

## consideraciones sobre el cálculo de la composición potencial de los conglomerantes hidráulicos

611-69

(CONTINUACION)

J. CALLEJA  
Dr. en Ciencias Químicas

### 4 los cementos siderúrgicos

Son *mezclas* (ternarias en principio) y quedan definidas como tales, con todas las consecuencias de orden químico. Abundando en las ideas expuestas en § 3.1 y § 3.2, se comprende que a estos cementos *no les es aplicable en ningún caso ningún «cálculo potencial»*. Basta para ello considerar la escoria siderúrgica como una *adición* (lo que en realidad es, bien, que, *en general, no inerte ni nociva*), y aplicar los razonamientos desarrollados a propósito de los cementos Portland con adiciones en § 3.2.1 y § 3.2.2.

En lo que sigue se exponen ejemplos relativos a cementos Portland Siderúrgicos PS y cementos Portland de Horno Alto PHA. Los cementos siderúrgicos sobresulfatados SF quedan, por definición, fuera de toda consideración a efectos de la «composición potencial», lo mismo que los Siderúrgico-Clínker SC.

#### 4.1 CEMENTOS PORTLAND SIDERÚRGICOS PS

Contienen clínker Portland y escorias siderúrgicas en proporción de 70 % de clínker, como mínimo, y una mezcla de escorias y yeso en proporción de 30 %, como máximo\*. En el ejemplo 12 se considera dicha proporción extrema.

\* Se entiende que la cantidad de yeso debe estar en todo caso de acuerdo con la de clínker (véase § 11).

Ejemplo 12: Sean los siguientes materiales en las proporciones señaladas (Cuadro 27):

CUADRO 27

COMPOSICION QUIMICA	1	2	3	4
	Clínker 70,0 % + Yeso 8,6 % + Escoria 21,4 % = Cemento 100 %			
P. F. ....	—	21,0	—	1,8
SiO <sub>2</sub> .....	21,0	—	31,0	21,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	6,5	—	11,5	7,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	3,0	—	1,5	2,4
CaO .....	65,0	32,5	46,0	58,1
SO <sub>3</sub> .....	—	46,5	—	4,0
Resto... ..	4,5	—	10,0	5,3
<i>Total</i> ... ..	100,0	100,0	100,0	99,9

Si se aplica el cálculo potencial al clínker (100 %), a la parte alícuota del mismo contenida en el cemento (70 %) y al cemento, se obtienen los resultados del Cuadro 28.

Como puede apreciarse, se observa un incremento de 19,1 unidades en la «composición potencial» global, de las cuales 12,2 corresponden a los silicatos y 6,9 a los aluminatos. El C<sub>3</sub>S disminuye 27,2 unidades y el C<sub>2</sub>S aumenta en 39,4; el C<sub>3</sub>A y el C<sub>4</sub>AF aumentan en 6,0 y 0,9 unidades respectivamente.

CUADRO 28

COMPOSICION POTENCIAL	1	2		3	
	Para clínker 100 %	Para clínker 70 %		Para cemento	
C <sub>2</sub> S .....	57,0	39,9	} 52,0	12,7	} 64,2
C <sub>3</sub> S .....	17,3	12,1		51,5	
C <sub>3</sub> A .....	12,1	8,5	} 14,9	14,5	} 21,8
C <sub>4</sub> AF .....	9,1	6,4		7,3	
CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O .....	—	—	—	8,6	—
Resto... ..	4,5	3,1	—	5,3	—
<i>Total</i> ... ..	100,0	70,0	66,9	99,9	86,0

#### 4.2 CEMENTOS PORTLAND DE HORNO ALTO PHA

Contienen clínker Portland y escorias siderúrgicas. La proporción de clínker es igual o superior a 30 % e inferior a 70 %, siendo el resto hasta 100, en cada caso, una mezcla de escorias y yeso \*. En el ejemplo 13 se considera la proporción extrema inferior, puesto que la superior coincide en el límite con la correspondiente a los cementos Portland Siderúrgicos PS considerados en el ejemplo 12.

\* Se entiende que la cantidad de yeso debe estar en todo caso de acuerdo con la de clínker (véase § 11).

