

662.66 = 666.94.03 = 60

611 - 57

## carbones pobres resumen sobre los diferentes problemas relacionados con los anillos

conferencia pronunciada en el Instituto Técnico de la  
Construcción y del Cemento el 30 de Abril de 1959, por

P. DUSSOSSOY  
Ingeniero de Minas

### I. Longitud de la llama

La lucha contra los anillos plantea ante todo el problema de la extensión de la llama. Se habla mucho de longitud de llamas. Algunos hablan de llama larga y fría, o de llama caliente y corta.

En realidad, el problema nos parece muy complejo para poderlo encerrar en una noción tan simple.

Algunos cálculos que hacen intervenir la extensión de la zona de combustión y la velocidad de los gases proporcional a su temperatura absoluta, nos han demostrado que, con frecuencia, era imposible el determinar a priori si una llama iba a ser larga o corta.

Vamos a precisar primero algunas definiciones. La longitud de una llama puede ser la longitud de la parte que irradia.

También se puede convenir llamar así la longitud de la zona de combustión.

Finalmente, en el caso de la lucha contra los anillos la noción de longitud de llama tomará un sentido más general. Ella fijará la posición del punto en que el humo contenga todavía  $Q$  calorías o, lo que viene prácticamente a ser lo mismo, la posición de la materia que ha alcanzado un estado dado caracterizado en el diagrama  $Q(t)$  de la materia por  $Q$  calorías.

Recordemos primero, rápidamente, algunas nociones concernientes al diagrama  $Q(t)$ .

La cantidad de calor que hay que suministrar a una materia prima para transformarla en cemento está muy bien definida en las pérdidas. Encierra, en efecto, un cierto número de elementos fijos:

- calor que hay que suministrar a 1 t de materias secas para llevarla de  $0^\circ$  a  $800^\circ\text{C}$ ;
- calor de descarbonatación, que puede ser considerado como constante en primera aproximación;
- calor de recalentamiento del crudo descarbonatado de  $800^\circ$  a  $1.500^\circ\text{C}$ , etc...

y un cierto número de elementos variables cuyas variaciones de un crudo al otro no pueden ser despreciadas. Estos elementos son:

- el calor que hay que suministrar al agua contenida en la pasta;
- el calor de clinkerización, que puede variar muy sensiblemente con la composición del clinker;
- las pérdidas en las diversas zonas del horno;
- el calor del clinker recuperado en el enfriador.

Es fácil establecer ábacos que muestren la importancia de estos diversos elementos.

Frente a este diagrama, se puede de la misma manera establecer un diagrama de los humos. El establecimiento de éste ocasiona la aparición de la interacción de la

materia y de los humos. De hecho nos vemos conducidos a un ábaco conteniendo una familia de curvas, correspondiendo cada una de éstas a un consumo calorífico determinado. El problema se complica luego para la zona de secado, donde es necesario hacer una construcción gráfica para cada caso particular.

Partiendo de estos ábacos y conociendo el contenido de agua y el consumo calorífico, es fácil establecer el diagrama  $Q(t)$  de un horno determinado. Se superpone luego este diagrama con el de la materia, obteniéndose, de esta forma, una especie de balance cuantitativo de la marcha del horno.

Estos diagramas no tienen más que un valor cuantitativo, y vamos a ver que el diagrama real de los humos se desvía muy sensiblemente en la zona de las temperaturas altas.

El examen de estos diagramas nos enseña que, en un punto del horno, para un mismo estado de la materia, suponiendo pérdidas idénticas en la parte de arriba de este punto, el estado de los humos está definido por la cantidad de calor  $Q$  que éstos contienen, y también por su temperatura.

Si se comparan dos regímenes correspondientes a consumos caloríficos diferentes, por el mismo estado de la materia, se pueden tener valores de  $Q$  idénticos, pero, siendo diferente el volumen de los humos, la temperatura es también distinta.

El problema se complica en la parte baja del horno donde la combustión no ha terminado, es decir, donde es preciso distinguir en el calor de los humos dos partes: el calor latente ya desprendido (que tiene por efecto aumentar la temperatura de los humos) y el calor potencial que queda por exhalar. La primera es la que interviene en los intercambios.

