, evitando que ésta sea inferior al punto de rocío para no correr el riesgo de que el polvo de carbón se empaste con el agua condensada. He aquí algunos datos complementarios, que también tomamos de Anselm, referentes a la molienda y secado de carbón pulverizado:

Producción.	kg/h	3.000	6.000
Cantidad de aire	m' . kg-1 m' . h-1	1,5 4.500	1, <b>66</b> 10,200
Polvo emitido	kg.h-1	90	150
Por ciento de la producción	g . m- <sup>s</sup>	3,3 20	14 14
Después del filtrado.			
Polyo emitido	kg . h-1	4,5 0.15	7,5 0.125
Concentración en el gas	g . m-*	1,0	0.72

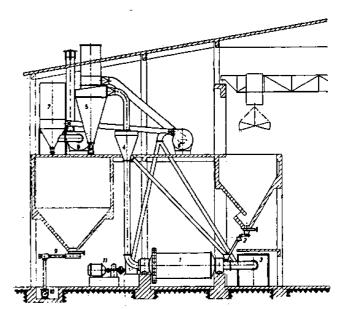
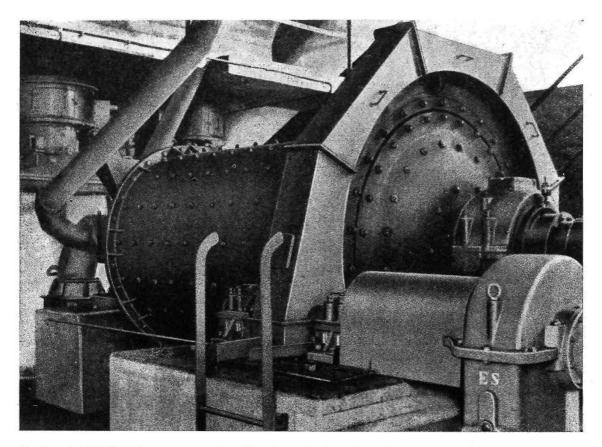


Fig. 20.—Instalación de un molino ventilado Polysius.

Molino de bolas-secador.—2. Plato de alimentación.—3. Hogar.—4. Separador.—5. Ciclón.—6. Ventilador de circulación.—7. Filtro de mangas.—8. Aspirador.—9. y 10. Roscas transportadoras de carbón en polvo.—11. Motor principal del molino.



Flg. 21. — Molino ventilado Polysius.

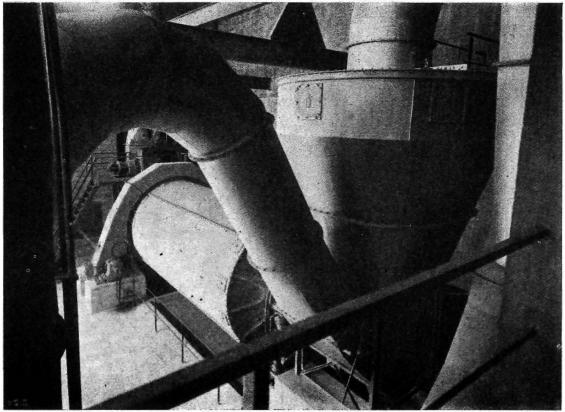


Fig. 22. — Molinosecador ventilado «Self», construído por Fives-Lille,

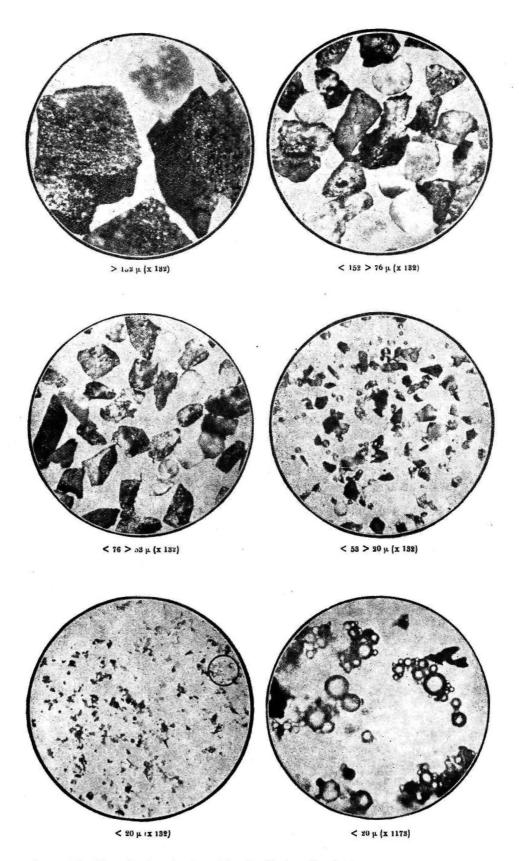


Fig. 23.—Microfotografías de polvo de carbón. (De Sturtevant-Londres).

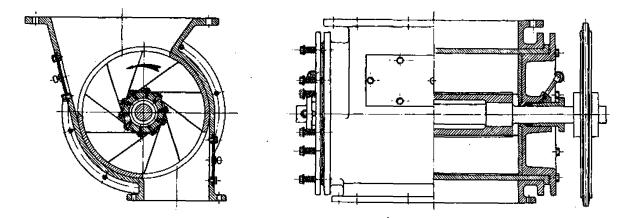


Fig. 24.—Alimentador celular «Polysius».—Los alimentadores celulares son estanques al aire y se aplican a los circuitos de molienda de carbón y siempre que debe establecerse comunicación entre partes del sistema a diferentes prísiones estáticas.

La separación y captación de polvo de carbón es, en definitiva, una operación indiscutiblemente lucrativa. Citaba Rocha y Melo el caso del montaje de electrofiltros en dos instalaciones de secado de carbones. La recuperación de polvo de carbón equivalió al 5,95 y al 5,56 % del combustible tratado, y la amortización de las instalaciones se consiguió al cabo de 16 y 18 meses, respectivamente.

En la figura 23 se dan varias microfotografías del polvo de carbón separado por medio de un electrofiltro Sturtevant.

# 8. Dosificación e inyección del combustible

La dosificación del combustible es una operación relativamente fácil cuando se trata de combustibles gaseosos o líquidos. No lo es tanto cuando se quema carbón. Así como los flúidos pueden trasladarse por la presión propia, el carbón debe emulsionarse con aire a presión. En la inyección indirecta el aire debe aislarse del circuito de molienda. Esto suele conseguirse por medio de una rueda celular (fig. 24), indispensable siempre que se establece comunicación entre partes del sistema a diferentes presiones estáticas.

Un alimentador de rosca, girando a velocidad variable, deja entrar la cantidad conveniente de carbón a la corriente de aire de inyección.

El aire que arrastra al combustible constituye una parte del necesario para la combustión. Por este motivo le llamamos aire primario, reservándose el apelativo de aire secundario al que entra posteriormente y, en general, a una mayor temperatura.

La misión del aire primario es arrastrar al combustible y proyectarlo al interior del horno en forma tal que pueda inflamarse y arder sin dificultades.

Con referencia al aire primario hay que tener en cuenta cuatro importantes variables:

- 1) Cantidad.
- 2) Presión.
- 3) Temperatura,
- 4) Composición.

#### 8.1. Cantidad de aire primario

La cantidad de aire primario depende del tipo dequemador y de la calidad del combustible. También influyen las dimensiones del horno rotativo.

La relación ponderal aire/combustible varía de 2,5 a 3,5. Supongamos que se mantiene la relación ponderal constante de tres kilogramos de aire por cada kilogramo de combustible. Según el Cuadro III, vemos que la cantidad de aire necesaria para la combustión neutra aumenta con el poder calorífico del combustible. Una relación ponderal constante, representaria el 42,2 % del aire necesario para la combustión de un lignito de 6.140 kcal/kg y el 22,2 % en un aceite combustible de 9.800 kcal/kg.

En las experiencias sobre las llamas realizadas en Ijmuiden se inyectaron diversos combustibles con cantidades de aire variables de 35 a 75 % del aire total. Estas experiencias pusieron de manifiesto que los factores de mayor influencia fueron la finura del carbón y la proporción de aire primario.

Otros estudios experimentales, realizados en el Japón, por Saji, emplearon de 1,9 a 2,56 veces el peso de aire en relación al de combustible, y por Yoshii, con 26 a 30 % del aire total.

Hardgrove recomienda 2,5 a 3,0 kg de aire por cada kilogramo de carbón. Para Simon se debe usar del 18 al 20 % del aire total. Los autores españoles suelen recomendar proporciones de aire primario bordeando los límites inferiores. Ferrer-Vidal y Gascuñana recomendaron "la menor cantidad posible"; Fonrodona nos dice de 18 a 20 %, cifra esta última aceptada por Serratosa.

CUADRO III - Cantidad de aire necesario para la combustión neutra de varios combustibles

COMBUSTIBLES	Poder calorífico inferior	Aire necesa combustic	Aire primario % Aire combust.	
	(keal/kg)	(m <sup>2</sup> N/kg)	(kg/kg)	=3:1
Turba	4.710	4,12	5,33	56,3
Lignito	6.140	5,50	7,11	42,2
Hulla I	6.910	7,71	8,68	34,6
Hulla II	7,890	7,76	10,04	29,9
Semi-coke	8.000	7,90	10,22	29,4
Coke	8.040	8,19	10,59	28,3
Hulia III	8.310	8,31	10,75	27,9
Hulla IV	8.340	8,41	10,87	27,6
Semi-antracita	8.420	8,71	11,25	26,7
Hulla-seca	8.510	8,72	11,28	26,6
Antracita	8.440	8,77	11,34	26,5
Carbono puro	8.080	8,89	11,49	26,1
Aceite combustible	9.800	10, <del>4</del> 6	13,52	22,2
Gas natural	11.814	12,62	16,32	18,4
Metano puro	11.979	13,30	17,20	17,4

#### 8.2. Presión del aire primario

La evidente importancia de la presión del aire primario es señalada, entre otros autores, por Anselm y Fritsch, los cuales nos dicen que la proporción de aire/carbón depende, principalmente, de la presión de transporte.

Como es sabido, hay que distinguir la presión estática y la presión dinámica. La primera indica el grado de compresión proporcionado por el ventilador. La segunda, la velocidad de circulación por el interior de los conductos.