Ejemplo 13: Sean los siguientes materiales, en las condiciones señaladas (Cuadro 29):

CUADRO 29

COMPOSICION QUIMICA	1	2	3	4
	Clínker 30,0 % + Yeso 8,6 % + Escoria 61,4 % = Cemento 100 %			
P. F. ....	—	21,0	—	1,8
SiO <sub>2</sub> ....	21,0	—	19,1	25,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ....	6,5	—	7,1	9,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ....	3,0	—	0,9	1,8
CaO ....	65,0	32,5	28,3	50,6
SO <sub>3</sub> ....	—	46,5	—	4,0
Resto... ..	4,5	—	6,1	7,5
Total... ..	100,0	100,0	61,4	100,0

Al aplicar el cálculo potencial al clínker (100 %), a la parte alícuota del mismo contenida en el cemento (30 %) y al cemento, se obtienen los resultados del Cuadro 30.

Es de advertir, no sólo la presencia de valores negativos, sino también de valores individuales superiores a 100 %. Si se prescindiera de esto, puede apreciarse además un incremento global en la «composición potencial» de 55,3 unidades, de las cuales 35,3 corresponden a los silicatos y 20,0 a los aluminatos. El silicato tricálcico se reduce en 77,9 unidades, adoptando el valor negativo de 60,8 %, y el silicato bicálcico aumenta en 113,2 unidades, adoptando el valor de 118,4 por ciento.

CUADRO 30

COMPOSICION POTENCIAL	1	2	3
	Para clínker 100 %	Para clínker 30 %	Para cemento
C <sub>3</sub> S ....	57,0	17,1 } 22,3	— 60,8 } 57,6
C <sub>2</sub> S ....	17,3	5,2 }	118,4 }
C <sub>3</sub> A ....	12,1	3,6 } 6,3	20,8 }
C <sub>4</sub> AF ....	9,1	2,7 }	5,5 }
CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O ....	—	—	8,6
Resto... ..	4,5	1,4	7,5
Total... ..	100,0	30,0 28,6	100,0 83,9

Si, a la vista de estos resultados, se pensase como en el caso del ejemplo 6, que se trata del sistema C<sub>2</sub>S-C<sub>3</sub>A-C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>-C<sub>4</sub>AF pobre en cal, y se aplicase el cálculo correspondiente, se obtendrían los resultados del Cuadro 30 bis.

CUADRO 30 bis

COMPOSICION POTENCIAL	1	2		3	
	Para clínker 100 %	Para clínker 30 %		Para cemento	
$C_3S$ ... ..	57,0	17,1	} 22,3	—	} 72,6
$C_2S$ ... ..	17,3	5,2		72,6	
$C_3A$ ... ..	12,1	3,6	} 6,3	— 26,0	} 11,3
$C_{12}A_7$ ... ..	—	—		31,8	
$C_4AF$ ... ..	9,1	2,7		5,5	
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ... ..	—	—		8,6	
Resto... ..	4,5	1,4		7,5	
<i>Total</i> ... ..	100,0	30,0	28,6	100,0	83,9

Los resultados muestran que, ni siquiera por equivocación es aplicable en este caso, el cálculo correspondiente a tal sistema, ya que daría un valor fuertemente negativo para el aluminato tricálcico.

#### 4.3 CEMENTOS SIDERÚRGICOS SOBRESULFATADOS SF

Como se indicó en el § 4, en base a la definición que de estos conglomerantes se da en el Pliego Español (10) y a su consecuentemente bajo contenido de clínker o de cemento Portland, *el «cálculo potencial» no tiene sentido en su caso.*

#### 4.4 CEMENTOS SIDERÚRGICO-CLÍNKER SC

Clasificados estos conglomerantes como *de adición* en el Pliego Español (10) y teniendo, por definición, un contenido de clínker Portland inferior a 30 %, podrían considerarse, a efectos del «cálculo potencial» ficticio, como comprendidos entre los Cementos Portland de Horno Alto PHA y los Cementos Siderúrgicos Sobresulfatados SF. En consecuencia, *tampoco en su caso tiene sentido el cálculo de la «composición potencial».*

#### 4.5 CONSECUENCIAS

Por lo expuesto en los ejemplos desarrollados en lo que precede se confirma la previsión hecha en § 4 respecto de la *imposibilidad de aplicación en cualquier caso del «cálculo potencial» a los cementos de tipo siderúrgico, cualquiera que sea su clase.* La aplicación a ultranza de dicho cálculo, bien en su forma ordinaria, o bien a base de las ecuaciones correspondientes a los sistemas pobres en cal, llevaría a resultados altamente erróneos en el primer caso para los cementos Portland Siderúrgicos PS, y absurdos en el segundo caso para los cementos Portland de Horno Alto PHA.

