

sistemas de transmisión de calor para hornos de vía seca en la fabricación de cemento

J. RICHARD TONRY

(«Pit and Quarry», julio 1961, pág. 151; y agosto 1961, pág. 113.)

sinopsis

En los últimos años se han puesto en marcha numerosos sistemas para mejorar la transmisión de calor en los hornos de vía seca y, en consecuencia, el consumo de combustible en la industria del cemento. El objetivo principal ha sido el ahorro de combustible y la obtención de mayores velocidades de producción en comparación con los hornos horizontales normales. Estos sistemas pueden dividirse en dos grupos: (1) externos, donde fluyen en contracorriente sólidos y gases calientes, y (2) internos, con exposición de superficie y radiación de la misma como medio de transmisión de calor.

Esta tendencia a sistemas de este tipo puede compararse a la que hubo hace cuarenta años con las calderas de recuperación de calor en hornos de vía seca. El primer objetivo, tanto entonces como ahora, es la mejor utilización del calor en los gases de escape.

introducción

Durante muchos años predominaron en la industria del cemento los hornos de vía seca. Comparados con los hornos de hoy día eran unidades relativamente pequeñas. Trabajaban a elevada temperatura en los gases de escape y, para su tamaño, eran capaces de una velocidad de producción elevada.

Al elevarse el precio de los combustibles, la tendencia lógica era pensar en los medios de recuperación de las pérdidas de calor por las chimeneas.

La primer respuesta fueron las calderas de recuperación de calor, y, entonces, se instalaron muchos sistemas con la doble finalidad de engendrar energía y producir clínker. Las fábricas de hoy día no suelen requerir esta energía al montar nuevas instalaciones, aunque siga existiendo la necesidad de mejorar las economías en el combustible.

Para resolver este problema de transmisión de calor se han instalado numerosos aparatos en menos de diez años. Son los siguientes:

1. El precalentador en suspensión gaseosa (fig. 1), que precalienta la alimentación del horno a unos 650-750° C por contracorriente con los gases de escape. Se han montado dos sistemas de este equipo: el Fuller-Humboldt con los ciclones de transmisión en ordenación vertical, y el F. L. Smidth con los ciclones ordenados en doble T de manera concéntrica (fig. 1a).

2. La parrilla móvil (fig. 2), que seca, precalienta y parcialmente calcina los módulos de crudo alcanzando temperaturas próximas a los 870° C.

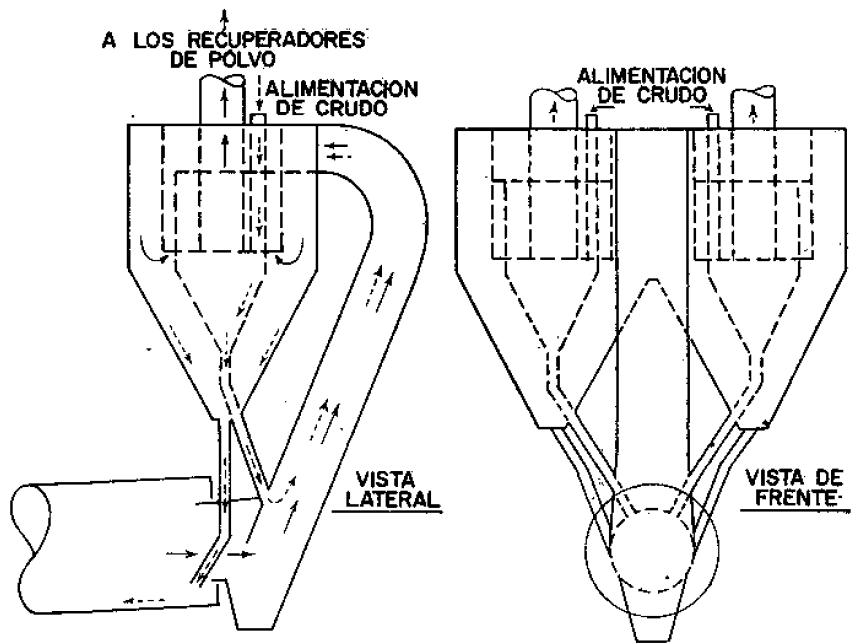
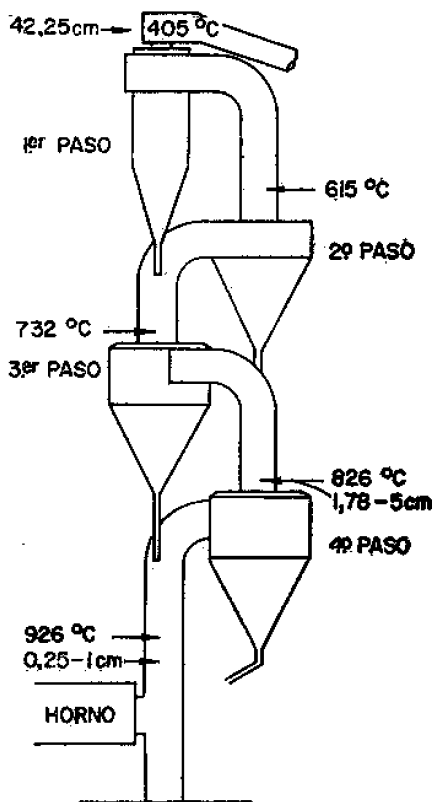


Fig. 1.—Presiones y temperaturas en el precalentador Humboldt-Fuller. Horno de 3,35×53,3 m (calentado con gas).

Fig. 1a.—Pecalentador F. L. Smidth. Horno de 3×3,65×95 m (calentado con gas).

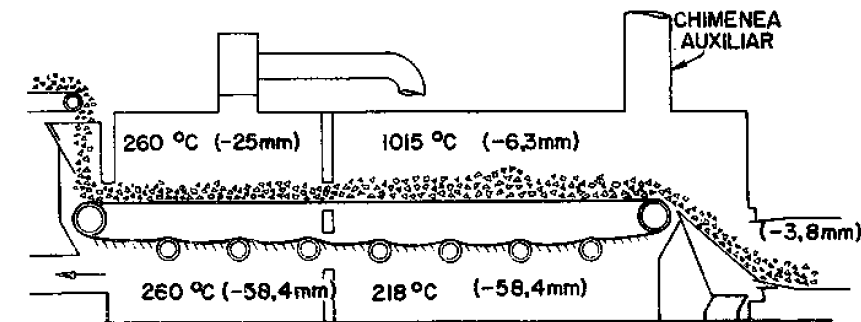
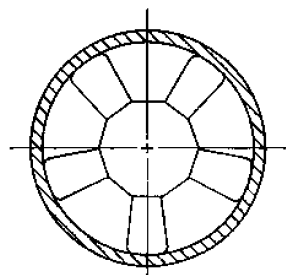
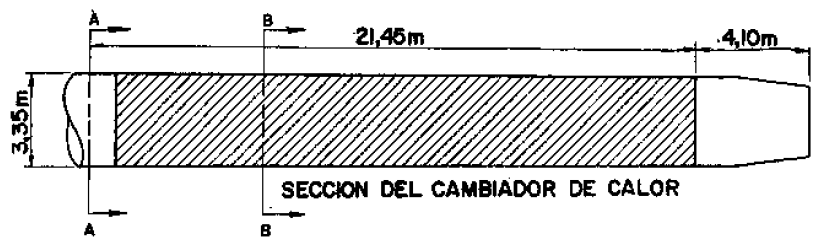
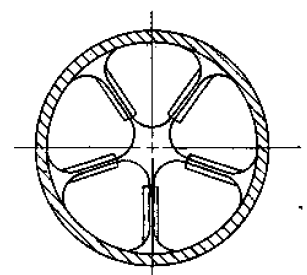


Fig. 2.—Presiones y temperaturas en la parrilla de doble paso. Horno de 3,80×48,80 m (calentado con carbón).



