

EL CEMENTO SULFADUR UN PORTLAND DE ALTAS RESISTENCIAS A LOS SULFATOS

Por JOSE LAFFARGA OSTERET

Químico Subdirector de Cementos Guadalquivir.

El autor describe las características más sobresalientes del cemento Sulfadur, de tanto interés para las obras que sufren el ataque de los compuestos selenitosos. Esta interesante información va precedida de un breve estudio sobre las posibilidades de existencia de compuestos sulfatados en los terrenos, tanto de forma natural como artificial. Asimismo repasa las principales teorías que explican las causas de estos ataques.

1. Posibilidades de contacto entre el hormigón y los sulfatos.

La agresividad de los sulfatos sobre los hormigones es sobradamente conocida por proyectistas y constructores.

Muchas veces, los terrenos o aguas selenitosas han obligado a abandonar proyectos interesantes. Cuando la necesidad ha impuesto la construcción, en terrenos con sulfatos, el ingeniero proyectista se ha visto forzado a introducir modificaciones defensivas, costosas siempre y generalmente difíciles de ejecutar. Además, la presencia de los sulfatos es un peligro permanente, lo que supone una rigurosa vigilancia, no sólo en la construcción de la obra, sino también durante la explotación de la misma, necesitándose, en la mayoría de los casos, continuas reparaciones e incluso reconstrucciones parciales o totales.

La posibilidad de encontrar aguas o terrenos que contengan sulfatos es grande; recordemos que sulfatos como el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), anhidrita (CaSO_4), sulfato magnésico, sulfato sódico y otros existen en yacimientos naturales, aguas del mar, depósitos de sales, etc. Igualmente pueden formarse por oxidación natural en ambiente húmedo, de distintos minerales sulfurados. Estas sales, presentes en variable concentración en rocas y terrenos, pueden disolverse en las aguas de arroyos y ríos, que las transportan y concentran, por evaporación primordial, causa que explica el hecho de que los climas cálidos favorecen la riqueza en sulfatos de las aguas, alcanzándose en ocasiones cifras elevadísimas. Esta formación, arrastre y enriquecimiento de los sulfatos en algunas corrientes hidrológicas, viene sucediéndose a lo largo de la historia geológica de nuestro planeta.

Como ejemplo de la alta concentración que pueden alcanzar los sulfatos en las aguas, tenemos el caso del agua del mar, cuya concentración en sulfatos, variables según los puntos del globo, oscila entre 2.900 mgr./litro para el océano Atlántico y 4.500 miligramos/litro en el Golfo Pérsico. Estas concentraciones de sulfatos resultan extremadamente agresivas. De forma general, podemos considerar como pe-

ligrosas para el hormigón una concentración de 300 miligramos/litro de sulfatos para aguas estancadas o con poco movimiento, y de más de 200 mgr./litro para las aguas corrientes.

1.1. EXISTENCIA Y FORMACIÓN DE SULFATOS.

Es de sobra conocida la existencia de yesos y otros sulfatos en distintos terrenos de diferentes edades geológicas [1], [2].

Los terrenos yesíferos, sin embargo, no se reparten uniformemente a lo largo de nuestro planeta; y frente a países donde no abunda su presencia, existen otros donde su existencia constituye un serio problema. Tal es el caso de nuestro país, pues, como afirma Valdés [1] refiriéndose al yeso, podemos estimar en cerca de un cuarto del solar español la fracción afectada por tara tan perniciosa para las obras.

Menos conocida es la existencia de sulfatos originados "artificialmente" en el campo de la técnica. La presencia de estos sulfatos "artificiales" puede ser la causa del ataque de las obras, aunque su importancia no pueda predecirse de antemano.

Por considerarlo de interés, señalamos algunas circunstancias, que con mayor o menor influencia intervienen en la aparición de los sulfatos "artificiales".

Por lavado, oxidación natural, meteorización y otras causas pueden formarse sulfatos a partir de productos almacenados, productos residuales o por la directa producción de sustancias químicas sulfatadas. Estos sulfatos, una vez en el terreno, se comportan como los naturales y pueden ser retenidos por aquél o arrastrados y transportados por las corrientes de agua. Por ello, en las obras de canalización ha de contarse una inspección constante, tanto del terreno como de las mismas aguas canalizadas, en las que también existe el peligro de formación de sulfatos por oxidación de los residuos sulfurados de la putrefacción de las materias albuminoides.