El «cálculo potencial», que podría aplicarse, como siempre, a la parte de clínker contenida en los conglomerantes, requeriría conocer las proporciones de escoria y de clínker y la composición de uno de ambos componentes, por lo menos, para poder hacer las debidas correcciones en las «composiciones potenciales ficticias». Respecto de estas últimas, es válido cuanto queda indicado en § 3.4.

En los cementos siderúrgicos hay que considerar que la escoria es un producto templado a partir de su estado de fusión y que, en función de su composición química y de las

condiciones de su enfriamiento posee, lo mismo que el clinker, *su propia «composición potencial»*. Así, pues, la verdadera «composición potencial» de los cementos siderúrgicos sería, en rigor, la resultante de sumar las «composiciones potenciales» *relativas al clinker y a la escoria*, por separado, teniendo en cuenta la proporción de ambos componentes. A los efectos del comportamiento de estos conglomerantes en el aspecto de la durabilidad, sería sumamente interesante el conocimiento de dicha «composición potencial» global y auténtica, así como para determinar qué tipo de escoria es más adecuada para un determinado tipo de clinker o viceversa. El desarrollo del tema se sale de los límites y del propósito de este trabajo.

## 5 los cementos puzolánicos

Son mezclas (ternarias en principio) de clinker, yeso y puzolana, y quedan definidos como tales, con todas las consecuencias de orden químico. Considerada la puzolana como una *adición*, bien que *no inerte ni nociva*, lo expuesto en § 3 y § 4 da a entender que *en ningún caso* es aplicable a estos cementos *ningún «cálculo potencial»*. Lo demuestra el ejemplo 14, relativo a un cemento con un contenido de puzolana del 35 %, valor usual en este tipo de conglomerantes.

*Ejemplo 14: Sean los materiales siguientes en las proporciones señaladas (Cuadro 31):*

CUADRO 31

COMPOSICION QUIMICA	1	2	3	4
	Clínker 56,4 % +	Yeso 8,6 % +	Puzolana 35 % =	Cemento 100 %
P. F. ....	—	21,0	9,0	4,9
SiO <sub>2</sub> ....	21,0	—	56,0	31,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ....	6,5	—	19,0	10,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ....	3,0	—	4,5	3,3
CaO ....	65,0	32,5	1,5	40,0
SO <sub>3</sub> ....	—	46,5	—	4,0
Resto....	4,5	—	10,0	6,0
Total... ..	100,0	100,0	100,0	100,0

Si se aplica el «cálculo potencial» al clinker (100 %), a la parte alícuota del mismo contenida en el cemento (91,4 %), y al cemento, se obtienen los resultados del Cuadro 32:

CUADRO 32

COMPOSICION POTENCIAL	1	2		3	
	Para clínker 100 %	Para clínker 56,4 %		Para cemento	
C <sub>3</sub> S ....	57,0	32,2	} 42,0	— 161,9	} 50,3
C <sub>2</sub> S ....	17,3	9,8		212,2	
C <sub>3</sub> A ....	12,1	6,8	} 11,9	22,0	} 32,0
C <sub>4</sub> AF ....	9,1	5,1		10,0	
CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O ....	—	—	—	8,6	—
Resto....	4,5	2,5	—	9,1	—
Total... ..	100,0	56,4	53,9	100,0	82,3

Como en el ejemplo 13, es de advertir, no sólo la presencia de valores negativos, sino también de valores individuales (positivos y negativos en este caso) superiores a 100 %. Al margen de ello, se puede apreciar un aumento global de la «composición potencial» de 28,4 unidades que se justifica así: aumento de 8,3 unidades en los silicatos y aumento de 20,1 unidades en los aluminatos. Individualmente el  $C_3S$  cede en 194,1 unidades y toma el valor negativo de  $-161,9$ , y el  $C_2S$  se incrementa en 202,4; el  $C_2A$  aumenta en 15,2 unidades y el  $C_4AF$  en 4,9.

