



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 N° 28 – MARZO DE 2010

“DETERMINACIÓN DEL BALANCE ENERGÉTICO DE LA FABRICACIÓN DEL CEMENTO PARA BACHILLERATO”

AUTOR JAVIER RUIZ HIDALGO
TEMÁTICA REACCIONES TERMOQUÍMICAS Y TERMODINÁMICA
ETAPA BACHILLERATO

Resumen

En el presente artículo, vamos a hacer un cálculo teórico de los requerimientos energéticos necesarios para la producción de un kilogramo de clínker, seguidamente corregiremos este dato considerando las pérdidas de calor de todo el proceso, con lo que conseguiremos un valor más real y finalmente considerando el tipo de carbón empleado, calculamos la cantidad de carbón necesaria para la obtención de un kilogramo de clínker.

Palabras clave

Clínker, arcillas, calizas, horno giratorio, alúmina, sílice, carbonato magnésico, carbonato cálcico, clinkerización, aluminoferrito tetracálcico, aluminato tricálcico, silicato tricálcico, silicato dicálcico, pérdidas parietales, vía húmeda, vía seca, poder calorífico inferior, poder calorífico superior, calor latente y crudo.

1. INTRODUCCIÓN

Para la industria del cemento, el clínker es el producto que se obtiene por la calcinación de las materias primas (arcillas y calizas) debidamente dosificadas, homogeneizadas y con un tamaño de grano adecuado.

Se entiende por crudo, a la mezcla de arcillas y calizas, que por un posterior tratamiento térmico se transforma en clínker.

El conjunto de reacciones químicas por las cuales se obtiene el clínker, se originan durante el proceso térmico de cocción, y este proceso se lleva a cabo en el horno giratorio, en el cual se pueden alcanzar temperaturas extremadamente altas, para que se puedan realizar las reacciones anteriormente mencionadas, y finalmente se obtenga el producto deseado, que no es otra cosa que el clínker.



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 N° 28 – MARZO DE 2010

En el horno giratorio de una fábrica de cemento, se realizarán las reacciones termoquímicas anteriormente descritas, así como algunos cambios de naturaleza física, estos cambios no se dan por igual en todos los hornos giratorios, ni en todas las partes de un determinado horno giratorio.

Las sustancias químicas que se obtienen en el proceso de cocción del crudo son muy complejas y para poder estudiarlas con una mayor simplicidad, se recurre a considerarlas formadas por la combinación de los distintos óxidos. Así tenemos las siguientes sustancias que se pueden abreviar como indico seguidamente:

S3C = $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ Silicato tricálcico

S2C = $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ Silicato dicálcico

A3C = $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ Aluminato tricálcico

AF4C = $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ Aluminoferrito tetracálcico

Suponemos que las materias primas que vamos a utilizar tienen la siguiente composición:

Componentes	Arcilla	Caliza
SiO ₂	60,5	3,5
Al ₂ O ₃	15,8	1,3
Fe ₂ O ₃	23	0,6
CaO	0,4	94,2

2. ETAPAS FUNDAMENTALES DEL PROCESO TÉRMICO

En el proceso térmico para la obtención del clinker, se pueden diferenciar las siguientes etapas fundamentales:

- Evaporación del agua retenida por cuando esta aún está en forma de crudo.
- Deshidratación de las arcillas: Las arcillas retienen en su estructura cristalina agua, para poder eliminarla, necesitamos temperaturas del orden de los 500 ° C. A estas temperaturas se rompe la red cristalina, transformándose la arcilla en alúmina (Al₂O₃) y sílice (SiO₂) amorfas.
- Disociación del carbonato magnésico (MgCO₃): Este proceso se realiza a una temperatura del orden de 700 ° C. El carbonato de magnesio (CaCO₃), se descompone en óxido del magnesio (MgO) y dióxido de carbono (CO₂) que se arrastra por los gases que escapan.
- Disociación del carbonato cálcico: Este proceso se realiza a una temperatura del orden de 900 °C. El carbonato cálcico (CaCO₃), se descompone en óxido del calcio (CaO) y dióxido de carbono (CO₂) que se arrastra por los gases que escapan. A esta temperatura se produce una



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 N° 28 – MARZO DE 2010

recristalización de la sílice (SiO_2) y la alúmina (Al_2O_3), que en la segunda etapa quedaron amorfas.