Para la presión estática se recomiendan, por Ferrer-Vidal, columnas de agua entre 300 y 800 mm. Estas presiones, hoy día, han sido bastante excedidas, sobrepasándose, en ciertos casos, los 1.000 mm de columna de agua.

Por la presión dinámica podemos calcular la velocidad y el gasto o caudal. Conocido éste y la sección de salida del inyector, podemos saber la velocidad de entrada del aire primario al horno.

En Ijmulden se experimentaron velocidades de 20 a 43 m/s. Yoshii, en el Japón, probó 40 y 41 m/s; Hardgrove recomienda de 30 a 40 m/s; Fonrodona, de 60 a 70 m/s; Hottel, para llamas de combustible líquido, nos dice que éstas se mantienen estacionarias entre 25 y 65 m/s.

#### 8.3. Temperatura del aire primario

La temperatura del aire primario suele ser reiativamente baja, si bien hay diferencias de criterio, al igual que entre las restantes características de las que ya hemos tratado. Los autores americanos suelen preferir, con Hardgrove, temperaturas de 70 a 105°C. Nordberg nos describe una moderna industria canadiense en la cual se inyecta aire de 65 a 80°C. Simon hace variar la temperatura entre 20 y 120°C. Harrington, para la combustión de la antracita pulverizada, recomienda una temperatura de la mezcia aire-carbón comprendida entre 120 y 140°C. En Ijmuiden se operó con aire primario a la temperatura de 80°C. En los grandes hornos de Ouburg, según Slegten, la temperatura del aire inyectado es de 100°C. Los datos de los japoneses Sajl y Yoshii se refieren a temperaturas comprendidas entre 40 y 70°C. Por último, acudimos a la probada autoridad de los ingenieros españoles Ferrer-Vidal y Gascuñana, ploneros en la utilización de carbones pobres, los cuales siempre recomendaron pura y simplemente el empleo del aire primario frio, es decir, sin precalentamiento alguno.

#### 8.4. Densidad y viscosidad del aire primario

Vamos a intentar esclarecer en qué medida influyen la presión y la temperatura del aire primario en sus cualidades de medio soportante de carbón pulverizado o de combustibles líquidos nebulizado.

		74 M I	CES	<u></u>		4.0	4 8	470S	7	E	Ī	UPEIP	VELOCIDAD DE CAIDA (AIRE	50°C)
ø						# "	* *	4703	<i>u</i>	2			D=1.95 × 10 4PO C= 1.1.65	
M	AFNOR	417H	A 9. B	N/Q	N E	1101	,	DE.	CAPI	T A C I Ó A		sm²/g	,	em/s
10000	10000	9520	-	10000				1	Π			. 4		569
1	8000	7930		7500			-				Γ		v= V Ked	
1	6300	5750 5660		6 8 2 8			1						* -	402
5000	5 0 0 0	4760		5000			-		İ		-	4		101
	3/50	4000 3368	7757	4800			ģ		Ι.					ļ <u>ļ</u>
2500	2 500	2830	2612	3000 2500			Po/r					1,8		284
	2000	2380	2057	2000			ď						, <u>-</u> ,	
1 [	1600	1888	1676	1500			å	_			-		$V = \sqrt{\frac{\theta \cdot f}{27} \left(\frac{\ell - \ell}{\ell}\right)} d$	
!	1250	1410	1405	1288				1000	;		-		V 27 ( e' / 2	
1000	1000	1000	1000	1000			Cameras	6			-	4 6		180
<b>!</b>	180	710	699	751				8	·					
500	670	590	599	611			, a	, <u>c</u> :	ς π	, ;		<i>9</i> 2		119
1	500 400	500 420	500 422	500 400			1	Ciclón	mu/ticit/on de Abus -		┢		OSEEN.	
]	3/5	358	357			-	1	Ç :	, r, c				~ 4 5 6 77	
258	250	297 250	295 251	300 250				-   :	\$ 8 8			184	6 m 4 (36.2 m m / n m)	74
	200	210	211	200	Tam	ız de malla	$\perp$	İ	1 %			r	$\frac{6\eta}{d} \cdot \sqrt{\frac{36\eta^2}{d^2}} \cdot \frac{18C(C\cdot C)d}{2}$	
	150	177	178	150	, y 00 .	/// <i>#</i> // #	"[		1	1			y= 2	
\ \	125	125	124	120			- 1		Cortin	3			9 C	}
100	100	185	104	100	Temi			[	၂ ပိ	de te/2	├	481	4	27
1 }	80	74	76 66	75	490	o mai	***	j	1 1				•	
50	55 50	62 53	53	6/	I. 1	T CT			]	0		923		.,
- ··-	40	44			Turbidimetro de Waonea	Flourémetros		i	]	Filtros	┢		STOKES	
		27			3	١			li	ii.			STORES	•
25					10	0,				- 1 - 1		1846		2
					10	3 3			iΙ				0 /0 1 12	[ '
					100	2 3					.	,	V= - 8 (8-6) 0-	[ ]
	l				100	86			1			4515	V= \frac{\gamma(e-e) d^2}{187}	233
10					10	7/00/2				. 1 1	ļ-	40/3		
					*		- 1		į į					
5						90			1	9		9278		4.88
		i				Į	,		į	1 2			CUNNINGHAM	
						1006	0,000	3	į	ofiltro				
2,5										۱,	Ľ	18461		0.02
	1			İ		9	700			F/ect			,	
	- 1						P	•		-   8			$V = \frac{g(e-e)d^2}{187}(1+2K\frac{\lambda}{d})$	
<u> </u>	:						$\bot$			7		45/54	187 ' <u>d</u> '	0.004
1							¥	<b>A</b>		-++	+		λ= camino libre medio de	
# 1	ĺ		İ	'						1				
0.5	İ							.0				92707	las moléculas = 37	0.001
	ļ		•					0.		]			c = velocidad media de	
	ļ							2				_		
0,25								10/1			- [	184615	Y ''	0.00045
								8			j	* 1	N= peso molecular	
	Į							Ultramicroscopio			1		medio	
<b> </b>	- {							<i>[a</i>				4 8/538	···· <del>······</del>	0,00011
						_								2.58877

Fig. 25.-Medida, captación y velocidad de caída del polvo de carbón.

El estudio más elemental del problema nos conduce a la conocida Ley de Stokes:

$$v = g d^2 \frac{\rho - \rho'}{18 \gamma} \tag{23}$$

donde:

v= velocidad de caída de una particula esférica de d micras de diametro en un medio de viscosidad  $\eta.$ 

 $g = \text{aceleración de la gravedad (980 cm.s}^{-3})$ 

 $\rho = densidad de la partícula.$ 

 $\rho' =$  densidad del medio viscoso.

Supongamos que se trata de partículas de un carbón con una densidad de  $1,3\,$  g. cm $^{-3}$  y con un tamaño de  $90\,$  micras  $(0,009\,$  cm). La ecuación [23] se puede transformar en:

$$v = 4410 \times 10^{-6} \frac{1,3 - \rho'}{\gamma}$$
 [24]

donde vemos que la velocidad de caída es función de las variables densidad del aire y viscosidad.

De las leyes de los gases perfectos, y suponiendo que el aire se comporte de acuerdo con ellas, deducimos que la densidad varía en razón directa de la presión e inversa de la temperatura absoluta:

$$\rho' = \rho_0 \frac{T_0 P_1}{T_1 P_0}$$
 [25]

La viscosidad, en cambio, y de acuerdo con Sutterland, aumenta con la temperatura, según la expresión:

$$\gamma = \frac{k\mathbf{T}^{3/2}}{\mathbf{C} + \mathbf{T}}$$
[26]

siendo, para el aire:

$$k = 150 \times 10^{-7}$$

$$C = 124$$

lo que nos da:

$$\eta = \frac{150 \times 10^{-7} \mathbf{T}^{3/3}}{\mathbf{T} + 124}$$
 [27]

A presiones relativamente bajas, próximas a la atmosférica, la viscosidad absoluta de los gases es independiente de la presión.

Para fijar ideas, mediante un ejemplo, supongamos que inyectamos aire primario con una presión estática de 680 mm de columna de agua. La presión absoluta de este aire será:

$$P_1 = 760 + \frac{680}{13,60} = 810 \text{ mm/Hg}$$

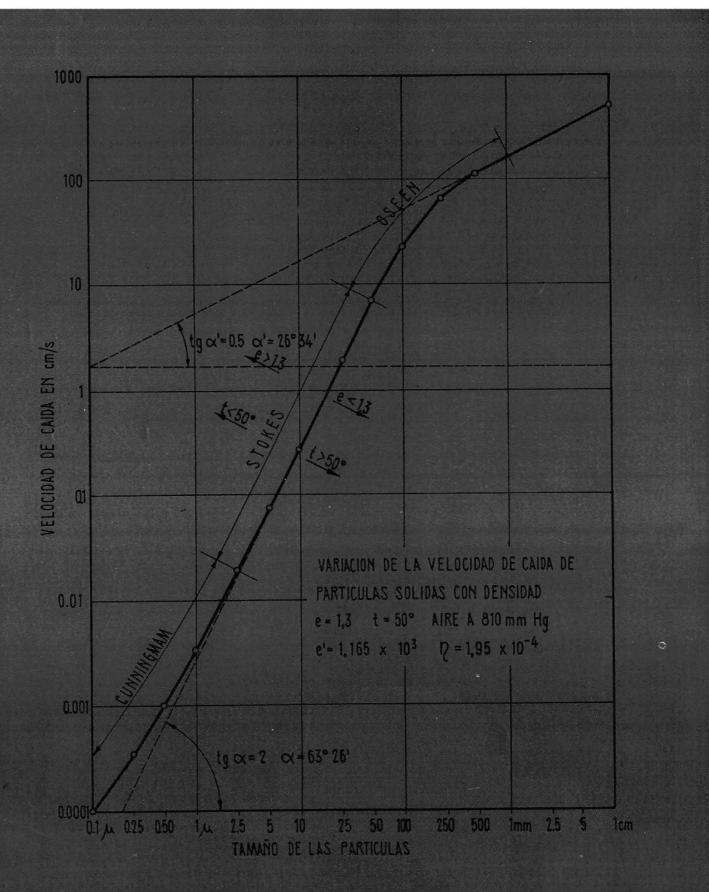
El peso específico del aire será:

$$\rho' = 1{,}293 \frac{273 \times 810}{T_t \times 760} = \frac{376{,}2}{T_t} \text{ kg . m}^{-3}$$

Variando la temperatura del aire y aplicando las ecuaciones [24], [25] y [27], se tendrá:

t°C T°K		Densidad (g . cm <sup>-3</sup> )	Viscosidad (Po)	Velocidad (cm <sup>-1</sup> )
0	273	$1,378 \times 10^{-3}$	$170  imes 10^{-6}$	33,7
25	298	$1,262 \times 10^{-3}$	$183  imes 10^{-6}$	31,3
50	323	$1,165 imes10^{-s}$	$195 \times 10^{-6}$	29,4
75	<sup>*</sup> 348	$1,081 \times 10^{-3}$	$206  imes 10^{-6}$	27,8
100	373	$1,009  imes 10^{-3}$	$218  imes 10^{-6}$	26,2
200	473	$0,795 imes10^{-3}$	$259  imes 10^{-6}$	22,1
300	573	$0.657 \times 10^{-3}$	$295 imes10^{-6}$	19,4

El cálculo demuestra que, según aumenta la temperatura, las cualidades del aire como medio soportante mejoran notablemente. Esta variación, sin embargo, no tiene influencia decisiva entre 25 y 100°C de temperatura, que constituyen los límites que encontramos en la práctica de la inyección del aire.



