Sobre la expansión de los cementos y los métodos para su determinación

(Limitaciones lógicas del campo de aplicación y de la validez de los resultados de ensayos de expansión de cementos en autoclave)

Dr. J. CALLEJA *

RESUMEN

En este trabajo se aborda, desde un punto de vista expositivo, analítico y crítico, la problemática de las normas para cemento, tanto en lo que se refiere a las especificaciones, cuanto en lo concerniente a los métodos de ensayo, en relación con el fenómeno de la expansión y sus consecuencias.

Se expone en plan estadístico el estado actual y las tendencias más dominantes por el momento, en cuanto a los ensayos de expansión, desde el punto de vista de la normalización en todos los países del mundo.

Se aporta información original sobre el problema de la expansión, sus causas y modos de evitarla, así como acerca de la insuficiencia de algunos métodos y de la cautela y prudencia con que es preciso aceptar, interpretar y valorar los resultados de los mismos.

1. CONSIDERACIONES GENERALES

Entre las características físicas y mecánicas que un buen conglomerante hidráulico debe poseer, la estabilidad de volumen sigue —y a veces precede o debe preceder— en importancia a las propias resistencias.

Por estabilidad de volumen de un cemento se entiende su cualidad de no dar lugar a excesivos —o en todo caso intolerables— cambios dimensionales durante el proceso de hidratación, ya consistan estos cambios en aumentos —expansiones e hinchamientos— o en disminuciones —retracciones—. La inestabilidad de volumen puede ser causa de fisuraciones y agrietamientos, e incluso de roturas y desintegraciones.

La inestabilidad por expansión, objeto principal de este trabajo, se produce por reacciones químicas en la pasta cementante durante la hidratación, en virtud de las cuales, a partir de productos anhidros se forman hidratos cuyo volumen final es mayor que la suma de los volúmenes de aquéllos y del agua implicada en la reacción, y siempre que los productos hidratados no dispongan de espacio libre para cristalizar sin producir tensiones o dilataciones.

A este respecto cabe decir que no siempre que se forma un producto hidratado de volumen mayor que los de sus componentes anhidros se produce expansión, o, por mejor decir, se

(*) Investigador Científico. Jefe del Departamento de Química del I.E.T.c.c.

manifiestan al exterior los efectos de ella. Así, si la expansión se produce prematuramente, durante el período plástico de la masa que fragua, y ésta no se encuentra absolutamente confinada y constreñida, la expansión puede no causar tensiones y en tal caso tampoco aparecen las consecuencias de las mismas. Si, por el contrario, la expansión tiene lugar a plazo más diferido, en el interior de una masa ya fraguada y endurecida, y por lo tanto constreñida hasta la rigidez, la expansión puede producir tensiones que den lugar incluso a rupturas. Las reacciones llamadas *topoquímicas*, es decir, las que tienen lugar *in situ* por acción entre sólidos, o entre sólidos y líquidos, pero sin que los productos de la reacción se formen en el seno y a través de una fase líquida —disolución acuosa en el caso de la hidratación del cemento— son típicamente expansivas (1). A este tipo de reacciones pertenecen muchas de las expansiones producidas en el hormigón fraguado, por ataque de sulfatos, o por interacción de algunos áridos reactivos con los álcalis del cemento.

2. LOS COMPONENTES EXPANSIVOS DE LOS CEMENTOS

No todos los componentes anhidros de los cementos tienen carácter expansivo en su hidratación; algunos de ellos son incluso retractivos. Entre estos últimos se encuentra el aluminato tricálcico C_3A , si bien en determinadas condiciones y en presencia de sulfato cálcico y agua puede dar lugar a la *ettringita*, cuya formación transcurre con carácter expansivo. En su formación se basa el mecanismo de los cementos expansivos, así como de los de expansión controlada o retracción compensada (2).

Los componentes expansivos del cemento son por excelencia la cal libre y la magnesia libre (cristalizada en forma de *periclasa*). Su presencia y proporción en el cemento dependen de multitud de factores inherentes a las materias primas, a la dosificación, a los procesos de cocción y de enfriamiento del clinker y al ensilado y aireación del cemento. En todo caso, son óxidos calcinados a muy alta temperatura —la de clinkerización: unos $1.450^{\circ}C$ — es decir, casi “a muerte”, por lo cual son muy lentos en su proceso de hidratación expansiva; la magnesia vítrea que queda en disolución sólida con otros componentes del clinker si éste se somete a un enfriamiento rápido es prácticamente inactiva a efectos de la expansión, pero no así la magnesia libre cristalizada (*periclasa*).

Esta lentitud de la hidratación, de la cal y de la magnesia libres calcinadas (sobre todo de la segunda) a alta temperatura es la causa de que los procesos expansivos debidos a dicha hidratación no se manifiesten de forma inmediata, sino diferida, con lo cual la expansión produce tensiones que pueden crear graves problemas.

3. LOS ENSAYOS PARA DETECTAR LA EXPANSION DE LOS CEMENTOS

La expansión de los cementos tiene, pues, un carácter potencial, y se manifiesta o actualiza a plazo, en general, no corto. Por este motivo, los ensayos para detectarla, o bien son lentos, y se aceptan como tales, o bien han de ser acelerados. Unos y otros consisten en observar o medir probetas de pasta pura tratadas en unas ciertas condiciones; los basados en la observación son de carácter meramente cualitativo, mientras que los basados en una medida pueden considerarse como cuantitativos y permiten fijar limitaciones numéricas a la expansión máxima admisible de los cementos.

