

Tentativa de evaluación de los efectos, beneficiosos o perjudiciales, de los aluminatos del cemento sobre las cualidades del hormigón

PRIMERA PARTE

W. SCHRÄMLI. Coordinador de Investigaciones. Holderbank A. G. Suiza
World Cement Technology. Vol. 9 N.º 2, págs. 35-42. Marzo 1978

El autor expone, en esta primera parte, la cuestión desde el punto de vista del fabricante limitándose a las consecuencias apreciables en las cualidades del hormigón. Trata de responder a dos preguntas: ¿Por qué se debe cambiar el contenido de aluminato tricálcico de un cemento? ¿Qué beneficios, o que perjuicios, producen con el cambio? El objetivo final será poder establecer un análisis "costo-beneficio" correspondiente a cada cambio.

Se extracta el interesante trabajo del Sr. Schrämli

Efectos relacionados con el contenido de C_3A del cemento:

Calcinación del "crudo". Formación de recubrimiento en el horno. Formación de terrones durante el almacenamiento del cemento. Fraguado del cemento, normal y alterado. Desarrollo de las resistencias. Calor de hidratación. Retracción. Ataque por los sulfatos. Durabilidad del hormigón.

Los dos primeros no son debidos al C_3A como tal, pero sí a la presencia de alúmina en las materias primas, así como a las condiciones que generalmente dan lugar a la formación de C_3A durante la calcinación del clínker.

La existencia de un coeficiente estadístico de correlación entre dos factores no implica necesariamente una relación causal cuando la correlación se establece solamente sobre bases estadísticas.

Polimorfismo de los aluminatos: Parece que son poco conocidos los factores que gobiernan la formación de cada forma polimórfica del aluminato; es cuestión importante, desde un punto de vista práctico, investigar todas las diferentes formas en que puede aparecer el aluminato.

Así, por ejemplo, según las investigaciones de Regour (1) sobre el ataque por el agua de mar sobre la pasta endurecida de cemento, pusieron de manifiesto que en el cemento

que contenía 14 % de aluminato tetragonal y 2 % de aluminato cúbico el ataque fue mucho menor que en otro cemento que sólo contenía 7 % de aluminato en forma cúbica.

La mayor parte de las relaciones establecidas entre el contenido de C_3A y las propiedades de cementos, morteros y hormigones se han basado en el cálculo de fases según las fórmulas de Bogue de composición del cemento. Hay una evidencia experimental (2): que los contenidos de C_3A deducidos de las fórmulas de Bogue tienden a ser más altos que los obtenidos en la difracción de rayos X, aunque también se encuentra lo contrario. Si, a pesar de ello, se continúan utilizando la fórmulas de Bogue es debido a que la determinación por difracción de rayos X es costosa y requiere tiempo. El cálculo según Bogue sólo es válido para la relación específica y no debe usarse para describir en general el papel del C_3A .

Posibilidades de cambiar el contenido de C_3A en el clinker

Efecto de reducir el contenido de C_3A en la composición del clinker:

	$C_3A = 12$	$C_3A = 5$	$C_3A = 5$
SiO ₂	21,30	22,83	19,49
Al ₂ O ₃	6,12	3,48	6,12
Fe ₂ O ₃	2,50	2,50	6,64
CaO	65,08	66,19	63,75
Resto	5	5	5
Saturación de cal	95	95	95
Módulo silíceo	2,47	3,82	1,53
Módulo de fundentes	2,45	1,39	0,92
C ₃ S	54,22	58,75	55,43
C ₂ S	20,18	21,15	14,09
C ₃ A	12	5	5
C ₄ AF	7,6	7,6	20,19
CaO libre	1,0	2,5	0,3
Clinkerización	Buena	Muy pobre	Muy buena
Recubrimiento del horno	Suficiente	Pobre	Excesivo,
	Razonable	poco adherente	muy densa, formación de anillos

Los tres clinkerers tienen la misma saturación de cal (95). El primero tiene 12 % de C_3A , el segundo y el tercero sólo 5 %; es obvio que en la práctica son estos dos cementos diferentes a pesar del mismo contenido de C_3A .