El diagrama que hemos establecido puramente teórico no tiene en cuenta más que el calor total.

En realidad, el establecimiento del diagrama  $Q(x)$ , que da la cantidad de calor de los humos en función de su posición en el horno, nos conduce a la noción de longitud de llama.

La longitud de una llama puede expresarse por una integral:

$$\int V dz$$

donde:  $z$  representa el tiempo y  $V$  la velocidad, en segundos, después de empezar la combustión.

Estando fijado el gasto de humos en peso por el consumo calorífico y la producción del horno,  $V$  y  $z$  son funciones de la temperatura.

Conocer exactamente estas funciones, es conocer la función  $Q(x)$  que da el estado de la materia en cada punto de abscisa  $x$  del horno.

Es, prácticamente, resolver el problema más importante del horno rotativo, el de los intercambios en todos los cortes del horno de espesor  $dx$ .

No podemos más que limitarnos a abordar este problema estudiando ejemplos o casos limitados que podrán fijarnos el sentido de las variaciones a falta de poder valorar éstas.

La velocidad,  $V$ , de los gases se da en función del gasto,  $Q$ , de humos referido a  $0^{\circ}\text{C}$  y de la sección,  $S$ , por la expresión:

$$V = \frac{Q}{S}(1 + \alpha t).$$

En función del consumo,  $C$ , del peso,  $P$ , de clínker en  $\text{kg/hr}$ , y de la temperatura absoluta,  $T$ , de los gases, se puede escribir esta expresión bajo la forma:

$$V = \frac{1}{S} \frac{C}{900} \times \frac{T}{273} \times \frac{P}{3600} \text{ m/s.}$$

A título de ejemplo para un horno de 3,5 m de diámetro produciendo 720 t/día y consumiendo 1.350 calorías, se encuentra:

$$V = 0,0065 T^{\circ} \text{ m/s.}$$

Así se tiene una idea de esta velocidad para diversas temperaturas:

$t$	$1.200^{\circ}\text{C}$	$1.300^{\circ}\text{C}$	$1.400^{\circ}\text{C}$	$1.500^{\circ}\text{C}$
$T$	$1.473^{\circ}\text{C}$	$1.573^{\circ}\text{C}$	$1.673^{\circ}\text{C}$	$1.773^{\circ}\text{C}$
$V \text{ m/s}$	9,5	10,2	10,8	11,5

Esta expresión no tiene en cuenta la aportación de  $\text{CO}_2$  de la descarbonatación. Para tener cuenta de ello habría que reemplazar

$$\frac{C}{900} \times \frac{C}{900} + 0,268.$$

Ahora vamos a considerar en la llama dos partes distintas:

- la zona de combustión o llama propiamente dicha;
- la zona de los humos, donde la combustión casi está terminada.

### 1.º Zona de combustión

Admitiremos para simplificar nuestros cálculos que la temperatura quede sensiblemente constante en esta zona, es decir, que la velocidad de los gases permanezca constante. En este caso podemos expresar la longitud de esta zona por la sencilla expresión:

$$L = V z,$$

donde:  $V$  se determina fácilmente en función de la temperatura como ya hemos visto y, para  $z$  el problema es menos fácil.

Se han establecido unas fórmulas, a menudo complicadas, que tienen en cuenta una combustión sin renovación de aire o una combustión con renovación completa y constante del aire.

Estas fórmulas teóricas son:

$$z = k \frac{r^2}{\sqrt{T}},$$

en la cual:  $r$  es el radio de la partícula de combustible supuesta esférica; y  $T$ , la temperatura absoluta de la misma.

Adoptaremos aquí más bien la fórmula experimental dada por ROSIN y que considera que los granos no son esféricos:

$$z = 55 \times d^{1,8}$$

Para las partículas de 100 micras, o sea,

$$d = \frac{1}{10} \text{ mm}$$

se encuentra que  $z = 0,87$  segundos.

Estos resultados aplicados a los granos de  $100 \mu$  de diámetro nos permitirían pensar que, en nuestras llamas corrientes, el 80 % del carbón se quema en menos de 1 segundo.