Pig. 26,-Velocidad de caida de particulas de carbón en el seno del aire

Es sabido que la ley de Stokes tiene una validez limitada. Si las partículas de carbón son de un tamaño superior a cien micras o inferior a una micra, las velocidades observadas se apartan algo de las que nos da la ley de Stokes. Hay que tener en cuenta las correcciones de Cunningham, Oseen y otras que aparecen en la figura 25. De acuerdo con estas correcciones se puede construir el gráfico de la figura 26, donde se expresa el comportamiento de las particulas de diferente tamaño en el seno del aire a una presión absoluta de 810 mm de mercurio y una temperatura de 50°C.

Como se dijo en 8,2, las velocidades de inyección del aire primario suelen ser superiores a 20 m/s, por lo que, sin duda alguna, tendremos una garantía absoluta de que las más pesadas particulas de carbón pulverizado serán transportadas al interior del horno.

Si en las condiciones de presión y temperatura del ejemplo a que nos hemos referido empleamos una relación ponderal de tres partes de aire por una de carbón, siendo el peso específico 1,165 kg/m³, 3 kg ocuparán 2,575 m³, y la concentración de polvo de carbón será de 388 g/m³. En el momento que comience la inyección de carbón el peso específico de la mezcla aire + carbón será:

$$\rho' = \frac{1,165 + 0,388}{1 + \frac{0,388}{1,3}} = 1,196 \text{ kg/m}^3$$

Al encontrarse el ventilador con una mayor resistencia bajará inmediatamente la presión de inyección, pero será todavía suficiente para impulsar la totalidad del combustible al interior del horno.

#### 8.5. El aire primario como comburente

Hay que tener en cuenta que el aire primario no se utiliza solamente como medio soportante, sino, además, como comburente. Como tal, debe contener suficiente cantidad de oxígeno para dar inicio a los fenómenos de combustión antes de conseguirse la mezcla con el aire secundario.

En condiciones normales, el aire seco contiene 300 gramos de oxígeno por metro cúbico. Manteniendo constante la presión estática y elevando la temperatura, disminuirá proporcionalmente la concentración de oxígeno y será preciso un mayor volumen de gas para aportar la misma cantidad de comburente.

#### Aire primario a 680 mm de columna de agua (Presión Estática)

t <sub>0</sub> C	Densidad (g.em <sup>-3</sup> )	O <sub>2</sub> (g, m <sup>-3</sup> )	Relación de volúmenes
0	$1,378 \times 10^{-3}$	320	1,000
25	$1,262 \times 10^{-3}$	293	1,092
50 -	$1,162 \times 10^{-3}$	270	1,178
75	$1,081 \times 10^{-3}$	251	1,275
100	$1,009 \times 10^{-3}$	234	1,366
200	$0.795 \times 10^{-3}$	185	1,733
300	$0.657 \times 10^{-3}$	152	2.099

Suponiendo que se utilizara aire primario precalentado a 300°C para proporcionar al carbón la misma cantidad de oxígeno, tendriamos que inyectar un volumen de aire dos veces mayor que si la temperatura fuese la del ambiente.

Si, por el contrario, la capacidad de aumentar el caudal del ventilador tiene un límite superior poco elevado, tendremos un medio de aumentar o disminuir el contenido de oxígeno, sin variar el caudal, pero si actuando sobre su temperatura.

Puede, asimismo, acudirse a medios que por lo inusitados podemos clasificar de heroicos. Nos referimos a la inyección con aire enriquecido con oxígeno, y aun con oxígeno puro. Recordamos que, en los coloquios de 1957, López Peciña se refirió a las posibilidades de aumentar la producción de un horno vertical—o rotativo—con el empleo de oxígeno como comburente. Según La Velle, este procedimiento ya se ha empleado, con éxito, en la industria del acero en Alemania. El mismo método se podría aplicar a la industria del cemento, con lo que aumentaría la capacidad de producción de los hornos, apenas con la instalación de un generador de oxígeno, de coste relativamente bajo. En la 20.º Reunión Técnica de Haubordin se trató de tan sugestivo problema. Se hizo la objeción de que el precio del oxígeno es, todavia, muy alto. Técnicamente, se opinó que la sobreoxígenación, con combustibles de alto contenido de carbono, proporcionaria temperaturas más elevadas y volvería la conducción del horno más regular y fácil.

Por nuestra parte no nos atreveríamos a aplicar ni a recomendar un método que no deja de tener sus riesgos, principalmente cuando el combustible no es muy alto en su contenido de carbono y se corre el peligro de explosiones violentas.

Bornschein, por ejemplo, señaló la conveniencia de emplear un gas protector cuando se trabaja con lignitos. El mencionado peligro de explosiones es muy pequeño si el contenido de oxígeno está por debajo del 13 %.

Azbe también señaló que el aire no es el medio de inyección más adecuado y debe limitarse a un mínimo. El empleo de gases puede ser más ventajoso si se pretende que las materias volátiles sufran una disociación apropiada liberando carbono sólido. La recirculación de los gases cargados de CO<sub>3</sub>, extraídos de la cámara de humos, está cada día más extendida.

Ya expusimos que en el sistema de inyección directa el aire primario está cargado del vapor de agua procedente del secado del carbón. El caso extremo lo constituyen algunos tipos de quemadores de "fuel-oil" que emplean vapor de agua como medio de inyección.

Por último, un caso interesante de suboxigenación lo constituye la mezcla de gas natural con el aire primario. Este caso se ha aplicado en los Estados Unidos, principalmente cuando se quema coque de petróleo u otro combustible pobre en volátiles.

#### 9. La combustión en el horno rotativo

De acuerdo con las informaciones facilitadas por Townend acerca de las experiencias efectuadas en Ijmuiden, en la combustión del carbón pulverizado se observan tres fases consecutivas:

- 1.º Preinflamación, con aumento de volumen de las partículas.
- 2.4 Inflamación y combustión de las materias volátiles.
- 3.º Combustión del coque residual.

La temperatura mínima a que se inflama el carbón pulverizado varía de 200 a 300°C, según la calidad del carbón y según su finura. El carbón fino, pasado por un tamiz de 74 micras, se inflama entre 210 y 220°C cuando es antracitoso, y entre 170 y 175°C cuando es bituminoso. Los aceites combustibles tienen su punto de ignición de los 130 a los 150°C. Los carbones groseros, comprendidos entre 177 y 210 micras, arden a los 550 ó 460°C, según sean antracitas o hullas de gas.

Asombra constatar que las temperaturas de inflamación de los combustibles sólidos finamente pulverizados son inferiores a las de los combustibles gaseosos.

# Temperaturas minimas de inflamación de algunos gases en el aire

Metano	632°C
Oxido de carbono	609
Hidrógeno	572
Etileno	490
Etano	470
Butano	408
Sulfuro de hidrógeno	292

Algunos autores han llegado a suponer que el carbono sólido contenido en el carbón pulverizado se inflama antes que las materias volátiles. Estas queman acto seguido muy rápidamente. El coque continúa ardiendo después de estar ya quemados los gases, de modo que, en definitiva, la combustión del carbono ocupa todo el tiempo que dura la llama.

Tiene su importancia la velocidad de propagación de la llama. En los carbones pulverizados aumenta con el contenido de materias volátiles y disminuye con el contenido de cenizas. También influye la proporción relativa aire/carbón. Los máximos se encuentran entre 2,5 partes a 4,5 partes de aire por una de carbón. Las velocidades de propagación oscilan entre 3 y 14 m.s<sup>-1</sup>. Para un carbón con 20 % de volátiles y 5 % de cenizas se tiene:

Aire/carbón	4:1
Velocidad máxima	7 m.s <sup>-1</sup>

Hay que mantener un cierto equilibrio entre la velocidad de inyección y la de propagación de la llama, a fin de que ésta se mantenga a una distancia fija del extremo del inyector, sin acercarse demasiado, y, también, sin apartarse mucho, pues, en este caso, la combustión podría sufrir intermitencias, por sucesivos apagones y encendidos.

Nusselt estableció que el tiempo que dura la combustión de una partícula de carbón es función de su tamaño:

$$h = \mathbf{C}d^{m}$$
 segundos [28]

y, según Rosin:

 $\theta = 55 \ d^{1.8}$ 

Una partícula de 0,1 mm de diámetro tarda en quemar 0,87 segundos.

La longitud de la llama queda definida por el tiempo que dura la combustión y la velocidad de los gases:  $1=v\,\theta \hspace{1cm} (291)$ 

siendo:

$$v = \frac{\mathbf{VT_t}}{\mathbf{ST_b}} \mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1}$$

V = Volumen de gases de la combustión en m<sup>3</sup>N.s<sup>-1</sup>.

S = Sección de paso del horno en m².

T<sub>t</sub> = Temperatura de la llama en grados Kelvin.