Los gases de combustión del carbón, coque, petróleo, fuel-oil, contienen siempre cantidades más o menos importantes de dióxido de azufre, que en el trans-

curso del tiempo se oxida, convirtiéndose en sulfato. La concentración en sulfato a causa de los gases de combustión puede ser pequeña inicialmente, pero bajo ciertas circunstancias puede aumentar peligrosamente. Caso que puede darse en los túneles y galerías por donde circulen vehículos con motores de explosión o vapor.

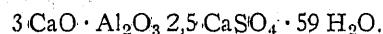
Finalmente hemos de añadir que pueden existir sulfatos o sustancias originadoras de los mismos en alguno de los agregados del hormigón, plastificantes, pinturas y revestimientos. Estos sulfatos, inocuos en forma no disuelta, pueden disolverse por meteorización o por aguas de riegos, existiendo entonces la posibilidad de ataque.

2. Causas de la agresividad de los sulfatos.

Desde principios del siglo pasado los químicos del cemento e ingenieros vienen ocupándose de los deterioros y destrucción de las fábricas de hormigón y sus causas. Ocupándose, naturalmente, del efecto de los terrenos y aguas sulfatadas sobre el cemento.

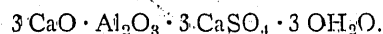
A continuación damos un breve resumen de los estudios e investigaciones efectuados para poner en claro el mecanismo del ataque de los sulfatos.

Candlot, en 1890, parece haber sido el primero en establecer la formación de un compuesto, definido por la interacción entre el aluminato tricálcico y el sulfato cálcico. Observó igualmente que los cristales del compuesto precipitaban abundantemente en soluciones saturadas de agua de cal. Analizó una muestra de estos cristales y le asignó la fórmula:



Advirtió su ligera solubilidad en agua y su insolubilidad en alcohol o en agua de cal con más de 0,2 gramos de CaO por litro.

El gran interés, que siempre tuvo, sobre los químicos del cemento, la acción de los sulfatos, hizo que se siguiese el camino iniciado por Candlot. Michaelis (1892) estableció la fórmula del sulfoaluminato como:

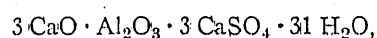


Otros investigadores confirmaron esta fórmula, aunque hubo discrepancias acerca del número de moléculas de agua de cristalización, debido, en parte, a los diferentes métodos de preparación. Se había identificado lo que Michaelis llamó pintorescamente "el bacilo del cemento".

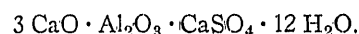
El papel del sulfoaluminato de cal en la desintegración del hormigón ha sido objeto, durante años, de innumerables controversias. Frente a la teoría generalizada de la acción destructora de los sulfatos sobre el hormigón, por formación del sulfoaluminato

de cal, que con su gran cantidad de agua de cristalización produce un considerable aumento de volumen, aumento que dentro de la masa de hormigón se puede traducir en fuertes tensiones, los contradictores argüían apoyándose en el hecho de no haberse encontrado cristales de sulfoaluminato de cal en los hormigones destruidos. En 1912, Nitzsche puso fin a la discusión al encontrar cristales de sulfoaluminato en hormigones atacados por los sulfatos, justificándolo la falta de éxito anterior por la rápida descomposición de los cristales en el agua, soluciones de sulfato magnésico y agua de mar.

En 1929, Lerch y colaboradores publicaron los resultados de un estudio sobre la reacción del sulfato cálcico con el C_3A : encontraron que, en realidad, se forman dos sulfoaluminatos, uno, rico en sulfato, trisulfato o sal de Candlot, cuya fórmula correcta es:



y otro, pobre en sulfato o monosulfato, de fórmula:



Al microscopio identificaron ambos compuestos, observando, por otro lado, que las moléculas entre el C_3A y el CaSO_4 variaban con la concentración del último, lo que se explica por la existencia de una mezcla de trisulfoaluminato con C_3A , que desaparece cuando sube la concentración del sulfato. Esto explica los distintos valores encontrados para la sal de Candlot por los anteriores investigadores. El sulfoaluminato se descompone también en presencia de carbonatos solubles o sales de magnesio.

Considerando que el contenido en C_3A de los cementos es la causa primordial del ataque de los sulfatos, por formación del voluminoso sulfoaluminato, diversos autores han publicado los resultados de sus experiencias, que muestran la influencia del C_3A sobre la resistencia química de los cementos.