Si a la vista de estos resultados se pensase, como en los casos de los ejemplos 13 y 6, que se trata del sistema  $C_2S-C_3A-C_{12}A_7-C_4AF$  pobre en cal, y se aplicase el cálculo correspondiente, se obtendrían los resultados del Cuadro 32 bis:

CUADRO 32 bis

COMPOSICION POTENCIAL	1	2		3	
	Para clínker 100 %	Para clínker 56,4 %		Para cemento	
$C_3S$ .....	57,0	32,2	} 42,0	—	} 90,1
$C_2S$ .....	17,3	9,8		90,1	
$C_2A$ .....	12,1	6,8	} 11,9	-114,5	} -7,8
$C_{12}A_7$ .....	—	—		96,7	
$C_4AF$ .....	9,1	5,1		10,0	
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ .....	—	—	8,6		
Resto.....	4,5	2,5		9,1	
<i>Total</i> .....	100,0	56,4	53,9	100,0	82,3

Como es bien patente, tampoco es aplicable dicho cálculo ficticio, que da un valor fuertemente negativo y mayor de 100 % para el aluminato tricálcico.

### 5.1 CONSECUENCIAS

Como en § 4.4, se confirma la previsión hecha en § 4 respecto de la imposibilidad de aplicación en ningún caso del «cálculo potencial» a los cementos de tipo puzolánico. La aplicación a ultranza de dicho cálculo, bien sea el correspondiente al sistema normal del Portland, o bien el correspondiente a sistemas pobres en cal, llevaría indistintamente a resultados absurdos.

El «cálculo potencial», que podría aplicarse, como siempre, a la parte de clínker contenida en los conglomerantes, requeriría conocer las proporciones de puzolana y de clínker y la composición de uno de ambos componentes, por lo menos, para poder hacer las debidas correcciones en las «composiciones potenciales ficticias». Respecto de estas últimas, es válido cuanto queda expuesto en § 4.5 y § 3.4.

## 6 cementos de adición

Los cementos de adición, según la definición que de ellos se da en el Pliego Español (10), y según las materias que en ellos pueden tomar parte, son parecidos a los cementos Portland «con adiciones» considerados en § 3.2, con la única diferencia de que estas adiciones participan en ellos en una proporción mucho mayor. En cuanto a la naturaleza de

estas adiciones, el mencionado Pliego considera dos grupos: el de las inertes: margas y calizas, dolomíticas o no, y el de las activas: escorias, puzolanas y algunos conglomerantes.

Para los conglomerantes «de adición» con adiciones del primer grupo son válidos «a fortiori» los razonamientos expuestos y las conclusiones resultantes para el cemento Portland con adiciones según § 3.2 y § 3.4. Para los conglomerantes «de adición» con adiciones del segundo grupo son de aplicación los argumentos y conclusiones expuestos y deducidos para los cementos siderúrgicos según § 4 y § 4.5, y para los cementos puzolánicos según § 5 y § 5.1. Los cementos siderúrgico-clínker SC encuadrados en el Pliego Español entre los de adición (10), ya han sido considerados en § 4.4.

#### 6.1 CONSECUENCIAS

*En ningún caso es aplicable el «cálculo potencial», en ninguna de sus formas, a los cementos de adición, siendo válidas, según los casos, las consideraciones hechas en § 3.4, § 4.5 y § 5.4.*

## **7 los cementos naturales**

Si bien el Pliego Español (10) no detalla acerca de las condiciones de fabricación de estos conglomerantes, es sabido que la clinkerización de sus crudos no llega a alcanzar las temperaturas que en el caso del Portland y, por lo tanto, aunque por composición dichos crudos pudieran dar lugar a las mismas especies químicas, por la menor cantidad de calor aportado al sistema reaccionante no sucede así. En efecto, en los clínkeres de los cementos naturales, como en las cales hidráulicas, apenas hay formación de silicato tricálcico, quedando sin combinar, en forma de cal libre, una cierta parte de la cal total de los crudos. Además de esto, el clínker del cemento natural no es homogéneo, por lo que, junto a porciones de material bien cocido, se encuentran otras de material, bien sea incocido, o bien sobrecocido. Cada una de estas porciones constituye de por sí, en realidad, *un sistema distinto* al de las restantes, por lo cual el clínker de cemento natural ha de considerarse, en la generalidad de los casos, *como una mezcla, y no como un sistema puro y bien definido.*

#### 7.1 CONSECUENCIAS

Las razones expuestas y, en particular, la última, hacen que para el cemento natural sean válidos los razonamientos expuestos en puntos anteriores, en cuanto a que, como *mezcla*, no le es aplicable *ningún* «cálculo potencial», y como sistema *distinto* del Portland y *no definido*, no le son aplicables, en particular, *ni las ecuaciones ordinarias correspondientes al Portland, ni las de cualquier otro sistema próximo bien definido.*

Dado que, en general, se desconocen las condiciones de cocción y enfriamiento del clínker; que se carece en absoluto de una garantía de constancia de dichas condiciones; que, por lo tanto, no se tiene idea de la naturaleza ni de la proporción de «cocidos», «sobrecocidos» e «incocidos», resulta *imposible todo arbitrio de corrección* de las eventuales «composiciones potenciales ficticias» que pudieran calcularse.