- A temperaturas superiores a 900°C , se realiza la cocción del clinker. Esta etapa se puede considerar a su vez que está formada por las siguientes etapas básicas:
 1. Combinación del carbonato cálcico (CaCO_3) con los subproductos resultantes de la deshidratación de las arcillas, sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), y óxido de hierro (Fe_2O_3). Este proceso es fuertemente exotérmico.
 2. Formación de la fase líquida: En esta etapa, se reblandece el material y se forma la fase líquida. Esta etapa tiene lugar a una temperatura de 1250°C aproximadamente. En esta etapa se forman aglomeraciones o nódulos del producto.
 3. Reacciones específicas de clinkerización.

3. REACCIONES DE CLINKERIZACIÓN

En esta etapa, podemos considerar que se dan los siguientes procesos de tipo físico y químico:

- La totalidad del hierro se combina químicamente como aluminoferrito tetracálcico (AF4C).
- El resto del aluminio (el que no forma parte del compuesto químico anterior) se combina químicamente como aluminato tricálcico (3^a).
- La sílice junto con el óxido de calcio, dan lugar a dos compuestos químicos distintos, el silicato tricálcico (S3C) y el silicato dicálcico (S2C).

No todo el óxido de calcio se combina químicamente con la sílice, siempre queda una determinada cantidad de óxido de calcio que no se ha combinado, a este óxido de calcio se le suele denominar cal libre. La podemos considerar como una impureza no deseada en el clinker.

El óxido de magnesio, es otra sustancia no deseada que puede aparecer en el clinker. Su origen está en que la caliza de origen pueda tener más o menos magnesio, es decir que pueda tener algo de dolomía. En pequeñas cantidades no suele dar problemas, pero si la cantidad es algo mayor, puede cristalizar de forma independiente al resto de las sustancias químicas presentes, formando periclase, originando una expansión no deseada en el cemento.

En el clinker también podemos encontrar otras impurezas como algunos óxidos alcalinos, el cloro y sulfatos. Estos últimos proceden de los combustibles.

4. COMPOSICIÓN POTENCIAL DEL CLÍNKER

La composición potencial del clinker, es la cantidad de cada uno de los compuestos descritos anteriormente que nosotros podemos encontrar en el clinker.



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 N° 28 – MARZO DE 2010

La palabra “potencial” significa que la fase líquida del clínker cristaliza en equilibrio junto con las fases sólidas y que estas fases son químicamente puras y de composición estequiométrica (S3C, S2C, A3C y AF4C).

Pero lo anterior no es del todo cierto en la práctica, debido a que el clínker se enfría de forma muy rápida, de manera que el equilibrio señalado anteriormente queda interrumpido. Es posible también que podamos encontrar iones distintos de los que se requieren teóricamente, debido a su presencia tanto en las materias primas del crudo como en el combustible, obteniéndose así alguna sustancia química no deseada.

Consideramos también de forma teórica, que todos los compuestos químicos del clínker son completamente cristalinos, pero en la práctica ocurre que quedan algunos materiales amorfos después del enfriamiento, de hecho todos los clínker tienen una fase vítrea en mayor o menor proporción.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente señaladas, se han establecido una serie de formulas para el cálculo de la composición potencial de un clínker normal, y son las que detallamos seguidamente:

$$S3C = 4,071 \text{ CaO} - 7,6 \text{ SiO}_2 - 6,7 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1,4 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$S2C = 8,6 \text{ SiO}_2 + 5,06 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 1,08 \text{ Fe}_2\text{O}_3 - 3,07 \text{ CaO}$$

$$A3C = 2,6 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1,7 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$AF4C = 3,04 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

5. PROCESO TÉRMICO PARA EL HORNO GIRATORIO

Los cálculos siguientes los estamos haciendo, considerando que tenemos un crudo de título 78 y un coeficiente clínker/crudo = 0.963, necesitaremos 1,04 Kg de crudo por cada Kg de clínker. Debemos considerar inicialmente los valores teóricos necesarios para todo el proceso y posteriormente consideraremos, los valores reales de pérdidas de calor que ocurren a lo largo de toda la instalación de la fábrica de cemento.

