

1 - Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento -

616-69 AUMENTO DE LA PRODUCCION DE CEMENTO Y MEJORA SIMULTANEA DE LA CALIDAD (\*)

Dr. J. Calleja Carrete.

- RESUMEN -

Por vía teórica y también experimentalmente se llega a la conclusión de que, en general, es conveniente elevar la cifra máxima de  $SO_3$  mantenida en la actualidad en la mayor parte de las normas para cemento. Esta medida es particularmente beneficiosa en el aspecto de la retracción.

Por lo que a los cementos portland españoles se refiere, una elevación del % de  $SO_3$  desde el 2,5 tolerado en el presente hasta el 4 % mejoraría, en general, sus características técnicas, suponiendo tal medida un aumento, prácticamente libre de gasto, en la producción nacional de cemento, de más de 100.000 t anuales. Esta cifra corresponde a la de una fábrica de nueva planta, cuyo costo puede evaluarse en unos 175.000.000 de pesetas, y equivale al 3,2 % de un total anual de 3.500.000 t, previsible en un futuro muy próximo (es posible que en la fecha de publicación de este trabajo las cifras expuestas hayan sido ampliamente rebasadas).

---

1 INTRODUCCION

La fijación de la cantidad máxima de yeso que puede añadirse a un clínker para obtener un cemento portland ha sido y es, como se sabe, una cuestión muy debatida.

Las normas de los diferentes países establecen esta cantidad máxima de yeso limitando la cifra de anhídrido sulfúrico  $SO_3$  en los cementos, a valores comprendidos entre 2 y 3,5%. Esto es así porque la mayor parte de las normas, por no decir la totalidad, están inspiradas en lo sustancial, bien en las normas británicas, bien

---

(\*) Trabajo presentado en la III Reunión Internacional sobre Reactividad de Sólidos, con el título de - "INFLUENCIA DEL CONTENIDO EN YESO DEL CEMENTO PORTLAND SOBRE LA RETRACCION DE LAS PASTAS, MORTEROS Y HORMIGONES"

en las alemanas DIN, o bien en las norteamericanas A.S.T.M. La norma española de fecha 1943 señala el valor de 2,5 % (\*)

Algunos países como Canadá, Estados Unidos y México prescriben cifras máximas de  $SO_3$  variables entre los límites citados, dependiendo del tipo y composición de los cementos. En el caso de los dos países citados en primer lugar, el contenido en aluminato tricálcico potencial  $C_3A$  es uno de los principales factores determinantes del mayor o menor porcentaje en  $SO_3$  de los cementos de cada clase.

Es curioso observar que desde un principio se han fijado siempre en todos los países porcentajes máximos invariables de  $SO_3$ ; después, en algunos, porcentajes variables con uno o más aspectos de la naturaleza y composición de los cementos, pero conservando su carácter de máximos. Tan sólo hace relativamente poco tiempo se ha empezado a pensar en "óptimos", en lugar de en "máximos", a partir de los trabajos de W. Lerch en los Estados Unidos.

En efecto, estos trabajos, y otros que los han seguido, han puesto de manifiesto dos hechos que parecen bien probados: uno, que cada clínker, según su naturaleza y composición, exige una cantidad óptima de yeso para que el cemento resultante presente las mejores características físicas y mecánicas; otro, que estas cantidades óptimas de yeso corresponden a porcentajes de  $SO_3$  en general su

---

(\*) Véase, para más detalles, D. Gaspar y Sr. Frazer: "Contribución al Estudio de las Normas de Diferentes Países para el Cemento Portland".  
Últimos Avances en Materiales de Construcción, Boletín Nº 57 especial (1954)  
Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento, Madrid.

poriores, y a veces muy superiores, a los señalados como máximos tolerables en casi todas las normas.

Lo que, expresado de otro modo, equivale a decir que apropiadas adiciones suplementarias de yeso a los cementos que cumplen las especificaciones relativas al porcentaje de  $SO_3$  según las normas, pueden mejorar, y de hecho mejoran en la mayoría de los casos, la generalidad de las características técnicas de los citados cementos.