Investigaciones realizadas en los Estados Unidos de América con cementos portland de distintos contenidos en C_3A , han demostrado que la resistencia, en soluciones agresivas de sulfatos, aumenta al disminuir el contenido en C_3A . Sin embargo, cementos con bajo contenido de C_3A (del 3 al 5 por 100) no logran alcanzar una resistencia completa. Pues ésta se consigue solamente cuando falta el compuesto C_3A en el cemento.

Los anteriores resultados se han visto confirmados con los ensayos efectuados con probetas de cementos, confeccionadas y tratadas de acuerdo con el Boletín núm. 212 de la A.S.T.M. (norma de ensayo, C 452-60 T). En estos ensayos se mide la expansión que sufren las probetas almacenadas en agua. Las probetas se fabrican de cemento puro, con una fuerte adición de yeso (7 por 100 de SO_3). En dichos

ensayos, cuyos detalles damos en la tabla I, se puede observar que un contenido decreciente de C_3A significa una expansión menor, pero solamente cesa prác-

Tabla I. — Medidas de las expansiones, en mm./m., de cementos con diverso contenido en C_3A , para determinar su resistencia a los sulfatos, según A.S.T.M.

% C_3A	28 DIAS	UN AÑO
12	0,224	1,000
11	0,119	0,689
10	0,104	0,285
9	0,073	0,273
7	0,060	0,179
6	0,062	0,216
5	0,059	0,164
4	0,050	0,120
3	0,041	0,101
2	0,038	0,087
1	0,037	0,080

ticamente la expansión si el cemento está totalmente libre de C_3A (ver apartado 322).

Lo anterior sirve de apoyo a la teoría más extendida, que considera el aluminato tricálcico como el causante de la baja resistencia del cemento portland ordinario a los sulfatos. Ella ha llevado a las Comisiones de Pliegos de Recepción de Aglomerantes a establecer un máximo del 5 por 100 de C_3A para los cementos portland de alta resistencia a los sulfatos.

Los cementos puzolánicos muestran, por regla general, y cuando se trata de ataques moderados, una resistencia mayor a los ataques de los sulfatos que los cementos portland. Este hecho se debe, por un lado, a la mayor compacidad del hormigón fabricado con cemento puzolánico, y por otro, a una cierta reacción entre las puzolanas y el hidrato de cal, del mortero de cemento. Sin embargo, esta reacción ya no tiene suficiente fuerza cuando se trata de ataques medianos o fuertes. Por ello, al utilizar Sulfadur, cemento exento de C_3A , no se deben añadir puzolanas naturales o materiales puzolánicos como Trass o escoria de altos hornos, ya que su presencia puede ser la causa del desarrollo de compuestos solubles de alúmina, que permiten la aparición de Ettringita. Esta misma posibilidad hay que tener en cuenta cuando se proyecta emplear adiciones en el hormigón, por lo que se recomienda conocer la opinión del fabricante del cemento, antes de la aplicación, sobre la aptitud de dichas adiciones.

Durante mucho tiempo se ha pensado en el contenido de cal del cemento como responsable de los deterioros causados por los sulfatos. Suponiéndose que los cementos bajos en cal presentaban una mayor resistencia a los ataques de los sulfatos. Como se ha

señalado antes, esta resistencia se ha debido a la compacidad del hormigón fabricado con cementos bajos en cal, puzolánicos y análogos. Sin embargo, la resistencia de los cementos bajos en cal no es mucho mayor que la de los portland ordinarios, puesto que no es la cal, sino los compuestos aluminosos, especialmente el C_3A , los que pueden reaccionar de manera peligrosa con los sulfatos.

La exactitud de lo que antecede queda demostrado precisamente con el comportamiento del Sulfadur, que es un cemento con un contenido normal de cal, debiendo su resistencia a los sulfatos, únicamente a la falta de C_3A entre sus componentes.

Los conocidos cementos bajos en cal, que se fabrican a base de mezclas de portland con puzolanas, escorias, etc., están lejos de alcanzar esta resistencia a los sulfatos, ya que en ellos existe siempre, en mayor o menor proporción, aluminatos solubles como el C_3A .