Los métodos de larga duración, si bien son los menos interesantes desde un punto de vista utilitario, por lo mucho que se tarda en saber si un cemento es expansivo o no, son en cambio los más fidedignos, ya que en ellos se somete al cemento a unas condiciones experimentales mucho más parecidas a las de la realidad en la práctica. En cambio, los métodos rápidos, basados en la aceleración de la hidratación de los componentes ex-

pansivos por elevación de la temperatura, por una parte son mucho más drásticos, y, por otra parte, al apartarse de las condiciones reales, introducen una incertidumbre o indeterminación en cuanto se refiere a los resultados y a su interpretación y valoración. Se ha pretendido justificar el carácter drástico —a veces excesivo— de estos ensayos arguyendo que sitúan a los resultados en el terreno de la seguridad; es decir, que si un cemento se muestra no expansivo con arreglo a uno de tales ensayos, se podrá garantizar que no será expansivo en cualesquiera condiciones; mientras que, si por el contrario, el cemento resulta expansivo según el ensayo, en la realidad práctica podrá serlo o no: es decir, no se puede asegurar que va a ser expansivo. Esto, que podría considerarse como absolutamente cierto en el caso de los cementos portland sin adiciones ni componentes secundarios de ningún tipo, no lo es en todos los casos, pues no hay duda de que las reacciones de hidratación a alta temperatura, o a alta presión en atmósfera de vapor, no transcurren por los mismos cauces ni de acuerdo con la misma cinética que gobiernan los procesos de hidratación a la temperatura normal; incluso los productos de la hidratación son distintos en lo que concierne a su composición y a su estructura. Esto es una realidad y tiene una importancia decisiva en el caso de cementos no portland o que contienen adiciones o componentes secundarios —véanse más detalles en 3.4—.

3.1. Tipos de ensayo

De acuerdo con lo expuesto, existen métodos cualitativos y cuantitativos, lentos y rápidos, para determinar la expansión. Entre los cualitativos está el llamado “de las galletas”, consistente en fabricar unas tortas de pasta pura, en determinadas condiciones, y en someterlas a la hidratación, observando al final del ensayo si la galleta muestra signos de rotura, desmoronamiento, agrietamiento radial, cuarteamiento, alabeo o deformación. De ser así, se hace constar como resultado del ensayo, con los detalles que sean del caso; de no ser así, se indica que el cemento pasa el ensayo de expansión “sin novedad”. El método de las galletas presenta dos versiones: la normal o lenta, realizada “en frío” y la acelerada o rápida, ejecutada “en caliente”. La primera consiste en mantener la galleta en cámara húmeda y/o sumergida en agua a la temperatura normal durante 28 días (a veces se hace una observación a los 7 días) y comprobando al final del ensayo si se ha producido alguna de las “novedades” señaladas anteriormente. La versión acelerada, rápida o en caliente, consiste en someter las galletas, (una vez fraguadas en cámara húmeda, durante 24 horas) a la acción del agua hirviendo durante un período de tiempo que suele oscilar entre 1 y 6 horas, haciéndose al cabo de dicho período las mismas observaciones.

Entre los ensayos cuantitativos está el llamado “de las agujas” debido a Le Chatelier, por cuyo nombre es conocido, y que consiste en fabricar unos cilindros de pasta pura en ciertas condiciones, sometiéndolos al fraguado e hidratación. La pasta se enmolda en unos cilindros de chapa abiertos por sus bases y por una generatriz, los cuales llevan soldadas a sus paredes, exteriormente, del lado de la generatriz abierta y normalmente a ella, unas largas agujas. La distancia entre los extremos de éstas se mide al principio y al final del ensayo y la diferencia, expresada en milímetros, se da como expansión del cemento. También el método Le Chatelier presenta dos versiones: la normal o lenta, efectuada en frío, y la acelerada o rápida, realizada en caliente. La primera se lleva a cabo manteniendo los moldes-agujas bajo agua a temperatura normal durante 28 días (a veces se hace una primera determinación de la expansión a los 7 días); la segunda consiste en hervir los moldes durante un tiempo que oscila entre 1 y 6 horas, determinándose la diferencia de apertura de las agujas al cabo de dicho tiempo. En general, el ensayo de las agujas Le Chatelier sólo se suele efectuar según su versión rápida o en caliente.

Otro ensayo más reciente, de origen norteamericano, es el del autoclave, según la correspondiente norma ASTM (3). Consiste en fabricar, en determinadas condiciones, prismas de pasta pura de $2,5 \times 2,5 \times 25$ cm, provistos de unos índices metálicos en sus extremos para poder medir su longitud. Después de un curado de 24 horas en cámara húmeda, los prismas se someten a la acción del autoclave en las condiciones que estipula el método (21 at.; 215°C) y durante 3 horas. La diferencia de longitud de las probetas antes y después del tratamiento en el autoclave, expresada como tanto por ciento de la longitud antes del tratamiento, se da como expansión.

3.2. Observaciones generales sobre los ensayos descritos

Un aspecto muy importante que hay que tener en cuenta, y que sin embargo pocas veces se tiene, es el de que no existe, ni puede existir una correlación, a veces ni mediana, entre los resultados de los ensayos descritos y el comportamiento real de los cementos en la práctica. Y tanto menos, cuanto más se apartan las condiciones del ensayo, por drásticas que sean, de las condiciones prácticas reales. Las razones son múltiples y evidentes. En primer lugar, las ya señaladas en 3; y en segundo lugar, el hecho de que los ensayos se realizan *en pasta pura*, en la cual todos los cambios de volumen —expansión o retracción— se manifiestan de forma más acusada, mientras que los cementos se emplean en la práctica en *forma de morteros u hormigones*, en los que tales cambios quedan muy atenuados.

En este aspecto, los resultados de cualquier ensayo de expansión sólo pueden tener un valor estadístico, en el sentido de que la probabilidad de expansión en la realidad será, en general, tanto menor, cuanto menor sea la expansión puesta de manifiesto por un determinado ensayo. Pero la estadística ha de basarse en datos o resultados homogéneos y comparables, y a este respecto se confirma una vez más lo indicado en 3, en cuanto a que los métodos normales o lentos, por más ajustados a la realidad, son más fidedignos y representativos del comportamiento de los cementos en la práctica. Esto quiere decir que la representatividad de los resultados decrece tanto más cuanto más se apartan las condiciones del ensayo, de las condiciones reales; así pues, el ensayo del autoclave sería —tal vez, pero discutiblemente— el más seguro, pero no el más representativo y fidedigno, siguiéndole en este orden los restantes ensayos rápidos (galletas y agujas “en caliente”). La prueba de ello es que, en caso de controversia entre resultados de distintos métodos, el criterio unánime consiste en aceptar como válido el resultado del ensayo a la vez más significativo y menos drástico, por ser más ajustado a la realidad práctica —véanse más detalles en 3.4.—

3.3. Los métodos de ensayo de expansión de los cementos en los distintos países del mundo, en 1970

De acuerdo con lo expuesto en 3.1., y según la más reciente publicación del CEMBUREAU sobre normas para cemento (4), los 44 países reseñados en dicha publicación mantienen adoptados en la actualidad, para determinar la posible expansión de los cementos —portland, siderúrgicos y puzolánicos—, uno o varios de los siguientes métodos: galletas en frío o agujas en frío (normales o lentos); galletas en caliente, agujas en caliente o autoclave (acelerados o rápidos).

