689-44

Código de buena práctica para hormigón resistente a sulfatos

(Consideraciones sobre requisitos para los cementos
 portland utilizables)

JOSE CALLEJA

Prof. Dr. en Ciencias Químicas

RESUMEN

Los cementos portland utilizables para hormigón resistente al ataque de los sulfatos deben cumplir una serie de requisitos, en su mayoría de naturaleza química.

A su vez, estos requisitos afectan a los constituyentes químicos, es decir, a los compuestos potenciales determinados por el conocido cálculo potencial aplicado a los sistemas fisicoquímicos del cemento portland.

El presente trabajo trata de aquellos requisitos que razonablemente pueden o deben especificarse para tales cementos, teniendo en cuenta el estado actual de las normas para los mismos en todos los países del mundo y las posibilidades reales de las fábricas de cemento en la práctica.

GENERALIDADES

En términos amplios, un "código de buena práctica" acerca de algo debe tomar en consideración todos los factores que tienen que ver con el problema de que se trate.

En el caso particular del hormigón tales factores son: el proyecto, los materiales, el proceso de hormigonado, así como el curado y las condiciones ambientales y de servicio del material. Esto es así, tanto si la característica que se considera es la resistencia mecánica, o la estabilidad, o la durabilidad, o todas ellas en conjunto.

En cuanto a los materiales, deben tenerse en cuenta los cementos, los áridos, las aguas y los aditivos. Cada uno de ellos se supone que debe cumplir con las especificaciones de las correspondientes normas vigentes en cada país.

Por otra parte, un "código de buena práctica" debe adoptarse y aplicarse con la mayor generalidad posible. A tal efecto debe compendiar y sustituir con ventaja a todas las normas generales, particulares y más o menos locales, previamente establecidas y en vigor. Así debe de suceder también en el caso de los materiales.

Una forma de que un tal código pudiera compendiar y reemplazar eficazmente a todas las normas existentes podría ser la adopción por su parte de todas las especificaciones existentes consideradas como esenciales para el fin propuesto. Esto implicaría una selección muy cuidadosa de un mínimo de tales especificaciones. Sería tal vez necesario, además, establecer algunas especificaciones nuevas.

En cuanto a esto último, y por lo que se refiere a los materiales, una seria limitación de tipo práctico podría ser, en algunos casos, la inexistencia de áridos o aguas naturales, o la gran dificultad de encontrarlos en determinadas circunstancias y lugares, de manera que cumpliesen todos los requisitos impuestos. Otra limitación podría ser la inexistencia en el mercado de un cierto cemento especial, o de un aditivo dado, propuestos o recomendados para un fin particular. Por tales razones no es aconsejable, ni adoptar normas o criterios ya existentes, ni establecer nuevas especificaciones, si no existe la posibilidad y una razonable probabilidad de encontrar en la práctica materiales que las cumplan. Esto es particularmente válido e importante en el caso de los aditivos y, más aún, en el de los cementos, es decir, cuando se trata de materiales “industriales” y “comercializados”. A este respecto los cementos requieren una atención y unas consideraciones especiales, desde el punto de vista de la durabilidad del hormigón.

CEMENTOS

Es sabido el gran volumen de estudios y de trabajos de investigación llevados a cabo para encontrar y fijar las condiciones que deben cumplir los cementos para hacer hormigón resistente a algunos ataques químicos específicos. La mayor parte de tales condiciones y las más frecuentemente impuestas son, como es lógico, de naturaleza química.

Por otro lado, una gran parte de estos trabajos se ha realizado a nivel de laboratorio de investigación, y desde un punto de vista un tanto académico. Ciertamente que es muy importante, incluso esencial, conocer el “cómo” y el “porqué” de la corrosión del hormigón, ya que ello permite adoptar las disposiciones adecuadas para la eficaz protección preventiva del mismo, en la medida en que las posibilidades reales lo permitan. La cuestión es que para un “código de buena práctica”, sólo las soluciones prácticas tienen valor. En este sentido se debe tener en cuenta que, en general, los resultados de los trabajos de investigación realizados en los laboratorios se obtienen empleando unos gramos, o a lo sumo algunos kilogramos de materias, mientras que la construcción de autopistas, de puentes, de presas o de puertos se lleva a cabo siempre utilizando muchas toneladas de materiales. Un ejemplo: el germanato tricálcico es, como se ha demostrado, mucho más resistente mecánicamente que el silicato tricálcico; pero no hay posibilidad de fabricar en cualquier lugar o tiempo toneladas de cemento hecho a base de germanato cálcico. Otro ejemplo: los cementos de bario serían evidentemente los más resistentes a los sulfatos; sin embargo no se producen industrialmente en ningún sitio, a pesar de las publicaciones existentes acerca de ellos.