Para un horno con 2,5 m de diámetro, con 4,91 m² de sección, con una producción de 500 t/día y un consumo específico de 1.350 kcal/kg, empleando un carbón con  $H_1 = 6.750$  kcal/kg, dando una cantidad de humos f = 7.6 m³N/kg, se tiene:

$$V = \frac{10^{\circ}Pqf}{86.400 \text{ H}_{1}} = \frac{500.000 \times 1.350 \times 7.6}{5.832.000} = 8.8 \text{ m}^{3} \cdot \text{s}^{-1}$$
$$v = \frac{8.8 \text{ T}_{1}}{273 \times 4.91} = 0.0065 \text{ T}_{1} \text{ m/s}.$$

Temperatura de la llama ("C)	1,300	1.400	1.500	1.600
Velocidad de los gases (m/s)	10,22	10,87	11,52	12,27
Longitud de la llama (m)	8,89	9,46	10,02	10,60

En la práctica, las llamas corrientes de carbón pulverizado, ardiendo sus partículas en menos de un segundo, alcanzan una longitud aproximada de unos 10 metros.

Saji, en el Japón, realizó interesantes estudios sobre este tipo de llamas, determinando fotográficamente sus dimensiones, en modelos reducidos. Obtuvo una longitud que se relacionaba con el diámetro de salida del quemador:

$$L/d_{\circ} = 65 \text{ a } 75$$

Los coeficientes de difusión molecular y de difusión turbulenta juegan un importante papel en la fijación de la longitud de la llama. Para llegar a un rápido final de la combustión se debe emplear un quemador de tobera estrecha, que dé al chorro una mayor turbulencia. El aumento de la proporción aire/combustible acorta la llama mucho más que un simple aumento de la velocidad de inyección. El empleo de un ventilador de alta presión es, en cualquier caso, necesario y conveniente. En cambio, no hay que exagerar la importancia de la molienda fina.

# 9.1. Temperatura de la llama

Como sabemos, la temperatura teórica de la combustión neutra está en razón directa del poder calorífico inferior del combustible e inversa del producto del peso de humos resultantes por su calor específico medio:

$$t_{c} = t_{c} + \frac{H_{i}}{Fc_{a}}$$
 [30]

De conformidad con el cuadro I, calculado para combustibles puros, quemando en el seno del aire, se

COMBUSTIBLES	kcal/m-*	1°C
Oxido de carbono	1.048	2.372
Etileno	924	2.274
Hidrógeno	899	2.246
Carbono		2.231
Propano	846	2.117
Etano	840	2.089
Metano	815	2.037
Sulfuro de hidrógeno	727	1,837
Azufre	664	1.673

Las condiciones de la combustión neutra raramente se dan en la práctica, de modo que las temperaturas teóricas nunca son alcanzadas. A lo más estas temperaturas indican, según los contenidos de unos y otros combustibles, el potencial térmico que podemos esperar en cada caso. Así, vemos que, el óxido de carbono puro, sería un combustible ideal porque da origen a una pequeña cantidad de humos. El carbono y el hidrógeno, a pesar de su poder calorífico muy diferente, se equiparan en lo referente al grado de temperatura. El azufre, en último caso, contribuye bastante a disminuir la temperatura de la llama

La temperatura efectiva es, desde luego, inferior a la teórica. Para Anselm esta disminución representa unos 300°C a menos, o sea, una disminución de 15 a 20 %. Una de las causas, como sabemos perfectamente, es el exceso de aire. Para Baouman, con 10 % de exceso de aire y un carbón de 7.000 kcal/kg se alcanzan 1.800° ± 25°C. Un 5 % de azufre volátil rebaja la temperatura a 1.777°C. Momot calculó que, con 20 % de exceso de aire y una temperatura teórica de 2.080°C, se alcanzan, en la práctica, 1.700°C. También para Folliot la temperatura aproximada es de 1.700°C. Según Azbe, en un horno rotativo, produciendo cal, se alcanza una temperatura de la llama próxima a 1.600°C. Persons, en un horno cementero, quemando fuel-oil, ha obtenido 1.593°C, y, según Lea y Desch, las temperaturas observadas por Martin y Gilbert eran de 1.560° y 1.510°C, respectivamente.

Estos datos nos indican que las temperaturas de la llama varian de uno a otro horno, que existen grandes divergencias entre las determinaciones de unos y otros autores, determinaciones que, en cualquier caso, parecen sujetas a grandes probabilidades de errores.

Debe existir, desde luego, un límite inferior, a partir del cual la llama ya no es apta para la obtención de clínker de cemento. En todo caso, la temperatura de la llama debe ser superior a la de formación del clínker, y para que éste se forme es necesario la preexistencia de una cierta cantidad de fase límida.

Las temperaturas de fusión de algunos eutécticos posibles en las composiciones del cemento Portland son:

$SC_3 - SC_2 - AC_3 \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots$	1.455°C
$SC_3 \longrightarrow SC_2 \longrightarrow AC_3 \longrightarrow Fe_2O_3 \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots$	1.340°C
$SC_2 \longrightarrow SC_2 \longrightarrow AC_3 \longrightarrow Fe_2O_3 \longrightarrow MgO \dots \dots \dots \dots \dots \dots$	1.300°C
$SC_3 - SC_3 - AC_3 - Fe_2O_3 - MgO - Na_2O \dots \dots \dots$	1.280°C

De acuerdo con estos datos, podemos pensar que, aumentando la proporción de fundentes, podremos rebajar la temperatura de la llama, lo que, de hecho, ocurre en la práctica. Sin embargo, una llama a 1.500°C presenta ya una escasa diferencia de temperatura en relación al lecho de material, y no puede garantir una buena transmisión de calor.

Un lignito con 4.500 kcal/kg de poder calorífico inferior, con dificultad proporciona una temperatura superior a 1.500°C; luego, en estas condiciones, difícilmente se puede conseguir una buena cocción del material. Para Guillon, un 40 % de cenizas rebaja la temperatura de la ilama en unos 200°C. Si en la composición de las cenizas entra carbonato cálcico, aquéllas absorben, además del calor necesario para su calentamiento, una cantidad de calorías muy importante para su descarbonatación. En estas condiciones, no merece la pena intentar la cocción del cemento usando un combustible semejante.

#### 9.2. Exceso de aire

La temperatura teórica de la combustión baja inmediatamente cuando se realiza en condiciones que no se ajustan a la neutralidad, según expresamos en el gráfico adjunto (fig. 27). Este es el caso general en los hornos rotativos. El combustible y el comburente no están uniformemente distribuídos, por el contrario aparecen muy imperfectamente mezclados a lo largo del recinto tubular.

No estamos ante un proceso estático, sino ante un proceso dinámico, en constante evolución. Tenemos un chorro central de combustible, inyectado a gran velocidad, apenas con un 20 %, o menos, del comburente necesario y, por eso, en condiciones de una evidente falta de aire en las primeras fases de su recorrido.

Existe una entrada de aire, tangencial, que va tomando contacto con el combustible, a medida que éste se interna en el horno. En tales condiciones, el concepto de combustión neutra carece de sentido práctico. Así, resulta que es necesario proporcionar un exceso de aire al combustible si no se quiere que éste arda tarde, mal o nunca.

La velocidad de reacción depende de la concentración de oxígeno en la fase gaseosa. Quemando polvo de lignito, y variando el exceso de aire, Hinz encontró un máximo, poco acusado, en la velocidad de combustión, para una proporción de aire entre 1,4 y 1,5.

De otra parte, con el empleo de carbones de baja calidad es necesario aumentar la cantidad y la velocidad del aire primario para asegurar el transporte de las cenizas inertes y garantizar la turbulencia necesaria. Indirectamente, y porque la mezcla con el chorro central se vuelve más difícil, se tiene que aumentar la cantidad de aire secundario.

Baouman cree que, quemando carbón pulverizado, es necesario un exceso de aire del orden de 10 % si se quiere que arda la totalidad del carbón. La buena conducción de un horno consiste en obtener una combustión completa con un mínimo exceso de aire. En Matouschek vemos la recomendación de un 6 % de exceso de aire, con 1,3 % de oxígeno en los humos finales. Tomamos de Anselm los siguientes excesos de aire medios: 8,7 % para un horno normal, 9,7 % para un horno Lepol, 12 % para un horno con precalentador y 15 % para un horno con caldera de recuperación.

En el año 1944 Ruiz Monje admitía un 20 % de exceso de aire en un estudio sobre el empleo de los lodos del lavado de carbones. Un tal exceso de aire podía ser tenido como exagerado cuando predominaban las ideas de aproximarse, lo más posible, a una combustión neutra. Estas ideas eran, en general, tomadas de países europeos, en los cuales, al tratar de carbones maios, acababan donde los peninsulares comenzamos. Actualmente, en ciertos países, y entre ellos Bélgica, se han instalado hornos de

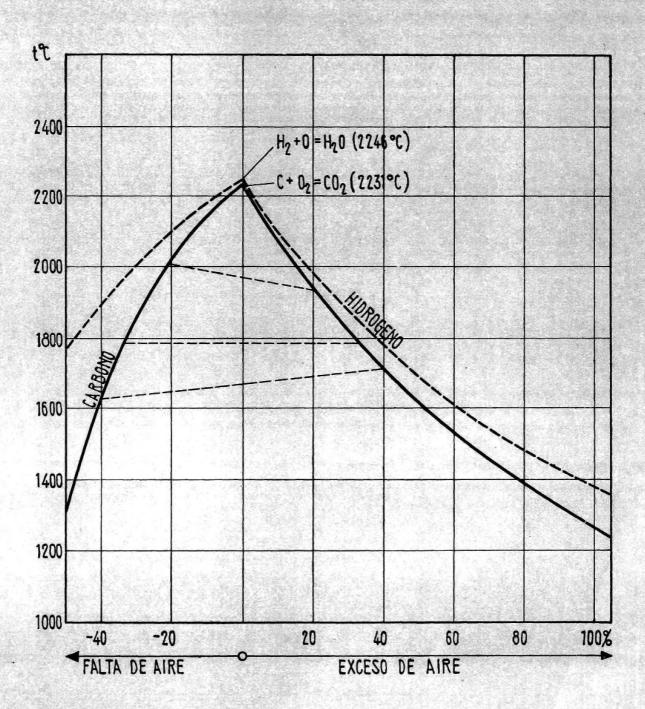


Fig. 27.—Variación de las temperaturas teóricas de la llama en función de la cantidad de aire.

grandes dimensiones, destinados a quemar malos carbones; y al tratar de ellos hizo observar Slegten que se obtuvieron rendimientos sensacionales, trabajando, en magnificas condiciones, con 6 % de oxígeno, o sea, aproximadamente, un 46 % de exceso de aire. El caso de este horno abrió los ojos a Anselm, poco antes de su muerte, así como a muchos otros. Se puede suponer—continuamos siguiendo a Slegten—que un aumento del volumen gaseoso reduce las estratificaciones y mejora la homogeneidad de los gases calientes, actuando sobre ellos análogamente a los agitadores.

