

- Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento -

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

Dr. J. Calleja Carrete.

- - -

c) Composición potencial calculada.-

La composición potencial de las zonas corticales y nucleas indicadas en las tablas 6 y 7 respectivamente se ha calculado con arreglo a las fórmulas dadas por Bogue para el caso de un clinker:

$$C_3S = 4,07 CaO - (7,60 SiO_2 + 1,43 Fe_2O_3 + 6,72 Al_2O_3)$$

$$C_2S = 2,87 SiO_2 - 0,754 C_3S$$

$$C_3A = 2,65 Al_2O_3 - 1,69 Fe_2O_3 \quad (VIII)$$

$$C_4AF = 3,04 Fe_2O_3$$

en el supuesto de que las muestras de clinker ensayadas se han mantenido en condiciones de equilibrio durante su proceso de enfriamiento a la salida del horno. En cuanto a los errores que esta hipótesis, que casi nunca se cumple de manera total, puede introducir, nos remitimos a lo indicado al respecto en el apartado 2,

En el cálculo de los valores indicados en las ecuaciones (VIII) no se han introducido tampoco las correcciones correspondientes a otros componentes menores, incluidos los álcalis.

Las tablas 6 y 7 contienen también dos columnas con las relaciones C_3S/C_2S y C_4AF/C_3A .

TABLA 6

COMPOSICION POTENCIAL - CORTEZAS						
Muestras	%					
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ S/C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	C ₄ AF/C ₃ A
1	43,2	32,8	1,32	13,4	6,4	0,48
2	48,9	28,3	1,73	13,3	6,1	0,46
3	50,5	26,2	1,91	13,4	5,5	0,41
4	46,9	28,3	1,66	14,5	5,8	0,40
5	46,9	28,6	1,64	14,5	5,8	0,40
6	51,8	26,1	1,98	12,8	6,1	0,48
7	47,9	29,9	1,60	12,2	6,7	0,55
8	46,8	29,0	1,61	14,3	5,8	0,41
9	46,3	29,4	1,58	13,5	6,7	0,50
10	43,7	32,2	1,36	13,6	6,1	0,45
11	42,9	32,8	1,31	15,1	5,8	0,38
12	41,4	35,1	1,18	14,1	6,1	0,43
13	44,9	30,8	1,46	14,4	6,1	0,42
14	43,9	31,5	1,40	14,9	6,1	0,41
Valores medios	46,1	30,1	1,55	13,9	6,1	0,44

TABLA 7

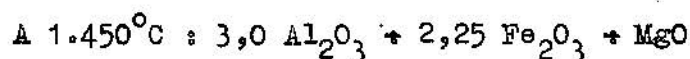
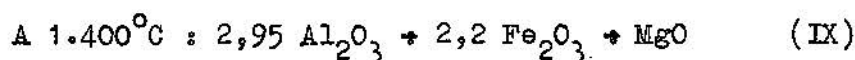
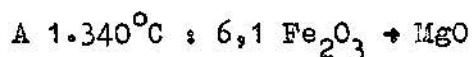
COMPOSICION POTENCIAL - NUCLEOS						
Muestras	%					
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ S/C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	C ₄ AF/C ₃ A
1	18,9	60,0	0,32	11,0	5,5	0,50
2	55,3	24,0	2,30	11,2	5,2	0,46
3	54,3	21,6	2,52	9,2	3,9	0,43
4	25,0	53,2	1,09	11,9	5,8	0,49
5	48,6	29,4	1,65	11,5	5,5	0,47
6*	64,2	16,0	4,01	3,2	8,5	2,66
7	39,1	40,9	0,96	10,5	5,5	0,52
8	34,5	44,6	0,77	9,8	6,7	0,68
9	46,3	30,5	1,52	12,0	5,2	0,43
10	46,5	30,7	1,52	11,5	5,5	0,48
11	36,8	43,2	0,85	12,8	5,2	0,40
12	14,9	65,7	2,27	12,0	4,6	0,38
13	48,1	27,8	1,73	11,1	4,9	0,44
14	38,6	40,9	0,94	11,2	5,2	0,46
Valores medios	39,0	39,4	1,60	11,2	5,3	0,47

