

- 17 -

616-3 EL ENFRIAMIENTO RAPIDO DEL CLINKER PROCEDENTE DE HORNOS ROTATORIOS DE CEMENTO.

(Die Schnellkühlung von Klinker aus Zementdrehöfen)

R. G. Uhlig.

De: "ZEMENT-KALK-GIPS", 30, Febrero 1950

En "Zement, Kalk, Gips" 2 (1949) 94 se reseñaba un artículo de Wilhelm Anselm". El enfriamiento rápido de clinker procedente de hornos rotatorios".

A juzgar por las observaciones preliminares de Anselm, no se niegan las ventajas del método americano de enfriamiento de clinker. Sin embargo, Anselm no menciona el hecho de que muchos fabricantes de los Estados Unidos han procedido independientemente de que el contenido de su clinker en MgO haga o no necesario dicho enfriamiento, pues este método proporciona otras ventajas.

Los años de la guerra y de la preguerra, con el alza constante del coste de los combustibles, han modificado la posición de los fabricantes norteamericanos de cemento que manifiestan un interés mayor por la cuestión de la economía de combustible. En muchos casos es preciso emplear hoy combustibles de menor valor y abundante contenido de agua para poder mantener el coste de producción a una altura de competencia.

La introducción del ensayo de dilatación en autoclave, y la fijación de valores determinados de dicha dilatación, se han reservado, en principio, a modificaciones de volumen en hormigones que contienen MgO en forma de periclasa. Investigaciones posteriores han mostrado, sin embargo, que el contenido en masa vítrea de un clinker obtenido por enfriamiento por aire, es una medida segura de su contenido en cal libre, para juzgar la constancia de volumen del clinker o del cemento en el autoclave. Valiosos trabajos sistemáticos en este sentido han sido escritos por R.H. Bogue, de Washington D.C., y Leon Blondieu de Cementos de Thieu (Bélgica).

El perfeccionamiento de la molienda corre parejas con el interés puesto en el coste del combustible. Ante el margen de beneficio cada vez

- INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO -

más pequeño entre el coste total de producción y los precios de venta alcanzados, no pueden permitirse las fábricas de cemento despreciar el hacer economías en el coste de molienda.

En las largas paralizaciones provocadas en la construcción durante los años de la depresión, y en regiones de clima húmedo, se ha podido comprobar que no todos los cementos son adecuados para un almacenaje prolongado. Puede sobrevenir en los silos o en los envases la disociación llamada "de almacenaje". Esta dificultad se reduce con el enfriamiento por aire, que permite un periodo de almacenaje doble o triple, sin que se verifique la disociación. La mayor resistencia del clinker enfriado rápidamente frente a soluciones de sulfato sódico y magnésico ha sido comprobada en las investigaciones de la Portland Cement Association Norteamericana.

Anselm ha afirmado que el clinker enfriado rápidamente con aire - tiene generalmente un color pardo rojizo. Entre las 237 instalaciones conocidas del autor hasta la fecha, no hay ninguna que produzca clinker de color diferente al del obtenido con el método anterior de enfriamiento más lento. Hay un gran número de fábricas en las que funcionan simultáneamente enfriadores lentos y rápidos con miras a una reorganización paulatina de la instalación y, naturalmente, no hay diferencia alguna entre los colores de ambos clinkers, supuesto que el trabajo de cocción es el mismo para los dos.

Al criticar los diversos tipos de enfriadores rápidos menciona - Anselm el enfriador rápido de parrilla transversal Fuller, el enfriador y vibrador Allis-Chalmers y el enfriador Folax de F.L. Smidth and Co. Se muestra, un corte transversal del Fuller; se citan cifras del rendimiento de ese enfriador y se analiza numéricamente su rendimiento térmico.

Aparte del hecho de que la figura que se da como típica de un enfriador Fuller se refiere a los primeros ensayos del mismo, los cálculos de Anselm están edificados sobre una base errónea y requieren una corrección.

En el segundo párrafo de su artículo añade Anselm, que el enfriamiento rápido debe realizarse entre 1450 y 1250°, y esto coincide con las experiencias de los ingenieros americanos. Pero esto no autoriza a Anselm a suponer que el clinker, de cuyo enfriamiento nos dá los resultados Taggart no abandona el horno a 1370°C, como afirma dicho autor. De igual manera no es correcto suponer que en el conjunto horno-enfriador descrito por Taggart, se opere, en virtud de una ordenación de toberas imaginadas por Anselm, con una zona de refrigeración en el interior del horno.