En cualquier caso, hay que vigilar constantemente el exceso de aire si se quiere conducir un horno con cierto cuidado. La instalación de analizadores de oxigeno automáticos se está imponiendo. La interpretación de los resultados del análisis de los humos se consigue con facilidad con el empleo de nomogramas, tal como el de la figura 28, preparado para la combustión de aceites combustibles.

#### 9.3. Densidad y flujo térmicos

Podemos definir la densidad térmica de un horno rotativo como la cantidad de calor desarrollada por hora y por unidad de volumen. Para calcularla, no hay que tener en cuenta la longitud total del horno. Un cálculo aproximado nos ha dado, para un horno de 2,5 m de diámetro, una liama con 10 m de longitud. Podemos aceptar, como media bastante generalizada, una longitud igual a cuatro veces el diámetro. En estas condiciones se tiene:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \times 4D = \pi D^3.$$

Suponiendo una producción de Pt/día, con un consumo de calor de Ckcal/kg, la densidad térmica o carga de calor será:

$$q_{c} = \frac{10^{3}PC}{24\pi D^{3}} - \text{kcal} \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}$$
 [31]

Rosin calculó teóricamente el valor de la densidad térmica para un combustible de poder calorífico  $H_1$  y un volumen específico medio de los gases de la combustión  $v_m$ :

$$q_{\tau} = \frac{\mathbf{Q}}{\mathbf{V}} = \frac{3.600 \,\mathbf{H}_i}{v_{\mathrm{m}} \,\theta} \tag{32}$$

donde () es el tiempo de combustión, el cual, según vimos en [28], vale

 $\theta = 55 \ d^{1.8} \ \text{segundos}$ 

luego:

$$q_{\rm v} = \frac{3.600 \text{ H}_{\rm i}}{55 \, d^{1.8} v_{\rm m}} \text{ kcal . h}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$$
 [33]

Siendo la densidad térmica función inversa del tamaño de las partículas combustibles, podemos aumentar  $q_{\tau}$  extremando la finura del carbón inyectado. Si, además, combinamos las expresiones [31] y [33], se tendrá:

$$q_{\text{\tiny T}} = \frac{10^{\circ} \text{PC}}{24\pi \text{D}^{\circ}} = \frac{3.600 \text{ H}_{\text{\tiny I}}}{55 \text{ d}^{1.8} v_{\text{\tiny m}}}$$

Lo que nos dice que, para hornos de poco diámetro, y con cargas de calor bastante elevadas, es necesario moler con la mayor finura.

Según el Cuadro I, para la combustión neutra del carbono se tiene:

H<sub>1</sub> = 8.080 kcal/kg T = 2.231°C  

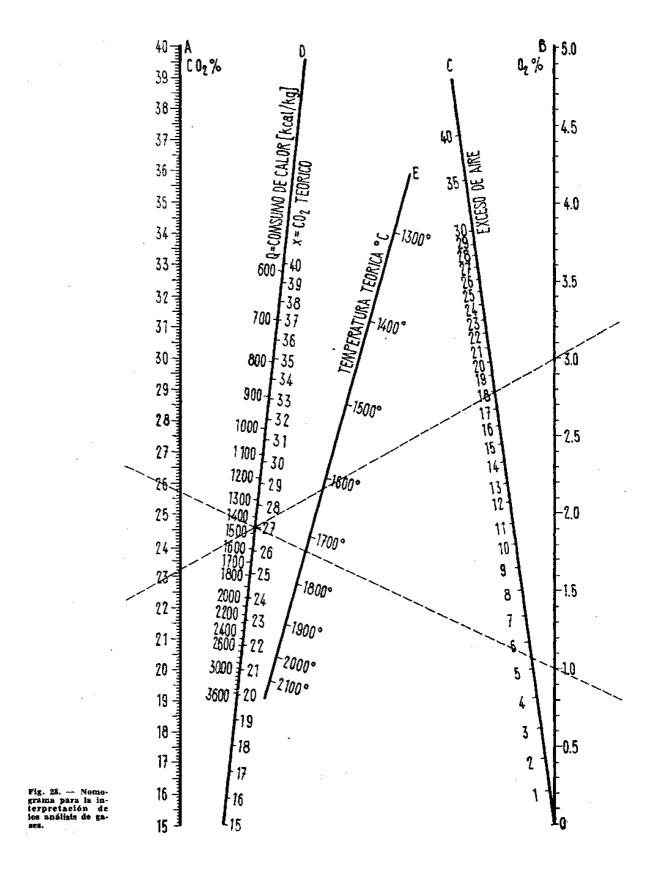
$$v_{\rm e}$$
 = 8,885 m<sup>3</sup>/kg  $v_{\rm r}$  = 81,5 m<sup>3</sup>/kg  

$$q_{\rm r} = \frac{3.600 \times 8.080}{81,5 \text{ }\theta}$$

$$q_{\rm r} = \frac{356.908}{\theta} \text{ kcal . h}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$$
[34]

Aplicando valores:

Tamaño de las particulas (micras)	Tiempo de combustión (segundos)	Densidad térmica (kcal . m-1 . h-1)	
120	1,21	295.000	
100	0.87	410.000	
80	0.57	626,000	
60	0.35	1.020.000	
40	0.17	2.100.000	
20	0,05	7.140.000	
10	0.014	25 490 000	



Suponiendo que las mayores partículas de carbón sean de 100 a 120 micras, la densidad térmica de los hornos rotativos estará comprendida entre las 300.000 y las 400.000 kcal.h<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>, lo que concuerda con los valores que fueron dados por Anselm.

Según dicho autor, la densidad térmica se mantiene igual para todos los tamaños de hornos, jugando un importante papel el calentamiento del aire secundario. Así, se tiene:

1) Consumo de calor: 2.000 kcal/kg.

Temperatura del aire secundario: 720°C. Densidad térmico: 240.000 kcal. h<sup>-1</sup>. m<sup>-3</sup>.

2) Consumo de calor: 1.500 kcal/kg.

Temperatura del aire secundario: 550°C. Densidad térmica: 310.000 kcal. h<sup>-1</sup>. m<sup>-2</sup>.

3) Consumo de calor: 1.000 kcal/kg.

Temperatura del aire secundario: 450°C. Densidad térmica: 340.000 kcal.h-1.m-3.

No quiere esto decir que sea imposible alcanzar una mayor concentración térmica. Forzando un horno hemos sobrepasado las  $500.000 \text{ kcal} \cdot \text{h}^{-2} \cdot \text{m}^{-2}$ , utilizando fuel-oil como combustible; pero, desde luego, la duración de los revestimientos refractarios en la zona de cocción ha acusado la sobrecarga.

Con la densidad térmica se relaciona el flujo de calor, que se define por:

$$\Phi = \frac{Q}{S} = \frac{4 \cdot 10^{3} PC}{24\pi D^{2}} = \frac{10^{3} PC}{6\pi D^{2}}$$
 [35]

o bien:

$$\Phi = 4\mathbf{D}q_{\tau} \tag{36}$$

Si admitimos una densidad térmica  $q_v$  constante, según [31], la producción P será una función directa del cubo del diámetro D, luego el flujo térmico aumentará proporcionalmente al diámetro o a la raiz cúbica de la producción.

Labahn nos presenta, como ejemplos, los siguientes flujos:

- Producción: 300 t/día. Consumo de calor: 1.450 kcal/kg. Flujo de calor: 3.000.000 kcal. h<sup>-1</sup>. m<sup>-2</sup>.
- Producción: 300 t/día. Consumo de calor: 1.250 kcal/kg. Flujo de calor: 2.400.000 kcal, h<sup>-2</sup>, m<sup>-2</sup>.
- Producción: 300 t/día. Consumo de calor: 900 kcal/kg. Flujo de calor: 2.200.000 kcal. h<sup>-1</sup>. m<sup>-2</sup>.

Para 600 t/día de producción y a igualdad de consumos de calor los flujos pasan a ser: 3.500.000, 2.900.000 y 2.700.000 kcal. h<sup>-1</sup>. m<sup>-2</sup>. También hemos alcanzado mayores flujos de calor, próximos a 4.500.000 kcal. h<sup>-1</sup>. m<sup>-2</sup>, desde luego quemando fuel oil, combustible, que según se dijo, puede proporcionar una alta densidad térmica. Porque, según López Peciña, siendo constante la velocidad de circulación de los gases en los hornos rotativos, el mejor combustible será aquel que pueda transportar una mayor cantidad de calor en un menor volumen de gases. Y nuevamente llegamos a la conclusión de que un combustible será o no utilizable en un horno determinado según pueda proporcionar el flujo de calor mínimo establecido en su caso.

# 9.4. Transmisión del calor

Enfocando debidamente el problema, podremos decir que no basta producir en el interior de un horno la cantidad de calor necesaria para la producción del clínker; es necesario, además, asegurar la transmisión del calor de la llama al material. Esta transmisión se efectúa por radiación y por convección.

El calor transmitido por convección es función de la diferencia de temperaturas:

$$Q_c = \alpha(T_a - T_b) \text{ keal. h}^{-1}, m^{-2}$$
 [37]

mientras que el calor radiado es proporcional a la cuarta potencia de las temperaturas absolutas:

$$Q_r = \sigma \epsilon (T_{n^4} - T_{b^4}) \text{ kcal. } h^{-1} \cdot m^{-2}$$
 [38]

donde:

- $\sigma \equiv \text{Constante}$  de Steffan, que vale: 5,03  $\times$  10-8 kcal , h-1 , m-2 , g-1,
- e = Factor de emisión.
- α = Coeficiente de convección.

Estas dos expresiones nos indican que la cantidad de calor radiado será muy superior a la cantidad transmitida por convección cuando las temperaturas sean muy elevadas y asimismo sea grande la diferencia existente entre las temperaturas de la llama y del material.