Dentro de estas mejoras generales que la adición de yeso al clínker aporta al cemento resultante, y que, sin duda, han contribuido desde siempre y progresivamente a que los fabricantes empleen aquel producto como único aditivo regulador (retardador) del fraguado, se cuentan las de los siguientes aspectos: resistencia mecánica, estabilidad de volumen, durabilidad y retracción, como principales.

Según esto, parece que puede pensarse, como ya se ha pensado, en el interés que tendría el elevar de modo racional la cifra de  $SO_3$  de casi todas las normas en general, y de la española en particular, ya que, por otra parte, éste es el único medio, o por lo menos uno de los pocos, para mejorar en condiciones económicas óptimas, la calidad del cemento portland, sin norma de la producción o, por mejor decir, incrementando ésta simultáneamente. Esta solución adquiere especial interés en el caso de países que abundan en yeso, tanto en cantidad como en calidad, y en los que es fácil y barata la extracción del mismo.

El presente trabajo pretende aportar unos datos al problema así planteado, estudiando con cierto detalle el aspecto de la retracción, uno de los tres citados antes expresamente, y tal vez de

los que menos atención han merecido, pese a su trascendencia técnica.

## 2 ANTECEDENTES

### Generalidades

Según Le Chatelier (1), en el proceso de la hidratación de los aglomerantes hidráulicos se produce una contracción, puesto que el volumen total de los cuerpos formados en todas las reacciones químicas que en aquél tienen lugar, es menor que la suma de los volúmenes del agua y de los cuerpos anhidros de partida.

Esta contracción que, naturalmente, tiene lugar en su mayor parte durante el período de fraguado y primera edad del endurecimiento, puede considerarse como irreversible y es, ante todo, de naturaleza química.

A ella le sigue la retracción debida a las variaciones de humedad que caracterizan a los sólidos aglomerados porosos, y que adquieren importancia cuando el aglomerante adopta una textura submicrocristalina o amorfa, es decir, cuando por su naturaleza capilar presenta una gran superficie externa o interna.

Esta retracción, que se manifiesta por el contrario dentro del período de endurecimiento, cuando los aglomerados se hallan sometidos a variaciones cíclicas de humedad, sean espontáneas o provocadas, es principalmente de naturaleza física. La que se observa en el primer ciclo de secado es, según F.M. Lee y C.R. Lee (2), irreversible en parte, mientras que la que aparece en sucesivos ciclos es reversible, si bien puede estar complicada, sobre todo en las primeras edades del aglomerado, por la existencia de una cierta contrac-

ción debida a que las reacciones químicas de hidratación continúan verificándose, aunque con lentitud.

Respecto de la retracción atribuible a las variaciones de humedad, así como acerca de las teorías emitidas para explicarla, y sobre las acciones de naturaleza fisicoquímica ejercidas para anularla o aminorarla, existe un trabajo reciente de J. Calleja (3).

Aparte de estas acciones de carácter fisicoquímico, pueden darse también otras de tipo más netamente químico que ejerzan el mismo o semejante efecto frente a la retracción. Tales son las que se manifiestan en la formación de cuerpos mediante reacciones que transcurren con aumento de volumen, es decir, de signo contrario en este sentido a las que tienen lugar durante la hidratación de los aglomerantes hidráulicos.

Unas y otras son contrapuestas y, elegidos convenientemente los cuerpos a intervenir en la reacción expansiva, y las condiciones óptimas en que ésta haya de tener lugar, puede lograrse - compensar total o parcialmente las contracciones y retracciones tanto irreversibles como reversibles.

De ello se trata con detalle en la parte experimental de este trabajo.

#### Retracción y composición del cemento

La contracción reconocida y descrita por Le Chatelier es particularmente notable en el caso del  $C_3A$ , como lo es también la de los cementos aluminosos (4). Estos, según informes de A. Hummel (5), O. Graf (6) y H. Borchm (7), manifiestan una gran retrac

ción inicial que cesa rápidamente, siendo el resultado final análogo al que se da en el cemento portland.

En el caso de ésto, T.C. Powers (8) ha determinado estadísticamente unos coeficientes de retracción irreversible, aplicables a cada especie potencial calculada por el método de Bogue, y correspondientes a edades de 3, 7 y 28 días. Los más elevados de estos coeficientes, con gran diferencia sobre los demás, son los relativos al  $C_3A$ .