- INSTITUTO TECNICO DE LA CONSTRUCCION Y DEL CEMENTO -

Después intenta Anselm establecer unos cálculos que deben dar la comparación del balance térmico del enfriador Fuller con el correspondiente a los enfriadores de tambor, pero no se puede considerar como conseguido el intento.

Para explicar el concepto "Balance térmico" expresemos lo siguiente:

Para el enfriador rápido de parrilla transversal Fuller de acuerdo con el Manual de Preparación de Minerales de Taggart.

Calor total disponible en el clinker 2500°F = 1370°C 354 Kal/Kg.

(Valores según la Am. Portl. Cem. Assoc, a 0°C)

Calor recuperado en el horno, Kcal/Kg	287	
Pérdidas por radiación Kcal/Kg .....	12	
Pérdidas por ventilación por la chimenea Kcal/Kg .....	43	
Calor residual en el clinker enfriado	<u>12</u>	354 Kcal/Kg.

Calor recuperado ..... 81 %

Taggart, en su Manual de Preparación de Minerales, da para el citado enfriador un calor neto de 1.000.000 Btu/ Btb (\*).

A esta cifra corresponden 1515 Kcal/Kg. (y no 1400 Kcal/Kg. como dice Anselm. Empleando la cantidad correspondiente de combustible resultan los siguientes valores:

Cantidad de aire necesaria para la combustión incluido un 5% de remanente .....	413 m <sup>3</sup> /min.
Cantidad de aire de combustión correspondiente al enfriador .....	356 m <sup>3</sup> /min.
Cantidad total de aire empleado en la refrigeración .....	708 m <sup>3</sup> /min.

---

(\*) British Thermal Units / British pounds.

Cantidad de aire devuelta .....	352 m <sup>3</sup> /min.
Temperatura del aire precalentado para el horno, aproximadamente .....	649°C
Temperatura del aire en la chimenea .....	135°C.

Para los enfriadores de tambor tenemos, según experiencias americanas, los siguientes valores:

Enfriador de tambor de construcción corriente

Calor total disponible en el clinker a 2500°F = 1370°C. (Valores según la Am. Portl. Cem. Assoc. a 0°C) .....	354 Kcal/Kg
Calor recuperado en el horno Kcal/Kg .....	209
Pérdidas por radiación, Kcal/Kg. ....	118
Calor residual en el clinker enfriado, Kcal/Kg .....	27
	<hr/>
	354 "

Calor recuperado ..... 59 %.

Sabiendo que la desviación de valor "ideal" de la pérdida por radiación dada por Anselm citada anteriormente, será totalmente negada, haremos las siguientes aclaraciones:

En los enfriadores de tambor no son posibles otras pérdidas de calor que las que se producen en el seno del aire de combustión y por radiación a través de las paredes del enfriador.

El calor restante permanece en el clinker. Puesto que Anselm supone un enfriamiento desde 1370°C hasta 140°C, se ha supuesto que el enfriador consta exclusivamente de metal, de manera que la radiación suponga una buena parte del enfriamiento para alcanzar la baja temperatura de salida que él sostiene.

Con miras a la economía del horno se ha de suministrar al enfriador la cantidad adecuada de aire de combustión. Esta cantidad, tal como es empleada en el enfriador Fuller, corresponde a aquella que hemos de deducir de la cantidad total de combustible gastado en el de tambor.

El enfriador Fuller necesita un calor neto de 1515 Kcal/Kg., deducción hecha de las 287 Kcal/Kg. que se recuperan, esto es, el calor total

de combustión asciende a  $1515 + 287 = 1802$  Kcal/Kg.

Las cantidades consumidas son las siguientes:

Cantidad de aire necesaria para la combustión, incluido un 5% de remanente .....	435 m <sup>3</sup> /min.
Cantidad de gases de combustión correspondientes al enfriador .....	375 m <sup>3</sup> /min.
Cantidad total de aire empleada en la refrigeración .....	375 m <sup>3</sup> /min.
Temperatura del aire precalentado para el horno	855°F = 457°C.

lo que naturalmente es un valor muy alto para un enfriador de tambor corriente. Valor que también muestra que el calculado para la radiación no es más bajo, y que la cifra dada por Anselm de 30 Kcal/Kg. para las pérdidas por radiación de un enfriador de tambor no puede ser alcanzada sin especiales precauciones. Para poder incluir en el cálculo el valor citado debe revestirse el enfriador de delante a atrás; sin embargo, esta medida elevaría la temperatura de salida del clinker. El resultado total sería como sigue:

Enfriador de tambor revestido ....