Por este motivo, antes de especificar acerca de las condiciones reales de los cementos resistentes a un determinado tipo de ataque químico, es aconsejable estudiar a fondo las especificaciones ya existentes en las normas vigentes de cada país, pues ellas pueden ilustrar sobre los tipos, clases y categorías o calidades de cemento que se pueden encontrar en el mercado. Estos son los únicos que se pueden emplear de hecho en las obras, por ser los únicos que se producen industrialmente, con independencia de los resultados de laboratorio más o menos espectaculares, obtenidos con otros cementos raros o muy especiales.

2.1. Las normas para cemento en el mundo

La recopilación más reciente y completa de normas para cemento en todos los países del mundo, en los cuales existen especificaciones oficiales publicadas, es la editada por el CEMBUREAU en 1968 (CSSW) (1). Contiene los requisitos normalizados para cementos portland y no portland (siderúrgicos y puzolánicos) de 44 países.

La clasificación y las designaciones para los cementos en tipos, clases y calidades o categorías en CSSW responden al esquema siguiente:

Cementos tipo portland

- OC Cemento portland ordinario.
- RHC Cemento portland de endurecimiento rápido
- o
- Cemento portland de altas resistencias iniciales.
- HSC Cemento portland de alta resistencia.
- LHC Cemento portland de calor de hidratación medio o bajo
- o
- Cemento portland de endurecimiento lento.
- SRC Cemento portland resistente a sulfatos.
- AEC Cemento portland con agentes inclusores de aire.

Cementos tipo siderúrgico

BFC

Cementos tipo puzolánico

POZ

En lo que se refiere a categorías o calidades, en el caso del cemento OC se utilizan los símbolos I, II, III, ... para designar las sucesivas, en orden de resistencias mecánicas crecientes. Análogamente en el caso de los cementos BFC y POZ se emplean los símbolos 1, 2, 3, ... para designar las distintas calidades, en orden creciente de contenido, bien sea de escoria siderúrgica en el caso de los cementos BFC, o bien de puzolana en el caso de los cementos POZ.

Esto lleva consigo el que, a veces, un cemento OC III (y tal vez en algún caso un cemento OC II) pueda ser equivalente a cementos RHC o HSC. A su vez, los cementos BFC 1 o POZ 1, si sus respectivos contenidos de escoria o de puzolana son bajos (por ejemplo, inferiores a 20 % o a 15 %) pueden ser considerados alguna vez como cementos portland ("con adiciones toleradas").

2.2. Cementos portland

Como se ha indicado, los requisitos químicos son prácticamente los únicos que hay que

tener en cuenta en lo que se refiere a resistencia química del hormigón. Entre estos requisitos los más importantes en el caso de los cementos tipo portland son los que implican limitaciones que afectan a la composición potencial calculada. A este respecto, los principales factores que se toman en consideración son el contenido de C_3A , o el de $C_3S + C_3A$, o el de $C_4AF + C_3A$, o el de $C_4AF + 2C_3A$ (o el de $C_4AF + C_2F$), en relación o no con el contenido de SO_3 de los cementos.

Vale la pena considerar el cuadro general de las normas ASTM para las cinco clases de cementos de tipo portland, I a V, como indica el Cuadro 1 (2). En él se aprecia que los calores de hidratación, las altas resistencias iniciales (o incluso finales), las resistencias frente a los sulfatos (e incluso las resistencias frente a las aguas ácidas y puras) están estrechamente relacionados, directa o inversamente en cada caso. También se observa que los cementos portland que se han de tener en cuenta con respecto a la resistencia frente a sulfatos y ácidos son los tipos ASTM V, IV y II*, tal vez en el orden expuesto; es decir, las clases de cemento SRC, LHC y SRC/LHC, dentro del tipo portland, según la clasificación CEMBUREAU.