SECCION EN CRUZ—SALIDA A-A



SECCION EN CRUZ—INTERIOR B-B

Fig. 3.—Secciones del intercambiador de cinco cámaras. Horno de 3,35×119 m (calentado con gas).

3. El intercambiador de calor interno (fig. 3), que precalienta los crudos por contacto con los compartimientos metálicos instalados en el extremo de alimentación del horno y por radiación desde su extremo caliente, así como por transmisión de calor del material fino sumergido en los gases de escape.

4. El intercambiador de calor de tipo serpentín, que calienta los crudos por conducción de calor a través de las paredes de los tubos.

5. El sistema interno de cadenas (fig. 5), que precalienta la alimentación por transmisión de calor desde los gases a las cadenas, expuestas también a radiación desde la zona caliente en la parte más baja del horno.

Algunos de estos aparatos de transmisión de calor se han instalado con hornos como conjunto formando nuevos sistemas; otros se han incorporado sobre hornos ya existentes. En ciertos casos, un precalentador ha sustituido a una caldera de recuperación de calor o se ha instalado en paralelo a una caldera preexistente.

Comparar los distintos sistemas es difícil por las diferencias existentes en crudos, combustibles e instalaciones. Para hacer posible una evaluación global de los sistemas respectivos se calcularon dos unidades arbitrarias.

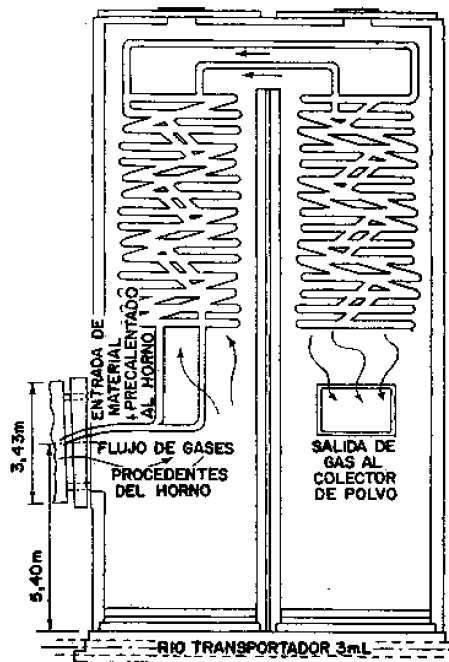
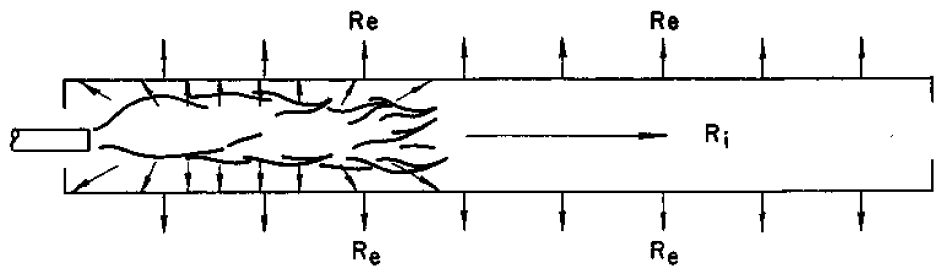
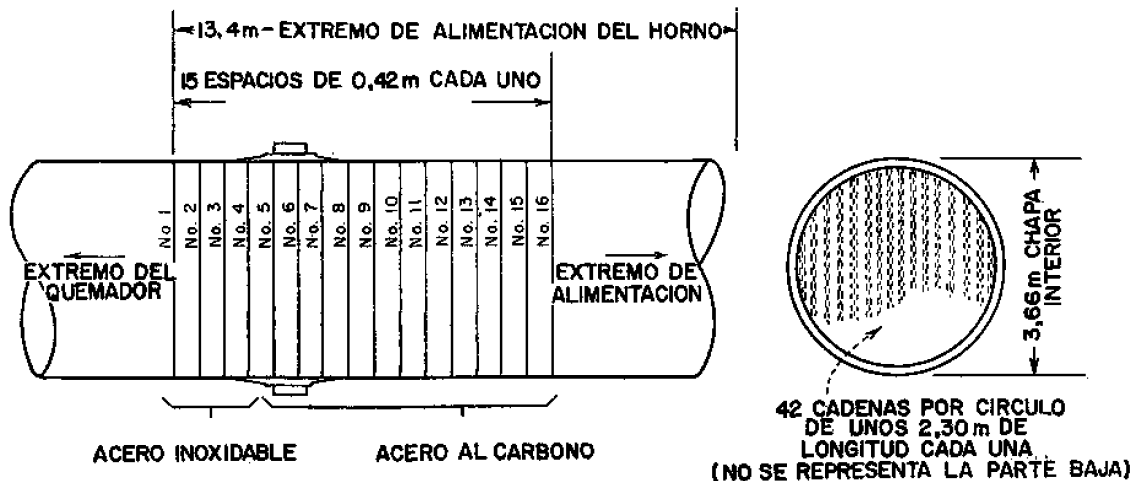


Fig. 4.—Precalentador tipo serpentín. Horno de 3,43×61 m.

Fig. 5.—Horno con sección de cadenas, 3,65×107 m (calentado con gas).

Fig. 6.—Calor procedente de la llama.



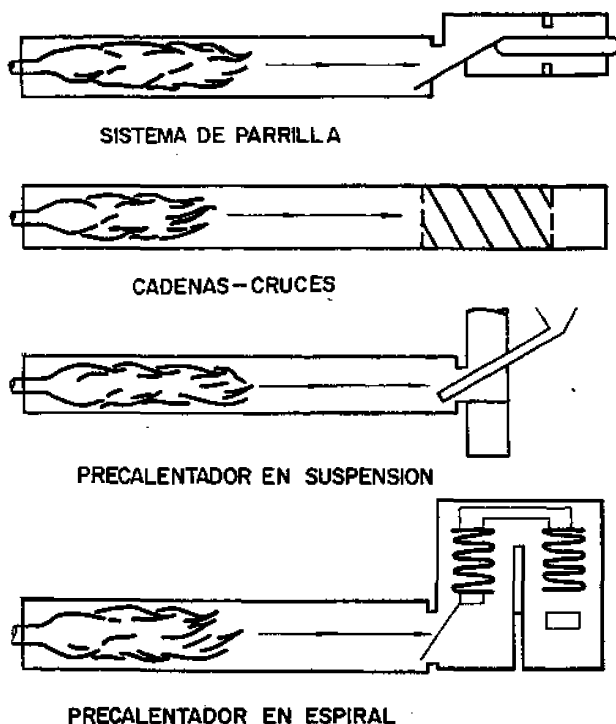


Fig. 7.—Radiación de la zona caliente al extremo de alimentación de los hornos.