*) Los valores correspondientes a la muestra numero 6 no se han tenido en cuenta al calcular las medias aritméticas.

d) Fase líquida calculada.-

En las tablas 8 y 9 se dan los valores del contenido en fase líquida a tres temperaturas, según las ecuaciones (I)^(*) dadas por Lea y Parker (2), aunque sin tener en cuenta los álcalis. Por otra parte, las cifras de magnesia utilizadas en dichas ecuaciones son las que figuran en las tablas 2 y 3, sin corregir por sustracción del Mn_2O_3 , al no haberse determinado tampoco este componente menor en el análisis químico.

Las fórmulas utilizadas han sido, por tanto, las siguientes:



e) Análisis estadístico de los resultados precedentes.^(**)

A la vista de los datos analíticos de las tablas 2 y 3 y de las composiciones potenciales dadas en las 6 y 7, deducidas de aquéllas mediante las ecuaciones (VIII), se ha llevado a cabo un análisis estadístico elemental de dichos datos experimentales y composiciones calculadas, así como de los errores y niveles de confianza que se obtienen al sustituir los datos analíticos de las tablas 2 y 3, y los de composición potencial de la 6 y 7, por sus medias aritméticas.

(*) Vease U.A.M.C. número 55.

(**) Agradecemos a la Sección de Cálculo del I.I.C.C. la colaboración prestada en este estudio.

TABLA 8

FASE LIQUIDA - CORTEZAS			
Muestras	A 1.340°C	A 1.400°C	A 1.450°C
1	14,0	24,7	25,1
2	13,6	24,4	24,8
3	12,2	23,5	23,8
4	12,8	25,2	25,6
5	12,8	25,2	25,6
6	13,3	23,5	23,9
7	14,5	23,6	24,0
8	12,8	24,9	25,3
9	14,6	25,0	25,4
10	13,4	24,5	24,9
11	12,8	25,8	26,2
12	13,3	25,0	25,4
13	13,4	25,4	25,8
14	13,4	26,0	26,4
Valores medios	13,4	24,8	25,2

TABLA 9

FASE LIQUIDA - NUCLEOS			
Nuestras	A 1.340°C	A 1.400°C	A 1.450°C
1	12,0	20,6	20,9
2	11,7	20,7	21,0
3	9,0	16,7	16,9
4	12,7	22,1	22,5
5	12,1	21,3	21,6
6	18,1	16,0	16,3
7	12,1	20,1	20,4
8	14,6	21,1	21,4
9	11,6	21,4	21,3
10	12,2	21,4	21,7
11	11,4	22,1	22,5
12	10,1	20,6	20,9
13	10,9	20,0	20,3
14	11,4	20,4	20,7
Valores medios	12,1	20,3	20,6

Ya se comprende que el escaso número de experiencias, desde el punto de vista de cualquier consideración de tipo estadístico, no permite llevar a cabo un estudio más a fondo; incluso los resultados aquí consignados han de considerarse más bien y tan sólo como un sondeo piloto cuyos datos servirían de base para el planeamiento de controles a mayor escala, mediante la adecuada toma de muestras.

Tiene esto el interés de reducir el número de operaciones analíticas efectuadas con cada una de las muestras de cada serie (cortezas y núcleos de los gránulos de clinker) a dos solamente: una con la muestra media formada por todas las zonas corticales de todos los gránulos considerados, y otra con la muestra media formada por todas las zonas nucleares correspondientes, en los casos en que los resultados de este estudio estadístico lo permitan. Además, desde el punto de vista de la preparación de muestras se facilitan notablemente las operaciones de pulverización y tamizado, según lo expuesto en el apartado [3 a)].

En las tablas 10 y 11 figuran los datos analíticos SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 y CaO , así como sus medias aritméticas μ y las desviaciones típicas inasegadas σ .

Puede observarse que los excesos de los valores extremos sobre la media aritmética nunca rebasan notablemente el valor 2σ , excepción hecha de los de Al_2O_3 y Fe_2O_3 correspondientes a la muestra número 6 de los núcleos (tabla 11), que llegan a valer 3σ y $-2,85\sigma$. Suponiendo las series normales, la posibilidad de estos excesos es muy pequeña.