En general, la mayoría de los países aplican el ensayo de las agujas Le Chatelier o el de las galletas, en caliente; muy pocos (uno solo) aplica el de las agujas en frío (además de las agujas en caliente). Y sólo una minoría de países, respecto de los que utilizan cualquier otro método, emplean el del autoclave; aún así, en algunos de estos casos este método se aplica, o bien a petición del usuario, o bien cuando el contenido de mag-

nesia del cemento excede de un cierto valor, o bien para determinados tipos o clases de cemento. En otros casos el método del autoclave puede ser sustituido por alguno de los restantes, o debe ser repetido, previa aireación del cemento, si el resultado es desfavorable en una primera tentativa de aplicación del mismo.

También para el ensayo de las agujas y el de las galletas en sus dos versiones, en caliente y en frío, está prevista una repetición del mismo con una nueva muestra del cemento aireado, si el resultado de la primera tentativa es desfavorable. La razón es que la expansión debida a la cal libre a veces se atenúa o desaparece durante el ensilado del cemento, por hidratación y carbonatación —aireación—. Cuando la expansión obedece solamente a este factor, en efecto disminuye o se anula al airear el cemento; no es así cuando además existen otras causas de expansión. En estos casos se acepta como resultado definitivo el más favorable. Y análogamente, cuando se ensaya la expansión por dos métodos de distinta capacidad de valoración, por ejemplo el lento de las galletas en frío y el rápido de las agujas en caliente, hace fe el primero, es decir, el menos drástico y más ajustado a la realidad práctica, de acuerdo una vez más con lo señalado en 3. y 3.2.

Los países que, según la mencionada publicación del CEMBUREAU aplican uno sólo de los citados ensayos de expansión, están reseñados en el Cuadro 1. De él se deduce que de los 26 (100 %) países incluidos (59 % del total de 44), 12 (46 %) utilizan el método de las agujas Le Chatelier en caliente, con tiempos de tratamiento comprendidos entre 1 y 5 horas, y expansiones máximas admisibles comprendidas entre 3 y 10 mm (promedios: 3 horas y 7,5 mm); 10 países (38 %) utilizan el método del autoclave, con expansiones máximas admisibles comprendidas entre 0,20 % y 1 % (promedio: 0,80 %); 3 países (12 %) emplean el método de las galletas en caliente, con tiempos de tratamiento de 2 horas; 1 país (4 %) emplea el método de las galletas en frío, con tiempo de tratamiento de 28 días; y ningún país emplea el método de las agujas en frío. Los tiempos de aireación del cemento para la repetición del ensayo, en los casos en que está prevista, oscilan entre 1 y 7 días (promedio: 5 días), y los valores máximos de expansión admisibles, por lo que se refiere al método de Le Chatelier en el ensayo repetido, oscilan entre 2,5 y 5 mm (promedio aproximado: 5 mm); también en este caso, cuando la magnesia rebasa el valor del 3 %, el tiempo de tratamiento aumenta, alcanzando un promedio de 6 horas.

Los países que aplican dos de los métodos citados están reseñados en el Cuadro 2. De él se infiere que de los 12 (100 %) incluidos (27 % del total de 44), 8 (67 %) emplean el método de las galletas en caliente, con tiempos de tratamiento que oscilan entre 1 y 6 horas (promedio: 3 horas); 6 países (50 %) utilizan el método de las galletas en frío, con un tiempo de tratamiento de 28 días; 6 países (50 %) utilizan el método de las agujas en caliente con expansiones máximas admisibles comprendidas entre 5 y 10 mm (promedio aproximado: 10 mm) y tiempos de tratamiento que oscilan entre 1 y 6 horas (promedio: 3 horas); 3 países (25 %) emplean el método del autoclave, con expansiones máximas admisibles comprendidas entre 0,5 % y 0,8 % (promedio aproximado: 0,70 %); y 1 país (8 %) utiliza el método de las agujas en frío, con un tiempo de tratamiento de 7 días y una expansión máxima tolerable de 3 mm. Los tiempos de aireación del cemento para la repetición del ensayo, en los casos en que se prevé, oscilan entre 3 y 7 días (promedio: 5,5 días); y el valor máximo admisible para la expansión, por lo que respecta al método de las agujas en caliente, en el ensayo repetido, es de 5 mm.

Los países que aplican tres o más métodos son los indicados en el Cuadro 3, el cual muestra que de los 6 (100 %) reseñados (14 % del total de 44), los 6 (100 %) emplean el método Le Chatelier en caliente, con tiempos de tratamiento que oscilan entre 1 y 3 horas

y expansiones máximas admisibles comprendidas entre 5 y 10 mm (promedios aproximados: 2 ½ horas y 8 mm); 4 países (67 %) usan, bien sea el método de las galletas en frío, con un tiempo de tratamiento de 28 días, o bien el método de las galletas en caliente, con tiempos de tratamiento que oscilan entre 2 y 3 horas (promedio aproximado: 3 horas), o bien el método del autoclave, con expansiones máximas tolerables que oscilan entre 0,30 % y 1 % (promedio aproximado: 0,70 %). La aireación prevista en el único caso de opción a repetir el ensayo es de 7 días de duración, y la expansión máxima admisible (Le Chatelier) es en tal caso de 5 mm.

El cuadro 4 resume todo lo anterior y permite apreciar los siguientes hechos:

- i) 44 países (100 %) llevan a cabo en total 68 ensayos de expansión (100 %); 26 de estos ensayos (38 %) son practicados por 26 países (59 %) con carácter exclusivo, mientras que 24 ensayos (35 %) son llevados a cabo a razón de dos por cada uno de otros 12 países (27 %), y 18 ensayos más (27 %) son ejecutados por los restantes 6 países (14 %), a razón de tres por cada uno;
- ii) de los 68 ensayos (100 %), sólo 17 (25 %) son de autoclave, en tanto que los otros 51 (75 %) son distintos; de ellos 24 (36 %) —los más numerosos— corresponden al método Le Chatelier; los restantes se reparten así: 15 (22 %) corresponden a galletas en caliente, 11 (16 %) a galletas en frío y 1 (1 %) a agujas en frío.