C U A D R O 1

ESPECIFICACIONES DE LAS NORMAS ASTM										
Clases de cemento tipo portland	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
Requisitos	Obligatorios					Optativos				
SO ₃ máx. para	C ₃ A < 8 %									
	C ₃ A > 8 %									
C ₃ S máx. %	3,0	3,0	3,5	2,3	2,3					
C ₂ S mín. %	3,5	—	4,5	—	—					
C ₃ A máx. %	—	—	—	35	—					
(C ₄ AF + 2C ₃ A) máx. %	—	—	—	40	—					
ó	—	8	15	7	5			5; 8*		
(C ₄ AF + C ₂ F) máx. %	—	—	—	—	20					
(C ₃ S + C ₃ A) máx. %**						58**				
(Na ₂ O + 0,658 K ₂ O) máx. %***						0,60	0,60	0,60	0,60	0,60

* 8 para cementos con resistencia moderada a los sulfatos.
5 para cementos con resistencia alta a los sulfatos.

** Para cementos con calor de hidratación moderado, cuando no se estipula método para la determinación del mismo.

*** Para cementos con contenido bajo de álcalis.

I: Para usos generales, no especiales (equivalente a OC).

II: Para usos generales o cuando se desea una resistencia moderada a los sulfatos, o un calor de hidratación moderado (equivalente a SRC/LHC).

III: Para emplear cuando se precisa una resistencia inicial alta (equivalente a RHC/HSC).

IV: Para usar cuando se requiere un bajo calor de hidratación (equivalente a LHC).

V: Para utilizar cuando se precisa una resistencia alta a los sulfatos (equivalente a SRC).

* Las normas ASTM consideran también el cemento portland tipo II con inclusores de aire.

Así pues, los requisitos que limitan los constituyentes potenciales en estos cementos, de acuerdo con el CSSW del CEMBUREAU son los indicados en el Cuadro 2.

C U A D R O 2

Países	Tipos de cemento	ESPECIFICACIONES NORMALIZADAS (Requisitos: %)				
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Otros
Alemania Occidental	SRC/LHC			≤ 3		
Australia	LHC	≤ 40	≥ 35	≤ 8	20	
Canadá	SRC			≤ 4		SO ₃ ≤ 2,5 si C ₃ A ≤ 8
Cuba	SRC/LHC	≤ 50		≤ 8		SO ₃ — si C ₃ A > 8 SO ₃ ≤ 2,5 si C ₃ A ≤ 8
	LHC	≤ 35	≥ 40	≤ 7		SO ₃ — si C ₃ A > 8 SO ₃ ≤ 2,5 si C ₃ A ≤ 8
	SRC	≤ 50		≤ 5		SO ₃ — si C ₃ A > 8 SO ₃ ≤ 2,3 si C ₃ A ≤ 8
						(C ₄ AF + 2 C ₃ A) ≤ 20
China Nacionalista	SRC/LHC			≤ 8		SO ₃ ≤ 2,5 si C ₃ A ≤ 8
España	SRC			≤ 5		
Estados Unidos	SRC/LHC			≤ 8		SO ₃ < 2,5 si C ₃ A ≤ 8
	LHC	≤ 35	≥ 40	≤ 7		SO ₃ < 2,5 si C ₃ A ≤ 8
	SRC			≤ 5		SO ₃ < 2,5 si C ₃ A ≤ 8 (C ₄ AF + 2 C ₃ A) ≤ 20
Israel	SRC			≤ 5		(C ₄ AF + 2 C ₃ A) ≤ 20
Japón	LHC	≤ 50		≤ 8		
Méjico	SRC/LHC			≤ 8		(C ₃ S + C ₃ A) ≤ 58
	LHC	≤ 35	≥ 40	≤ 7		
	SRC			≤ 5		
Unión Soviética	LHC	≤ 50		≤ 8		(C ₃ A + C ₄ AF) ≤ 22
	LHC	≤ 50		≤ 8		
Venezuela	SRC/LHC			≤ 8		(C ₃ S + C ₃ A) ≤ 58
Valores medios		≤ 44 (45)	≥ 39 (40)	≤ 6,4 (6,5)	≤ 20 (20)	

Además de los datos de dicho cuadro, algunos países fijan un límite superior para el contenido de C_3A de los cementos RHC, en 15 % (Cuba, China Nacionalista, Estados Unidos, Uruguay y Venezuela) y en 18 % (España).