2.1. RESISTENCIA DE LOS CEMENTOS A LOS SULFATOS.

Establecido que el ataque de los sulfatos al cemento, y por consiguiente al hormigón, se debe fundamentalmente a la formación de cristales de sulfoaluminato

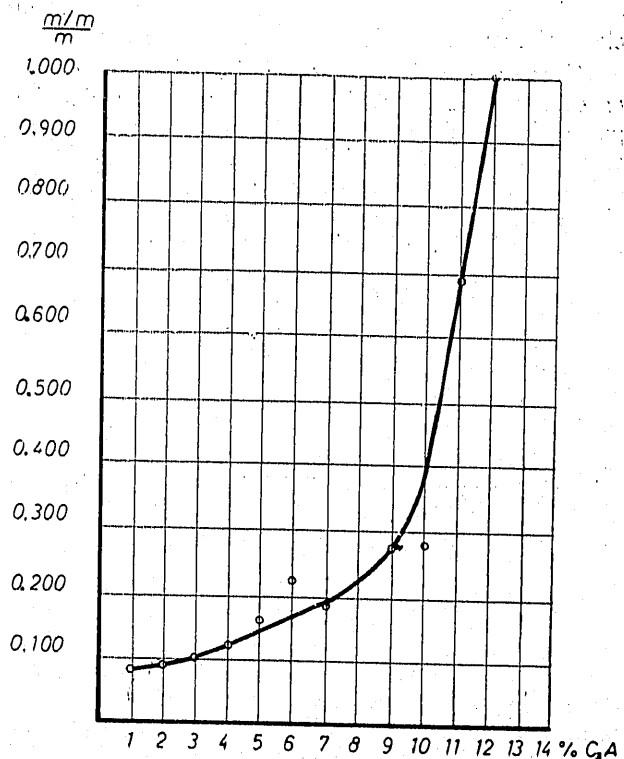


Figura 1.*

de cal, por reacción entre $CaSO_4$ y C_3A , parece justo afirmar que los cementos con bajo contenido en C_3A presentarán una mejor resistencia a las aguas sulfatadas. Abundando en este criterio, como hemos dicho

antes, la A.S.T.M. ha establecido el límite del 5 por 100, como el máximo contenido de aluminato tricálcico, que pueden contener los cementos denominados de alta resistencia a los sulfatos. Las Normas vigentes españolas así lo señalan para el cemento de especificación PAS 150. Cemento portland resistente a los sulfatos.

Indudablemente, ese contenido de C_3A supone una cierta seguridad en el empleo, pero desgraciadamente no es suficiente, pues cementos conteniendo menos del 5 por 100 de C_3A no resisten la prueba Anstett (ver figs. 2.^a y 8.^a), que causa grietas en cementos con el 0,1 por 100 de C_3A .

Se podrá aducir que la prueba Anstett es exagerada y las condiciones a que se somete el cemento no se dan en la Naturaleza, resistiendo algunos cementos, que no soportan esta prueba, otras más normales y menos rigurosas, e incluso comportándose bien, en la práctica, los hormigones preparados. No vamos ahora a discutir este criterio, pero nos permitimos establecer una analogía entre el ensayo Anstett y el del autoclave, y recordamos lo escrito por nosotros [3] en un trabajo sobre la inestabilidad de volumen en el cemento portland: "Cabe discutir el valor real de los resultados, que se obtiene con el método del autoclave, pero no olvidemos que el ensayo dé una seguridad absoluta acerca de la calidad del cemento a sus consumidores." El Profesor Tricht calificó de "bárbaro" cualquier ensayo donde el cemento se sometiese a ebullición, pero el ensayo del autoclave, "bastante más bárbaro", se ha impuesto. Nada nos impide pensar en una futura imposición de la prueba Anstett.

Es indudable que un cemento ideal para resistir a los sulfatos será el que carezca de aluminato tricálcico.

Un hormigón compacto, fabricado con una dosificación conveniente a base de ese cemento ideal, no hay duda que puede afirmarse *a priori* que es totalmente indiferente a los ataques de los sulfatos.

3. El cemento Sulfadur portland de altas resistencias a los sulfatos.

La Sociedad alemana Dyckerhoff Zementwerke A. G., con un siglo de experiencia tanto en el campo de la química del cemento como en la producción industrial, produce una amplia gama de tipos de cementos. Luego de numerosos ensayos e investigaciones, sus químicos e ingenieros han conseguido fabricar un cemento de altas resistencias a los sulfatos, que desde hace tiempo se consume en Alemania y en otros países, con entera satisfacción de ingenieros y constructores. Este cemento, amparado por distintas patentes, se conoce con el nombre de Sulfadur, cementos portland de alta resistencia a los sulfatos, exento de aluminato tricálcico (C_3A).