El volumen del horno se calculó en 1.000 pies cúbicos, y el fuel consumido en 1.000.000 B.t.u./hora. Estas cifras se referían a velocidades de producción horaria. De este modo, toda la información reunida podría fijarse en una tabla.

Transmisión de calor por radiación interna

En el proceso de sinterización, el calor producido por el combustible a quemar se transmite al material en el horno: 1) por radiación de la llamada a la carga, 2) por contacto gas-sólido, y 3) por conducción de los revestimientos, paredes de conductos y superficies internas. Parte de este calor es radiado por la llama en el horno al revestimiento refractario, la carga y la costra de la zona caliente.

En el extremo de la llama esta radiación (R_i) pasa en el volumen de gases de la cabeza superior del horno. Considerando sólo la función interna del sistema del horno, esta idea se demuestra por la figura 6. De acuerdo con los métodos de Geoffrey Martin, el 42 % del calor total producido se transmite de este modo como radiación interna.

De esta radiación interna (R_i) procede el calor para secado, calcinación y al que absorben las radiaciones previas a la clinkerización. La clinkerización tiene lugar en la zona caliente del horno con radiación directa desde la llama e indirecta desde el interior del horno.

Los aparatos de transmisión dedicados a capturar este calor radiado son las crucetas internas y las cadenas, como se ven en la figura 7.

Velocidades horarias para un volumen de horno de 1.000 pies cúbicos (28,3 m³) (forro interior 152 mm)

SISTEMA	Clinker (kg)	Combustible quemado (kcal×10 ³)	Combustible quemado (kcal×t)
Precalentador en suspensión	1.295 a 2.285	12,85 a 24,45	978.000 a 1.185.000
Cruces internas *	630 a 817	7,80 a 9,82	1.038.000 a 1.290.000
Cadenas *	1.020	14,36	1.349.000 a 1.482.000
Parrilla	1.535 a 1.600	14,63 a 16,63	948.000 a 1.030.000
Serpentín	1.295	13,10	1.020.000
Hornos rectos	613 a 1.158	7,30 a 16,63	1.330.000

* Un horno con intercambiador de calor interno mostrará una relación producción-volumen mayor, cuando el volumen se computa sobre la sección del horno por debajo de la sección de transmisión de calor, en lugar del volumen total del horno. Esto consideraría el horno como compuesto de dos porciones separadas: a) alimentación y precalentamiento, y b) calcinación y clinkerización.

El precalentador de tipo parrilla captura parte de este calor en el extremo de descarga y, posiblemente, en la superficie de los gránulos de la carga sobre la parrilla. El precalentador en suspensión se construye de tal modo que no utilice esta radiación directa, lo mismo que el precalentador de serpentín. En estos últimos sistemas, la radiación indirecta de las superficies calientes motivada por gases a alta temperatura colabora a la transmisión de calor.

Radiación interna

Al considerar los sistemas de transmisión de calor es interesante calcular la distribución hipotética de calor en el horno, siguiendo, en toda su extensión, los métodos de Geoffrey Martin.

Se supone que la superficie interna del revestimiento del horno en la zona caliente se mantiene a la temperatura de clinkerización de 1.400° C y que a esta temperatura se radia tanto calor como se recibe de la llama; entonces puede determinarse por cálculo la longitud de esta zona.

Ejemplo:

Tamaño del horno: 3,05 m de diámetro interior (considerando el refractario) por 53 m de longitud con precalentador en suspensión gaseosa.

Calor consumido: $33,5 \times 10^6$ kcal/hora.

Producción: 680 t/día.

$$\frac{Q}{A} = 0,173 E \frac{T^4}{100}$$

Q = B.t.u./hora (energía radiante que emite la superficie interna).

A = Area superficial en pies².

T = Temperatura absoluta, °R ó 459,7 + F.

E = Factor de emisividad (0,8 para refractarios).

En consecuencia:

$$\frac{Q}{A} = 0,173 \times 0,8 \frac{(2590 + 460)^4}{100} = 0,1384 \times 865.000.$$

$$\frac{Q}{A} = 119.800 \text{ B.t.u./hora que emite la cara interior del ladrillo por pie}^2 \text{ (325.000 kcal/h . m}^2\text{) a } 2.590^\circ \text{ F (1.400}^\circ \text{ C)}.$$

Q = A. 325.000 = 33.500.000 kcal/hora, siendo A = 103,1 m² de superficie interior a 1.400° F.

La longitud de la superficie interior del forro es entonces:

$$L = \frac{103,1 \times 4}{9,30 \times 3,14} = 14,1 \text{ m de longitud de la zona de clinkerización.}$$

Esto es un cálculo hipotético que representa la longitud de la zona de más calor en el horno.

El valor se encuentra en los valores experimentales.

El calor teórico requerido para calcular el crudo descarbonatado a la temperatura de clinkerización se ha calculado en 160 kcal/kg de clinker. Este calor podría suministrarse con la transmisión de calor de la zona caliente a 1.400° C:

$$\frac{680 \text{ t/día}}{24} = 28,35 \text{ t/hora.}$$

$$28.350 \times 160 = 4.530.000 \text{ kcal/hora.}$$

$$\frac{4.530.000}{325.000} = 13,93 \text{ m}^2.$$

La superficie requerida para esta transmisión de calor es 13,93 m², o sea, 1,35 m de longitud de horno, aproximadamente.

Estos cálculos hipotéticos en la transmisión de calor se introducen para acentuar las posibilidades de acelerar el proceso de clinkerización mediante el uso de aparatos de transmisión de calor para un se-

cado y calcinación rápidos. El tiempo de retención para la carga de este horno, se calcula en unos 70 minutos a 70 r.p.h. Estos cálculos sugieren que es posible mayor velocidad y menor tiempo. El tiempo de retención actual, en un caso similar, era de 45 minutos.

Estos sistemas de transmisión de calor se muestran en las figuras 1 a 5. Cada uno está sacado de una instalación en marcha, con las adecuadas temperaturas y presiones.

La tabla I señala instalaciones típicas de sistemas de transmisión de calor en los Estados Unidos.

Estos sistemas requieren una recuperación completa del polvo que retorna al circuito. Como esta recuperación va acompañada de una temperatura más baja en los gases, la mayor parte de los álcalis y el azufre volatilizados vuelven al horno. Esto es la consecuencia de estos sistemas en circuito prácticamente cerrado.

Pre calentador en suspensión tipo Humboldt - Fuller

Este sistema, que consiste en cuatro pasos de tipo ciclón, calienta el crudo por contacto sólido-gas en un sistema de contracorriente; la alimentación pasa de arriba-abajo a través de los ciclones y los gases de escape del horno que proceden del horno hacia arriba para ser finalmente expulsados. El calentamiento del crudo es muy rápido; en unos 20 segundos, pasa de unos 40° C a 650-700° C. En este proceso los materiales pasan rápidamente por la zona de las primeras reacciones eudotérmicas, llevando consigo pérdida de agua y parte del dióxido de carbono de los carbonatos.