Anulando los datos de la experiencia correspondiente a la muestra número 6 se obtienen las medias aritméticas μ' y las desviaciones típicas σ' que se incluyen también en la tabla 11.

TABLA 10

CORTEZAS				
Muestras	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
1	22,8	6,4	2,1	64,5
2	22,7	6,3	2,0	65,5
3	22,4	6,2	1,8	65,1
4	22,2	6,7	1,9	64,7
5	22,3	6,7	1,9	64,9
6	22,7	6,1	2,0	65,9
7	23,0	6,0	2,2	65,4
8	22,4	6,6	1,9	64,9
9	22,4	6,5	2,2	64,7
10	22,7	6,4	2,0	64,4
11	22,7	6,9	1,9	65,0
12	23,1	6,6	2,0	64,9
13	22,5	6,7	2,0	64,8
14	22,5	6,9	2,0	64,9
Valores medios μ	22,6	6,5	2,0	64,9
σ	0,26	0,28	0,114	0,407

TABLA 11

NUCLEOS				
Muestras	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
1	25,9	5,3	1,8	62,4
2	22,9	5,3	1,7	65,7
3	21,8	4,3	1,3	61,6
4	25,1	5,7	1,9	63,1
5	23,0	5,5	1,8	64,6
6	22,4	3,0	2,8	64,7
7	24,5	5,1	1,8	64,4
8	24,6	5,1	2,2	63,6
9	22,8	5,6	1,7	63,8
10	22,9	5,5	1,8	63,9
11	24,7	5,9	1,7	66,5
12	26,8	5,5	1,5	63,3
13	22,3	5,2	1,6	62,6
14	24,4	5,3	1,7	64,4
Valores medios μ	23,9	5,2	1,8	63,8
σ	1,489	0,724	0,35	1,40
Valores medios μ'	23,98	5,33	1,73	63,76
σ'	1,4860	0,4139	0,2086	1,1848

Se aprecia entonces que los datos de Al_2O_3 y Fe_2O_3 correspondientes al análisis de la muestra 6 presentan excesos de $5,6\sigma$ y 5σ sobre las nuevas medias aritméticas μ , los cuales son francamente inadmisibles, justificando plenamente la decisión adoptada.

En las tablas 12 y 13 figuran los datos C_3S , C_2S , C_3A y C_4AF de composición potencial calculada, correspondientes a las zonas corticales y nucleares respectivamente, así como sus medias aritméticas μ y sus desviaciones típicas σ . Se ha calculado además el error probable ϵ sobre la media aritmética.

A la vista de las cifras resultantes se pueden formular las siguientes conclusiones en la comparación de las series correspondientes a las cortezas y a los núcleos, por lo que respecta a dispersiones y medias aritméticas:

Valores de C_3S y C_2S .- La dispersión es muy significativamente más elevada en la serie de los núcleos que en la de las cortezas.

La media aritmética es significativamente más elevada en la serie de los núcleos que en la de las cortezas.

La diferencia es menos significativa que en los casos del C_3A y el C_4AF debido a los altos valores de las dispersiones del C_3S y el C_2S en la serie de los núcleos.

Valores de C_3A .-

La dispersión es algo más elevada en la serie de los núcleos que en la de las cortezas, pero la diferencia no es significativa.

La media aritmética es muy significativamen-

T A B L A 1 2

CORTEZAS				
Muestras	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
1	43,22	32,85	13,41	6,38
2	48,86	28,31	13,31	6,08
3	50,48	26,23	13,39	5,47
4	46,87	28,38	14,54	5,78
5	46,92	28,62	14,54	5,78
6	51,84	26,06	12,78	6,08
7	47,91	29,89	12,18	6,69
8	46,83	23,98	14,28	5,78
9	46,26	29,41	13,51	6,69
10	43,72	32,19	13,58	6,08
11	42,94	32,78	15,07	5,78
12	41,37	35,10	14,11	6,08
13	44,86	30,76	14,37	6,08
14	43,91	31,46	14,90	6,08
Valores medios <i>M</i>	46,14	30,07	13,86	6,06
σ	3,0059	2,5987	0,8260	0,3447
ε	0,5422	0,4688	0,1490	0,0622