## 8 los cementos aluminosos

Por definición (10) son distintos del Portland: carecen de silicato tricálcico; apenas contienen silicato bicálcico; en lugar de aluminato tricálcico contienen otros aluminatos menos básicos; las fases que contienen hierro difieren también de las del Portland. Constituyen, pues, un sistema distinto al ordinario del Portland, y distinto también de los sistemas próximos al mismo.

Así como el Portland normal, el rico en cal, el pobre en cal y el PAS, constituyen sistemas cuyas ecuaciones para el respectivo «cálculo potencial» son fáciles de deducir (4), como se ha visto, por ejemplo, en § 3.3, el aluminoso es también un sistema para el que las correspondientes ecuaciones, muy distintas, pueden deducirse también con facilidad, cosa que se sale de la intención y de los límites de este trabajo (15).

### 8.1. CONSECUENCIAS

Es bien evidente, sin que se precise de un ejemplo numérico que lo materialice, que la aplicación al cemento aluminoso de cualquiera de los sistemas de ecuaciones aplicables al Portland llevaría a resultados absurdos, rechazables por sí mismos.

## 9 la composición potencial en las normas ASTM

Interesa tener en cuenta de manera especial la aplicación que de la «composición potencial» hacen las Normas ASTM, ya que los trabajos que dieron lugar al establecimiento de las ecuaciones para el cálculo de dicha composición son de origen norteamericano (16).

En primer lugar, dichas Normas (11) definen el *cemento Portland* como «el producto obtenido por pulverización de clínker, consistente esencialmente en silicatos cálcicos hidráulicos, al cual no se le han añadido después de la calcinación otras adiciones distintas de agua y/o sulfato cálcico no tratado, con la excepción de que pueden añadirse, a opción del fabricante, adiciones de otros materiales que no excedan del 1 %, con tal de que se haya demostrado mediante ensayos llevados a cabo o revisados por el Comité C-1 (Cemento), que dichos materiales, en las cantidades indicadas, no son perjudiciales».

En los requisitos de tipo químico, y sin entrar en detalles, las Normas ASTM fijan límites máximos para el  $C_3A$ , para la suma  $2C_3A + C_4AF$ , para el  $C_3S$  y para el  $C_2S$ , según las clases de cemento Portland y otras circunstancias. Por otra parte, el contenido de  $C_3A$  condiciona el de  $SO_3$  de los cementos. Pero hacen la salvedad, precisamente al tratar acerca de los contenidos máximos de  $C_3S$  y de  $C_2S$  permisibles según los casos, de que «la expresión de limitaciones químicas mediante los supuestos compuestos calculados no significa necesariamente que los óxidos se encuentren realmente o totalmente presentes como tales compuestos». La anterior definición corresponde a la edición de las Normas ASTM de 1961. Una definición más reciente —actual (17)— es la siguiente:

«A los efectos de esta Especificación (C 150 64) *cemento Portland* es el producto obtenido por pulverización de clínker, consistente esencialmente en silicatos cálcicos hidráulicos.» «El cemento a que se refiere esta especificación no debe contener más adiciones que las siguientes: a) agua o sulfato cálcico sin tratar, o ambos, en cantidades tales que no se sobrepasen los límites fijados para el trióxido de azufre y para la pérdida al fuego; b) a opción del fabricante pueden emplearse en la fabricación del cemento adicio-

nes coadyuvantes del proceso, con tal que tales materiales, en las cantidades empleadas, hayan demostrado no ser perjudiciales, de acuerdo con las Especificaciones para Adiciones Coadyuvantes del Proceso, para Empleo en Fabricación de Cemento Portland (18)» \*. Se añade en la Especificación C 150-64 que el fabricante de cemento, a petición del usuario, debe facilitar por escrito la naturaleza, cantidad e identidad de cualquier adición coadyuvante del proceso utilizada en la fabricación del cemento, así como también, a requerimiento, debe suministrar datos de ensayos que prueben la idoneidad de tal adición, según la especificación correspondiente.

Por otra parte, cuando se trata de cementos *distintos del Portland* pero que contienen como componente principal *clínker de cemento Portland*, las especificaciones basadas en *compuestos potenciales* se refieren siempre al *clínker* de cemento Portland y al *cemento Portland* contenido en el conglomerante, y no al *conglomerante* en sí.