Según G.L. Kalousok (9), el  $C_3A$  potencial afecta también a la retracción de secado en mucho mayor medida que otros componentes del cemento portland, en el sentido de aumentar ésta con la proporción de aquél, tal como H.F. Gonnorman y otros han demostrado (10) (11).

Se ha tratado también de relacionar la retracción con el contenido en alúmina de los cementos y con el módulo aluminico o de fundentes (relación  $Al_2O_3/Fe_2O_3$ ), en el que interviene también el óxido férrico. Las observaciones hechas indican que los cementos con valores bajos de la relación A/F tienen carácter especial y presentan menor retracción, si bien también menores resistencias mecánicas (12)

Es igualmente importante, desde el punto de vista de la retracción, el estado del  $C_3A$  (o del  $Al_2O_3$ ) en el clínker; si la alúmina se encuentra en la fase vítrea, su acción retractiva es mucho menor que si se halla cristalizada tal como ha demostrado R.H. Bogue (13) y posteriormente G. Mussnug (14). Lo mismo sucede con la alúmina que se encuentra unida al óxido férrico formando el  $C_4AF$ .

Esto explica que los cementos tipo Ferrari, ricos en  $Fe_2O_3$  (de baja relación A/F), retraigan mucho menos que los portland ordi-

narios (15) (16) (17) (18) (19).

Consecuencia de lo dicho es que la tendencia de los cementos a la retracción disminuye notablemente al enfriar con gran rapidez el clínker de que proceden, pues con ello aumenta la cantidad de fase vítrea y disminuye en proporción el  $C_3A$  cristalizado, que es el compuesto de carácter más marcadamente retractivo (13).

No solamente el contenido en  $C_3A$  afecta al valor total de la retracción, sino también a la rapidez con que ésta se manifiesta. Según M. Duriez (19 bis), la velocidad con que aparece puede ser muy grande en el caso de cementos ricos en aluminatos y yeso, debido a la fijación de agua en la hidratación.

En el caso de determinados cementos, también los álcalis afectan a la retracción por secado (20), lo que confirma la idea de que en un sistema tan complejo como es el cemento portland, los componentes aparentemente menores pueden ejercer acciones decisivas, tal como cabe esperar al aceptar la teoría coloidal acerca del fraguado (21).

Los cementos sulfosidúrgicos (de yeso y escorias) manifiestan escasa tendencia a la retracción, como se desprende de los estudios de L. Blondiau (22), A. Hummel (23) y otros autores (24)(25) (26). Según G. Mussnug (25) ello se debe a un hinchamiento o expansión, cuyo valor lineal en ‰ es unas diez veces superior al correspondiente al cemento portland.

En cambio, los cementos de olovado contenido en escorias (portland de alto horno) tienen mayor tendencia a retraer que los portland ordinarios (27).

La presencia de cal libre tiende a disminuir la retrac-

ción ya que su expansión al hidratarse compensa aquélla, al menos en parte (28). Pero, por otra parte, adiciones suplementarias de cal viva al cemento portland no producen expansión en modo alguno. La aparente contradicción que se observa en este hecho se explica porque la cal libre adicional se hidrata desde el comienzo del fraguado, mientras que la presente en el clínker se encuentra incluida en los gránulos del cemento y sólo reacciona cuando la hidratación de los mismos está muy avanzada. Además, la cal libre del clínker es "calcinada a muerte" y se hidrata con gran lentitud (29).

#### El yoso del cemento y la retracción

La eliminación total de la retracción de un cemento solamente podría lograrse, según W. T. Moran (30), por adición al mismo de un elemento expansivo que se opusiese a ella y produjese una expansión igual a la retracción normal en cada momento. Naturalmente, no se conoce tal adición ideal.

Esta misma idea es la que ha llevado a muchos investigadores a pensar en la compensación, siquiera parcial, de la retracción, provocando expansiones controlables y siendo utilizada como agente expansivo para tal fin la sal de Candlot. Se manifiestan en este sentido R. L'Hermite (31) y H. Lafuma (32), entre otros (32 bis). Según Lafuma, la compensación de la retracción exige en la práctica una expansión del orden de 2 a 3 milímetros por metro, lo que, a su vez, requiere, en un cemento expansivo (o de retracción compensada), de un 4,5 a un 5% de  $SO_3$ .