Esto indica claramente que no siempre el método más drástico de ensayo de expansión —el del autoclave— se utiliza hoy día con preferencia, sino que, por el contrario, se emplea en una minoría casi absoluta de países y en una minoría más que absoluta de casos. Y aún en determinados países y casos su utilización está condicionada a una exigencia del usuario del cemento, o a un convenio entre usuario y fabricante, o a que el contenido de magnesia del clinker exceda del 5 %. En otros casos no se aplica sino a determinados tipos y clases de cementos, e incluso puede ser sustituido por otro ensayo menos drástico.

El método de las agujas Le Chatelier en caliente resulta ser el más utilizado, con mucho, en mayor número de casos y países.

3.4. Consideraciones particulares sobre el ensayo de expansión en autoclave

Circula la versión que el autor no garantiza, pero que ha tenido ocasión de conocer a través de fuentes autorizadas e imparciales, de que el ensayo de expansión en autoclave se implantó en determinado país, más por razones comerciales que técnicas, y con el objeto de evitar o restringir en un momento determinado la importación de cemento de un cierto continente por parte de países de otro continente. Hasta el punto, se añade, de que los fabricantes del país en cuestión fueron más rigurosos que la propia administración a la hora de especificar límites de expansión en autoclave a los cementos, tal vez en defensa de sus intereses comerciales, y sin duda ante la seguridad de cumplir las limitaciones que con tanto rigor se autoimponían. Esto no es de extrañar cuando se utilizan caros y complejos procesos de flotación de minerales para separar magnesia y poder utilizar calizas magnesianas como materia prima para fabricar cemento, y así, la limitación máxima de la expansión al 1 %, propuesta al parecer por la administración estadounidense, se forzó al 0,5 %, por deseo manifiesto de los fabricantes de cemento.

En los cuadros expuestos se puede apreciar que el ensayo del autoclave se aplica indistintamente a cementos portland, siderúrgicos y puzolánicos, a veces con el mismo valor limitativo de la expansión.

C U A D R O 1

NORMAS, PRESCRIPCIONES Y ENSAYOS SOBRE EXPANSION DE CEMENTOS								
PAIS	Tipos de Cemento	Tipos de Ensayos y Prescripciones				Observaciones		
		G A L L E T A S		AGUJAS Le Chatelier			AUTOCLAVE	
		en frío	en caliente	en frío	en caliente			
1 Africa del Sur	Portland	28 días			1 h — 10 min		Aireación 7 días 5 mm	
" " "	Siderúrgicos				1 h — 10 min		Aireación 7 días 5 mm	
2 Alemania Occ.	Portland		2 horas				Aireación 3 días	
" "	Siderúrgicos		2 horas				Aireación 3 días	
" "	Puzolánicos		2 horas				Aireación 3 días	
3 Argentina	Portland						1 %	
4 Austria	Portland		2 horas				Aireación 3 días	
"	Siderúrgicos		2 horas				Aireación 3 días	
5 Bélgica	Portland					5 h — 6 min		Aireación 24 h.
"	Siderúrgicos					5 h — 6 min		Aireación 24 h.
6 Brasil	Portland						0,8 %	
"	Siderúrgicos						0,5 %	
7 Canadá	Portland						1 %	Repetición con nueva muestra en 28 días.
8 Cuba	Portland						0,5 %	
9 China	Portland		? horas					
"	Siderúrgicos		? horas					
"	Puzolánicos		? horas					
10 España	Portland						1 %	
"	Siderúrgicos						1 %	
"	Puzolánicos						1 %	
11 Estados Unidos	Portland						0,80 %	
" "	Siderúrgicos						0,20 %	Retracción 0,20 %
" "	Puzolánicos						0,50 %	Retracción 0,50 %
12 Francia	Siderúrgicos					3 h — 3 min		
13 Grecia	Portland							
14 Indonesia	Portland					3 h — 10 min		
15 Inglaterra	Portland				1 h — 10 min		Aireación 7 días 5 mm	
"	Siderúrgicos				1 h — 10 min		Aireación 7 días 5 mm	
16 Irlanda	Portland				1½ h — 5 min		Aireación 7 días 2,5 mm	
17 Italia	Portland				3 h — 10 min			
"	Puzolánicos				3 h — 10 min			
18 Méjico	Portland					0,80 %		
"	Puzolánicos					1 %	Retracción 0,3 %	
19 Noruega	Portland				3 h — 5 min			
20. Paquistán	Portland				1 h — 10 min		Aireación 7 días 5 mm	
21 Portugal	Portland				3 h — 4 min		Aireación 7 días	
"	Puzolánicos				3 h — 4 min		Aireación 7 días	
22 Suecia	Portland				3 h — 10 min			
"	Siderúrgicos				3 h — 10 min			
23 Taiwan	Portland					0,50 %		
24 Turquía	Portland				4 h — 10 min		Con MgO 3 % 6 h	
"	Siderúrgicos				4 h — 10 min		Con MgO 3 % 6 h	
"	Puzolánicos				4 h — 10 min		Con MgO 3 % 6 h	
25 Uruguay	Portland					0,90 %		
26 Venezuela	Portland					0,80 %		
Totales: 26 (100 %)		1 (4 %)	3 (12 %)		12 (46 %)	10 (38 %)		
Aclaraciones:								