El Cuadro 2 muestra que, en general, los valores medios de los límites máximos y mínimos exigidos para los cementos SRC, SRC/LHC y LHC, en conjunto, son: C_3S máximo, aproximadamente 45 %; C_2S mínimo, aproximadamente 40 %; C_3A máximo, aproximadamente 6,5 % y C_4AF máximo, aproximadamente 20 %.

Por otra parte, el Cuadro 3 presenta los límites superiores, medios e inferiores para los requisitos sobre los conceptos especificados en el Cuadro 2, en lo que se refiere a los cementos SRC y/o LHC, SRC y LHC. A este respecto parece evidente que los límites superiores, medios e inferiores para el contenido máximo de $(C_3S + C_3A)$ % especificados en el caso de Méjico y Venezuela (Cuadro 2) deben ser 58 %, 51,5 % y 38 % para SRC y LHC, y 58 %, 57 % y 53 % para SRC o LHC, en lugar de 58 % en los tres casos.

Del Cuadro 3 se deduce fácilmente el Cuadro 4 que contiene las condiciones más suaves y más drásticas que se pueden imponer individual y conjuntamente, a los cementos portland, con independencia de que sean de la clase SRC, LHC, o SRC y/o LHC.

Los requisitos 1) y 2) por una parte, los 3), 4), 5) y 6) por otra, y finalmente los 1), 3) y 7), evidentemente son, en cierta medida, complementarios unos de otros. En este sentido hay que prever que los requisitos 1) y 2), si se imponen simultáneamente, pueden ser incompatibles entre sí, en particular si otros requisitos igualmente simultáneos refuerzan dicha incompatibilidad. Además, los requisitos 1) y 3) impuestos por separado son más restrictivos que el requisito 7). De igual manera el requisito 5) es más drástico que el 6). Así pues, de hecho los requisitos 1), 3), 4) y 5) podrían ser, por el momento, los únicos considerados retenibles como obligatorios.

C U A D R O 3

Especificaciones Normalizadas (Requisitos)			SRC y LHC			SRC y/o LHC			SRC			LHC		
			máx.	medio	mín.	máx.	medio	mín.	máx.	medio	mín.	máx.	medio	mín.
C_3S %	$\leq$		50	45	35	50	50	50	50	40	35	50	50	50
C_2S %	$\geq$		40	40	35	—	—	—	40	40	35	—	—	—
C_3A %	$\leq$		8	6,5	3	8	7	3	8	7,5	7	5	5	4
C_4AF %	$\leq$		20	20	20	—	—	—	20	20	20	—	—	—
$(C_4AF + 2 C_3A)$ %	$\leq$		20	20	20	—	—	—	—	—	—	20	20	20
$(C_4AF + C_3A)$ %	$\leq$		22	22	22	—	—	—	—	—	—	22	22	22
$(C_3S + C_3A)$ %	$\leq$		58	58	58	58	58	58	58	—	—	—	—	—
				(51,5)	(38)		(57)	(53)						

A partir de los valores más drásticos para los requisitos 3), 4), 5) y 6) del Cuadro 4, y considerando valores extremos inferiores nulos para C_3A y C_4AF , los valores aislados y las

combinaciones binarias, ternarias y cuaternarias de los mismos dan el orden de drasticidad o severidad de creciente (números romanos) que muestra el Cuadro 5.