La Dirección General de Obras Hidráulicas, del Ministerio de Obras Públicas, consciente del tremendo problema que engendran los terrenos selenitosos, demorando e incluso impidiendo la ejecución de ciertas grandes obras de interés nacional, abordó las dificultades existentes con miras a su resolución. Después de los naturales estudios, informes y asesoramientos, se autorizó a la fábrica de cementos de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir para producir el cemento Sulfadur en nuestro país, de acuerdo con la firma propietaria de la patente española número 247 823, que ampara el nuevo proceso de fabricación.

El cemento Sulfadur se fabrica eligiendo cuidadosamente las materias primas adecuadas, que sufren un control muy riguroso a lo largo de todo el proceso. El clinker y el cemento se ensayan con métodos muy precisos, para asegurar la ausencia total de aluminato tricálcico. Los sistemas ordinarios de ensayos, especificados en las Normas vigentes, se completan con otros más exigentes, finalizándose el control químico con análisis microscópicos y roentgenológicos, para adquirir una absoluta seguridad acerca de la composición del cemento fabricado.

Independientemente de estos ensayos, que aseguran la imposibilidad química de ataque de los sulfatos al cemento Sulfadur, su resistencia se comprueba con varios métodos, acelerados y de larga duración, en los que se ensayan diversos tipos de probetas en diferentes condiciones.

De esta forma se garantiza al usuario la calidad del cemento.

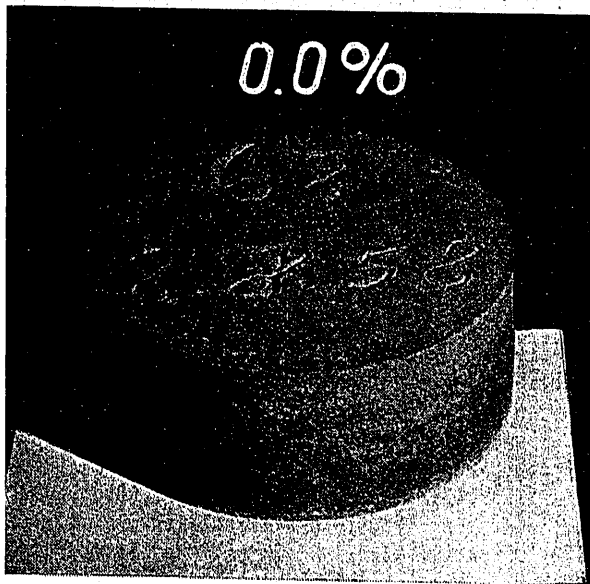
El cemento Sulfadur posee otras notables propiedades, que permiten clasificarlo como un portland de excelente calidad. Los resultados obtenidos, en numerosos y distintos ensayos, así permiten afirmarlo.

Por considerarlo de interés, publicamos algunos datos acerca de las experiencias realizadas; en muchos casos nos limitamos a resumir las experiencias, dejando para otra ocasión su exposición completa con los informes que amablemente nos ha facilitado el laboratorio principal de la Dyckerhoff Zementwerke A. G.

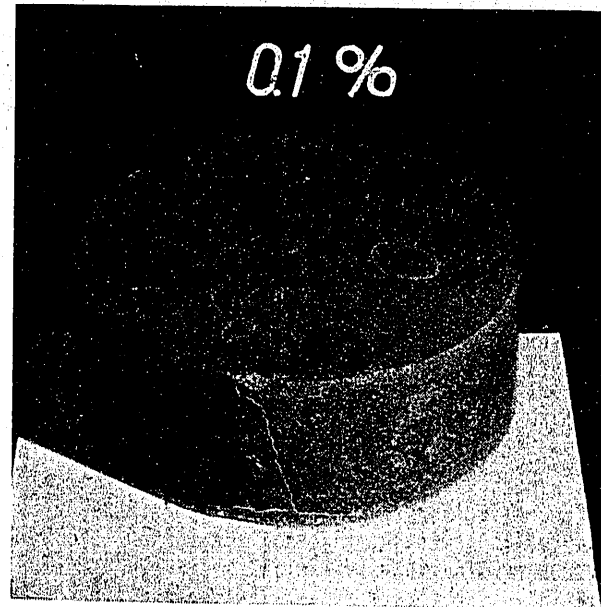
3.1. PROPIEDADES TÉCNICAS DEL CEMENTO SULFADUR.