T A B L A I
Sistemas de transmisión de calor

Fábrica	Producción media del horno (t/día)	Consumo medio de combustible (kcal/t de clínker)	Temperatura del material a la salida del precalentador (°C)	Temperatura gases escape (°C)	Tamaño del horno, diámetro interior en chapa (m)	Combustible	Velocidad del horno (r.p.h.)
PRECALENTADOR FULLER TIPO HUMBOLDT DE SUSPENSION GASEOSA							
1	264,5	962.000	749	315	2,74 × 38,10	Carbón	90
2	301,0	1.385.000*	666	287	3,05 × 36,5	Carbón	60
3	445,0	978.000	815	304	3,20 × 45,7	Carbón	60
4	307,5	1.454.000*	732	315	3,04 × 42,6	Carbón	65
5	682,0	1.185.000	788	404	3,35 × 53,3	Gas	70-75
6	426,0	1.000.000	788	576	3,35 × 53,3	Carbón	90
7	289,0	1.185.000	760	315	3,20 × 45,7	Carbón	100
PRECALENTADOR SMIDTH - TIPO SUSPENSION							
8	409,0**	1.332.000**	593	287	3,05 × 3,65 × 94,5	Gas	60
INTERCAMBIADOR DE CALOR INTERNO SMIDTH - SISTEMA CRUCETA							
9	464,0	1.290.000	649	510***	3,35 × 118,9	Gas	60
10	631,0	1.185.000	—	482***	3,50 × 121,9	Gas	70
11	316,0	1.038.000	—	538	2,74 × 98,4	Carbón	92
PLOMO A.C.L. (PRECALENTADOR DEL TIPO DE PARRILLA)							
12	688,0	1.030.000	—	—	3,81 × 48,8	Carbón	62
13	732,5	947.500	—	121	Parrilla: 3,81 × 22,0 3,92 × 53,3 Parrilla: 3,81 × 25,0	Carbón	65

* Incluye calderas de recuperación de calor.—** Conseguída previamente la puesta en marcha.—*** Agua enfriada.

SISTEMAS DE CADENAS

Fábrica	Producción media del horno (t/día)	Consumo medio de combustible (kcal/t) de clínker	Temperatura del material a la salida del precalentador (°C)	Temperatura gases escape (°C)	Tamaño del horno, diámetro interior en chapa (m)	Combustible	Velocidad del horno (r.p.h.)
14	818.0	1.350.000	927	—	3,65 × 106,7	Gas	70

PRECALENTADOR GRUDEX-KENNEDY - TIPO DE SERPENTIN

15	511.0	1.018.000	704	426	3,43 × 61,0	Carbón	120
----	-------	-----------	-----	-----	-------------	--------	-----

Al alcanzar la temperatura más alta en el último ciclón, puede aparecer un estado más o menos crítico. Varía con los crudos, según las características de los materiales y consiste en un estado pastoso o pérdida de fluidez del crudo. En consecuencia, puede obturarse el tubo de alimentación. Con objeto de evitar este problema, las fábricas trabajan a una temperatura más baja para evitar la aglomeración de partículas o la adherencia a las paredes del ciclón.

De especial consideración en estos sistemas son la temperatura de los gases y la presión en los ciclones, junto con las peculiaridades propias de cada sistema. Estos valores se encuentran en las tablas II y III.

T A B L A I I

Temperaturas de los gases en los precalentadores H-F 1 (°C)

Fábrica	Ciclón 1	Ciclón 2	Ciclón 3	Ciclón 4	Horno
1	407	595	737	765	949
2	287	321	487	593	984
3	304	349	726	599	1050
4	315	371	482	676	787
5	404	615	732	826	926
6	593	699	704	788	815
7	315	637	749	871	982

T A B L A I I I

Presiones estáticas en los precalentadores H-F (mm H₂O)

Fábrica	Extremo alimentación del horno	Ciclón 4	Ciclón 3	Ciclón 2	Ciclón 1	Pequeños ciclones	Ventilador
1	—	55,9-58,4	218,4	426,7	—	685,8	939,8
3	5,0	25,4	—	—	304,8	381,0	508,0
4	0,0- 1,8	17,8-30,5	137,9	177,8-203,2	381,0	457,2	762,0
5	2,5-10,1	17,8-50,8	—	—	482,6	685,8	787,4
6	12,7-19,0	38,1	—	—	254,0	—	609,6
7	7,6	—	—	—	—	—	685,8

En estos sistemas de precalentamiento, se filtra aire y debe evitarse aire falso porque se aumenta el volumen de gases y se perturba el flujo de gases en los ciclones. Asimismo, siempre que entre aire frío en los conductos, aparece una acumulación de material seco sobre el punto de entrada. Esto se observa especialmente si en los crudos se encuentra presente un contenido de azufre claramente elevado.

Si en la misma planta se usa un sistema de precalentador y otros humos horizontales, con el mismo crudo, el análisis químico del clínker mostrará un contenido en cal más elevado. Esto se debe a las diferencias en las pérdidas de polvo y a las cenizas arrastradas por el clínker. El precalentador emplea menos carbón y pierde menos polvo.

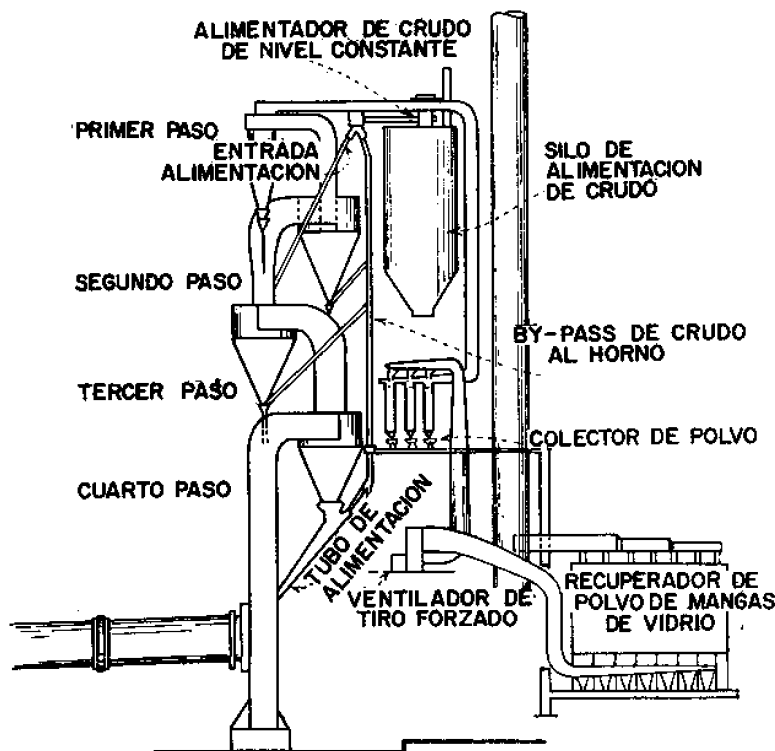


Fig. 8.—Precalentador Fuller (tipo de suspensión Humboldt).