## **10 la composición potencial en las normas españolas para conglomerantes hidráulicos**

Dos son las prescripciones relativas a la composición química de los conglomerantes de tipo Portland (exclusivamente) que el Pliego Español (10) basa en datos relativos a la composición potencial: una se centra en el contenido máximo de silicato tricálcico (por supuesto que determinado por «cálculo potencial», aunque expresamente no se indique) que pueden tener los cementos Portland P-350 ( $C_3S$  máximo % 35) para ser empleados en presas; otra se refiere al contenido máximo de aluminato tricálcico (también, y aunque no se mencione, determinado por «cálculo potencial»). Esta última afecta de distinto modo al cemento Portland normal en dos de sus categorías, P-350 y P-450 ( $C_3A$  máximo % 18), y al cemento Portland resistente a las aguas selenitosas en dos de sus calidades PAS-250 y PAS-350 ( $C_3A$  máximo % 5).

Si se tiene en cuenta lo que según § 3 el cemento Portland *puede ser*, de acuerdo con la ampliación «eventual» que de la definición del mismo se da en el Pliego Español vigente en la actualidad, se comprende que, en virtud de cuanto se ha expuesto en lo que precede, es ocioso establecer cualquier condición limitativa basada en la «composición potencial», pues el cálculo de la misma dará resultados *siempre* dudosos y *nunca* de garantía.

Quiere decirse con esto que ambos criterios: el de admitir como cemento Portland mezclas de clínker Portland y yeso (retardador) que pueden contener hasta 10 % de otras materias, y el de establecer limitaciones basadas en datos de «composición potencial» calculada, son mutuamente exclusivos y, por lo tanto, incompatibles. A no dudarlo, es éste un serio fallo básico del Pliego que urge subsanar.

En cuanto al modo de hacerlo, evidentemente son dos las soluciones: una, suprimir tales prescripciones limitativas, lo cual es fácil y cómodo, pero poco defendible; otra, suprimir la «eventual» ampliación que de la definición de cemento Portland se da en el Pliego Español. El comentario amplio a esta última solución se reserva para otra ocasión y lugar, por salirse del propósito y de la limitada extensión de este trabajo (19).

\* Tanto el espíritu como la letra de esta excepción se refieren a productos fluidificantes, incluso res de aire, coadyuvantes de la molienda, etc., del tipo de los ligninsulfonatos y similares.

## 11 la composición potencial y las adiciones en cuanto al contenido de $SO_3$ de los cementos

El Pliego Español (10) fija como prescripción de tipo químico un contenido de  $SO_3$  máximo admisible (en concepto de yeso retardador) que para los cementos Portland y los siderúrgicos (excepción hecha del Siderúrgico Sobresulfatado SF), y para los cementos de adición, se cifra en 4 %. Este valor está en relación con el *contenido medio de  $C_3A$*  de los cementos Portland españoles, y es un *máximo alcanzable o no a voluntad* (20). Está basado en la formación de sulfoaluminato cálcico monosulfato hidratado  $C_3ACsH_{10}$  y corresponde al *contenido óptimo de yeso* del cemento para alcanzar las máximas resistencias y la máxima estabilidad de volumen (21) y (22).

Es evidente que si el contenido de  $SO_3$  (yeso) del *cemento* debe guardar una relación estequiométrica con el contenido de  $C_3A$  («potencial») del mismo, dicho contenido de  $SO_3$  debe calcularse y fijarse de acuerdo con el contenido de  $C_3A$  «potencial» del clínker, con independencia, en principio, de la naturaleza y cuantía de las «eventuales» adiciones que el conglomerante pueda contener (20).

Si, a tenor de ello, se considera el clínker tipo que ha servido de base para los ejemplos precedentes, y las distintas partes alícuotas del mismo que han tomado parte en los diferentes conglomerantes formados a partir de él; si se consideran asimismo las cantidades de yeso (expresadas en  $SO_3$  %) necesarias para la formación, bien sea del  $C_3ACsH_{10}$ , o bien del sulfoaluminato cálcico trisulfato hidratado  $C_3ACsH_{30}$ , se tienen los resultados del Cuadro 33:

CUADRO 33

1 Clínker %	2 $C_3A$ %	3 4	
		$SO_3$ %	
		Para $C_3ACsH_{10}$	Para $C_3ACsH_{30}$
100,0	12,1	3,6	10,8
91,4	11,1	3,3	9,9
81,4	9,8	2,9	8,7
70,0	8,5	2,5	7,5
56,4	6,8	1,1	6,0
30,0	3,6	0,6	3,2 *

Por otra parte, se ha procurado, ex profeso, que en todos los ejemplos puestos el contenido de  $SO_3$  de los conglomerantes resultantes fuese de 4 %, es decir, coincidiese con el máximo permitido por el Pliego Español. Pues bien, este valor rebasa a todos los de la columna 3 del Cuadro 33, e incluso al último valor, marcado con asterisco, de la columna 4.