Observando el cuadro que da la velocidad en función de la temperatura, se deduce que, para el horno considerado, la longitud de la zona de combustión sería de unos 10 metros; más allá, quedaría un porcentaje de producto inquemado del orden de 20 % que desaparecería progresivamente en una longitud proporcional al cuadrado del radio de las partículas.

Si comparamos ahora dos llamas que tengan el mismo gasto en peso, de sección igual, pero de temperaturas diferentes, el primer problema por resolver es el de determinar cual es la más larga, si la caliente o la fría. Si las finuras de los combustibles son idénticas, no se puede sacar una conclusión muy clara, porque sería necesario conocer la diferencia de temperatura entre los humos y las partículas de carbón. Por tanto, no podemos decir nada.

Por el contrario, si la llama caliente es debida a una finura mayor, es probable que la reducción del tiempo de combustión llevará ventaja sobre el factor temperatura, y la llama caliente en el combustible muy fino sería más corta que la llama fría.

### 2.º Zona de los humos

Consideremos la longitud  $L(T)$  de una llama hasta el punto en que los humos se hallan a una temperatura  $T$ .

Comparemos de nuevo la llama caliente  $L_1$  y la llama fría  $L_2$ .

Para comparar estas dos llamas, hay que añadir a la longitud,  $L_1$ , de la zona de combustión de la llama caliente, una cierta longitud que corresponda a la porción del horno donde los humos se enfrían de la

temperatura de la llama 1 a la de llama 2.

Este hecho tiende a dar para la llama caliente  $L_1(T)$  una longitud mayor, por lo menos, si las finuras de combustibles no son muy diferentes.

En un horno donde la llama es caliente, los circuitos se alejan.

En un horno muy enfriado, la llama se enfría mucho, los circuitos se aproximan, y se cuece en el borde de la tobera.

Ahora vamos a pasar revista a la influencia de algunos factores sobre la longitud de la llama.

### **Producción**

La longitud de la llama crece proporcionalmente a la producción. Los intercambios se intensifican en la zona central.

### **Consumo calorífico**

El aumento de velocidad de los humos debido al aumento de  $C$  en general está compensado por una disminución de temperatura.

Tomando un ejemplo:

$$C_1 = 1.350 \text{ calorías con } 250 \text{ calorías recuperadas en el enfriador,}$$

$$\text{y } C_2 = 1.450 \text{ calorías con } 150 \text{ calorías recuperadas en el enfriador (chimenea de equilibrio abierta).}$$

Se encuentra que es la temperatura la que lleva ventaja y la zona de combustión es más corta con la llama fría.

Si ahora se extiende la comparación hasta el límite superior de la zona de descarbonatación, un cálculo rápido, volviendo a los ábacos, demuestra que, en la parte alta de la zona de combustión, la velocidad es mayor para la llama fría, variando la desviación de 2% a 1,3% entre el principio y el fin de la zona de descarbonatación.

Debido a estas variaciones en sentido opuesto, la acción de la regulación del enfriador sobre la longitud de la llama es muy reducida. En realidad, no hemos po-

dido juzgar nunca su influencia sobre los anillos.

### **Aire primario**

Es el mismo problema que en el caso precedente, y no se puede sacar una conclusión muy clara.

### **Conclusión**

Si volvemos a la lucha contra los anillos, se plantea una primera pregunta ¿pasando un combustible, más pobre, que provoca la destrucción del anillo, se debe la acción a una fusión o a una dislocación por enfriamiento?

Pensamos más bien por experiencia que enfriamos así la zona del anillo. Pero esto es, sin duda, un caso particular, porque el producto pobre empleado es «schlamm» que se muele muy fácilmente. Se podría imaginar muy bien un resultado inverso.

Concluiremos, pues, con una declaración de modestia ante la ignorancia en la que nos encontramos en presencia de elementos de base de la conducción de nuestro horno tan importantes como puede ser la longitud de una llama.

## **II Emisión de polvo**

El polvo proviene de varias regiones del horno:

- 1.º la mayor parte procede del intercambiador de pasta (cadenas o calcinador).
- 2.º otra parte, viene de la zona de descarbonatación (es ésta la que aporta  $\text{CaO}$  Libre).
- 3.º otra parte, proviene del enfriador de clinker.
- 4.º y, finalmente, una parte está constituida por cenizas del combustible que han conseguido atravesar el conjunto de cadenas.