El paso 4 en estos sistemas es un punto crítico, porque los crudos pegajosos pueden bloquear la descarga ahogando así el ciclón. Los crudos pueden acumularse junto a la entrada de gases por cambio en la velocidad de esto; estas acumulaciones, especie de pegaduras, deben destruirse con barras a través de registros. Para evitar demoras motivadas por el *chocking* en este paso o en otros sucesivos, deben comprobarse periódicamente estos puntos críticos por un operario; las aglomeraciones observadas pueden destruirse con un chorro de aire comprimido.

Como estos sistemas están cerrados prácticamente, puede escapar poco polvo y, en consecuencia, no pueden eliminarse los álcalis presentes en el crudo. El azufre se retiene también en el sistema, como lo demuestran los resultados de unas cuantas instalaciones.

En una fábrica con un horno horizontal y otro equipado con el sistema Humboldt-Fuller, se obtuvieron los siguientes análisis de clinker:

Horno horizontal:	Na_2O - 0,14 %
	K_2O - 0,38 %
Horno con precalentador:	Na_2O - 0,13 %
	K_2O - 0,60 %

La volatilización y pérdida de K_2O , fenómeno normal en el horno horizontal, no tiene lugar en el segundo caso.

En otra fábrica, se obtuvo un resultado similar en el clinker:

Horno sin precalentador:	Na_2O - 0,26 %
	K_2O - 0,89 %
	SO_3 - 0,66 %
Horno con precalentador:	Na_2O - 0,27 %
	K_2O - 1,29 %
	SO_3 - 1,46 %

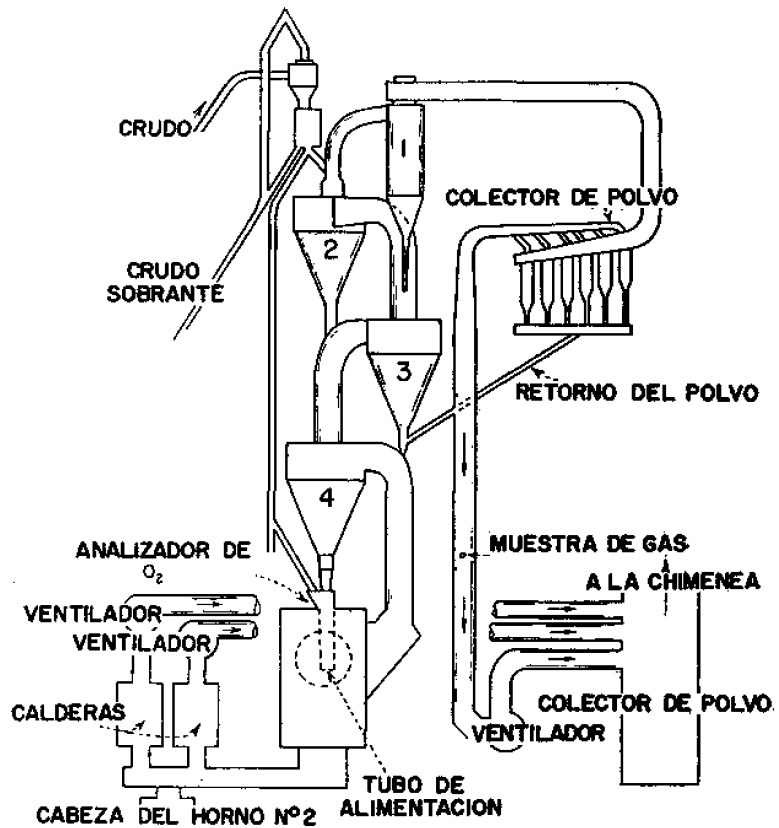


Fig. 9.—Precaentador Fuller, tipo de suspensión Humboldt, empleado con calderas de recuperación de calor.

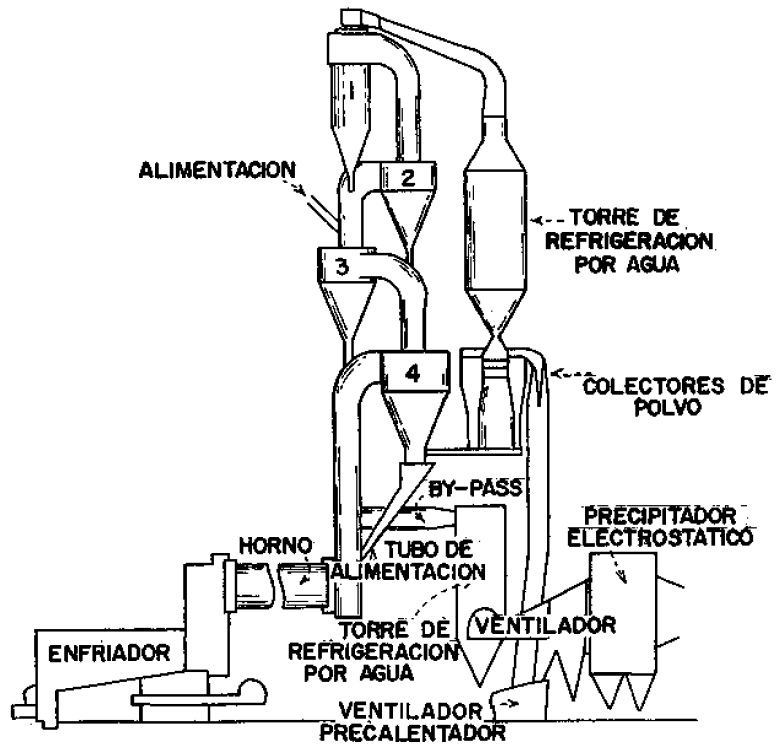


Fig. 10.—Precaentador Fuller, tipo de suspensión Humboldt, empleado con torre de refrigeración por ducha de agua.

En la primera fábrica (ver figura 8 y tablas II y III), el precalentador se instaló con un horno preexistente, y se ha modificado, al mejorar el sistema, incluyendo un colector de polvo con mangas de fibra de vidrio. Para controlar la marcha del horno se han hecho ensayos horarios del peso litro de clinker. Una media típica en las veinticuatro horas de un día es 1.460 gramos/litro, en comparación a 1.370-1.390 gramos/litro en un horno horizontal sin precalentador de la misma fábrica.

El contenido de oxígeno en los gases de escape del horno se ha mantenido de 1,0 a 1,5 %.

El operador del horno puede manejar el combustible a alimentar y las velocidades del horno y de alimentación del crudo, aunque la primera suele mantenerse constante.

Para comprobar la producción de clinker se emplea una balanza Merrick, que pesa el clinker a la salida del enfriador.

En esta instalación el crudo cae al conducto elevador en el paso 2, permitiendo al primer paso actuar como cabecera para el material arrastrado en la corriente gaseosa. El alimentador y la velocidad del horno se controlan independientemente desde la plataforma del hornero, aunque, como hemos dicho antes, la velocidad del horno se mantiene normalmente constante.

Todo el polvo del sistema de recuperación vuelve constantemente al tubo de alimentación. Las vises transportadoras que retornan el polvo están enclavadas con el horno y cortan la alimentación de polvo si el horno se para. Esto se hace para evitar el taponamiento del tubo de alimentación.