La preparación de cementos expansivos o sin retracción no implica la preparación, por cocción, de un cemento "sulfoaluminoso", sino que, como indica H. Lafuma (32) y confirman C. Gorla y M.



Appiano (33), basados en datos de otros autores, basta moler conjuntamente la mezcla de componentes de dichos cementos.

El conocimiento de la dependencia entre las variaciones reversibles de volumen y las adiciones de yeso al cemento data de algún tiempo, según hace constar H. Kühl (34). En efecto, A. Guttmann (35), O. Goffin y G. Mussnug (36), R. H. Bogue, W. Lerch y W.C. Taylor (37), H. Kühl y D.H. Lu (17), G. Mussung (38), G. Haggormann (39) y G. Pickott (40) han investigado sucesivamente este punto, demostrando que las pequeñas adiciones de yeso al clínker ejercen una acción relativamente escasa, y que adiciones en mayor proporción incrementan el hinchamiento (expansión) y hacen disminuir la retracción. Lo mismo afirman F.M. Lea y C.H. Dosch (40 bis).

Según G. Mussnug es preciso un 4% de yeso como mínimo para obtener un efecto sensible. R. H. Bogue indica que un aumento de 1,7% de  $SO_3$  sobre el del yeso necesario, produce también un efecto notorio.

F.E. Jones (40 III) señala la existencia de datos que evidencian que el contenido en yeso de los cementos influye en sus resistencias mecánicas y en su retracción de secado, especialmente en el caso de los cementos altos en  $C_3A$  (40 IV). Se ha sugerido, al mismo tiempo, que la durabilidad de los cementos puede mejorarse adicionándoles mayor cantidad de yeso.

P. H. Bates (41) hace observar que una adición de yeso mayor que la precisa para controlar el fraguado, ejerce una influencia favorable en las resistencias mecánicas. Por otra parte, H. Kühl y D.H. Lu (17) han encontrado que, al aumentar la cantidad de yeso adicionada al clínker, la retracción del cemento pasa por un mínimo; la proporción precisa para alcanzar éste depende del por -

contaje de  $C_3A$  potencial. Lo mismo ha sido confirmado por G. Haegormann (42).

L. Forsón (42bis) indica que la adición de yeso como regulador del fraguado del cemento mejora la resistencia de éste y, - hasta un 11%, beneficia a los de alto contenido en álcalis, ya que fija a éstos.

Rocientemente (42 III) se indica que adiciones de 4% de yeso hemihidrato al cemento portland y del 6% al cemento de alto horno elevan la resistencia de los hormigones.

W. Lerch (20) ha puesto de manifiesto, en un interesante trabajo, la influencia del yeso en las propiedades generales del cemento y a él se debe el establecimiento del concepto de "cemento correctamente retardado". Se entiende por tal, según Lerch, aquel cuyo contenido en yeso es el preciso para hacer desaparecer la tercera fase de la hidratación, conforme a las curvas del autor sobre el efecto térmico durante el fraguado (hidratación de los aluminatos residuales, después de la transformación cuantitativa del yeso en sulfatoaluminato). Tratando de encontrar el porcentaje "óptimo" de  $SO_3$  en los cementos, es decir, el que proporciona cementos de mejores características químicas, físicas y mecánicas, ha encontrado W. Lerch que la cifra es, en todos los casos estudiados por él, sensiblemente la precisa para que el cemento quede "correctamente retardado". Varía con el grado de finura y con el contenido en álcalis y  $C_3A$  del clínker, particularmente por lo que se refiere a la retracción.

El óptimo de  $SO_3$  se halla, en general, comprendido entre 4 y 5 %, cifras que también admito H. Lafuma (32), y que son superiores a las toleradas por las normas H. Kühl (43) señala en éstas,

máximas comprendidas entre 2,5 y 3%.