Se notará que las cenizas debido a su estructura flotante tienen tendencia a atravesar las cadenas más fácilmente que el

polvo de clínker o de crudo cuya masa específica es más elevada.

Hace algunos años hemos intentado evaluar la importancia del «recyclage» del polvo en las cadenas, basándonos en el análisis de las tomas de materia efectuadas en la parte de arriba y en la parte de abajo del conjunto de cadenas. Paralelamente, esto nos ha revelado la importancia de las cenizas que llegan hasta el conjunto de cadenas y las que son detenidas por él.

El arrastre del polvo en un horno obedece parcialmente a la ley de Stockes, es decir, que el polvo es arrastrado cuando su masa  $m$  es tal que, puesta accidentalmente en suspensión en los gases a una altura  $h$ , su velocidad de caída es lo suficientemente débil para que a la salida del horno este polvo esté todavía en suspensión en el gas. En realidad, la ley de Stockes no interviene en este fenómeno más que de una manera muy limitada, porque la caída de las partículas en suspensión está, por una parte, perturbada por un cierto movimiento de rotación de los gases y, por otra, se halla acelerada por los numerosos obstáculos que constituyen las cadenas y partículas muy gruesas, y sobre todo pastosas, que vuelven a caer a través de los humos.

En definitiva, una partícula puesta en suspensión en un punto tiene pocas probabilidades de alcanzar la salida del horno.

¿Cuál es la probabilidad para una partícula de atravesar el conjunto de cadenas sin detenerse?

Esta es la pregunta a la que hemos tratado de buscar, si no una respuesta exacta, por lo menos un orden de dimensión.

No les voy a detallar estos cálculos, más que solamente algunos elementos y algunos resultados.

Recordemos primero la ley de Stockes:

$$t = \frac{18 h \eta 10^8}{(\mu_p - \mu_g) g d^2},$$

en la cual:

$\eta$  = viscosidad del gas (en poises)

$\mu_p$  = densidad de la partícula  $\times 3$

$\mu_g$  = es despreciable al lado de  $\mu_p$

$g = 981 \text{ cm seg}^{-2}$

$d$  = diámetro medio de partícula (en micras)

$h$  = viene en cm.

La viscosidad dinámica  $\eta$  viene dada en función de la viscosidad a  $0^\circ\text{C}$  por la fórmula de Sutherland:

$$\eta T = \eta_0 \sqrt{\frac{T}{273^\circ}} \frac{1 + \frac{C}{273}}{1 + \frac{C}{T}}$$

El coeficiente  $C$  para los diversos gases de los humos vale:

CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
239	138	101	113	961

Han sido verificados hasta  $400^\circ\text{C}$ . No buscando una gran precisión, los admitiremos para mayores temperaturas.

Partiendo de estos coeficientes hemos establecido las viscosidades en diversas regiones del horno.

Aire a  $600^\circ\text{C}$  de la cabeza del horno:  $\eta = 391 \cdot 10^{-6}$  «poises».

Llama a  $1.500^\circ\text{C}$ , combustión al 1/3:  $\eta = 583 \cdot 10^{-6}$  «poises» (1/3 CO<sub>2</sub>, 2/3 O<sub>2</sub>, exceso de aire 1,1).

Llama  $1.500^\circ\text{C}$ , combustión completa antes de la adición CO<sub>2</sub> de descarbonatación:  $572 \cdot 10^{-6}$  «poises».

Después de la adición CO<sub>2</sub> de descarbonatación:  $573 \cdot 10^{-6}$  «poises».

Humos a  $1.000^\circ\text{C}$  a la entrada del conjunto de cadenas:  $471 \cdot 10^{-6}$  «poises».

Humos a  $600^\circ\text{C}$  en el centro del conjunto de cadenas con 1/2 H<sub>2</sub>O:  $418 \cdot 10^{-6}$  «poises».

Humos a  $200^\circ\text{C}$  con todo el agua desprendida:  $215 \cdot 10^{-6}$  «poises».

Con estos elementos hemos aplicado la ley de Stockes en varias regiones del horno.