TABLA 13

NUCLEOS				
Muestras	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
1	18,94	60,05	11,00	5,47
2	55,31	24,02	11,17	5,17
3	54,28	21,64	9,20	3,95
4	25,04	53,16	11,89	5,78
5	48,59	29,37	11,53	5,47
6	--	--	--	--
7	39,06	40,86	10,47	5,47
8	34,47	44,61	9,78	6,69
9	46,32	30,51	11,97	5,17
10	46,50	30,66	11,53	5,47
11	36,79	43,15	12,76	5,17
12	14,85	65,72	12,04	4,56
13	48,07	27,76	11,08	4,86
14	38,62	40,91	11,17	5,17
Valores medios	38,98	39,41	11,20	5,26
σ	12,876	13,838	0,9679	0,6382
ε	2,4104	2,5905	0,1812	0,1195

TABLA 14

CORTEZAS						
Grados de confianza	50%	75%	90%	95%	99%	99,7%
Magnitud	$\epsilon = + 0,67\sigma$	$\epsilon = + 1,15\sigma$	$\epsilon = + 1,64\sigma$	$\epsilon = + 1,96\sigma$	$\epsilon = + 2,58\sigma$	$\epsilon = + 3\sigma$
C_3S	+2,04 (+4%)	+3,46 (+7%)	+4,93 (+10%)	+5,89 (+12%)	+7,75 (+16%)	+9,02 (+19%)
C_2S	+1,74 (+5%)	+2,99 (+9%)	+4,26 (+14%)	+5,09 (+16%)	+6,70 (+22%)	+7,80 (+26%)
C_3A	+0,55 (+3%)	+0,94 (+6%)	+1,35 (+9%)	+1,62 (+11%)	+2,49 (+17%)	+2,49 (+18%)
C_4AF	+0,23 (+3%)	+0,39 (+6%)	+0,56 (+9%)	+0,67 (+11%)	+0,89 (+14%)	+1,03 (+16%)
NUCLEOS						
C_3S	+8,58 (+22%)	+14,81(+38%)	+21,12(+54%)	+25,24(+65%)	+33,2 (+85%)	+38,62(+99%)
C_2S	+9,27 (+23%)	+15,91(+40%)	+22,69(+57%)	+27,12(+69%)	+35,7 (+91%)	+41,51(+105%)
C_3A	+0,65 (+5%)	+1,11 (+9%)	+1,59 (+14%)	+1,89 (+17%)	+2,49 (+22%)	+2,90 (+26%)
C_4AF	+0,43 (+8%)	+0,73 (+14%)	+1,04 (+19%)	+1,25 (+23%)	+1,65 (+31%)	+1,91 (+36%)

te más elevada en la serie de las cortezas que en la de los núcleos.

Valores de C_4AF .-

La dispersión es sensiblemente más elevada en la serie de los núcleos que en la de las cortezas, si bien la diferencia es poco significativa.

La media aritmética es muy significativamente más elevada en la serie de las cortezas que en la de los núcleos.

En la tabla 14 se indican finalmente los límites de error absoluto y relativo (entre paréntesis), admisibles para las magnitudes calculadas C_3S , C_2S , C_3A y C_4AF en cada una de las series correspondientes a las cortezas y a los núcleos, admitiendo en cada caso niveles de confianza del 50, 75, 90, 95, 99 y 99,7% y suponiendo las series normales.

Los datos incluidos en el recuadro indican que el error relativo pasa del 50% del valor de la media aritmética, por lo cual se estima que carecen de interés.

Es de apreciar que para la serie de las cortezas las medias aritméticas son bastante representativas y permiten aproximaciones del 10 al 15% para el nivel de confianza del 90%; sin embargo para la serie de los núcleos sólo son algo representativos los valores medios del C_3A y del C_4AF , con aproximaciones de 15 y 20% respectivamente para el nivel de confianza del 90%. Los valores del C_3S y el C_2S presentan en cambio dispersiones demasiado fuertes para que sus medias aritméticas puedan considerarse como valores aproximados representativos de la serie.

(continuará)