Quiere decir esto que en este último caso el contenido de yeso es superior al que puede combinarse con todo el  $C_3A$  del clínker y, por lo tanto, del conglomerante, aun admitiendo la formación total del sulfoaluminato cálcico hidratado más rico en sulfato cálcico. O, lo que es lo mismo, que la totalidad de los conglomerantes considerados en los ejemplos están sobredosificados de yeso y, en definitiva, pueden tener un comportamien-

to expansivo y presentar mermas de resistencia. Ello es consecuencia de haber fijado un *contenido de yeso igual para todos los conglomerantes, sin haber tenido en cuenta (se repite que ex profeso) el distinto contenido de clínker (y por lo tanto de  $C_3A$  «potencial») de los mismos*. Esto puede tener, y de hecho ha tenido a veces, graves consecuencias en la práctica (20). Otro punto singular, en relación con este tema, es el del contenido de  $SO_3$ , en diversas formas (7), del propio clínker; (en el caso del clínker tipo considerado en los ejemplos se ha supuesto nulo el  $SO_3$  por razones de simplificación). Pero esta cuestión, como otras ya señaladas, se sale del marco del presente trabajo.

## 12 conclusiones

- 1.<sup>a</sup> La «composición potencial» es la expresión cuantitativa del contenido de especies químicas bien definidas que tiene un sistema fisicoquímico en equilibrio en unas condiciones dadas.
- 2.<sup>a</sup> El «cálculo potencial» es el arbitrio matemático por el que puede hallarse la «composición potencial» de un sistema.
- 3.<sup>a</sup> De las dos conclusiones anteriores se deduce que no puede hablarse de composición ni de cálculo potenciales, si no se da la circunstancia de la existencia de un equilibrio fisicoquímico entre especies químicas bien definidas.
- 4.<sup>a</sup> Por la conclusión precedente el «cálculo potencial» y la «composición potencial» obtenida del mismo, serán diferentes en función de las especies químicas que puedan formarse, las cuales a su vez dependerán de la composición química del sistema y de las condiciones de equilibrio.
- 5.<sup>a</sup> El «cálculo potencial» utilizado en la química de los conglomerantes es solamente aplicable al clínker, en primera aproximación, y sentando determinadas hipótesis en cuanto a las condiciones de equilibrio fisicoquímico del material. De acuerdo con la composición química del sistema *C-S-A-F* y con condiciones supuestas para el equilibrio de las especies en los casos reales, hay ecuaciones que dan la «composición potencial» en el caso del sistema «normal» del Portland, de sistemas más ricos y pobres en cal, respectivamente, así como de sistemas con relación *A/F* (módulo de fundentes) mayor o menor de 0,64 (relación molar  $Al_2O_3/Fe_2O_3$ ).
- 6.<sup>a</sup> Por extensión, el «cálculo potencial» puede aplicarse sin grandes errores al cemento Portland, definido éste como mezcla exclusiva de clínker y yeso, a condición de que el yeso tenga una gran pureza.
- 7.<sup>a</sup> En el caso de conglomerantes mezcla de clínker con otros materiales, el «cálculo potencial» sólo es aplicable a la parte alícuota de clínker contenido en dichas mezclas, cuando se dispone de datos suficientes para llevarlo a cabo.
- 8.<sup>a</sup> Por lo tanto, el «cálculo potencial» carece de sentido en el caso de cementos Portland con adiciones, cementos siderúrgicos de todas clases, cementos puzolánicos, cementos de adición, cementos naturales y cementos aluminosos. Para los cuatro citados en primer lugar es así porque, en general, no se conoce la composición química del clínker y su proporción en la mezcla, o lo que sería equivalente, la composición global del conglomerante, la de las adiciones en conjunto y la proporción de estas últimas en la mezcla. Para el quinto y el sexto, porque los respectivos clínkeres, por diversas razones, constituyen de por sí sistemas totalmente distintos del Portland.

