

- Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento -

611-30 CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA DEL CLINKER DE CEMENTO PORTLAND (continuación).

Doctor J. Calleja Carrete.

- - -

3.- PARTE EXPERIMENTAL

a) Técnica de la preparación de las muestras.-

Con objeto de poner de manifiesto las heterogeneidades analíticas y de distribución de constituyentes mineralúrgicos en el clinker granulado, a fin de comprobar no sólo hechos ya conocidos, sino previsiones complementarias según lo expuesto en los apartados precedentes, y sacar de ello las correspondientes conclusiones, se han tenido en cuenta, en líneas generales, los criterios ya indicados en un trabajo anterior (1), además de otros útiles para el presente.

Se han utilizado como muestras de ensayo gránulos de clinker de cemento Portland obtenidos en horno rotatorio de vía húmeda empleando como combustible carbón, y otros cocidos en horno Lopol por vía seca quemando fuel-oil. Ambas series de experiencias han tenido por objeto eliminar la variable introducida por las cenizas del combustible, con objeto de poder dar mayor generalidad a los resultados obtenidos y a las conclusiones emanadas de ellos.

En cada gránulo de clinker se han considerado, a diferencia de lo hecho en el citado trabajo precedente (1), sólo dos zonas: una externa, cortical o periférica (que incluye la corti-

cal y parte de la intermedia tenidas en cuenta en aquél), y otra interna, central o nuclear que comprende la nuclear de entonces y parte también de la intermedia.

La extensión de cada una de estas zonas se ha dejado al arbitrio, si bien en cierto modo se señalan para cada gránulo las dimensiones respectivas de ollas, tal como se indica en el apartado 4. Se ha hecho así admitiendo a priori que las posibles variaciones observadas en cuanto a composición y distribución de constituyentes mineralógicos serán continuas según una dirección radial en cada gránulo de forma sensiblemente esférica; en tal caso las cifras absolutas que se obtengan dependerán de la extensión o espesor relativo de cada zona considerada, pero las diferencias observadas entre una y otra serán siempre del mismo signo para cada componente elemental o constituyente mineralógico estudiado, con lo que este aspecto cualitativo en el que han de apoyarse las conclusiones a extraer queda fijo e invariable.

No obstante, en otra serie de experiencias se separaron las zonas corticales de las internas, dando a las primeras un espesor menor que en ensayos anteriores, a fin de observar la variación que esta reducción de la zona considerada como cortical introducía en los resultados numéricos obtenidos, habiéndose podido confirmar así la validez de la hipótesis señalada.

Otra de las razones de considerar solamente dos zonas en lugar de tres en los gránulos de clinker ha sido el facilitar la laboriosa y delicada operación de preparar las muestras. En efecto, para separar cortezas y núcleos en los gránulos se ha utilizado en esta ocasión una muela de diamante accionada mecánicamente, con la que se han obtenido por corte las lajas externas de los gránulos, constituyentes de la zona cortical, dejando en ca-

da uno un núcleo interior de forma aproximadamente cúbica o prismática.

En la operación de corte se refrigeraba la muela y el gránulo con benzol o toluol exentos de agua, a fin de evitar que la elevación de temperatura pudiera introducir modificaciones del tipo de un recocido del gránulo, por ejemplo en las zonas de corte.

En la tabla 1 se dan las dimensiones de los gránulos utilizados en cada una de las catorce experiencias de la primera serie correspondientes al horno rotatorio de vía húmeda, así como el tamaño de los prismas internos resultantes que constituyeron las zonas nucleares. De cada gránulo más o menos aproximadamente esférico o más bien elipsoidal se dan las dimensiones aproximadas según los tres ejes del elipsoide; en cuanto al núcleo extraído de cada gránulo se indican las dimensiones de las tres aristas.

Ambas muestras por separado fueron después trituradas, pasadas a través de un tamiz de 10.000 mallas por centímetro cuadrado, homogeneizadas y guardadas en tubos cerrados a la lámpara hasta el momento de proceder con ellas a las distintas operaciones analíticas, con objeto de evitar su contaminación o su alteración por exposición a la atmósfera.

El paso por el tamiz de 10.000 mallas tenía por objeto reducir todas las muestras a un mismo grado de finura aproximadamente, a fin de evitar posibles diferencias de ataque atribuíbles a diferencias de finura, pues como ya se indicó, es posible la existencia de cal libre como inclusión en los cristales de silicato y aluminatos tricálcicos, la cual pasaría inadvertida de no reducir la muestra a un grado de finura muy elevado.