C U A D R O 4

Especificaciones Normalizadas (Requisitos)	SRC, LHC, SRC y/o LHC	
	Más suaves	Más drásticas
1) C_3S % $\leq$	50	35
2) C_2S % $\geq$	35	40
3) C_3A % $\leq$	8	3
4) C_4AF % $\leq$	20	20
5) $(C_4AF + 2 C_3A)$ % $\leq$	20	20
6) $(C_4AF + C_3A)$ % $\leq$	22	22
7) $(C_3S + C_3A)$ % $\leq$	58	38

Es obvio que la mayor severidad corresponde a la combinación binaria de requisitos 3) + 5). En consecuencia, las condiciones correspondientes, junto con la condición del requisito 1), son las únicas que podrían imponerse, como máximo, para los cementos portland que hayan de resistir ataques de sulfatos, teniendo en cuenta las especificaciones existentes hoy día en las normas vigentes de todos los países. Estas condiciones son las expuestas en el Cuadro 6.

En otros aspectos, los cálculos potenciales aplicados a sistemas con las composiciones potenciales 1 a 13 del Cuadro 7 dan las composiciones químicas (tantos por ciento de C, S, A y F); los módulos (hidráulicos: $MH = C/(S + A + F)$; silíceo: $MS = S/(A + F)$; y férrico o de fundentes: $MF = A/F$; el factor de saturación de cal: $FSC = 100 C / (2,85 S + 1,18 A + 0,65 F)$ y la cantidad de fase líquida formada teóricamente a $1.450^{\circ}C$: $FL^* = 3 A + 2,25 F$ indicados en el propio Cuadro 7 (3).

La composición química correspondiente a clínker con un contenido de C_3S igual o inferior a 35 % muestra un contenido elevado de sílice, particularmente para $C_3A = 3$ % y $C_4AF = 14$ % (clínker 1); en consecuencia, el módulo hidráulico y el factor de saturación de cal son muy bajos y la fase líquida formada a $1.450^{\circ}C$ es igualmente escasa. Tal composición no es usual, de forma que el clínker 1 no sería un clínker "industrial" o "comercial".

Se dispone de dos soluciones: una consiste en aumentar el contenido de C_3S a 50 % (condición menos drástica —véase Cuadro 4—) para obtener el clínker 2; la otra solución es aumentar el contenido de C_4AF a 20 %, para obtener el clínker 3. En el primer caso el contenido de sílice es algo menor, el contenido de cal es mayor y, por consiguiente, MH

* Para $A/F > 0,9$.

y FSL son también mayores, pero aún no lo suficiente; FL no cambia. El clinker 2 tampoco es, pues, un clinker "industrial" ni "comercial". En el segundo caso tanto los contenidos de sílice como de cal son menores, pero los de alúmina y óxido férrico son mayores, de forma que MH es aún menor y LSF bajo; FL es mucho mayor y tal vez algo excesivo. Tampoco el clinker 3 es, por lo tanto, un clinker netamente "industrial".

C U A D R O 5

Combinaciones de requisitos	Condiciones extremas	Orden de drasticidad
Aislados		
3)	$0 \leq C_3A \leq 3$	III'
4)	$0 \leq C_4AF \leq 20$	V'
5)	$0 \leq C_5A \leq 10$ $0 \leq C_4AF \leq 20$	IV
6)	$0 \leq C_6A \leq 22$ $0 \leq C_4AF \leq 22$	VI
Binarias		
3) + 4)	$0 \leq C_3A \leq 3$ $0 \leq C_4AF \leq 20$	III
3) + 5)	$0 \leq C_3A \leq 3$ $0 \leq C_4AF \leq 14^*$	I
3) + 6)	$0 \leq C_3A \leq 3$ $0 \leq C_4AF \leq 19^*$	II
4) + 5)	$0 \leq C_3A \leq 10$ $0 \leq C_4AF \leq 20$	IV
4) + 6)	$0 \leq C_3A \leq 22$ $0 \leq C_4AF \leq 20$	V
5) + 6)	$0 \leq C_3A \leq 10$ $0 \leq C_4AF \leq 20$	IV
Ternarias		
3) + 4) + 5)	$0 \leq C_3A \leq 3$ $0 \leq C_4AF \leq 14^*$	I
3) + 4) + 6)	$0 \leq C_3A \leq 3$ $0 \leq C_4AF \leq 19^*$	II
4) + 5) + 6)	$0 \leq C_3A \leq 10$ $0 \leq C_4AF \leq 20$	IV
Cuaternarias		
3) + 4) + 5) + 6)	$0 \leq C_3A \leq 3$ $0 \leq C_4AF \leq 14^*$	I
* Para $C_3A = 3$		

C U A D R O 6

Requisitos drásticos al máximo para cementos SRC y/o LHC

1) C_3S %	$\leq$	35
3) + 5) ($2 C_3A$ % + C_4AF %)*	$\leq$	20*
* para C_3A %	=	3 ,
C_4AF %	$\leq$	14 ;
y para C_3A %	=	0 ,
C_4AF %	$\leq$	20 .