9.<sup>a</sup> Si a pesar de no ser aplicable el «cálculo potencial» en los casos mencionados, llegara a aplicarse, se cometerían grandes errores. Estos no pasarían desapercibidos en muchos casos, pues se obtendrían valores negativos para algunas especies y superiores a 100 % para otras.

10.<sup>a</sup> Los casos en que esto no sucede son los más graves, pues bajo una falsa apariencia de corrección se obtendrían valores cuantitativamente erróneos. El error puede ser hasta cualitativo, figurando como existentes especies químicas que no lo son, o viceversa.

## **bibliografía**

1. CALLEJA, J.: «Resumen y comentarios». IV Coloquios de Directores y Técnicos de Fábricas de Cemento. *Materiales de Construcción - Ultimos Avances* (I.E.T.c.c.), núms. 118 y 119, abril-septiembre 1965.
2. BENITO, C. de: «Pliego de condiciones». *Ibid.*
3. BALAGUER, J. M.: «Homologación y control de la calidad». *Ibid.*
4. CALLEJA, J.: «Cemento Portland: cálculo e interpretación de datos químicos». *Manuales y Normas del I.E.T.c.c.*, Madrid, 1960.
5. CALLEJA, J.: «Conglomerantes hidráulicos: Físicoquímica y Tecnología». *Monografía*, núm. 214 (I.E.T.c.c.), Madrid, 1961.
6. CALLEJA, J.: «Interpretación de la composición química y potencial del cemento Portland». I Seminario de Construcción de Carreteras. I.E.T.c.c., Madrid, 1961.
7. CALLEJA, J.: «Los álcalis en la estructura del clínker de cemento Portland». *Revista de Ciencia Aplicada*, XIV, 397, 1959.
8. CALLEJA, J., y FERNÁNDEZ PARÍS, J. M.: «Determinación complexométrica de la alúmina en cementos». *Materiales de Construcción - Ultimos Avances* (I.E.T.c.c.), núm. 91 (1959); *Revista de Ciencia Aplicada*, XIII, 326 (1959).
9. CALLEJA, J., y FERNÁNDEZ PARÍS, J. M.: «Observaciones acerca de la determinación de alúmina en cementos». *Materiales de Construcción - Ultimos Avances* (I.E.T.c.c.), núm. 109 (1963).
10. P.C.C.H.—64: Normas y Manuales del I.E.T.c.c., Madrid, 1964.
11. ASTM Standards: Specification C150-61, Part 4, 1961.
12. CALLEJA, J.: «Consideraciones sobre los contenidos nominal y real de materiales hidráulicamente activos en los conglomerantes». *Informes de la Construcción* (I.E.T.c.c.), núm. 173, página 119 (1965).
13. CALLEJA, J.: «El cálculo de la composición potencial en sistemas distintos al del clínker Portland». Trabajo en preparación.
14. CALLEJA, J.: «Variaciones de la composición potencial del clínker de cemento Portland en función de las variaciones de composición química de los crudos». Trabajo en preparación.
15. CALLEJA, J.: «El cálculo de la composición potencial del cemento aluminoso». Trabajo en preparación.
16. BOGUE, R. H.: «The chemistry of Portland cement», 2.<sup>a</sup> ed. Reinhold Publishing Co., New York, 1955.
17. ASTM Standards: Specification C 150-64, Part 9, junio 1965.
18. ASTM Standards: Specification C 465-65 T. Part 9, junio 1965.
19. CALLEJA, J.: «Comentarios sobre el Pliego Español de conglomerantes hidráulicos PCCH-64». Trabajo en preparación.
20. CALLEJA, J.: «Puntos de vista sobre el contenido de yeso en los cementos Portland». *Materiales de Construcción* (I.E.T.c.c.), núm. 120 (1965).
21. CALLEJA, J.: «Influencia del contenido de yeso del cemento Portland sobre la retracción de las pastas, morteros y hormigones». III Reunión Internacional sobre Reactividad de los Sólidos, Madrid, 1956. *Materiales de Construcción* (I.E.T.c.c.), núms. 76 a 78 (1956), con el título de «Aumento de la producción de cemento y mejora simultánea de la calidad».
22. CALLEJA, J.: «El yeso como constituyente de los conglomerantes hidráulicos». I Congreso Internacional sobre las Obras Públicas en Terrenos Yesíferos, Madrid, 1962. *Materiales de Construcción* (I.E.T.c.c.), 1963.