TABLA I

Muestra	Dimensiones del Gránulo cm.	Dimensiones del núcleo cm.
1	3,0 x 3,2 x 3,5	1,0 x 1,0 x 1,0
2	3,5 x 3,7 x 4,0	1,2 x 1,2 x 1,5
3	3,0 x 3,7 x 4,5	1,5 x 1,5 x 1,5
4	4,0 x 4,5 x 5,0	1,5 x 1,8 x 2,5
5	3,0 x 4,0 x 5,0	1,4 x 1,5 x 1,9
6	2,5 x 3,3 x 4,0	1,1 x 1,2 x 1,2
7	1,5 x 2,5 x 3,5	1,1 x 1,1 x 1,3
8	1,5 x 2,4 x 3,0	1,0 x 1,2 x 1,2
9	2,5 x 3,0 x 3,5	1,2 x 1,5 x 1,5
10	2,0 x 3,0 x 4,0	1,1 x 1,8 x 1,8
11	2,5 x 3,0 x 3,5	1,3 x 1,4 x 1,6
12	2,5 x 3,0 x 3,5	1,3 x 1,3 x 1,4
13	1,5 x 2,5 x 3,5	1,0 x 1,3 x 1,4
14	2,5 x 3,0 x 3,5	1,3 x 1,3 x 1,4

b) Métodos analíticos.-

Por lo que se refiere a la determinación de cal libre en las muestras se ha seguido en un todo lo ya indicado en el mencionado trabajo anterior (1), de acuerdo con las especificaciones americanas (17). El método de Emley pone de manifiesto la cal libre tanto en forma de CaO como de Ca (OH)₂, por lo que suele dar a veces valores más altos que los procedimientos microscópicos que permiten detectar solamente el CaO. Además, en el caso de emplear aceleradores tales como el NaCl o el BaCl₂, se obtienen valores aún más altos; por esta razón no se ha hecho uso de ellos.

En cuanto al análisis general del clinker se ha seguido la norma española NELC 3.01-a, que prácticamente en su totalidad es una transcripción de la correspondiente americana (18).

No se han llevado a cabo determinaciones de álcalis ni de otros componentes menores como P₂O₅, Mn₂O₃ y TiO₂, por lo que en los cálculos posteriores de fase vítrea y de las composiciones potenciales no se han tenido en cuenta las inclusiones o correcciones correspondientes.

4.- RESULTADOS

Los resultados analíticos, así como los valores de los módulos e índices, composición potencial y contenido en fase vítrea calculados a partir de aquéllos, tanto para las zonas corticales como para las nucleares correspondientes a cada una de las muestras, se exponen en una serie de tablas, indicando además en todas ellas los valores medios resultantes (medias aritméticas).

(17) A.S.T.M. Standards, C 114-47, 57 (1949).

(18) A.S.T.M. Standards, C 114-47, 38 (1949).

TABLA 2

ANÁLISIS QUÍMICO - CORTEZAS										
Muestras	%									
	H	PF	RI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CaO libre
1	0,08	0,5	0,2	22,8	6,4	2,1	65,2	1,2	0,4	0,7
2	0,05	0,4	0,1	22,7	6,3	2,0	66,1	1,4	0,3	0,6
3	0,04	0,7	0,1	22,4	6,2	1,8	62,2	1,2	0,3	1,1
4	0,05	0,6	0,1	22,2	6,7	1,9	65,4	1,2	0,3	0,7
5	0,03	0,4	0,1	22,3	6,7	1,9	65,7	1,2	0,3	0,8
6	0,04	0,4	0,2	22,7	6,1	2,0	66,7	1,1	0,3	0,8
7	0,04	0,6	0,2	23,0	6,0	2,2	66,0	1,1	0,3	0,6
8	0,04	0,5	0,1	22,4	6,6	1,9	65,7	1,2	0,3	0,8
9	0,05	0,6	0,1	22,4	6,5	2,2	65,6	1,0	0,3	0,9
10	0,07	0,8	0,1	22,7	6,4	2,0	65,2	1,2	0,3	0,8
11	0,03	0,5	0,2	22,7	6,9	1,9	65,4	1,2	0,2	0,4
12	0,05	0,7	0,1	23,1	6,6	2,0	65,6	1,1	0,3	0,7
13	0,05	--	0,2	22,5	6,7	2,0	66,0	1,2	1,3	1,2
14	0,04	0,6	0,2	22,5	6,9	2,0	65,7	1,2	0,4	0,8
Valores medios	0,05	0,6	0,2	22,6	6,5	2,0	65,8	1,2	0,4	0,8

TABLA 3

ANÁLISIS QUÍMICO - NÚCLEOS										
Muestras	%									
	H	PF	RI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CaO libre
1	0,10	0,5	0,2	25,9	5,3	1,8	63,0	1,0	0,4	0,6
2	0,02	0,5	0,1	22,9	5,3	1,7	67,3	1,3	0,4	1,6
3	0,15	0,7	0,5	21,8	4,3	1,3	65,5	1,1	0,5	3,9
4	0,19	0,9	0,1	25,1	5,7	1,9	63,6	1,1	0,4	0,5
5	0,02	0,6	0,1	23,0	5,5	1,8	66,1	1,1	0,3	1,5
6	0,10	0,8	0,2	22,4	3,0	2,8	68,4	1,0	0,4	3,7
7	0,12	1,0	0,1	24,5	5,1	1,8	65,3	1,1	0,5	0,9
8	0,04	0,7	0,2	24,6	5,1	2,2	64,8	1,2	0,5	1,2
9	0,02	0,7	0,1	22,8	5,6	1,7	66,5	1,2	0,6	2,7
10	0,22	1,4	0,2	22,9	5,5	1,8	64,7	1,2	0,4	0,8
11	0,07	1,3	0,2	24,7	5,9	1,7	66,0	1,0	0,5	0,5
12	0,20	--	0,3	26,8	5,5	1,5	64,2	1,0	0,3	0,9
13	0,09	0,8	0,2	22,3	5,2	1,6	67,5	1,1	0,4	4,9
14	0,08	0,7	0,1	24,4	5,3	1,7	65,9	1,0	0,4	1,5
Valores medios	0,10	0,8	0,2	23,9	5,2	1,8	65,6	1,1	0,4	1,8