Zona de cocción —  $1.500^{\circ}\text{C}$  —  $\eta_i = 580 \cdot 10^{-6}$

$$h = 150 \text{ cm}$$

$$t = \frac{53.200}{d^2}$$

Cálculo de  $d$  límite para alcanzar el conjunto de cadenas; el tiempo para alcanzarlo es del orden de 6 a 7 segundos.

Se encuentra  $d = 90 \mu$ .

Todas las partículas de clínker o de cenizas que alcanzan el conjunto de cadenas serían, así,  $< 90 \mu$ .

#### Zona de cadenas

Admitiendo una velocidad de los humos de alrededor de 10 m/s, una duración de trayecto de 3,5 segundos para atravesar el conjunto de cadenas, y una altura  $H$  de 2 metros, tenemos:

$$t = \frac{49.000}{d^2}$$

siendo  $d \approx 100 \mu$  y si se toma  $t = 5$  segundos; valor aumentado para tener en cuenta la disminución de viscosidad de los gases a la entrada del horno.

La experiencia ha confirmado estos resultados. Prácticamente todos los polvos recuperados por los filtros son  $< 100 \mu$ . Los rechazos sobre 4.900 mallas/cm<sup>2</sup> son nulos ó  $< 3$  ó  $4 \%$ .

Un cálculo análogo nos mostraría que el «recyclage» en las cadenas afecta de manera sensible las partículas comprendidas entre  $90 \mu$  y  $180 \mu$ . Estas últimas deberían emplear 1,5 segundos para caer, y, por tanto, recorrer una distancia máxima de 15 metros antes de caer.

Para completar nuestro estudio, hemos determinado además los elementos siguientes:

- 1) tonelaje de partículas de clínker o de cenizas detenidas por el conjunto

de cadenas. Se determina por el análisis de los gránulos en la parte de abajo.

- 2) tonelaje del clínker y cenizas que atraviesan el conjunto de cadenas y detenido por los filtros. Se determina por el análisis y pesado de los polvos.
- 3) tonelaje del crudo que atraviesa el conjunto de cadenas, determinado como en el anterior.
- 4) tonelaje del crudo detenido por el conjunto de cadenas y constituyendo el «recyclage» del crudo.

Esta es la incógnita que valoramos haciendo algunas hipótesis:

a) admitiremos que todas las partículas de igual dimensión tienen la misma probabilidad de salir del horno cuando están o son puestas en suspensión en la parte de abajo del conjunto de cadenas.

b) admitiremos que en la parte de abajo del conjunto de cadenas las partículas comprendidas entre  $90$  y  $180 \mu$  tienen la misma probabilidad de ser puestas en suspensión en los humos que las menores de  $90 \mu$  «recyclage».

Se puede entonces valorar el tonelaje de partículas entre  $90$  y  $180 \mu$  considerando el porcentaje respectivo de estas dimensiones de partículas y estudiando la granulometría de las muestras tomadas a la salida de las cadenas.

Hemos estudiado estos análisis en un diagrama triangular  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ .

Ahora les daremos algunos resultados referentes a varias series de ensayos (ver cuadro adjunto).

Se notará la diferencia de permeabilidad del conjunto de cadenas para el clínker y para las cenizas. Esto es consecuencia de la estructura esponjosa de las cenizas. Debido a su ligereza, tienden a seguir el filete gaseoso y a evitar la cadena que podría detenerlas.

Se concibe la influencia importante de este «recyclage», el cual nos aclara el mecanismo de la producción de polvo de un horno y ciertos fenómenos ligados a los

desbordamientos de pasta o al empleo de fluidificantes.

También nos muestra que en un horno rotativo todos los elementos son solidarios, y no se puede estudiar la llama sin pensar al mismo tiempo en el conjunto de cadenas.

Con sólo ser un elemento de la conducción del horno inadecuado, toda la marcha del horno se resiente de ello. La calidad del clínker no dependerá únicamente de la llama y del crudo, sino también del papel de pantalla desempeñado por las cadenas.