Criterio de signos: he considerado positivos los calores que se proporcionan al sistema y negativos los calores que el sistema nos devuelve.

5.1. Procesos endotérmicos teórico:

1. Calentar el crudo (1,04 Kg) desde 0 ° C a 800 ° C:

$$Q_1 = m \times c \times \Delta t \quad c = 0,279 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{K} \quad \Delta t = 800 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$Q_1 = 1,04 \times 0,279 \times 800 = 232,13 \text{ Kcal/Kg ce clínker}$$



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 N° 28 – MARZO DE 2010

2. Descomposición térmica de los carbonatos:

$$Q_2 = X \times c_p \times m \quad X = 0.78 \text{ Título} \quad c_p = 400 \text{ Kcal/Kg}$$
$$Q_2 = 0,78 \times 1,04 \times 400 = 324,48 \text{ Kcal/Kg de clínker}$$

3. Elevación de la temperatura del óxido de calcio desde 800 ° C hasta la temperatura de clinkerización 1450 ° C:

$$Q_3 = 0,635 \times 1,4 \times (0,218 \times 1450 - 0,211 \times 800) = 97,28 \text{ Kcal/kg de clínker}$$

4. Calentamiento de los derivados de las arcillas desde 800 ° C hasta 1450 ° C:

$$Q_4 = 0,32 \times 1,04 \times 0,29 \times (1450 - 800) = 62,73 \text{ Kcal/Kg de clínker}$$

5. Formación de la fase líquida:

$$Q_5 = \text{Se puede estimar que supone } 26 \text{ Kcal/kg de clínker}$$

Así pues el calor proporcionado al sistema es:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 = Q' = 232,13 + 324,48 + 97,28 + 62,73 + 26 = 742,62 \text{ Kcal/Kg de clínker}$$

5.2. Procesos exotérmicos teórico:

6. Calor desprendido en el proceso de clinkerización:

$$Q_6 = \text{Podemos estimar que se desprenden } 100 \text{ Kcal/kg de clínker}$$

7. Enfriamiento del clínker desde 1450 ° C hasta 0 ° C:

$$Q_7 = 1 \times 0,247 \times 1450 = 358,15 \text{ Kcal/Kg de clínker}$$



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 Nº 28 – MARZO DE 2010

8. Enfriamiento del CO₂ desde 800 ° C hasta 0 ° C:

$$Q_8 = 0,499 \times 1,04 \times 0,265 \times 800 = 110,0 \text{ Kcal/kg de clínker}$$

Todos los valores anteriores los consideraremos negativos en virtud del criterio de signos especificado al inicio de este apartado.

Calor desprendido por el sistema :

$$Q_6 + Q_7 + Q_8 = Q'' = -100 - 358,15 - 110,0 = - 568,18 \text{ Kcal/kg de clínker}$$

5.3. Correcciones para hacer coincidir los valores teóricos con los reales:

Los valores anteriores, son valores teóricos, pero en la realidad la cantidad de calor es sensiblemente mayor.

Hay que considerar que el horno giratorio pierde mucho calor por las paredes, este calor lo desprende por radiación. A este calor perdido por las paredes del horno se le llama pérdidas parietales. En el enfriador también se pierde mucho calor por radiación. Los gases de escape suelen salir también calientes. Por todo lo comentado anteriormente, podemos concluir que el rendimiento térmico de una fábrica de cemento es bastante bajo, de forma que el calor real que necesitamos para la obtención del clínker es muy superior al calor teórico calculado anteriormente.