No es posible cambiar el contenido de C_3A sin cambiar otras características de la composición del cemento. Además el concepto de variables independientes no aparece; esto es consecuencia de la interpretación estadística de las relaciones.

La literatura acerca del efecto del C_3A es abrumadora pero no es utilizable porque, o no describe con suficiente precisión las condiciones en que se han observado los efectos, o, si lo hace, son muy diferentes a las que se podrían producir al aplicar en el terreno práctico los cementos.

EFFECTOS DE LOS ALUMINATOS

a) Sobre el fraguado

Desde hace algún tiempo el desarrollo del fraguado se ha asociado a la formación de ettringita por la reacción del C_3A y la disolución acuosa de sulfato cálcico. Prevalece la

unanimidad de que esa reacción tiende a detenerse y es seguida de un período llamado de inducción o durmiente. Algunos autores opinan que el fraguado tiene lugar al final del período de inducción, cuando se pueden reconocer nuevas reacciones; para otros el fraguado ocurre durante el período de inducción, pero no ofrecen una sencilla hipótesis explicativa. Recientemente Locher y colaboradores han lanzado la idea de que el fraguado es provocado por la recristalización de la ettringita formada por la reacción inicial (3).

No se tiene ningún mecanismo avanzado para describir las cantidades de aluminatos presentes en el cemento al producirse el fraguado. von Euw y Gourdin (4) aplican una relación cuantitativa con ayuda de múltiples análisis de regresión; en el laboratorio del autor se ha procedido así. Ambos indican un decrecimiento del tiempo de fraguado al aumentar el contenido de C_3A . Schmitt y Henco (5) observan también un gradual aumento del tiempo de fraguado al incrementarse el contenido de C_4AF a expensas del C_3A .

Richartz (6) indica, con evidencia experimental, que el fraguado de los cementos ricos en aluminatos se retarda mucho si se les mantiene expuestos por algún tiempo a la humedad, mientras que los cementos pobres en aluminatos son poco afectados por el almacenamiento.

La suposición de que los ensayos del tiempo de fraguado realizados sobre pastas son significativos para la forma de fraguar el hormigón, ofrece dudas.

b) Sobre el endurecimiento prematuro

La experiencia del grupo Holderbank, con sus más de 50 fábricas de cementos, indica que el endurecimiento prematuro está asociado al contenido alto de C_3A ; Ionescu y Enculescu (7) coinciden con ello. No quiere esto decir que no haya otros factores. El endurecimiento prematuro no es simplemente falso fraguado asociado con la sobresaturación de la fase acuosa en $CaSO_4$, ni con el fraguado relámpago debido a la muy rápida hidratación del C_3A en ausencia de retardadores. Es un gradual aumento de la consistencia del hormigón durante su transporte por espacio mayor a una hora. Los medios de caracterizarlo (Alemania, reducción de la fluidez; USA pérdida de asentamiento) carecen de buena reproducibilidad.

Si se supone que el endurecimiento prematuro se debe a reacciones en que interviene el cemento, parece más sencillo investigarlo en el sistema más simple de la pasta; así se han realizado medidas reológicas con penetrómetros. Pero ocurre que cementos calificados en los ensayos USA como libres de anomalías, producen endurecimiento prematuro en los hormigones. Hay poca literatura sobre esto. Kalousec (8) sugirió la idea de una excesiva y anormal formación de ettringita; algo coincide con la teoría de Locher. La cuestión sigue abierta. J. Gebauer (9) avanza la idea de que la presencia de alita altamente reactiva sea un factor contribuyente.

DESARROLLO DE RESISTENCIAS

Está en estado de controversia. Bajo un punto de vista práctico es de gran importancia.