El procedimiento de puesta en marcha de este sistema se adapta al precalentador y tipo de combustible empleado. A continuación damos el procedimiento para una fábrica que emplea antracita y lignito mezclados: El ventilador de tiro se cierra. El horno se enciende con gas-oil o fuel-oil hasta que la cámara de combustión está lo bastante caliente para quemar la mezcla de carbones empleada en la producción normal. El carbón se empieza empleándolo mezclado con una pequeña cantidad de combustible líquido, hasta que la zona se calienta a unos 600-650° C. En este momento, el horno se gira continuamente y empieza a añadirse crudo a una alimentación reducida. Se ponen en marcha las vises del polvo; gradualmente el horno se aumenta de velocidad hasta su régimen lo mismo que se hace con la alimentación hasta la producción normal.

En la segunda fábrica el precalentador funciona con buen éxito con una caldera de recuperación de calor, pasando a través de ésta el 20 % de los gases del horno aproximadamente. Un esquema de este tipo se encuentra en la figura 9. En este sistema el ventilador del precalentador funciona a velocidad constante y el de la caldera de recuperación es de velocidad variable para regular el tiro del horno. El resultado es un aumento de producción, aproximadamente del 30 %, si se compara con la operación del precalentamiento directo. Si es necesario se emplea un sistema de agua pulverizada para reducir la temperatura de los gases de escape que van a las calderas.

En la quinta fábrica el precalentador se ha adaptado para usar crudos que contienen materia combustible en forma de pizarra bituminosa.

La figura 10 muestra el esquema de esta instalación con la torre de refrigeración por agua colocada entre el paso 1 y los recuperadores mecánicos de polvo. Se introducen duchas de agua para unos 10-12 galones por minuto, a fin de reducir la temperatura de los gases de escape en este punto. Otras fábricas emplean de 25 a 30 galones con este fin. La temperatura límite que interesa es de 320° C en el ventilador de tiro.

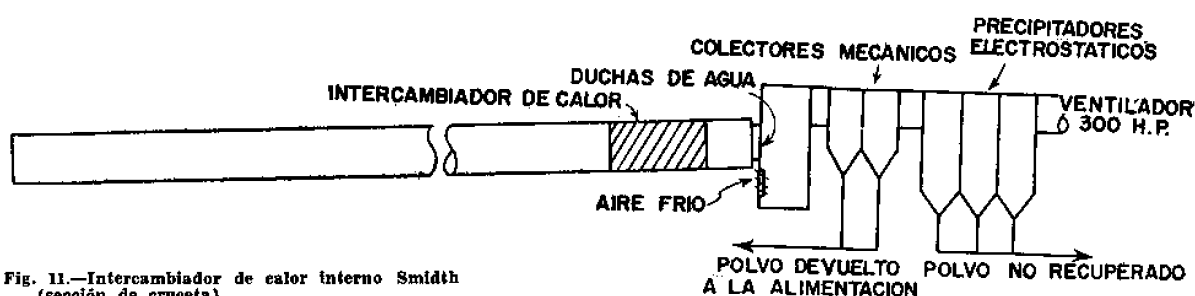


Fig. 11.—Intercambiador de calor interno Smidth (sección de cruzeta).

Se emplean analizadores de gases para ayudar a mantener el 2,0-3,0 % de oxígeno a la entrada de la torre de refrigeración, tomando muestras del primer paso. Este punto se considera el más favorable para tomar muestras en este sistema concretamente. Como protección contra las explosiones en los ciclones, un mecanismo automático pasa el precalentador cuando los combustibles en los gases alcanzan un máximo del 3 %. Todos los ciclones del precalentador van forrados de refractario.

El único procedimiento satisfactorio, hasta el momento, para tratar por este sistema materias primas con combustible, es cuidar la explotación de cantera a fin de reducir al mínimo la cantidad de dicho combustible.

Precalentador Smidth - tipo suspensión

En este sistema el crudo se calienta por transmisión directa de gas a sólido en contracorriente por ciclones colocados horizontal y concéntricamente. Los dos ciclones situados sobre la cabeza de entrada del crudo, reciben los gases de escape del horno por medio de un conducto común. Dentro de cada uno de estos ciclones hay un ciclón más pequeño, como puede verse en el esquema de la figura 1A. En este esquema no se representa el sistema de recuperación de polvo. El resto de la instalación es un horno de unos 95 m de longitud calentado con gas natural, con todo el equipo auxiliar.

Al recoger esta información, el sistema lleva trabajando un tiempo relativamente corto. Se ha observado que la temperatura del crudo al abandonar el precalentador es crítica, habiéndose observado "taponamientos" y limitado aquella a 595° C para evitar estos inconvenientes.

Una mejora en la alimentación de los hornos de vía seca con este sistema es el transportador de cinta en la pesada automática. Esto se ajustó a unos 38 kg por metro de cinta, con velocidad de ésta variable. Este transporte se conectó en el panel de control incluyendo aparatos para la medida de la alimentación del horno, horaria o diariamente.

En este tipo de precalentador la alimentación del horno se hace en el ciclón interior, descargando por el fondo en el conducto principal del horno; los gases de escape lo conduce después al ciclón exterior, desde cuyo fondo cae al horno. Los gases pasan del ciclón exterior al interior y después al sistema de recuperación de polvo; éste consiste en una combinación de colectores mecánicos y, o bien, electrostáticos o bien de mangas de fibra de vidrio.

Intercambiador de calor interno Smidth - sistema de cruceta

El sistema en cruz es un intercambiador de calor interno que divide el extremo de alimentación de un horno en cuatro o cinco compartimientos con diferentes sistemas. La figura 11 muestra una instalación que emplea un intercambiador de cinco cámaras. La alimentación que pasa el extremo superior de esta zona, se divide entre los compartimientos y pasa al extremo inferior, descargando, más tarde, en el tubo limpio del horno. De este modo el crudo se expone a una gran superficie de calentamiento con las placas metálicas y el forro del horno, existiendo una parte en suspensión en la corriente gaseosa.

En una instalación típica, la temperatura en el extremo de alimentación es de 480° C y al atravesar la zona del intercambiador es de unos 820-870° C. A fin de rebajar la temperatura de los gases a unos 370-400° C para proteger el colector mecánico y el precipitador electrostático, se instala una ducha de agua en el extremo de alimentación y se emplea una válvula para introducir aire frío. Automáticamente, se establece un equilibrio entre el agua y el aire para mantener el máximo tiro en la producción de clinker deseada. Esta ducha se instala aquí mejor que en el conducto de gases de escape, por la carga de polvo que llevan éstos a la salida del horno.

En una fábrica se mejoró la triste experiencia de los anillos al emplear el intercambiador de calor. La cocción debe regularse para mantener una temperatura fija a la salida de la sección del intercambiador, proporcionando más uniformidad al crudo que avanza hacia la zona caliente. Al parecer, este precalentamiento es suficiente para reducir la formación de anillos.

En otra fábrica, donde se ha usado durante varios años el sistema del intercambiador, la conservación ha consistido, esencialmente, en sustituir la primera sección de cada uno de los cinco compartimientos después de unos dos años de servicio. El sistema entero consta de 25 secciones.