C U A D R O 2

NORMAS, PRESCRIPCIONES Y ENSAYOS SOBRE EXPANSION DE CEMENTOS									
PAIS	Tipos de Cemento	Tipos de Ensayos y Prescripciones						Observaciones	
		G A L L E T A S		AGUJAS Le Chateller		AUTOCLAVE			
		en frio	en caliente	en frio	en caliente				
1 Australia	Portland	28 dias	24 h. — 6 h		6 h — 5 min		Aireación 7 días 3 mm		
2 Bulgaria	Portland	28 dias	2 — 4 h						
"	Siderúrgicos	28 dias	2 — 4 h						
"	Puzolánicos	28 dias	2 — 4 h						
3 Checoslovaquia	Portland	28 dias	3 horas				Aireación 3 días		
"	Siderúrgicos	28 dias	3 horas				Aireación 3 días		
"	Puzolánicos	28 dias	3 horas				Aireación 3 días		
4 Chile	Portland	28 dias	5 horas		3 h — 10 min*		*En caso de incum- plimiento vale el ensayo en frio.		
5 Dinamarca	Portland	28 dias*					Con MgO 3 % has- ta exp. cte. duran- te 2 horas.		
6 Francia	Portland***			7 días 3 min	3 h — 3 min***		Aireación 7 días 5 mm		
7 Holanda	Portland				1 h — 10 min				
8 Hungria	Portland	28 dias	3 horas						
"	Siderúrgicos	28 dias	3 horas						
"	Puzolánicos	28 dias	3 horas						
9 India	Portland								
"	Siderúrgicos								
"	Puzolánicos								
10 Japón	Portland	28 dias	1½ horas				Aireación 7 días 5 mm		
"	Siderúrgicos	28 dias	1½ horas		10 min		Aireación 7 días 5 mm		
"	Puzolánicos	28 dias	1½ horas		10 min		Aireación 7 días 5 mm		
11 Rumania	Portland	28 dias	2 horas						
"	Siderúrgicos	28 dias	2 horas						
"	Puzolánicos	28 dias	2 horas						
12 Unión Sovietica	Portland		?		2 h — 10 min 2 h — 10 min 2 h — 10 min				
"	Siderúrgicos		?				*Con MgO 5 % en el clinker		
"	Puzolánicos		?				*Con MgO 5 % en el clinker		
"			?				*Con MgO 5 % en el clinker		
Totales: 12 (100 %)		6 (50 %)	8 (87 %)	1 (8 %)	6 (50 %)	3 (25 %)			

Aclaraciones: * Se corresponden entre sí los de la misma línea; ** Sólo a solicitud del comprador; *** Con constituyentes secundarios.

Aclaraciones: * Se corresponden entre sí los de la misma linea; ** Sólo a solicitud del comprador; *** Con constituyentes secundarios.

C U A D R O 3

NORMAS, PRESCRIPCIONES Y ENSAYOS SOBRE EXPANSION DE CEMENTOS

PAIS	Tipos de Cemento	Tipos de Ensayos y Prescripciones	Observaciones				
		G A L L E T A S		AGUJAS Le Chateller		AUTOCLAVE	
		en frio	en caliente	en frio	en caliente		
1 Finlandia	Portland y Siderurgicos	**sustituye a*	***sustituye a*		****sustituye a ***	1 %*	**y *** sustituyen a*; ****sustituye a***
2 Israel	Portland				1 h — 10 min	0,30 %*	*según clase.
					1 h — 5 min	0,80 %*	**por acuerdo entre suministrador y comprador. ***obligatorio en su clase.
3 N. Zelandia	Portland				1 h — 10 min	0,50 %	Aireación 7 días 5 mm
4 Polonia	Portland	28 días*	3 horas*		3 h — 8 min		
"	Siderurgicos				3 h — 6 min*		
					3 h — 5 min	0,80 %*	* según clase.
5 Suiza	Portland	28 días	2 horas		3 h — 8 min		
					2 h — 8 min		
6 Yugoslavia	Portland	28 días	3 horas		3 h — 10 min		
"	Siderurgicos	28 días	3 horas		3 h — 10 min		
"	Puzolánicos	28 días	3 horas		3 h — 10 min		
Totales: 6 (100 %)		4 (67 %)	4 (67 %)		6 (100 %)	4 (67 %)	

Aclaración: Se corresponden entre sí los asteriscos de igual categoría dentro de cada país y tipo de cemento.

C U A D R O 4

NORMAS, PRESCRIPCIONES Y ENSAYOS SOBRE EXPANSION DE CEMENTOS									
PAIS	Número de Ensayos	Tipos de Ensayos y Prescripciones						Total de Ensayos	
		G A L L E T A S		AGUJAS Le Chateller		AUTOCLAVE			
		en frío	en caliente	en frío	en caliente				
1 (59 %)		(2 %)	(7 %)	(0 %)	(27 %)	(23 %)			
2 26	1	1	3	0	12	10		26	
3		(1 %)	(4 %)	(0 %)	(18 %)	(15 %)			(38 %)
4 (27 %)		(7 %)	(9 %)	(1 %)	(7 %)	(3 %)			
5 12	2	6	8	1	6	3		24	
6		(9 %)	(12 %)	(1 %)	(9 %)	(4 %)			(35 %)
7 (14 %)		(3 %)	(3 %)	(0 %)	(5 %)	(3 %)			
8 6	3	4	4	0	6	4		18	
9		(6 %)	(6 %)	(0 %)	(9 %)	(6 %)			(27 %)
10 (100 %)		(12 %)	(19 %)	(1 %)	(39 %)	(29 %)			
11 44		11	15	1	24	17		68	
12		(16 %)	(22 %)	(1 %)	(36 %)	(25 %)			(100 %)

El ensayo de autoclave, efectuado en una pasta de 24 horas en la que la hidratación, dista mucho de ser completa, puede conducir a ésta por caminos distintos a los de la hidratación normal, como se indicaba en 3. En efecto, son bien conocidas las experiencias consistentes en producir reacciones hidrotérmicas con vapor saturado a alta temperatura y presión, las cuales dan lugar de forma acelerada a la producción de hidratos estables que proporcionan estructuras resistentes en corto plazo. Las condiciones de 21 atmósferas (equivalentes a 215°C) durante 3 horas de tratamiento en el autoclave son suficientes para ello. En tales experiencias se basa toda una extensa industria de prefabricados de hormigón (piezas y elementos resistentes) que utilizan la presión y la temperatura del vapor saturado como acelerantes de la hidratación y endurecimiento del cemento.