Calor total disponible en el clinker a 2500° F = 1370°C (Valores según la Am. Por. Cem. Assoc. A 0°C),	345 Kcal/Kg.
Calor recuperado en el horno, Kcal/Kg. ....	247
Pérdida por radiación, Kcal/Kg. ....	30
Calor residual en el clinker enfriado, Kcal/Kg	<u>77</u> 354 "
Calor recuperado .....	70 %
En este caso el calor neto es $1802 - 247 = 1555$ Kcal/Kg.	
Cantidad de aire necesaria para la combustión incluido un 5% de remanente .....	425 m <sup>3</sup> /Kg.
Cantidad de gases de combustión correspondientes al enfriador .....	366 m <sup>3</sup> /Kg.
Cantidad total de aire empleada en la refrigeración .....	366 m <sup>3</sup> /Kg.
Temperatura del aire precalentado para el horno: 549°C.	
Temperatura de salida del clinker 366°C.	

Naturalmente a semejante enfriamiento corresponde un recocido que perjudica mucho la calidad del clinker; además, es de notar que un clinker

que sale a 366°C necesita un considerable enfriamiento lento antes que pueda pasar a los molinos. Sin duda el error en el análisis térmico de Anselm ha sido producido al pasar por alto el hecho de que cualquier cantidad de calor que se recupere en el clinker se pierde al fin y al cabo. Además la cantidad de aire necesaria para la combustión no es suficiente, con los diversos combustibles y métodos de calefacción empleados hoy día en la industria del cemento, para enfriar el clinker de la temperatura de salida del horno a la adecuada para la molienda. Así, el director técnico de una fábrica de cemento tiene solamente dos alternativas para hacer descender la temperatura del clinker.

Primera.- Puede tolerar una elevada temperatura del clinker a la salida del enfriador y que el calor restante vaya pasando al aire poco a poco dejando el clinker en reposo, lo que resulta largo y costoso; o

Segunda.- Puede disponer un enfriamiento amplio, por ejemplo - con un enfriador rápido, para reducir la temperatura del clinker a un punto adecuado para la molienda. Tendrá que emplear una cantidad de aire que exceda de la necesaria para la combustión, y, naturalmente, el calor restante pasará también, como en el caso primero, al ambiente.

El periodo de enfriamiento de 12,5 minutos dado para el enfriamiento rápido se refiere naturalmente al tiempo que tarda en pasar de 1370°C a 66°C, mientras que el periodo de enfriamiento de 6 minutos dado para la parte superior del enfriador rápido representa el tiempo aproximado en que el clinker es expuesto a aquella masa de aire refrescante que después pasará desde el enfriador al horno como aire precalentado. La suposición de que son necesarios más de 15 minutos en el interior del horno, no responde en forma alguna a la realidad.

El error en tal suposición se hace evidente, cuando se toma en cuenta, como hizo notar por primera vez R.H. Bogue, que la zona de temperaturas para la cristalización de los componentes fusibles se encuentra entre 1288°C y 1200°C y que, para evitar esta cristalización, el tiempo es un factor esencial. El enfriamiento a 1200°C debe realizarse en 2 ó 3 minutos para producir un clinker con alto contenido de materia vítrea. Las afirmaciones de Bogue ha sido comprobadas por la American Portland Cement Association, así como por una serie de firmas colaboradores mediante ensayos de dilatación.

Queda, pues, claro, que una demora de más de 15 minutos en el in

terior del horno sería perjudicial, pues entonces tendría lugar, en lo esencial, una cristalización total. Más claro, el clinker, "se quemaría" en lugar de enfriarse y sería de ningún provecho, en el mejor de los casos, de pequeño contenido vítreo.