Sistemas de cadenas

Uno de los avances más interesantes en la mejora de la transmisión de calor ha sido el empleo de un sistema de cadenas en un horno de vía seca. Los resultados han sido satisfactorios, y continúa su uso con mejoras que se van haciendo a medida que aumenta la experiencia.

En una fábrica funcionan dos hornos con cadenas. Cada uno de ellos tiene un sistema de cadenas diferente: uno del tipo de cortina y otro del tipo de guirnalda. Al cabo de, aproximadamente, un año de trabajo, resultó ser más favorable el sistema de cortina. Empleando este sistema de transmisión de calor y una ducha de agua para enfriar los gases de escape, este horno aventaja a los de vía seca normales en cuanto a consumo de calor en 47,5 millones de kilocalorías por hora.

Suspensión tipo cortina

Para instalar estas cadenas se empleó la suspensión en cruz que produce una serie de cortinas paralelas. Algunas cadenas que resbalan en la parte baja de la sección del horno producen una serie de retenciones en el crudo antes de seguir su marcha descendente.

En los primeros días de marcha con las cadenas, unas pocas se desprendieron en el término de dos semanas; después de unas cinco semanas más, una rosa aparecida en el frente de la sección de cadenas obligó a parar. Esto fue debido a la caída de refractarios aislantes, probablemente por la erosión motivada por la fila frontal de cadenas. Se sustituyó una sección del forro, un poco más de dos metros, empleando un ladrillo refractario de chamota de buena calidad en lugar de ladrillo aislante. En la sección de cadenas dio un buen resultado el ladrillo de sílice.

La superficie interna del horno se dividió en 14 secciones para instalar tres cadenas en cada una de ellas. A los segmentos de la chapa del horno se soldaron bloques de acero inoxidable de 15 mm de espesor y 17 cm² de sección. En la cara extrema de estos bloques se soldaron redondos de acero inoxidable de 15 mm de diámetro para sujetar los extremos de las cadenas. Los redondos se colocaron cubriendo cuatro bloques a la vez.

La experiencia demostró que este montaje no era satisfactorio. Se hizo el cambio, de modo que cada cadena se sujetase a una barra sencilla a través de dos bloques.

La sección inicial de cadenas de 6,3 m se componía de tres secciones con distintas cadenas en cada una, como sigue:

Primera sección: cuatro filas, acero inoxidable 309, troncos de 15 mm de diámetro, eslabones de 6,25 centímetros de diámetro.

Segunda sección: otras cuatro filas, tronco de 15 mm de diámetro, eslabones de 6,25 cm de diámetro.

Tercera sección: ocho filas, cadena de acero al carbono, tronco de 15 mm de diámetro, eslabones de unos 6,25 cm de diámetro.

La experiencia demostró que podía aumentarse el número de cadenas y, por tanto, se instaló un sistema en doble longitud, aumentando las 16 filas de cadenas a 32.

Para el sistema inicial se hicieron los siguientes cálculos:

Longitud de la sección de cadenas: 6,4 m.

Diámetro interior del forro del horno: 3,35 m.

Volumen del horno en la sección de cadenas: 56,4 m³.

Cadenas:

16 filas.

42 por fila.

2,4 m de longitud (unos 1.638 m totales).

9,4 kg/m (total 15.710 kg).

0,256 y 0,324 m² por metro (total 473 m²).

Densidad de las cadenas:

$$\text{metros por m}^3 = \frac{1638}{56,39} = 29$$

$$\text{kg por m}^3 = \frac{15422}{56,39} = 274$$

$$\text{m}^2 \text{ por m}^3 = \frac{471}{56,39} = 8,37$$

Producción del horno: 818 t/día.

Combustible empleado: 1.435.000 kcal por t - 1959

1.345.000 kcal por t - 1960

Control del horno:

Producción horaria por 1.000 pies³ (28,3 m³) de volumen:

$$\frac{4.700}{24 \times 33,220} = 5,9 \text{ bbl (1 t) por hora/MCF.}$$

Calor consumido:

$$1.435.000 \times \frac{818}{24} = 48.800.000 \text{ kcal/hora}$$

Velocidad del horno: 70 vueltas/hora.

Tiro en la cabeza: 2,5 mm.

Tiro en el extremo de alimentación: 28 mm.

Temperaturas: Por debajo de las cadenas: 955° C.

Entrada al colector de polvo: 376° C.

Salida del colector de polvo: 287° C.

Agua para enfriamientos de los gases: 65 g.p.m. (19,7 kg/cm²).

Suspensión tipo guirnalda

La primera instalación con una cadena de acero se diseñó de la misma manera que para un horno de vía húmeda. La fila frontal de cadenas duró seis semanas y los enganches se perdieron. La razón principal de este mal comportamiento fue la corrosión del metal por oxidación y abrasión. Esta fila se sustituyó por cadena de acero inoxidable 309.

Las cadenas se colgaron formando guirnaldas con los extremos separados 120° C y sin superponerse las cadenas de una sección con las de la próxima (en este método de suspensión el sistema solapado era el responsable del excesivo desgaste de las cadenas).

La sección de 6 m del horno contenía tres tipos de cadenas; a saber:

Primera sección: dos filas, acero inoxidable 309, tronco de 15 mm de diámetro, paso de eslabón 47,75 milímetros de longitud interior por 38,58 mm de ancho interior; las filas se encuentran separadas 1,20 m y las cadenas tienen 4,50 m de longitud.

Segunda sección: dos filas, cadena de acero, tronco de 15 mm de diámetro; las filas se separan 1,20 m y las cadenas tienen 4,50 m de longitud.

Tercera sección: dos filas, cadena de acero, tronco de 15 mm; las filas se separan 0,60 m y las cadenas son de 4,05 m de longitud.

La estadística o cálculos de este sistema fueron los siguientes:

Longitud de la sección del horno: 6,17 m.

Diámetro interior del horno: 3,12 m.

Volumen del horno en esta sección: 47,2 m³.

Cadenas:

6 círculos.

42 cadenas por círculo.

4,05 y 4,50 m de longitud (total 1.097 m).

7,0 y 6,1 kg por m (total 7.370 kg).

0,0328, 0,0266, 0,0196 m² por metro (total, 296,8 m²).

Densidad de las cadenas:

$$\text{m por m}^3 = \frac{1097}{47,2} = 23,2.$$

$$9,74 \text{ kg/m}^3 = \frac{7370}{47,2} = 156.$$

$$\text{pie}^2 \text{ por pie}^3 = \frac{3.196}{1670} = 1.915 \text{ m}^2/\text{m}^3 = \frac{296,8}{47,2} = 6,26.$$

Producción del horno: 630 t/día.

Combustible empleado: 1.490.000 kcal/t.

Control del horno:

Producción horaria por 1.000 pies³ (28,3 m³) de volumen:

$$\frac{3.700}{24 \times 29.558} = 5,2 \text{ bbl (0,88 t) por hora/MCF.}$$

Calor consumido:

$$1.490.000 \times 0,88 = 1.325.000 \text{ kcal/hora.}$$

Recuperación de polvo

En el horno con suspensión de cadenas tipo cortina se recuperó polvo al horno a una velocidad de 700 libras por minuto. Antes de instalar las cadenas el polvo recuperado se hacía a 400 lb/minuto. Este polvo se transporta y eleva a la vis que alimenta el horno.