Pero aún hay más: en este tipo de industria se emplean cementos siderúrgicos y puzolánicos, a veces con preferencia a los propios portland, ya que aquéllos se manifiestan más aptos para los tratamientos hidrotérmicos, particularmente en autoclave (5). Y aún los propios portland dan mejores resultados en el tratamiento cuando se utilizan mezclados con arena silícica (cuarzo) finamente molida y en no escasa proporción (5). La razón de esto estriba en el que se ha dado en llamar por investigadores de la escuela alemana “efecto silícico”. Consiste éste en que materiales de naturaleza silícica, aun cuando se trate del propio cuarzo, estable e inerte, puestos en presencia de un cemento que se hidrata en condiciones de activación hidrotérmica, se activan a su vez, combinándose con la cal de hidrólisis de los silicatos del cemento. Entre tales materiales, además del cuarzo, se cuentan, por supuesto, las escorias siderúrgicas, las puzolanas naturales y artificiales, las cenizas volantes y diversos otros de naturaleza más o menos margosa, esquistosa o arcillosa.

El “efecto silícico” ejerce dos acciones igualmente beneficiosas: por una parte, contribuye a reforzar la estructura resistente de la pasta hidratada con nuevos productos de hidratación; por otra parte, elimina la cal de hidrólisis, fijándola en forma de hidratos estables. Esta cal hidratada, al quedar sin fijar, podría ser asiento de ataques químicos por aguas ácidas, puras y carbónicas y, por lo tanto, factor potencial de desintegración del hormigón; el “efecto silícico” elimina totalmente o en gran parte este peligro (5).

Pero lo mismo que ocurre con la cal liberada en la hidrólisis parcial e hidratación de los silicatos, puede suceder —y de hecho sucede— con la cal libre del cemento, cuando existe: esta cal se somete igualmente al “efecto silícico” en presencia de materiales silícicos activos o activados hidrotérmicamente y forma silicatos cálcicos hidratados estables. En consecuencia, no se hidrata por sí sola con carácter expansivo, y su expansión no tiene lugar ni se manifiesta en el ensayo del autoclave. Así, pues, este ensayo drástico de expansión de los cementos no siempre sitúa los resultados “del lado de la seguridad”, como se indicaba en 3, pues esa cal libre del cemento que por “efecto silícico” no expande en el autoclave, en la realidad puede expandir, ya que el “efecto silícico” no se manifiesta casi en absoluto “en frío”. Lo cual prueba, de acuerdo con lo señalado en 3.2., que el ensayo de expansión en autoclave puede incluso no ser fidedigno ni representativo en algunos casos, precisamente porque las condiciones experimentales del método se apartan demasiado de las reales, y esto puede cambiar las cosas de un modo decisivo.

Existen pruebas experimentales concluyentes del “efecto silícico” en cementos portland con escorias y puzolanas, tratados en autoclave, en las que se llega a enmascarar todo vestigio de expansión. El autor ha podido comprobar personalmente (6) que un cemento portland con 6 % de cal libre, cuyos prismas de pasta pura se alabeaban, retorcían, ensanchaban y alargaban en proporciones de centímetros en el autoclave, hasta hacerse deleznales y desintegrarse, podía ser estabilizado por adiciones crecientes de una puzolana

natural. Pequeñas adiciones —de 5 % a 10 %— atenuaban la expansión y sus efectos; adiciones mayores —de 10 % a 20 %— neutralizaban casi totalmente la expansión; adiciones aún mayores —de 20 % a 30 % ó 40 %— llegaban a producir incluso una pequeña retracción, observándose en todos los casos una estabilización progresivamente creciente. Es muy probable que este cemento, aún con las dosis más elevadas de puzolana, se comportase en la práctica como expansivo, pues en condiciones normales la acción puzolánica se manifiesta sobre el hidróxido cálcico —cal apagada o cal de hidrólisis— y no sobre el óxido cálcico —cal viva o cal libre del cemento—. Esta ha de apagarse —hidratarse— previamente, y su hidratación va acompañada de expansión. Por lo tanto, la hidratación de la cal libre es anterior a su fijación por acción puzolánica —o por “efecto silícico”—, con lo cual no se evita la expansión en la práctica, aun cuando el ensayo de autoclave no la acuse.

Análogo efecto al de las puzolanas naturales ha sido observado con escorias siderúrgicas (7) y con cenizas volantes (8). En consecuencia, tampoco puede considerarse el ensayo de expansión en autoclave como el más seguro —véase 3.2.—, a pesar de su carácter superdrástico.

Esta interferencia del “efecto silícico” parece ser ya tenida en cuenta en las más modernas normas para cemento de algunos países. Por ejemplo: Brasil —véase Cuadro 1— establece un límite máximo de expansión en autoclave de 0,8 % para cementos portland y sólo de 0,5 % para cementos siderúrgicos; incomprensiblemente Méjico invierte los términos imponiendo una expansión máxima de 0,80 % para los cementos portland y de 1 % para los puzolánicos, pese a que para éstos impone también una retracción máxima de 0,3 %; en cambio, de acuerdo con la lógica y con los argumentos y hechos expuestos en lo que precede, los Estados Unidos imponen expansiones máximas de 0,80 %, 0,20 % y 0,50 % para los cementos portland, siderúrgicos y puzolánicos respectivamente, y para estos últimos, además, retracciones máximas de 0,20 % y 0,50 % en cada caso. En este sentido, las Normas ASTM se han suavizado por lo que respecta a los cementos portland, pues han pasado de una expansión máxima tolerable de 0,5 % (ASTM C 150-60) a otra de 0,8 % (ASTM C 150-67), manteniendo en cambio las mismas limitaciones para los siderúrgicos y puzolánicos.

En el Cuadro 3 es igualmente lógica la actitud de Israel que impone (con carácter de convenio entre fabricante y usuario) una expansión máxima de 0,30 % a determinadas clases de cementos portland —ordinarios y de alta resistencia inicial o de endurecimiento rápido—, o de 0,80 % (con carácter de ensayo obligatorio) a los cementos portland resistentes a sulfatos —lógicamente con un contenido menor de C_3A —. La solución de Polonia es también razonable, al imponer el ensayo de expansión en autoclave —con un valor máximo de 0,80 %— a los cementos portland y no a los siderúrgicos, y dentro de aquéllos, sólo a los resistentes a sulfatos y de moderado o bajo calor de hidratación —con escaso contenido de C_3A —.