« RECYCLAGE »

	Ensayo n.º 1	Ensayo n.º 2	Ensayo n.º 3	Ensayo n.º 4	Ensayo n.º 5
Horno .....	2	2	1	2	1
Fluidificante .....	sin	con	con	con	sin
Producción de clinker del horno .....	560 t	560 t	420 t	560 t	420 t
<b>Tonelaje en suspensión en los humos por debajo de las cadenas:</b>					
Cenizas .....	11,5 t	12,3 t	14 t	11 t	14 t
Clínker .....	45,5 t	65,5 t	46 t	76 t	81 t
Crudo .....	175 t	360 t	240 t	360 t	370 t
Total .....	232 t	438 t	300 t	447 t	465 t
<b>Tonelaje retenido por las cadenas y «recyclage»:</b>					
Cenizas .....	7 t	9 t	11 t	7 t	9 t
Clínker .....	36 t	61 t	40,5 t	69 t	64 t
Crudo .....	152 t	345 t	223 t	340 t	325 t
Total .....	195 t	415 t	274,5 t	416 t	398 t
Tonelaje de polvos recuperados por el electrofiltro .....	29 t	19 t	22 t	27 t	64 t
Tonelaje supuesto perdido en la chimenea .....	3,5 t	3,5 t	3,5 t	3,5 t	3,5 t
Coefficiente de permeabilidad de las cadenas al clínker y adoptado para el crudo < 90 µ .....	20 %	6,9 %	12 %	9,2 %	21,3 %
Coefficiente de permeabilidad de las cadenas para las cenizas ..	39 %	26,8 %	19 %	36 %	36 %

OBSERVACIONES: Horno muy desreglado en el curso del ensayo.



« RECYCLAGE »

PRODUCCION.....	360 t	450 t	520 t	540 t	620 t
<b>«Recyclage»:</b>					
Crudo.....	121 t	145 t	192 t	220 t	239 t
Clinker.....	25 t	31 t	37 t	49 t	61 t
Cenizas.....	20 t	17 t	16 t	18 t	12 t
<b>Total.....</b>	<b>166 t</b>	<b>193 t</b>	<b>245 t</b>	<b>287 t</b>	<b>312 t</b>
Permeabilidad de las cadenas al clinker.....	21,6 %	25,8	(30)	37	26,3
Permeabilidad de las cadenas a las cenizas.....	30 %	41 %	39,6	40,2	40 %

### III Formación de costra

La formación de costra presenta analogías con el mecanismo de formación de anillos. La diferencia estribaba en la temperatura de aparición de los líquidos eutécticos.

Después del encendido, al ser llevado el refractario a una temperatura elevada en contacto con la llama, surgen combinaciones eutécticas cuando el refractario pasa bajo el talud de materia.

Generalmente, las combinaciones obtenidas no están en equilibrio ni con el refractario ni con la materia. Es suficiente mirar el diagrama para poder comprobar que la materia y el refractario deben estar separados por combinaciones intermedias (consideraremos el caso de los refractarios aluminosos, como el más corriente). Estas combinaciones en contacto con el ladrillo llevarán consigo la formación de mullita,  $A_3S_2$ , la cual aparece lentamente hacia  $1.000^\circ\text{C}$ ; luego, más rápidamente, a la formación del eutéctico  $A_3S_2 - CAS_2 - A$ , el cual aparece a  $1.512^\circ\text{C}$ , y en seguida y también muy rápidamente, al contacto de la materia con la aparición del eutéctico  $CAS_2 - C_3AS - A$  a una temperatura más baja,  $1.380^\circ\text{C}$ .

Este eutéctico aparece en cantidad más importante absorbiendo la alúmina del ladrillo, al mismo tiempo disuelve el  $CAS_2$  y el  $C_2AS$  de la costra que se halla en contacto con éste.

Esta disolución de la alúmina del ladrillo no cesa más que cuando la temperatura de la interfase ladrillo-costra llega a ser inferior a la temperatura del eutéctico  $CAS_2 - C_3AS - A$  (sería necesario tener en cuenta los otros óxidos, especialmente  $Fe_2O_3$ , que pueden disminuir esta temperatura).

Esto exige que la costra llegue a ser bastante espesa. Si ésta se forma mal, la disolución del ladrillo continúa.