Una tercera solución sería elevar simultáneamente el valor del C_3S a 50 % y el del C_4AF a 20 %. Así resulta el clinker 4 con una composición química más normal y un valor más elevado de FSC. Un aumento del contenido de C_4AF a 25 % (clinker 5) rebaja el valor del MH e incrementa el del FSC, pero eleva demasiado el contenido de FL, de tal manera que este clinker probablemente tendría tendencia a formar anillos en el horno; así, pues, sería un clinker “comercial”, si al mismo tiempo fuera un clinker “industrial”. La elevación del contenido de C_4AF a 25 %, rebajando simultáneamente el de C_3A a 0 % (clinker 6) daría lugar a una composición semejante, con una proporción aún mayor de FL.

Un clinker con contenidos de C_3S de 50 %, de C_4AF de 20 % y de C_3A de 0 % (clinker 7) tendría propiedades en cierto modo intermedias entre las del clinker 3 y las del clinker 4.

El aumento del contenido de C_3S a 55 % manteniendo el C_3A en 3 % y el C_4AF en 20 % da lugar al clinker 8 con una composición aún más normal, particularmente por lo que se refiere a módulos FSC y FL. El clinker 9 y el clinker 10 son similares al clinker 8; el primero está más en la línea del clinker 7 y el último más en la línea del clinker 6.

Los resultados precedentes son independientes del hecho de que el clinker se compone, no sólo de los cuatro constituyentes principales C_3S , C_2S , C_3A y C_4AF , sino también de un resto R que contiene la pérdida al fuego, el residuo insoluble, el óxido magnésico, la cal libre, los álcalis y el trióxido de azufre (en forma de sulfatos alcalinos y/o de sulfato cálcico). Este resto asciende normalmente a 5 %, de forma que los cuatro componentes principales se elevan al 95 %. Así, pues, los valores del Cuadro 7 se transformarían en los correspondientes entre paréntesis, lo cual no modifica ni los hechos ni las deducciones de los mismos hechos en lo que precede.

En conclusión, del Cuadro 7 se desprende que los clinker más normales, en lo que se refiere a facilidades técnicas para su producción industrial, son los 8, 4, 7, 9, 10 y 6, probablemente en este mismo orden o en otro muy aproximado. Volviendo a los requisitos expuestos en el Cuadro 6, el primero, C_3S % $\leq$ 35, no puede mantenerse siempre ni con facilidad; debería sustituirse por el menos drástico C_3S % $<$ 50 (o incluso C_3S % $<$ 55).

En cuanto al segundo, $(2 C_3A + C_4AF) \% \leq 20$, la modalidad consistente en $C_3A \% \leq 3$ y $C_4AF \% \leq 14$ tampoco puede mantenerse; la modalidad $C_3A \% = 0$ y $C_4AF \% \leq 20$ no siempre es fácil de mantener; ambas modalidades pueden ser sustituidas por la intermedia $C_3A \% \leq 3$, $C_4AF \leq 20$. En consecuencia, los requisitos que podrían imponerse razonablemente a los cementos resistentes al ataque por sulfatos (y en cierta medida importante a los ataques ácidos) son los indicados en el Cuadro 8.