Además de las comprobaciones de la fase vítrea realizadas en el laboratorio, la presencia de un elevado contenido vítreo en un clinker enfriado con aire, ha puesto de manifiesto una mejora esencial de la aptitud de molienda del clinker. Esta mejora debe atribuirse, en gran parte, a las grandes tensiones existentes entre las partículas del clinker al enfriarlo rápidamente desde una temperatura superior a los 1200°C en oposición al efecto del enfriador de tambor, en que el clinker se recuece y se eliminan las mencionadas tensiones.

Aunque Bogue ha hecho constar también que la magnesia cristaliza en último lugar de la masa fusible como periclasa, y se ha de deducir de aquí que puede evitarse una dilatación retrasada del hormigón cuando se forma una cantidad por lo menos moderada de materia vítrea, no se consiguen las otras ventajas características del clinker con alto contenido vítreo en tanto no se alcanza un máximo en éste.

Por lo tanto, al emplear el enfriador rápido por aire, Fuller, hay que procurar en primer lugar, conseguir un desarrollo rápido de las llamas en el horno, con lo que el clinker alcanza a una temperatura superior a la de cristalización; la zona de enfriamiento, donde queda "congelado" por el aire, y se obtiene un clinker cuyo contenido vítreo, se aproxima al máximo teórico.

Se ha encontrado que la "congelación" tiene lugar sobre los 1250°C. Por ello, debe tener el clinker, al salir del horno, una temperatura que exceda los 1250°C cuando sea prácticamente posible. Cuando el clinker abandona el horno a 1370°C, como dice Taggart, no se debe tomar en cuenta en ningún enfriador el tiempo necesario para pasar de 1450°C a 1370°C.

El proceso de enfriamiento rápido por aire en el enfriador Fuller comienza tan pronto sale el clinker al exterior del horno y cae en la corriente de aire que va del enfriador al horno.

El contacto íntimo de la superficie del clinker con el aire frío produce una "congelación" de dicha cubierta en menos de un segundo, y acto

seguido tiene lugar la "congelación" progresiva de la masa total del clínker.

Anselm ha intentado determinar por comparación de la temperatura del aire que entra en el horno y la del que sale por la chimenea la relación entre el "aire primario" y el "aire secundario". Utiliza entonces un dato de un libro encontrado en la bibliografía y generaliza para el enfriador rápido y concluye que 58% del total de "aire secundario" y 42% del "aire primario" se desperdician en la combustión.

Considerando las experiencias reseñadas anteriormente, que son el resultado de cuidadosas investigaciones de técnicos americanos del cemento, se puede deducir sin más, que no se pueden dar valores generalizados al rendimiento de los enfriadores rápidos. Los enfriadores se proyectan teniendo en cuenta las condiciones del combustible. Sin embargo, poseen una cierta elasticidad, de forma que pueden cambiarse el combustible y la distribución del aire. El rendimiento térmico puede variar como consecuencia lógica del cambio de combustible. No obstante hay ciertos valores típicos para los diversos combustibles y sistemas de calefacción, que pueden utilizarse como una buena base para fines informativos, para comprender la influencia de todas las circunstancias de la combustión sobre el rendimiento de los enfriadores rápidos. Estas informaciones se dan en la tabla I del original.

Todo lo dicho tiene el único fin de hacer una crítica de los datos incorrectos de Anselm así como de la afirmación de que el enfriador rápido por aire eleva el gasto de combustible del horno más que el enfriador de tambor.

Se ha demostrado claramente mediante investigaciones térmicas técnicas que el enfriador rápido por aire, de parrilla transversal, Fuller, consigue un ahorro de combustible frente al enfriador de tambor. Estos resultados han sido también comprobados en 250 enfriadores Fuller que actualmente están en uso.

Estando Anselm bajo la impresión de que el enfriador rápido requiere más combustible, es realmente extraño que recomiende chimeneas de ventilación para el enfriador de tambor, a fin de alcanzar una mejor refrigeración ¿Qué hay entonces de la disminución de la cantidad de calor recuperada y del consiguiente aumento de la cantidad de combustible?. En el enfriador de tambor resultan inevitables estas consecuencias, puesto que la cantidad total -



de aire debe afluir a un extremo del mismo y este no es el caso del enfriador Fuller en el que el aire puede repartirse a voluntad entre el horno y la chimenea de ventilación.

---

NOTA: El trabajo original de W. Anselm, del cual no hemos podido disponer por el momento, y sobre el que se centra la discusión efectuada por Uhlig, ha sido publicado en los números de Enero y Marzo de la revista española "Cemento-Hormigón".