Esta costra que se halla inmediatamente al contacto del ladrillo no es estable, reacciona sobre la materia, y aparecen los eutécticos  $C_3AS - CA - C_2S$  y  $C_2AS - C_3S_2 - C_2S$ . Estos no son estables y continúan reaccionando con la materia hasta que la combinación obtenida permanezca estable en presencia del  $C_3S$ , del  $C_2S$  y del  $C_3A$  del clinker. Este compuesto obtenido, y que constituye la masa de la costra, no es más que clinker rico en  $C_3S$ .

A continuación damos algunos análisis de costras obtenidos, dos a 5 metros y 7 metros de la descarga del horno:

	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$	CaO libre	Varios	Total	líquido a $1.450^\circ\text{C}$
Costra a 7 metros . . . . .	56	24,7	8,2	7,—	1,5	2,6	100	20 %
Costra a 5 metros región negra.	51,2	32,5	7,5	6,4	0,1	2,3	100	18,5
» amarilla.	32,—	42,2	10,7	7,4	4,8	2,9	100	23,5
» fundida.	58,6	25,5	7,3	5,5	0,2	2,9	100	17,5

Consideremos un elemento en la superficie de la costra. Éste tiene una composición representada por un punto del triángulo  $C_3S - C_2A - C_3A$  en la zona de cristalización primaria de la CaO libre.

De hecho este elemento estará constituido por una mezcla de líquido eutéctico  $C_3S - C_2S - C_3A$  que aparece a  $1.455^\circ\text{C}$  (haciendo abstracción de los elementos secundarios) y de varios sólidos:  $C_3S$ ,  $C_2S$  y  $C_3A$ .

Supondremos para la continuación de nuestro razonamiento que la temperatura es superior a  $1.455^\circ\text{C}$ .

Durante una vuelta de horno, este trozo de costra está sometido directamente al contacto de la llama que eleva su temperatura. Aparece una nueva cantidad de líquido y el punto representativo de este líquido se desplaza sobre la curva de separación de  $C_3S$  y  $C_2S$ . Si este calentamiento es brusco, este líquido puede segregarse y caer, y la formación de costra se reduce por fusión. La costra, calentada de esta manera, pasa bajo la materia. Entonces, hay que considerar varios casos:

1.º) La materia contiene menos líquido

que la costra porque es más refractaria o más fría. En este caso, hay solidificación de una parte del líquido de la costra y ésta tiende a aumentar.

- 2.º) La materia contiene más líquido que la costra porque es más fusible. En este caso, la costra tiende a licuarse cada vez más y ésta disminuye.

Este caso podría también producirse con una materia más refractaria, pero llevada a una temperatura más alta que la costra, debido a las reacciones exotérmicas de clinkerización.

Como conclusión, parece que, por regla general, se debe formar una costra mejor con un crudo más calcáreo.

Con este motivo, hemos observado que un horno que se obstruye, es decir, cuyos elementos arcillosos o cenizosos fusibles quedan retenidos en la parte de arriba de la zona, tiende a dar una buena costra.

No obstante, estos fenómenos son suficientemente complejos para que sea difícil dar una regla general, y podrían, probablemente, darme numerosos ejemplos en los que sucede lo contrario.

Se podrá notar, sin embargo, la influencia nefasta de las variaciones de llama que provocan el «descostrado», la influencia de los enfriamientos que hacen que la costra se desprenda poco a poco por transformación del  $C_2S \beta$  en  $C_2S \gamma$ .

¿Cuál puede ser la influencia del combustible en esta formación de costra?

Hemos visto que la formación de la costra resultaría de una especie de equilibrio entre los elementos siguientes:

- a) —calentamiento de la costra por la llama.  
—enfriamiento de esta costra pasando bajo el talud de materia, donde interviene la importancia del talud de materia.

Si el calentamiento es demasiado brusco o la costra insuficientemente enfriada, hay «descostrado».

- b) Composición de la costra y composición de la materia;

El factor principal parece ser la inten-

sidad del calentamiento por la llama. Esto querría decir que los factores más importantes serían:

- la finura del combustible
- la turbulencia de la llama
- la proporción en materias volátiles.