De acuerdo con los mencionados resultados de W. Lerch, hace ver J. Dreyfus (44) el interés general que tendría el elevar el porcentaje de  $SO_3$  por encima del máximo establecido actualmente en las normas, por lo que se refiere a las resistencias mecánicas y a la retracción, a fin de evitar los inconvenientes debidos a los altos contenidos en  $C_3A$  de los clínkeres, tanto más cuanto que G. Pickett señala que es precisamente en los clínkeres ricos en alúmina y con tendencia a dar cementos con gran retracción, particularmente si contienen muchos álcalis, donde puede combatirse la retracción mediante el yeso (40).

Señala a este respecto R.H. Bogue (47) que las fases consistentes en aluminatos que contienen álcalis reaccionan con el agua más rápidamente que las que no los contienen o los contienen en menor proporción, por lo que, según W. Lerch (48), los cementos de elevado contenido en álcalis requieren mayor cantidad de yeso para regular debidamente el fraguado.

La generalidad de los clínkeres españoles contienen un promedio de  $C_3A$  que puede cifrarse entre 13 y 14%. Partiendo de esta base, J. Calloja (45) y D. Guinea (46) han llamado la atención sobre la conveniencia de estudiar una revisión de la norma española para el cemento portland, por lo que a la cifra máxima actual de  $SO_3$  se refiere.

Esta solución es, según J. Dreyfus (44), el único medio de mejorar en condiciones económicas la calidad del cemento portland, dado que es factible forzar bastante la cifra de  $SO_3$  de las normas, sin temor a expansiones peligrosas debidas al yeso, en vista de la finura de los cementos actuales. A propósito de la finura

y de la velocidad de hidratación de los aluminatos, antes aludida, indica W. Lerch (48) que, al aumentar la superficie específica, se eleva la cantidad de aluminatos disponibles para entrar inmediatamente en reacción con el agua, lo cual exige también una mayor cantidad de yeso para regular el fraguado de los cementos alta o moderadamente abundantes en  $C_3A$ .

Al mismo tiempo, cuanto mayor es la finura de un cemento mayor es también la cantidad de agua que exige para amasar una pasta de una consistencia dada y, por tanto, mayor también la retracción de la misma.

Cabe decir en este sentido que las fracciones más finas de un cemento, tanto las separadas por tamizado como las arrastradas por corriente de aire, y que serían las más retractivas, son también las más abundantes en yeso ( $SO_3$ ) (48bis), por lo que, tanto si se acepta una homogénea distribución de  $C_3A$  en toda granulometría de un cemento, como si se admite una acumulación de dicho componente en las fracciones más finas, la mayor retracción que éstas presentarían estaría compensada, al menos en parte, por la mayor abundancia en ellas de yeso, material éste que se muele a gran finura con mucha facilidad.

A. G. Whittaker y V.E. Wessels (49) han confirmado las conclusiones de Lerch, encontrando que los clínkeres estudiados por ellos requerían, para retardar debidamente el fraguado, mayor cantidad de yeso (de 3 a 4% de  $SO_3$ ) que la fijada como máxima en las normas. El aumento del yeso fijado en la norma hasta las cifras señaladas, apenas afecta al tiempo de fraguado, si bien eleva las resistencias a cortos plazos y reduce la expansión en autoclave. Las cifras de Whittaker y Wessels también concuerdan con las de Lerch, Lafuma y otros (50).

Más recientemente S. Guinea (50) ha aplicado el método de Lerch para fijar la cantidad óptima de yeso a añadir a varios clínkeres españoles, encontrando que, en algunos casos, los valores de  $SO_3$  resultantes exceden del tolerado como máximo por la norma española. No obstante, las resistencias mecánicas mejoran o se mantienen invariables, y la retracción prácticamente desaparece, al pasar de la cifra de  $SO_3$  de la norma a la del método de Lerch. Observa, por otra parte, que las medidas de retracción son capaces de acusar sensiblemente variaciones ligeras en el contenido de  $SO_3$  de un cemento. Concluye que es necesario y urgente la revisión de la norma española para el cemento portland, especialmente por lo que se refiere al contenido en  $SO_3$ , proponiendo, en principio, elevar el porcentaje de éste hasta el 4 ó 5 % y señalando, al mismo tiempo que el aspecto de la calidad, el aspecto económico de la cuestión. Este aspecto, sobre el que ya antes llamó la atención J. Dreyfus, como queda indicado, se volverá a considerar con algún detalle más adelante. (Continuará)

- - -