En el horno con suspensión de cadenas tipo guirnalda, el polvo se devolvió directamente al horno a una velocidad de 900 lb/minuto, en comparación a las 500 lb/minuto que se devolvían antes de instalar las cadenas.

Precalentador Grudex - Kennedy - tipo serpentín

El precalentador tipo serpentín, consta de un tubo de acero resistente al calor de 15,25 cm de diámetro curvado en espiral. En la figura 4 se ilustra la disposición de este sistema en el extremo de alimentación del horno. Los gases del horno fluyen alrededor del serpentín y calientan el crudo que fluye por el interior por conducción a través de las paredes de acero.

El crudo se bombea en los dos serpentines de 600 m de longitud y la velocidad de flujo se controla manualmente desde la plataforma del hornero por un sistema de bomba Fuller-Kimyon. La descarga del serpentín se hace directamente sobre el fondo del horno, el cual dispone de bloques especiales a su entrada para retener la carga, evitando su derramamiento al exterior.

La operación normal del sistema requiere 336 pies³ por minuto de aire comprimido a 62 lb/pulg², suficiente para arrastrar la carga a través del tubo. La temperatura de la alimentación en la entrada al horno es de unos 700° C y los gases de escape bajan de 845 a 355° C a la salida del precalentador.

No se retorna polvo al horno y la pérdida es del 4 %. Este método de trabajo reduce la retención de álcalis en el clínker producido. El polvo arrastrado por los gases del horno se deposita en parte en la superficie del tubo y debe retirarse diariamente. Esto se hace a través de registros previstos en la estructura con chorros de aire. Se procuran buenos ajustes en ambos extremos del horno para reducir las entradas de aire falso.

El desgaste del tubo es despreciable, como confirma la experiencia en dos unidades después de varios años. Para la sección del tubo instalado en la zona más caliente se prevé una vida de diez o más años. En el resto del sistema es de esperar que la vida del tubo sea de veinte a treinta años.

Horno ACL - precalentador de parrilla

Este precalentador, esquematizado en la figura 2, permite la recuperación del calor de los gases del horno por dos pasos a través de los gránulos del crudo. Estos gránulos contienen de 12 a 14 % de agua y se calientan desde unos 38° C hasta unos 870° C en unos veinte minutos. En la marcha de la parrilla tienen lugar las primeras reacciones del crudo, incluyendo: secado, deshidratación y calcinación parcial. Además, el lecho de gránulos capta polvo arrastrado por los gases, reduciendo su carga a la salida del sistema.

La consideración más importante de este sistema es la supervivencia de los gránulos. Deben soportar el choque térmico y secar sin romperse. Una vez secos, los módulos deben tener suficiente resistencia para permanecer intactos al elevar la temperatura. Si los gránulos rompen, se aumenta la carga de polvo en los gases del horno y el lecho queda bloqueado por este polvo, dando lugar, finalmente, a la parada del horno.

En este sistema, los gránulos se producen continuamente en una artesa y caen al canal de alimentación de la parrilla. El crudo y el agua en forma de ducha se introducen en el cuadrante inferior derecho de la artesa que gira en el sentido de las agujas de un reloj. Establecidas la inclinación y velocidad óptimas de la artesa, en la marcha normal sólo hay que manejar las cantidades de agua y crudo. El nodulizador de tipo de artesa (de 4,5 m de diámetro y 75 cm de altura de pared) es muy flexible y permite cambiar su velocidad de inclinación. En una fábrica, marchaba a 10 r.p.m. y una inclinación de 59°.

Datos estadísticos de dos fábricas que trabajan por el sistema de parrilla ACL

TEMPERATURAS (°C)	FABRICA 12	FABRICA 13
Cámara caliente.—Parte superior	1.015	1.010
Cámara caliente.—Parte inferior	218	426
Entre las dos cámaras:	460	398
Cámara de secado.—Parte superior	260	287
Cámara de secado.—Parte inferior	121	121

PRESIONES (mm K₂O)

Cámara caliente.—Parte superior	— 6,35	— 7,82
Cámara caliente.—Parte inferior.	— 58,42	— 50,80
Cámara de secado.—Parte superior	— 25,4	— 22,8
Cámara de secado.—Parte inferior.	— 58,42	— 50,8
Cabeza de cocción del horno	— 1,27	0 a 0,25
Extremo de alimentación del horno	— 3,81	— 12,7
Parrilla enfriadora	+ 25,4	+ 76,2
Cocción.—Mezcla carbón-aire	71,1° C	65,5° C
Cocción.—Aire caliente al molino	232° C	—
Cocción.—Diámetro interior del quemador	25,4 cm	27,2 cm
Humedad de los gránulos	13,5 %	13,0 %
Espesor del lecho de gránulos	17,78 cm	17,78 cm
Velocidad de la parrilla de módulos	1.107 m/min	1.143 m/min.
Espesor del lecho del enfriador	15,2-17,8 cm	10,1 cm

La producción de nódulos se controla por el operador, en su tamaño y contenido de humedad. Por ejemplo, unos nódulos que aparecen de buen aspecto con el adecuado contenido de agua, cambian de aspecto cuando se quedan muy secos. Al suceder esto, también cambia el tamaño del nódulo y hay una tendencia cíclica a pasar de muy grandes a muy pequeños. Hoy en día esta operación depende, en gran medida, de las observaciones del operario.

Un factor importante en el trabajo de este sistema es separar regularmente el crudo que se acumula en el extremo de descarga de la parrilla. Con este fin se usan los registros laterales de la cámara.

En puntos previamente establecidos se toman muestras de la parrilla para conocer el contenido de álcalis.

	Na ₂ O	K ₂ O	P. F.	
Crudo	0,15	0,62	35,0	0,86
Polvo de retorno	0,36	4,16	13,2	3,56
Nódulos que salen de la parrilla	0,17	0,79	27,9	0,96
Clínker	0,17	0,90	0,0	0,75

El clínker producido en este horno contiene más álcalis que el producido en hornos horizontales normales. Los vapores alcalinos pueden observarse en la parte delantera del horno, y una evidencia de ello se tiene en el enfriador por los fallos del refractario en el techo del extremo caliente.

La experiencia ha demostrado que el carbón que contiene 3 % o más de azufre motivaba comparativamente un bloqueo más rápido del tubo del horno en el extremo de descarga de la parrilla. Este material se formaba en capas, de color pardo-amarillento y de contenido elevado en SO₃. De dos muestras analizadas, se obtuvieron el 20,5 y el 30,0 % de SO₃, respectivamente. Al cambiar a un carbón con 2 % o menos de azufre, mejoró notablemente la situación.

Resumen

Al emplear sistemas de precalentamiento interno y externo en los hornos rotatorios, se ha conseguido un aumento en la velocidad de producción y una economía en el consumo de combustible. En algunos sistemas se maneja más polvo en los recuperadores. A veces se acumulan los álcalis y el azufre, elevándose el contenido de aquéllos en el clínker resultante. Para cada sistema deben emplearse crudos típicos con vistas a su granulación y fluidificación a altas temperaturas.