3.5. El ensayo de expansión en autoclave en las normas españolas para cemento

Hasta 1960 rigió en España el ensayo de las galletas, en frío (28 días de conservación en cámara húmeda y bajo agua —a las 24 horas de fabricadas y conservadas en cámara—) y en caliente (2 ½ horas de ebullición a las 24 horas de fabricadas y conservadas en cámara húmeda) (9).

Desde 1960 hasta 1964 rigió de modo exclusivo el ensayo de las galletas en caliente, en las condiciones indicadas (10).

En la actualidad, desde 1964, rige en las nuevas normas implantadas en 1960 y revisadas en dicho año 1964, el ensayo del autoclave, con limitación de la expansión máxima al 1 %, como preveía en un principio la administración norteamericana, para cualesquiera tipos clases o categorías de cementos —portland, siderúrgicos y puzolánicos—. En el caso de los cementos siderúrgicos sobresulfatados (los cuales no se fabrican en España) y en el de los de adición, el ensayo de autoclave es prescriptivo con la misma limitación de expansión máxima, si el contenido de magnesia rebasa en ellos el 5 % (11).

No obstante, en todo tiempo se ha practicado y se sigue practicando por parte de los laboratorios de muchas fábricas de cemento, y por otros laboratorios de ensayo, control e investigación, y aparte de los métodos de las normas, el ensayo de las agujas Le Chatelier, en caliente.

Al margen de los motivos más o menos justificados para la introducción del ensayo de expansión de los cementos en autoclave en las normas españolas en 1964, es extraño el hecho de que éstas fijen la misma limitación máxima para todos los cementos afectados por el ensayo, cualquiera que sea su tipo. Ello está en pugna con lo expuesto en 3.4 y con la actitud lógica y razonable adoptada en otros países de acuerdo con ello.

Puede añadirse que, en el caso de nuestro país, el ensayo del autoclave es aún más problemático, y sus resultados aún menos fidedignos y representativos, incluso cuando se aplica con exclusividad a los cementos portland. En efecto, en las normas para cementos establecidas en España en 1960 (10), se introdujo la siguiente ampliación de la definición dada de los cementos portland como “conglomerantes hidráulicos que se obtienen por pulverización del clinker y sin más adición que la de piedra de yeso natural”: “Eventualmente puede darse la denominación comercial de cementos portland a aquéllos que, además de los componentes principales, clinker y piedra de yeso, contengan otras adiciones no nocivas en proporción inferior al diez por ciento, con objeto de mejorar algunas de las cualidades de los conglomerantes o de los morteros y hormigones con ellos fabricados, siempre que los cementos resultantes cumplan todas las condiciones químicas, físicas y mecánicas que se especifican para el portland en el presente Pliego”. Tanto la definición de cemento portland como su ampliación se mantuvieron sin variación al revisar las normas en 1964 (11). La práctica ha demostrado que la denominación “comercial” es también una denominación “técnica” a todos los efectos, lo cual era previsible, puesto que no es posible separar ambos aspectos, ni en la fabricación, ni en la utilización del cemento, máxime cuando no existen marchamos que indiquen en los envases si se trata de portland a secas, o de portland “comercial”.

Un 10 % de adiciones “no nocivas” —activas: escorias, puzolanas, cenizas volantes, o incluso inactivas: arenas silíceas (cuarzo)— molidas con el clinker a la finura del cemento, puede ser suficiente para que, por “efecto silícico” o por activación puzolánica en el autoclave, se neutralice y enmascare la expansión debida a la cal libre. Esto quiere decir que, en el caso de España, el resultado del ensayo de autoclave puede ser dudoso e inseguro, no ya con los cementos siderúrgicos y puzolánicos, como sucede en general en virtud de lo indicado en 3.4., sino incluso con los cementos portland “comerciales”, por razones idénticas a las allí expuestas. En tales circunstancias es posible que haya casos en los que un ensayo acelerado en caliente, del tipo Le Chatelier —o incluso el de las galletas—, sea más fidedigno y acorde con el comportamiento real de los cementos en la práctica, ya que a su rapidez y a su carácter moderadamente drástico une la ventaja de no invertir los resultados, puesto que el “efecto silícico” en agua a ebullición y a la presión ordinaria durante pocas horas, es poco intenso e insuficiente para enmascarar la expansión.

En cuanto al futuro de las normas españolas, por lo que a las prescripciones y métodos de

ensayo de la expansión se refiere, todas las consideraciones hechas deberían ser tenidas en cuenta, añadiendo a ellas los siguientes hechos:

- i) en cuanto a cementos portland se refiere, desde la publicación del CEMBUREAU sobre normas en 1961 (12) hasta la más reciente de 1968 (4) se ha observado un incremento en la adopción del ensayo de autoclave del 22 % al 38 %. La limitación de la expansión máxima admisible no ha variado prácticamente en cuanto a su valor medio, pero algunos valores individuales muy significativos se han suavizado sustancialmente, mientras otros menos significativos se han agravado;
- ii) en cuanto a cementos distintos del portland —siderúrgicos y puzolánicos— el incremento ha sido del 12 % y 12 % respectivamente, al 18 % y 12 % en cada caso, es decir, que en el de los cementos puzolánicos no ha habido incremento. Es de advertir que en el caso de los siderúrgicos gran parte del incremento está condicionado a convenios entre fabricantes y usuarios, contenido de MgO, etc.

3.6. Consideraciones finales

En la elección de un método de ensayo —entre varios disponibles— para determinar un cierto parámetro o característica de un material en general —y la expansión de un cemento en particular— es indudable que junto a los factores puramente técnicos y objetivos intervienen a veces otros factores psicológicos y por lo tanto subjetivos. Estos últimos pueden consistir en una predilección por un método y en una mayor confianza en el mismo —discutibles, por supuesto— en función del origen de dicho método, del número o calidad de los países que lo introducen o adoptan, y a veces hasta en “la moda”, por un banal ánimo de imitación, en pugna con un consciente espíritu analítico y crítico. Esto es más frecuente de lo que se piensa, y al autor le constan hechos en tal sentido que servirían para ilustrar un nutrido anecdotario.