C U A D R O 7

Condiciones (Requisitos impuestos a los clínteres)		Parámetros químicos para los correspondientes crudos (calcinados)								
		C %	S %	A %	F %	MH	MS	MF	FSC %	FL % 1.450°C
$C_3S \% = 35$	Clinker 1	65,4 (62,1)	25,9 (24,6)	4,1 (3,9)	4,6 (4,4)	1,94 (1,89)	2,99 (2,96)	0,88 (0,89)	81,6 (81,4)	22,6 (21,6)
$C_2S \% = 48$										
$C_3A \% = 3$										
$C_4AF \% = 14$										
$C_3S \% = 50$	Clinker 2	66,4 (63,1)	24,9 (23,6)	4,1 (3,9)	4,6 (4,4)	1,98 (1,98)	2,86 (2,84)	0,88 (0,89)	85,7 (85,8)	22,6 (21,6)
$C_2S \% = 35$										
$C_3A \% = 3$										
$C_4AF \% = 14$										
$C_3S \% = 35$	Clinker 3	64,2 (61,0)	23,9 (22,7)	5,3 (5,0)	6,6 (6,3)	1,80 (1,79)	2,00 (2,00)	0,81 (0,79)	83,0 (82,9)	30,8 (29,2)
$C_2S \% = 42$										
$C_3A \% = 3$										
$C_4AF \% = 20$										
$C_3S \% = 50$	Clinker 4	65,6 (62,3)	22,5 (21,4)	5,3 (5,0)	6,6 (6,3)	1,90 (1,90)	1,89 (1,89)	0,81 (0,79)	89,0 (89,1)	30,8 (29,2)
$C_2S \% = 27$										
$C_3A \% = 3$										
$C_4AF \% = 20$										
$C_3S \% = 50$	Clinker 5	64,6 (61,4)	20,8 (19,8)	6,4 (6,1)	8,2 (7,8)	1,82 (1,82)	1,43 (1,42)	0,77 (0,78)	90,9 (90,7)	37,6 (35,9)
$C_2S \% = 22$										
$C_3A \% = 3$										
$C_4AF \% = 25$										
$C_3S \% = 50$	Clinker 6	64,7 (61,5)	21,9 (20,8)	5,2 (4,9)	8,2 (7,8)	1,83 (1,84)	1,62 (1,64)	0,64 (0,63)	88,9 (89,0)	34,2 (32,3)
$C_2S \% = 25$										
$C_3A \% = 0$										
$C_4AF \% = 25$										
$C_3S \% = 50$	Clinker 7	65,6 (62,3)	23,6 (22,4)	4,2 (4,0)	6,6 (6,3)	1,91 (1,91)	2,19 (2,17)	0,64 (0,60)	87,1 (87,1)	27,4 (26,2)
$C_2S \% = 30$										
$C_3A \% = 0$										
$C_4AF \% = 20$										
$C_3S \% = 55$	Clinker 8	66,0 (62,7)	22,1 (21,0)	5,3 (5,0)	6,6 (6,3)	1,94 (1,94)	1,86 (1,86)	0,81 (0,79)	91,0 (91,1)	30,8 (29,2)
$C_2S \% = 22$										
$C_3A \% = 3$										
$C_4AF \% = 20$										
$C_3S \% = 55$	Clinker 9	66,0 (62,7)	23,2 (22,0)	4,2 (4,0)	6,6 (6,3)	1,94 (1,94)	2,15 (2,14)	0,64 (0,63)	89,1 (89,1)	27,4 (26,2)
$C_2S \% = 25$										
$C_3A \% = 0$										
$C_4AF \% = 20$										
$C_3S \% = 55$	Clinker 10	65,1 (61,8)	21,4 (20,4)	5,2 (5,0)	8,2 (7,8)	1,87 (1,86)	1,59 (1,59)	0,64 (0,64)	91,0 (90,8)	34,2 (32,6)
$C_2S \% = 20$										
$C_3A \% = 0$										
$C_4AF \% = 25$										

C U A D R O 8

Requisitos razonables para cementos SRC (portland)				
1)	C_3S	%	$\leq$	50
2)	C_3A	%	$\leq$	3
3)	C_4AF	%	$\leq$	20

La condición limitativa $C_3A = 0$ ($A/F = 0,64$) —clínteres 6, 7, 9 y 10 del Cuadro 7— es fácil de cumplir en la práctica, a condición de que otros requisitos no lo dificulten seriamente. De hecho, existen patentes industriales que permiten fabricar clínteres con 0 % de C_3A potencial y con menos de 2 %, o incluso 1 %, de C_3A microscópico.