Dado el elevado consumo energético de todo el proceso, en la industria cementera se pretende reducir los consumos térmicos de los hornos giratorios, empleando para eso modificaciones que supongan algún tipo de ahorro energético. Las modificaciones pueden afectar a otras zonas de la instalación, no sólo a los hornos giratorios.

Actualmente se recurre a las instalaciones por vía seca, en las cuales los requerimientos energéticos son más bajos.

En el proceso por vía húmeda, (proceso antiguo), es una ventaja el hecho de que el crudo sea mucho más homogéneo. El crudo se introduce en el horno giratorio como una pasta fluida.

Para el horno de vía seca, empleando un intercambiador de calor y un enfriador de parrilla normal, las pérdidas energéticas, pueden ser las siguientes:

9. Calor arrastrado por los gases de escape del horno giratorio:

$$Q_9 = 166 \text{ Kcal/kg de clínker.}$$



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 N° 28 – MARZO DE 2010

10. Pérdidas parietales tanto del horno giratorio, con del intercambiador (calor perdido por radiación):

$$Q_{10} = 81 \text{ Kcal/kg de clínker.}$$

11. Pérdidas parietales de los enfriadores de parrilla:

$$Q_{11} = 123 \text{ Kcal/Kg de clínker.}$$

El calor total perdido en todos estos procesos es:

$$Q_9 + Q_{10} + Q_{11} = Q''' = 166 + 81 + 123 = 370 \text{ Kcal/Kg de clínker.}$$

5.4. Calor total real necesario para la fabricación del clínker:

Considerando todos los procesos descritos en los apartados anteriores, obtenemos un calor total real para todo el proceso de fabricación de 1 kilogramo de clínker de 544,44 Kcal.

$$Q_t = Q' + Q'' + Q''' = 742,62 - 568,18 + 370 = 544,44 \text{ cal/ kg de clínker}$$

6. CANTIDAD DE CARBÓN NECESARIA

El poder calorífico inferior de un combustible, es la cantidad de calor que se desprende cuando quemamos un kilogramo de dicho combustible, considerando que el agua generada en la combustión permanece en estado valor. El agua generada en la combustión permanecerá en estado vapor, ya que en el proceso la temperatura siempre estará por encima de los 100 ° C.

Si los humos estuvieran a una temperatura inferior a 100 ° C el vapor de agua cedería su calor de condensación, así tendríamos una mayor cantidad de calor que se denomina poder calorífico superior.

La diferencia entre el poder calorífico superior y el poder calorífico inferior es el calor latente del agua.

Considerando un carbón español de composición promedia: 736,1 g de Carbono, 32,8 g de Hidrógeno y 18,5 g de azufre por cada kilogramo de carbon.

Tendremos:





ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 N° 28 – MARZO DE 2010



736,1 g de C dan = $736,1/12 \times 97,6 = 5987$ Kcal/Kg de carbón

32,8 g de H dan = $32,8/2 \times 58,2 = 954$ Kcal/Kg de carbón

18,5 g de S dan = $18,5/32 \times 80 = 46$ Kcal/Kg de carbón

El poder calorífico inferior de este carbón es:

$$5987 + 954 + 46 = 6987 \text{ Kcal/Kg de carbón}$$

Para cada kilogramo de clinker se necesitan 544,44 Kcal como cada kilo de carbón nos proporciona 6987 Kcal, para la obtención de un kilogramo de clinker necesitamos 78 gramos de carbón.

BIBLIOGRAFÍA

Labahn, Otto (1984). Prontuario del Cemento. Barcelona: Editorial Técnicos Asociados S.A.

Lotear, Beyer (2000). Química Inorgánica. Barcelona: Editorial Ariel

H. F. W. Taylor (1978). La Química de los Cementos. Logroño: Editorial Urmo S.A.

Autoría

- Nombre y Apellidos: Javier Ruiz Hidalgo
- Centro, localidad, provincia: IES Américo Castro, Huetor-Tajar, Granada
- E-mail: javierruizh@hotmail.com