Pero, sobre todos estos factores colaterales deben pesar las consideraciones puramente científico-técnicas, las cuales implican un estudio, una experiencia y, en suma, un conocimiento, a la par que una ética. Se deben elegir en todos los casos en que sea posible métodos que respondan a la finalidad que se persiga, en cuanto a fiabilidad, precisión, reproductibilidad, representatividad y fácil y correcta interpretación y valoración de resultados. El método elegido en tales condiciones no debe aplicarse más que en los casos y con los materiales para los que está previsto, sin extrapolaciones injustificadas y arriesgadas. Si la determinación de un cierto parámetro es problemática y la interpretación de un resultado confusa, se debe desistir de metodizar a ultranza; tal sucede con la retracción, la cual se confunde muy frecuentemente con la tendencia a la fisuración, dándose a veces como resultado y valor de la primera lo que no es sino un índice de la segunda —ensayo francés del anillo—. En tales casos la prudencia aconseja utilizar los procedimientos que se encuentran en esa situación, a lo más, con fines especulativos y de investigación, y nunca como métodos de ensayo normalizados o recomendados que puedan implicar limitaciones o libertades nocivas o inútiles.

En este aspecto, y volviendo al caso de la expansión de los cementos, sería absurdo que algún país que, como Francia, tiene normalizadas cuatro clases de cemento tipo portland sin constituyentes secundarios, y quince clases de cemento tipo portland conteniendo tales constituyentes (14), adoptara, sobre todo para estos últimos, el ensayo de expansión en autoclave. La adopción del método de las agujas Le Chatelier en este caso es, pues, en virtud de lo expuesto en 3.4. y 3.5., una resolución lógica y no chauvinista, como pudiera parecer.

4. CONCLUSIONES

Cuanto se ha expuesto en lo que precede viene a cumplir un propósito y a realizar una idea hace tiempo concebidos por el autor, y que justifica el largo subtítulo de este trabajo (15) (16): exponer y comentar las insuficiencias y limitaciones que en determinados casos puede tener un método de ensayo de expansión de los cementos que, como el del autoclave, se aparta con mucho, en cuanto a sus condiciones experimentales, de las condiciones reales en la práctica. La exposición hecha y el análisis llevado a cabo permiten emitir las siguientes conclusiones:

- 1.^a) El método de ensayo de expansión de cementos en autoclave es demasiado drástico en sus condiciones, y tal vez por ello se ha considerado —equivocadamente— como el más seguro de todos y en todos los casos.
- 2.^a) Las condiciones experimentales propias del ensayo de autoclave introducen en determinados casos nuevos factores que, como el “efecto silícico” y la activación puzolánica pueden actuar enmascarando y ocultando el comportamiento realmente expansivo de un cemento en la práctica. Esto es suficiente para despojar al método de su condición de seguro en todos los casos.
- 3.^a) Por razón de los factores señalados, el ensayo del autoclave no se puede aplicar con igual criterio a cualquier tipo de cemento. En rigor, sólo debería aplicarse a cementos portland sin adiciones ni “componentes secundarios”. En el caso de aplicarlo a cementos de tipo siderúrgico o puzolánico, las limitaciones para decidir si éstos pueden ser potencialmente expansivos deberían ser mucho más drásticas que en el caso del portland.
- 4.^a) Dada la definición que en las normas españolas vigentes en la actualidad se hace de “cementos portland comerciales”, la validez de los resultados del ensayo de expansión en autoclave aplicado a los mismos queda muy mermada, cuando no anulada totalmente.
- 5.^a) Existen y se aplican desde antiguo, métodos rápidos y moderadamente enérgicos que, siendo en general más representativos y válidos, se avienen mejor a los casos en que la aplicación del ensayo de autoclave es inadecuada o, por lo menos discutible. Tal es el caso del método Le Chatelier, realizado en caliente.

REFERENCIAS

- (1) LAFUMA, H.: Rev. Mat. Const. Trav. Pub. 243, 441; 244, 4 (1930).
- (2) CALLEJA, J.: Discusión al trabajo “Expansive Cements” de P. P. BUDNIKOV e I. V. KRAVCHENKO. Proceedings of the Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement 1968. Part IV, Vol. IV, pág. 335, Tokyo, 1969.
- (3) NORMAS NORTEAMERICANAS (U.S.A.): ASTM Standard C 150-67.
- (4) CEMBUREAU: Cement Standards of the World. Portland Cement and its derivatives. Cembureau, 2 rue St. Charles, París 1968.
- (5) FRANJETIC, Z.: “Schnellhärtung der Beton” (Endurecimiento rápido del hormigón). Versión española del Dr. J. CALLEJA. I.E.T.c.c., Madrid 1971. En prensa.
- (6) CALLEJA, J.: Trabajo no publicado.
- (7) GARCIA DE PAREDES, P.: Comunicación privada.
- (8) JOISEL, A.: Comunicación privada.

- (9) NORMAS ESPAÑOLAS DE 1930: Pliego General de Condiciones para la Recepción de Aglomerantes Hidráulicos en Obras de Carácter Oficial. R. O. No. 59 del Ministerio de Fomento, de 25-II-1930.
- (10) NORMAS ESPAÑOLAS DE 1960: Pliego de Condiciones para la Recepción de Conglomerantes Hidráulicos en Obras de Carácter Oficial. Orden en el B. O. E. No. 187 de 26-I-1960. P.C.C.H. 61 del I.E.T.c.c.
- (11) NORMAS ESPAÑOLAS DE 1964: Pliego de Condiciones para la Recepción de Conglomerantes Hidráulicos en Obras de Carácter Oficial. Orden en el B. O. E. No. 109 de 6-V-1964. P.C.C.H. 64 del I.E.T.c.c.
- (12) CEMBUREAU: Review of the Portland Cement Standards in the World 1961.
- (13) CEMBUREAU: Review of the Standards for Cements other than Portland in the World 1958.
- (14) NORMAS FRANCESAS: NF P 15-302 1964.
- (15) CALLEJA, J.: "Criterios sobre normas para cemento". Normas y Manuales del I.E.T.c.c., Madrid, enero 1968. Revista ION XXVII, 253-266 (1967). Materiales de la Construcción (I.E.T.c.c.) núm. 128 (1967).
- (16) CALLEJA, J.: "Ideas para un Consultorio Técnico en Química e Industria". Química e Industria (ANQUE) 16 (3) 1970.