No obstante, los clínteres con $C_3A \leq 0$ (que contienen C_4AF y C_2F en lugar de C_3A y C_4AF , cuando $C_3A = 0$), con relaciones A/F entre 0,50 y 0,64, si bien existen en la práctica tienen en general un escaso contenido de FL a las temperaturas de clinkerización (generalmente más elevadas que las usuales), de forma que los refractarios de los hornos se corroen fuertemente, en particular si son de naturaleza magnésica. Por consiguiente, los cementos derivados de estos clínteres son, en general, más difíciles de fabricar y más caros.

Existe siempre un equilibrio entre el contenido de C_3S y las correspondientes resistencias altas a corto y largo plazo por una parte, y entre el mismo contenido de C_3S (cal, hidróxido cálcico —portlandita—) por otra. Por lo tanto, limitar el contenido de C_3S a un máximo de 35 % y, en correspondencia, especificar un contenido mínimo de 40 % de C_2S no sería, en general, ni técnicamente fácil ni aconsejable en la práctica, pues la resistencia mecánica es un sumando adicional en lo que concierne a la durabilidad. Además, en algunos casos sería conveniente elevar el límite superior de C_3S de 50 % a 55 %, como se ha visto en los cálculos y ejemplos anteriores, puesto que ello podría facilitar en algunos casos el cumplimiento del requisito $C_3A = 0$. Algunos otros importantes factores relativos a la naturaleza y estructura de la pasta hidratada del cemento, en relación con la composición y constitución de éste, no son objeto de consideración en este trabajo.

2.3. Cementos de tipo distinto al portland

Es evidente que otros tipos de cementos diferentes del portland —tales como los cementos con escorias (siderúrgicos y de horno alto) y los puzolánicos— son más particularmente resistentes al ataque químico e incluso más específicamente en el caso del ataque por sulfatos. Por el momento, tales cementos no son tenidos en cuenta en las presentes consideraciones. El único aspecto que conviene hacer resaltar es que tales cementos, fabricados con clínter de cemento portland y con escorias siderúrgicas o puzolanas, pueden ser aún más resistentes al ataque por sulfatos en general, si los respectivos clínteres de cemento portland cumplen los requisitos establecidos para los cementos portland en lo que precede. En lo que se refiere a los cementos puzolánicos, el límite superior relativo al contenido de C_3S de su fracción de clínter de cemento portland no debe ser mantenido necesariamente, de manera que se puede admitir el 55 % (o aún más), en lugar del 50 %.

3. CONCLUSION FINAL

Como se ha indicado al principio de estas consideraciones, las soluciones prácticas son las únicas que tienen valor para un "código de buena práctica". En lo que atañe a los cementos, las condiciones o requisitos más completos y razonables que deben cumplir para hacer hormigón resistente al ataque químico por sulfatos parecen ser los indicados en el Cuadro 8 de este trabajo. De otro modo, las dificultades para obtener en la práctica cementos afectados por más requisitos, o más drásticos que los mencionados, podría invalidar a tales cementos, de manera que el efecto práctico podría ser opuesto al pretendido (4). Por el contrario, las condiciones del Cuadro 8, si bien suficientes para el fin propuesto, se pueden hacer en cierto modo más rigurosas, pues la condición límite $C_3A = 0$, por ejemplo, se puede cumplir real y prácticamente de forma relativamente sencilla.

Por consiguiente, los requisitos del Cuadro 8 se juzgan dignos de consideración para un "código de buena práctica" para la confección de hormigón resistente al ataque por sulfatos, en lo que se refiere a los cementos portland, teniendo en cuenta el estado actual de las normas para cemento en todos los países del mundo, así como las posibilidades técnicas de las fábricas de cemento en la práctica.

REFERENCIAS

- (1) CEMBUREAU: "Cement Standards of the World (Portland Cement and its Derivatives)". París, 1968. Rue St. Charles, 2. París XV, Francia.
- (2) ASTM Standard Specification C 150-70.
- (3) CALLEJA, J.: "Cemento Portland: Cálculo e Interpretación de Datos Químicos". I.E.T.c.c., Madrid, 1960.
- (4) CALLEJA, J.: "Criterios sobre Normas para Cemento". I.E.T.c.c., Madrid, 1968.