La proporción de cenizas no intervendría más que en la medida en que pudiese dar un combustible que ardiese difícilmente y provocar una mala cocción. Si la cocción se mantiene normal, las cenizas no deberían intervenir.

Hemos visto algunas fábricas en las cuales se utilizaban mezclas combustibles con más de 40 % de cenizas para hornos forzados. Además, a esta mezcla se le añadía polvo de recuperación de filtros.

Parece ser que un combustible —aunque sea muy cenizoso— puede dar una buena costra a condición de que esté molido lo suficientemente fino para que la cocción sea buena. En el caso de empleo de combustibles de mala calidad, conviene prestar mucha atención a la regularidad de la llama, es decir, a la mezcla de los combustibles. Esto nos parece que es el punto más importante para poder utilizar estos combustibles.

#### IV Calidad del clinker

El empleo de combustibles muy ricos en cenizas nos obliga, naturalmente, a realizar una corrección importante de la composición del crudo para tener en cuenta las cenizas incorporadas al clinker.

Las cenizas normales como tienen un  $\Delta bc$  superior a + 200, se concibe que esta corrección pueda ser importante.

Hemos visto que estas cenizas que se incorporan al crudo sobre toda la extensión del horno son un factor importante de heterogeneidad.

Se puede imaginar que su incorporación se hace tanto más regularmente cuanto más fina sea la materia. Se debería tener una mejor incorporación con la materia en vía seca que con un horno que dé en vía húmeda gruesos granulados de pasta.

Con un conjunto de cadenas que cumplan bien con su función de pantalla y cenizas molidas finamente, se puede hacer la

incorporación en gran parte en el conjunto de cadenas.

A título de ejemplo, hemos efectuado medidas sobre un horno que produce 620 toneladas de clínker.

De las 140 toneladas de combustible de 23 % de cenizas que producen 30 toneladas de cenizas, se recuperaban:

2,3 toneladas de cenizas en la recuperación de polvo.

1 tonelada se suponía perdida en la chimenea.

22 toneladas eran incorporadas al clínker, de las que 13 están detenidas en la zona y en la parte de arriba del conjunto de cadenas, y 9 toneladas están detenidas por el conjunto de cadenas y se vuelven a encontrar en el análisis de los granulados.

La diferencia, alrededor de unas 5 toneladas, representaría una desviación de régimen instantáneo en relación al régimen medio del horno o una fijación de cenizas sobre la formación de costra.

El fenómeno inverso se produciría en el caso de pérdida de revestimiento del horno.

El examen al microscopio permite estudiar la influencia de las cenizas sobre la formación del clínker. Se observará que en vía seca no se han visto nunca clínkeres con zonas bicálcicas importantes en forma de arco de círculo. Estas zonas se caracterizan por una envoltura cenizosa del clínker en el transcurso de su formación. Esto no se ha

observado nunca en vía seca, ni aun con combustibles muy ricos en cenizas. La mezcla de las cenizas y del crudo pulverizado parece hacerse de esta manera muy íntimamente.

En vía húmeda, por el contrario, se observan a menudo clínkeres heterogéneos que comprenden zonas bicálcicas de varios mm<sup>2</sup>.

Estas zonas bicálcicas corresponden a coloraciones amarillas del clínker, lo que se puede explicar debido a que las cenizas contendrían todavía, C, no quemado, que produciría una reducción parcial de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en donde se depositan.

El examen de los clínkeres muestra también que la corrección del crudo no puede ser jamás perfecta. Se hallan obligatoriamente, con los combustibles muy cenizosos, zonas de C<sub>3</sub>S conteniendo aún CaO libre debido a que están saturadas de cal; estas zonas tricálcicas están rodeadas de zonas bicálcicas que provienen de las cenizas. Por lo tanto se corre el riesgo de tener otra vez expansión, aun con una cocción intensa.

A pesar de estas dificultades, hay que reconocer que las cenizas se combinan fácilmente con el clínker. Toman el CaO necesario para su transformación:

— de la cal libre, por una parte,

— y, por otra parte, de la cal liberada por la retrogradación de C<sub>3</sub>S en C<sub>2</sub>S que las cenizas provocan. La sílice se difunde hasta el contacto CAL disponible. Lo contrario no es posible.