Aproximación de Bogue (10): En 1934 estableció la resistencia de cada uno de los cuatro constituyentes del clínker.

Su conclusión es que el C_3A tiene una influencia despreciable. Esta opinión gobierna en USA mucho tiempo; en Europa es diferente. Hay que reconocer que toda la resistencia

no es la suma, sino el resultado de la interacción de varios constituyentes. La técnica estadística introduce la aplicación de relaciones lineales:

$$N = a_0 + a_1 C_3S + a_2 C_3S + a_3 C_3A + a_4 C_4AF + a_5 S$$

Aplican este análisis Gonnerman (11) Blaine (12) von Euw (3) Alexander (13) Holderbank (2) Schmitt (5). Todos aplican distintos métodos y no son comparables por las diferentes cantidades de datos. El punto común es que el C_3A influye en las resistencias a edades diferentes, unas veces positivamente y negativamente otras. El efecto del C_3A sobre las últimas resistencias de las probetas de mortero conservadas en agua es deteriorante. Schmitt (5) demuestra que sólo hay cambios importantes si se cambia el contenido de C_3A cambiando el módulo de sílice.

Alexander (13) y Popovics (14) sugieren un efecto interactivo del C_3A sobre la influencia del C_3S :

$$N = a + bC_3S (1 + dC_3A) + eS$$

$$N = \frac{100}{0,98 - \left(1 - \frac{C_3S}{100}\right) \cdot e^{-28 (0,0018 \cdot C_3A + 0,005)}}$$

Alexandre explica el coeficiente d en el término $bC_3S (1 + dC_3A)$ como indicador de la proporción en que C_3A promueve la actividad del C_3S y la llama "sensibilidad" del C_3S al C_3A .

Celani, Mogi y Río pudieron demostrar experimentalmente que C_3A promueve la hidratación del C_3S . Otras experiencias sugieren que el efecto del C_3A se puede comparar, en cierto modo, al de los álcalis o mejor a la forma cómo los álcalis están presentes en el cemento.

EFFECTO INDIRECTO: CAMBIO EN LA NECESIDAD DE AGUA DEL CEMENTO

El hecho de que diferentes cementos requieren distintas cantidades de agua para obtener la pasta de consistencia normal ha sido poco estudiado; tiene gran importancia sobre la calidad del hormigón. Gebauer y Schrämlí (16) establecen que el % de C_3A , el contenido total de álcalis y la cantidad de la fracción 10-30 μ están en correlación con la necesidad de agua.

Si se aumenta el C_3A en 7 %, se incrementa la cantidad de agua en 1,8 %.

El efecto de la variación del cociente agua/cemento de 0,35 a 0,45 es aproximadamente de 12,5 kp/cm².

P. G. de P. (IETCC)

REFERENCIAS

- | | |
|---|---|
| (1) Rev. Mat. Constr. n.º 687.69 1974. | (9) VDZ 77 Congr. Düsseldorf. 1977. |
| (2) Holderbank /Ag. No publicado. | (10) The Chem of Cement 2.ª ed. |
| (3) Zement Kalk Gips. 29 (10) 435 1976. | (11) Pros ASTM 34 II 244 1934. |
| (4) Mat. et Constr. n.º 299 1970. | (12) Build. Science Series 8 N. B.Std. 1968. |
| (5) Zement Kalk Gips 26 (2) 63 1973. | (13) Cement Concret Res. 2 (6) 633 1972. |
| (6) Zement Kalk Gips 26 (2) 67 1973. | (14) Cement Concret Res. 6 (3) 343 1976. |
| (7) Proc RILEM 2 1973. | (15) 5.º Int. Symp Chem Cement. 2 492 1969. |
| (8) US Bur. Reclamation Gen Rep N.º 45. | (16) Amer. Concrete Soc. Bull. 53 (2) 161 1969. |