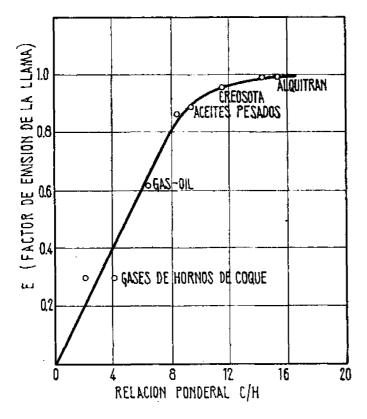


Fig. 29.—Factor de emisión en función del contenido de carbono.

Tiene mucha importancia el valor del factor de emisión e que vale:

$$\epsilon = l - e^{-kt}$$

siendo: k el coeficiente de absorción y l el espesor del flujo gaseoso.

Como se sabe, Folliot calculó los coeficientes de absorción y de emisión—encontrando que dependían del tamaño de las partículas emisivas—y también consiguió medir dichos coeficientes en las condiciones reinantes en los hornos rotativos:

•	K (	€
Calculado para $d_n = 50 \mu \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots$	0,43	0,35
Medido	1,72	0,82

Admira el alto valor del factor de emisión práctico, muy superior al teórico. Folliot, y otros autores, creen que este aumento se debe a la formación de partículas de coque extremadamente finas, del orden de las 0,05 micras, así como a la presencia de las partículas sólidas incandescentes e incombustibles debidas a las cenizas.

No obstante, en la llama de los combustibles líquidos, donde no se cuenta con las cenizas, Thring ha medido elevados factores de emisión, aumentando con la proporción relativa de carbono (fig. 29), acercándose a la unidad cuando la relación ponderal C/H es superior a 10, o sea, para contenidos de carbono mayores que 90 %.

Como sea que, en general, se queman en los hornos de cemento combustibles con más de 90 % de carbono, podremos obtener un buen factor de emisión si procuramos que la combustión se efectúe dando un alto grado de disociación de los hidrocarburos, con liberación de carbono elemental. Y esto, según dijimos, se logra reduciendo el poder comburente del aire primario.

Pero el calor radiado también depende de la cuarta potencia de la temperatura absoluta y ésta se eleva bastante cuando se aumenta el poder comburente del aire de inyección.

De estas dos condiciones opuestas resultarán dos modalidades de llamas:

- I) Llamas largas, brillantes y templadas.
- II) Llamas cortas, incoloras y calientes.

En una llama cualquiera, el factor de emisión varía en cada punto del chorro incandescente, como varía también la concentración de particulas de carbono, alcanzando el máximo a 1/3 de la longitud total. El máximo de temperatura aparece más allá del máximo factor de emisión. Este disminuye en función inversa al máximo de temperatura.

Planteado el dilema, parece que no sepamos para qué tipo de llama inclinar nuestras preferencias. Diremos que no hay que exagerar la tendencia para una llama luminosa y radiante a base de poco aire de inyección. La experiencia demuestra que, al disminuir la cantidad de aire primario, también disminuyen la energia transmitida al material y la producción del horno.

Baouman hizo notar que el coeficiente de utilización del calor, en la zona de cocción, es muy bajo, apenas un  $5\pm0.5\%$  de la enorme cantidad desarrollada, por lo que es necesario producir muchas calorías y a muy alta temperatura. Anselm indicó que podía intensificarse la combustión, aumentando la temperatura y acortando la llama, creando una mayor turbulencia mediante quemadores de construcción apropiada. También para Simon importa mucho la obtención de una llama corta, principalmente para la reducción del consumo de calor y de la pérdida de polvo. Momot concuerda en que la llama debe ser corta y caliente, siendo recomendable elevar la temperatura a un máximo compatible con la seguridad del revestimiento.

Para Folliot hay que contar con otros medios de transmisión del calor además de los ya clásicos, radiación y convección, señalando la llamada, por Vernon, convección viva. En el horno de cemento, cuando la llama se vuelve luminosa, la actividad de la combustión disminuye y la energía aportada por roce decrece. Con una llama cálida y transparente, a una velocidad de 1,5 m/s y a una temperatura de 1.700°C se puede transmitir, por convección, unas 100 kcal/h<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup> grado<sup>-1</sup>, coeficiente muy superior al que se obtiene por el cálculo clásico.

En este orden de ideas, y para aumentar la cantidad de calor transmitido por convección, se proponen modelos no convencionales de quemadores, como uno patentado por Nagel, que produce una llama aplastada y paralela al lecho del material. Con esta llama se consigue transmitir a la carga un 50 % del calor emitido, obteniendose un aumento de la producción de 15 % con un 10 % de disminución en el consumo de combustible.

#### 10. La combustión de carbones pobres

#### 10.1. Influencia de las cenizas

Dijimos que el factor de emisión medido en las llamas de carbón pulverizado se aproxima a 0,9. Un factor tan elevado se relaciona con la existencia de partículas sólidas—carbón y cenizas—en el seno de la llama. La radiación debida al polvo es considerable, desde luego muy superior a la radiación gaseosa, pero la radiación total no es la suma algebraica de una y otra, porque, como se ha dicho, existe una absorción parcial de la una por la otra.

Se comprende, pues, que el aprovechamiento del poder radiante de las cenizas candentes sea un medio muy adecuado de obtener una llama caliente—quemando el combustible con aire primario de alto poder comburente—y, a la vez luminosa, por efecto de las particulas sólidas.

La eficacia de la presencia de las cenizas en las llamas se pone de manifiesto en los casos de combustión mixta. Azbe relató el caso de un horno que habitualmente quemaba gas natural y vio aumentado su rendimiento cuando se mezcló carbón pulverizado con el aire primario. Algo parecido sucede cuando se trabaja quemando fuel-oil y polvo de carbón en conjunto. Con la adición de carbón se nota una inmediata mejora en la calidad del clínker obtenida, lo que se demuestra por el aumento del peso por litro, la uniformidad de la granulación, la disminución del consumo específico de calor y aun por las mejores resistencias mecánicas del cemento obtenido.

Está ciaro que la influencia de las cenizas no se limita a sus efectos en la transmisión del calor. Se admite que, en una zona del horno determinada por su peso y por la velocidad de arrastre, las cenizas caen sobre el crudo y se incorporan al material alterando la composición primitiva. En qué medida se incorporan las cenizas al clínker obtenido es asunto que ha sido muy debatido, tal vez desde la primera vez en que se comenzó a quemar carbón pulverizado en los hornos rotativos.

Lhopitallier y James, examinando al microscopio el clínker obtenido con carbones altos en cenizas, encontraron importantes zonas de silicato bicálcico, en forma de arco de círculo, características de la formación de una capa envolvente, con menos cal, producida por el efecto de la caída de las cenizas sobre los granos de clínker. Cuando los combustibles eran de muy baja calidad, con 50 % de cenizas y se trabajaba-por via seca, la mezcla del crudo con las cenizas era bastante intima, merced al estado pulverulento de ambos materiales. Trabajando por vía húmeda, por el contrario, la heterogeneidad se manifestaba mejor, con la aparición de zonas bicálcicas y óxidos de hierro reducidos. Con la misma finalidad, Calleja, en su contribución al estudio de la estructura del clínker, consiguió determinar el efecto de las cenizas sobre algunos clínkeres. Las cenizas que se depositan sobre el clínker pueden contener algo de carbono sin quemar, el cual provoca la reducción del óxido férrico. La sílice, abundante en las cenizas, por su parte, se difunde hacia el interior de los gránulos, en busca de los puntos donde hay un exceso de cal

Como sea que el clínker obtenido tiene una composición que no se corresponde con el material crudo entrado en el horno, se atribuye, por muchos autores, esta diferencia al resultado de la incorporación de las cenizas. Gascuñana consideró que las cenizas eran uno entre varios factores desdosificadores. En

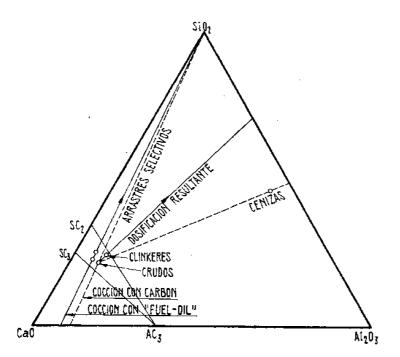


Fig. 30.—Desdosificación debida a las cenizas y s la segregación del crudo.

un anterior trabajo nuestro demostramos que la desdosificación también aparece cuando se queman combustibles sin cenizas. Debía existir algún otro, y bastante importante, factor desdosificador, y citamos como tal la que denominamos segregación del crudo (fig. 30).

Sin embargo, en los hornos modernos, equipados con cruces y cadenas, o con parrillas de calcinación, o con permutadores de suspensión en los gases, o con electrofiltros que devuelven la casi totalidad del polvo al circuito de alimentación, o que inyectan el polvo recuperado junto con el combustible y el aire primario, hay que contar con una casi total incorporación de las cenizas y también con una completa neutralización de los arrastres selectivos. En estos casos, la desdosificación producida por las cenizas adquiere todo su valor y plantea un problema relativamente fácil que tan solamente exige una mayor vigilancia por parte del laboratorio, de modo que se venga a compensar con un crudo sobresaturado de cal la aportación silicoaluminosa de las cenizas.

Es interesante señalar que Alegre, siguiendo a Hendrickx, recomienda mezclar al carbón la cal necesaria para saturar a las cenizas. Según sus cálculos, para un carbón con 20 % de cenizas, la adición es de 3 a 4 % sobre el peso del carbón. Y no hay que extrañar la adición de materias no combustibles al carbón, porque en las grandes unidades es costumbre cada vez más extendida la recirculación del polvo a través del inyector de aire primario. Esta recirculación se ha visto aplicada en Bélgica, Holanda, Suiza, Francia y el Canadá. En este último país la cantidad de polvo inyectado equivale a 14 % del clínker producido, según datos de una fábrica de reciente instalación en las proximidades de Quebec.