T A B L A 4

INDICES Y MODULOS - CORTEZAS						
Muestras	MH	MS	MF	IR	IH	GS
1	2,1	2,7	3,0	0,46	0,37	0,89
2	2,1	2,7	3,2	0,44	0,37	0,91
3	2,1	2,8	3,4	0,44	0,36	0,92
4	2,1	2,6	3,5	0,45	0,37	0,91
5	2,1	2,6	3,5	0,45	0,37	0,91
6	2,1	2,8	3,1	0,44	0,36	0,92
7	2,1	2,8	2,7	0,44	0,36	0,90
8	2,1	2,6	3,5	0,45	0,37	0,91
9	2,1	2,6	3,0	0,45	0,37	0,90
10	2,1	2,7	3,2	0,45	0,37	0,89
11	2,1	2,6	3,6	0,45	0,37	0,90
12	2,0	2,7	3,3	0,46	0,38	0,88
13	2,1	2,6	3,4	0,46	0,37	0,89
14	2,1	2,5	3,5	0,45	0,37	0,90
Valores medios	2,1	2,7	3,3	0,45	0,37	0,90

TABLA 5

INDICES Y MODULOS - NUCLEOS						
Muestras	MH	MS	MF	IR	IH	GS
1	1,9	3,6	2,9	0,50	0,43	0,78
2	2,2	3,3	3,1	0,43	0,37	0,91
3	2,2	3,9	3,3	0,43	0,36	0,92
4	1,9	3,3	3,0	0,49	0,42	0,81
5	2,1	3,2	3,1	0,45	0,37	0,90
6	2,3	3,9	1,1	0,39	0,36	0,95
7	2,0	3,6	2,8	0,47	0,40	0,85
8	2,0	3,4	2,3	0,47	0,40	0,82
9	2,1	3,1	3,3	0,45	0,38	0,89
10	2,1	3,1	3,2	0,45	0,38	0,89
11	2,0	3,2	3,5	0,47	0,40	0,85
12	1,9	3,8	3,7	0,51	0,44	0,77
13	2,1	3,3	3,2	0,46	0,37	0,89
14	2,0	3,5	3,1	0,46	0,40	0,85
Valores medios	2,1	3,4	3,0	0,46	0,39	0,86

a) Análisis químico.-

Las tablas 2 y 3 presentan respectivamente la composición de las muestras corticales y nucleares determinada por análisis, con inclusión de los componentes mayores y algunos de los menores del clinker. Las columnas encabezadas con H, PF, RI se refieren a la humedad de las muestras determinada a 105 - 110°C, pérdida por calcinación a 1000°C y residuo insoluble, respectivamente.

Los datos consignados son en todos los casos la media de dos determinaciones concordantes, habiéndose efectuado una tercera en las pocas ocasiones en que las diferencias halladas lo reclamaban así.

b) Indices y módulos calculados.-

En las tablas 4 y 5 se incluyen los valores de los siguientes módulos e índices definidos del modo que se indica a continuación:

$$\text{Módulo hidráulico (Michaelis) } MH = \frac{\text{CaO} - (\text{CaO libre} + \text{CaO en CaSO}_4)}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (\text{II})$$

$$\text{Módulo silíceo (Kühl) } MS = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (\text{III})$$

$$\text{Módulo aluminico, férrico o de fundentes (relación A/F) (Kühl) } MF = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (\text{IV})$$

$$\begin{array}{l} \text{Índice de hidraulicidad (Vicat)} \\ \text{Índice de resistencia química (Lafuma)} \end{array} \quad IR = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO}} \quad (\text{V})$$

Indice real de hidráulicidad
(Lafuma)

$$IH = \frac{SiO_2 + 0,2 Al_2O_3}{CaO} \quad (VI)$$

Grado de saturación en cal
(Kühl)

$$GS = \frac{CaO - (CaO \text{ libre} + CaO \text{ en } CaSO_4)}{2,8 SiO_2 + 1,1 Al_2O_3 + 0,7 Fe_2O_3} \quad (VII)$$

En nuestro caso, por tratarse de clinker y no de cemento, la cal total se ha corregido sustrayendo de ella la cifra de cal libre solamente, al no existir cal en forma de sulfato. Las cifras de alúmina y óxido férrico son las indicadas en las tablas 2 y 3 al no corregirse sustrayendo de la primera la suma - $P_2O_5 + TiO_2$, ni de la segunda el Fe_2O_3 correspondiente al hierro en forma de óxido ferroso, ya que estos componentes menores no fueron determinados en el análisis químico.

(continuará)