#### 10.2. La calidad de los carbones

Y, como era de esperar, el tema nos conduce nuevamente al problema de la calidad de los carbones. Recordamos un párrafo afortunado de Serratosa, "Las fábricas de cemento están conceptuadas como fábricas que pueden emplear los peores combustibles para su desenvolvimiento. En algunas ocasiones he tenido que oir—por personas que se dicen enteradas—que el contenido de cenizas del carbón era interesante, pues con ellas se aumentaba la producción al incorporarse al clínker." Objetaba Serratosa que, si considerábamos a las cenizas como una materia prima, su precio era demasiado caro para los fabricantes de cemento.

El problema, en términos tan concretos como correctos, fue planteado en 1944 por Ferrer-Vidal, bajo el siguiente enunciado: "Aprovechamiento de carbones de baja calidad en los hornos rotatorios de las fábricas de cemento sin perjuicio de la calidad del clínker producido." O sea, se trata de un aprovechamiento, el cual tan sólo será interesante si no causa perjuicios en la calidad del producto.

Con hispano arrojo se nos presentó López Peciña "un poco en defensa de los tan vilipendiados carbones de baja calidad... por ser dichos carbones más baratos que los carbones buenos, arriesgándome a proclamar que la combustión de un carbón con 50 % de cenizas, con unos 4.000 kcal/kg proporciona una temperatura tan elevada como un fuel-oil de 10.000 kcal/kg." No nos place contrariar el sano optimismo, motor que impulsa las más arriesgadas empresas. Apenas tenemos que hacer notar que las cenizas no son un elemento absolutamente inerte. Su simple calentamiento, a 1.500°C, admitiendo un calor específico

medio de 0,26 kcal/kg $^{-1}$ /°C $^{-1}$ , para un 50 % de cenizas, absorbe 195 kcal/kg, de modo que las supuestas 4.000 se convierten en 3.805 kcal/kg, esto, si las cenizas no contienen carbonatos, porque si los contienen, y tenemos en cuenta su calor de descarbonatación, la reducción es todavía menor y es dudoso que el calor restante sea capaz de producir una temperatura tan elevada como un fuel-oil de 10.000 kcal/kg.

Anselm, con su experiencia, se mostraba más cauteloso al recomendar que no se empleasen carbones con menos de 5.000 kcal/kg si se quería obtener un clínker bien cocido. Constató, además, que el consumo de calor por tonelada de clínker, aumentaba al bajar el poder calorífico inferior del combustible.

Además de los ya citados, existen otros inconvenientes que dificultan el empleo de carbones de baja calidad. Folliot hizo notar que antes del último conflicto mundial raramente se utilizaban carbones con más de 25 % de cenizas. En Francia el promedio de cenizas era de 15 %. Al finalizar la última guerra se trabajaba normalmente con carbones conteniendo 30 % de cenizas. Ahora bien, la mayor parte de las instalaciones estaban previstas para carbones con 7.000 kcal/kg. Es fácil de comprender el agobio con que se vieron estas instalaciones cuando tuvieron que preparar una cantidad equivalente de carbón pulverizado, con 5.000 kcal/kg, o menos, y, en general, más difícil de moler que las buenas hullas.

Como quiera que lo más costoso en nuestro ánimo siempre es reducir la producción, cuando nos vemos en el agobio mencionado, lo que por lo menos intentamos, es moler la totalidad del carbón necesario, sin reparar mucho en la finura y en la humedad residual, con lo cual introducimos en el horno un combustible pobre y deficientemente preparado que puede ser un importante factor de muchas perturbaciones

El problema de la utilización de los combustibles pobres puede resolverse con mayores probabilidades de éxito cuando se posee una instalación de molienda y secado dimensionada con algún exceso,

#### 10.3. Molienda conjunta del carbón y el crudo

Sabemos que en 1943 Gascuñana e Ynzenga propugnaron por la molienda conjunta de carbones pobres con el crudo. El garbón mezclado con la pasta reemplazaba parcialmente al combustible inyectado. Mucho más recientemente, hemos visto cómo Folliot apoyaba el mismo sistema.

Pensamos que esta solución puede ser interesante cuando se trabaja por vía húmeda, en hornos largos, o con calderas de recuperación de calor. Por vía seca, no creemos que sea tan práctico. Nos exponemos que el combustible arda en zonas donde no nos interesa tener altas temperaturas. Y no digamos lo que podria suceder en los hornos con parrillas de calcinación o permutadores de ciclones...

Así, pues, nos limitamos a dar fe de la existencia del procedimiento, proclamando, sinceramente, que desconocemos sus resultados.

#### 10.4. Combustión conjunta de carbón y "fuel-oil"

Otra cosa diremos respecto a la combustión conjunta de carbón pulverizado y aceites pesados. El problema, y su solución, fue debidamente expuesto por Serratosa en los coloquios de 1957. Sus ventajas son muchas. Como sea que la mezcla puede efectuarse en proporciones de una variabilidad casi ilimitada, se puede afirmar que dejan de existir carbones pobres desde que se mezclen con la proporción apropiada de combustible líquido. La solución, además, no está sujeta ni a tipos de horno ni a sistemas de fabricación. Sirve para la vía seca, para la vía húmeda, para hornos con parrillas o con permutadores de calor.

Pero el resultado más sensacional de la combustión mixta, no es tan sólo el haber resuelto el problema de los combustibles pobres, sino el haber mejorado las condiciones de la combustión en los hornos donde antes solamente se quemaban combustibles líquidos.

#### 10.5. Perturbaciones atribuídas a los carbones pobres

No podemos concluir este trabajo sin referirnos, siquiera sea tangencialmente, a las perturbaciones de la marcha de los hornos rotativos que se atribuyen a los carbones pobres. Entre estas perturbaciones, la formación de anillos es la más importante.

Aquí nos tenemos que referir a un estudio publicado hace cinco años: "Formación y destrucción de anillos en los hornos rotativos para cemento Portland", en el cual tratamos del problema en toda su amplitud. Entre las causas de formación de anillos dependientes de la combustión citábamos:

- a) Composición química de los carbones (cenizas).
- b) Poder calorifico del combustible.
- c) Grado de finura de los carbones.
- d) Proporción relativa del aire utilizado.
- e) Mezcla del combustible con el comburente.

De estas cinco causas tan solamente las dos primeras inciden sobre la calidad de los carbones. La tercera causa se atribuye a una molienda más o menos defectuosa. Las dos últimas dependen del aire que interviene en la combustión. En estas dos últimas se da mayor importancia a la forma de efectuar la combustión que a la calidad del combustible. O sea, con un buen combustible, mal quemado, también se pueden formar anillos, como sucede en los hornos donde se quema exclusivamente fuel-oil.

La consecuencia recíproca es que no deben formarse inevitablemente anillos en los hornos rotativos cuando en ellos quemamos carbones de baja calidad si conseguimos que éstos quemen completa y perfectamente.

La formación de anillos de cenizas se puede explicar fácilmente: Al final de la zona de cocción, en un punto donde el chorro de inyección ya ha perdido parte de su velocidad inicial, y donde la casi tota-lidad del carbono ya ha sido quemada, las cenizas precipitan en fina lluvia sobre el material. Siendo, en general, bastante más fusibles que el crudo de cemento Portland, forman una cierta cantidad de líquido sobre el cual se cuelan y quedan retenidas porciones del crudo que va llegando. Puede que el antilo, en su hacer y deshacer, llegue a una situación estacionaria, a partir de la cual se mantenga sin aumentar ni llegar a perturbar grandemente la marcha del horno. Es un caso bastante frecuente ver funcionar hornos rotativos con un pequeño antillo a la entrada de la zona de cocción. Pero también puede suceder nornos rotativos con un pequeno antito a la entrada de la zona de cocción. Pero tambien puede suceder que el anillo retenga cantidades de crudo cada vez mayores, hasta perturbar seriamente la continuidad del trabajo. Llegado este momento, hay que destruirlo, sea como sea, a lanzadas o a tiros, según recomiendan los más violentos. A fuego iento según pensamos nosotros. Pero la mejor forma de combatir los anillos, en todos los casos, es evitar que se formen. No se formarán anillos de cenizas si éstas caen en un punto del horno donde no haya temperatura bastante para ocasionar su fusión. Esto se consigue aumentando, a la vez, la velocidad de inyección del aire primario, y la velocidad de circulación del flujo gaseoso que atraviesa el horno, o sea, abriendo el registro.

Tal vez el peor inconveniente que en nuestro entender tienen los carbones pobres, es el formar una nube oscura ante el mechero, que impide ver lo que pasa en el interior del horno más allá del punto donde comienza la llama. En este aspecto, la combustión de los derivados del petróleo es francamente superior, puesto que la tendencia a formación de anillos es notada—muchas veces—a partir de los primeros momentos, lo que nos permite maniobrar a tiempo. Por eso resulta recomendable la combustión mixta. En un momento dado, al tener la menor duda sobre la marcha del horno, nada nos impide suspendo de la composito de la marcha del horno, nada nos impides suspendo de la composito de la marcha del horno, nada nos impides suspendo de la composito de la marcha del horno, nada nos impides suspendo de la composito de la marcha del horno, nada nos impides suspendo de la composito pender momentáneamente la inyección de carbón pulverizado, quemando solamente fuel-oil hasta conse-guir una buena visibilidad en el interior del horno. Y si comprobamos que se está formando un anillo, puede ser que nos convenga utilizar temporalmente tan sólo combustibles liquidos, por ser éstos más fácilmente maniobrables y con una llama más prolongada nos permitan destruir, sin mayores compli-caciones, el anillo en formación por fusión lenta.

Y aquí vamos a poner punto final a este tema, que apenas hemos tratado en sus múltiples aspectos r aqui vamos a poner panto inia a este tema, que apenas nemos tratado en sus intidiples aspectos técnicos, evitando la parte económica, en la cual reside su verdadero talón de Aquiles. Porque es por imperativos económicos—de interés particular o nacional—que nos vemos forzados a emplear ciertos combustibles por los que tenemos muy pocas simpatías. Y, cuando esto sucede, no hay más remedio que seguir adelante con lo que nos dan para quemar y procurar salir victoriosos de la batalla sin gloria ni laureles que es nuestro diario quehacer, porque, a fin de cuentas, y como dice el refrán: "la habilidad del barbero es sacar patilla donde no hay pelo".

# bibliografía

- ALEGRE, R.: Formation et supression des anneaux de cendres dans les jours rotatifs à ciment. (Formación y destrucción de anillos de cenizas en los hornos rotativos de cemento). "Revue des Matériaux", núm. 509, febrero 1958, pág. 42.

- ANSELM, G.: La fabricación del cemento. Ediciones Asland. Barcelona, 1944, pág. 39.

   Eliminación del polvo. La técnica de la molienda. I. T. C. C., Monografía núm. 115. Madrid, julio 1952.

   Hornos verticales de cemento. Hornos rotatorios. I. T. C. C., Monografía núm. 116. Madrid, julio 1952.

   Calculs thermiques relatifs aux jours à ciment, à chaux, à magnesie et à dolomie. (Cálculos térmicos relativos de la complexa a los hornos de cemento, de cal, de magnesia y de dolomia). "Revue des Matériaux", núm. 447, pág. 325 (1952).
- L'influence du combustible sur la cuisson du ciment. (Influencia del combustible en la cocción del cemento.) "Revue des Matériaux", núm. 465, junio 1954, pág. 159.
- Anselm, G., y Fritsch, W. H.: Der Drehofen. Probleme der Kohlen staubjeuerung. (El horno rotativo. Problemas del calentamiento con carbón pulverizado). "Zement-Kalk-Gips", octubre 1954, núm. 5 (Número especial).
- A. S. T. M.: Compilation of Standards on Coal and Coke. (Recopllación de normas sobre carbón y coque). "American Society for Testing Materials", Philadelphia, Pa.

  Balzola, M., y Salis, M.: Comité de Normas alemán DIN. Ensayo de Combustibles. Bilbao, 1941.
- BAOUMAN, A.: Conduite du feu dans les fours rotatifs à ciment. (Conducción del fuego en los hornos rotativos de
- cemento). "Revue des Matériaux", núm. 427, pág. 119.

   Produits réfractaires, croûtes, anneaux, boules. (Productos refractarios, costras, anillos y bolas). "Revue des Matériaux", núms. 457, 58, 59 (1953).

  BLANC, E. C.: Le Ciment Portland. (El Cemento Portland). Cap. XI, págs. 236-260. Béranger, Paris y Liege, 1927.

  BLEINTREU, H.: Le charbon pulvérisé, le poussier de charbon et leurs applications. (El carbón pulverisado, el polvo
- de carbón y sus aplicaciones). Dunod, Edit. París, 1932.
- BODMER A., y Nisolle, L.: Le Chauffage au Charbon Pulvérisé. (El calentamiento con carbón pulverizado). Dunod, Paris, 1933.
- BOMKE, K.: Kohlen und Zement. (Carbón y Cemento). "Zement-Kalk-Gips", 1958, núm. 6 (Número especial).
- CLAUSEN, C. F.: Aspect actuel de l'industrie cimentière Nord-Americaine. (Aspecto actual de la industria cementera norteamericana). "Revue des Matériaux", núm. 597, pág. 349.
- Connform, R. M., y Lee, E. R.— Firing kilns with fluid petroleum coke. (Combustion en los hornos con coque de petróleo fluido). "Rock Products", noviembre 1955.

  Dussossov, P.: Carbones pobres, Resumen sobre los diferentes problemas relacionados con los anillos. "Ultimos Avances", núm. 92, pág. 29.

- Ferrer Maluquer, J. M.: Experiencias sobre la fabricación de cemento Portland con fuel-oil nacional como combustible de horno. "Cemento-Hormigón", núm. 235, octubre 1953, págs. 322-26.
- FERRER-VIDAL, J.: Termotecnia en la Industria del cemento. "E. E. I. I.", Madrid, 1944.
- Aprovechamiento de carbones de baja calidad en los hornos rotatorios de las fábricas de cemento, sin perjuicio de la calidad del clinker producido. "Cemento-Hormigón", núm. 121, abril 1944, pág. 79.
- FONRODONA, J.: Empleo del fuel-oil en la fabricación de cemento. I. T. C. C., Monografía núm. 156, 1955.
- FOLLIOT, A.: Les études sur la flamme et le four rotatif à ciment. (Los estudios sobre las llamas y el horno rotativo de cemento). "Revue des Matériaux", núm. 459, diciembre 1953, pág. 329.

  La cuisson du ciment au four rotatif. (La cocción de cemento en el horno rotativo). "Revue des Matériaux", nú-
- mero 482-483, págs. 84-87.

  Transmisión del calor en el horno rotativo para cemento. "Ultimos Avances", núm. 83, septiembre-octubre 1957.
- Estado de los estudios experimentales sobre la llama. Posible utilización de los productos carboníferos de baja
- calidad en la preparación de la materia prima. "Ultimos Avances", núm. 91, enero-febrero 1959. FOLLYE DE JOUX, E. de la: Combustibles et combustion. (Combustibles y combustion). "Revue des Matériaux", número 306, marzo 1935, pág. 77.
- GASCUÑANA, C.: Lecciones sobre fabricación de cementos. Madrid, mayo 1942, pág. 122.
- Los carbones empleados en la cochura del cemento y su influencia sobre los resultados obtenidos. "Cemento-Hormigón", núm. 108, marzo 1943, pág. 56.
- El empleo de carbones bajos en volátiles para la cocción del clínker. "Cemento-Hormión", núm. 200, noviem-
- bre 1950, pág. 330. Guillon, H.: Utilización de combustibles pobres en la fabricación de cemento. "Ultimos Avances", núm. 90, noviembre-diciembre 1958.
- HARRINGTON, P. D.: Fuel economy. (Economía de combustibles). "Pit and Quarry", julio 1949, pág. 42.
- Instituto Portugues de Combustiveis: Carvões Portugueses. Lisboa, 1941.
- LA VELLE, M. J.: Oxygen enrichment of primary air can improve kiln production. (El enriquecimiento del aire primario con oxigeno puede mejorar la producción de los hornos. "Rock Products", marzo 1959, pág. 97.

  Lenhart, W. B.: Economia de combustible: Alimentación de hornos con antracita. "Cemento-Hormigón", núm. 198,
- septiembre 1950, pág. 271.
- LÓPEZ PECIÑA, D.: La combustión del carbón en los hornos de cemento. "Cemento-Hormigón", agosto a noviembre de 1952.
- LÓPEZ PECIÑA, D.: Los combustibles y la combustión en los hornos de cemento. "Ultimos Avances", núm. 82, julio-
- agosto 1957, pág. 10.

  MATOUSCHEK, F.: Mauvaise combustion: Anneaux de collage. (Mala combustión: Formación de anillos). "Revue des
- Materiaux", núm. 427, pág. 116.

  NORDBERG, B.: Swiss Engineers Design Cement Plant with Dust Return into Firing End of Kiln and Gravity Flow Packing. (Ingenieros suizos han proyectado una fábrica de cemento con retorno del polvo al quemador del horno y con ensacado por gravedad). "Rock Products", agosto 1955, pág. 87.
- PALOMAR LLOVET, P.: Un nuevo sistema para aumentar la capacidad de los hornos rotatorios. "Cemento-Hormigón", número 294, agosto 1958.
- ROCHA E MELO, J. O. da: Alguns aspectos da tecnica do fabrico de cimento Portland. "Técnica", núm. 238, pág. 190. Ruiz Castellanos, J. R.: Gráfico para interpretación de la combustión a partir del análisis de los gases en un horno de cemento. "Cemento-Hormigón", núm. 218, mayo 1952, pág. 162; junio 1952, pág. 198.
  Ruiz Monje, A.: Estudio termoquímico de la fabricación de clínker con carbón schilamns. "Cemento-Hormigón",
- número 124, julio 1944, pág. 219.

  Saji, Kenjiro: Turbulent Diffusion with gas and pulverized coal burners. (Difusión turbulenta en los quemadores con gas y carbón pulverizado). "Rock Products", agosto 1952, pág. 152.

  Serratosa Nadal, A.: Combustión conjunta de fuel-oil y carbón. "Ultimos Avances", núm. 82, pág. 24.
- SIMON, G.: Réflexions sur quelques types de flammes utilisées dans les fours rotatifs de cimenterie. (Reflexiones sobre algunos tipos de llamas empleados en los hornos rotativos de cemento). "Revue des Matériaux", número 485, febrero 1956, pág. 42.
- Spiers, H. M.: Technical Data on Fuel. (Datos técnicos de los combustibles). Londres, 1955.
- TEIXEIRA LOPES, A.: O cimento Portland. Lisboa, 1942, pág. 131.

  TOWNEND, D. T. A.: La combustion des combustibles solides et le but des recherches sur le rayonnement des flammes rélatives à la combustión du charbon pulverisé. (La combustión de los combustibles sólidos y la finalidad de las investigaciones sobre la radiación de las llamas de carbón pulverizado). "Revue des Matériaux", núm. 496, página 27, enero 1957. Virella, A.: Notas sobre la conducción de hornos rotativos para cemento Portland. "Cemento-Hormígón", febre-
- ro 1951 a mayo 1953, núms. 203 a 230.
- La segregación de los crudos de cemento Portland. Memoria 28.º Congreso Internacional de Química Industrial, I, pág. 719.
- Des irregularités observées dans la cuisson des clinkers à ciment Portland. (Irregularidades observadas en la cocción de los clínkeres de cemento Portland). "Revue des Matériaux", núm. 490-91, julio-agosto 1956, pag. 173.
- Formación y destrucción de anillos en los hornos rotativos para cemento Portland. I. T. C. C., Monografía número 162, Madrid, 1956.
- Empleo de aceites combustibles en los hornos rotativos. "Cemento-Hormigón", núms. 264 a 275, marzo 1956 a febrero 1957.
- Les gaz d'échappement des jours rotatifs chauffés au mazout. (Los gases de escape de los hornos rotativos calentados con aceites combustibles). "Revue des Matériaux", núm. 510, marzo 1958, pág. 57.
   El rendimiento de los hornos rotativos y la composición de los gases de escape. "Cemento-Hormigón", núme-
- ros 298 y 299, enero y febrero de 1959.
- YNZENGA, F.: Sobre la incorporación del Schlamms de Puertollano al crudo del cemento Portland por via húmeda. "Cemento-Hormigón", núm. 112, julio 1943, pág. 146.

Terminada la conferencia, los señores Sarabia, Fonrodona, García Gil, Calleja, Gascuñana y Uría, comentan y solicitan aclaraciones, sobre todo en lo que respecta a poder calorífico, temperatura de llama, medida de finura de carbones y tipo de encendido de los hornos.