El Sulfadur es un cemento portland genuino. Por ello son válidas las mismas prescripciones de trabajo en vigor para el cemento portland. Naturalmente, en la práctica no basta sólo la gran estabilidad de un cemento frente a los sulfatos, sino que también las restantes propiedades técnicas para el cemento y el hormigón han de cumplir las actuales exigencias en cuanto a tratamiento, densidad, resistencias mecánicas, etc.

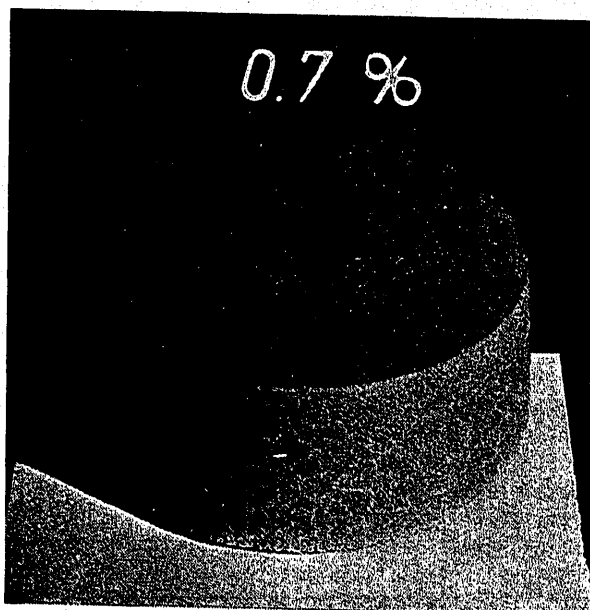
El cemento Sulfadur puede emplearse para todas las construcciones de hormigón, hormigón armado



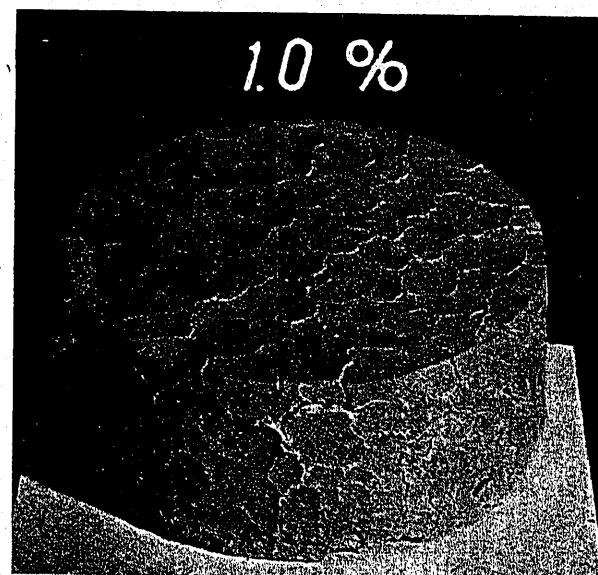
1



2

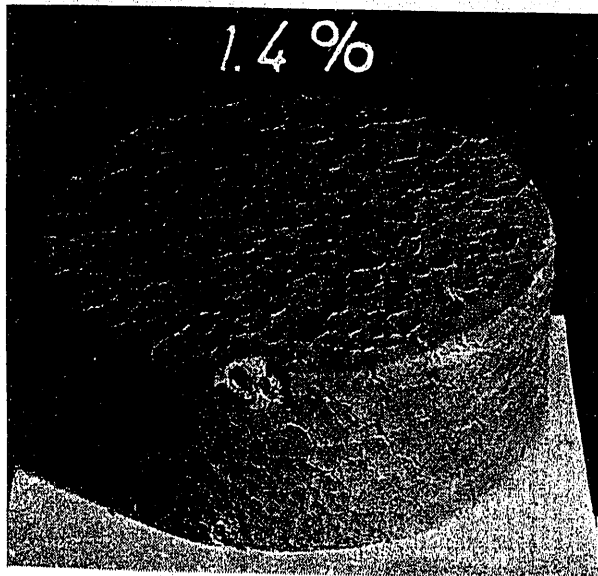


3

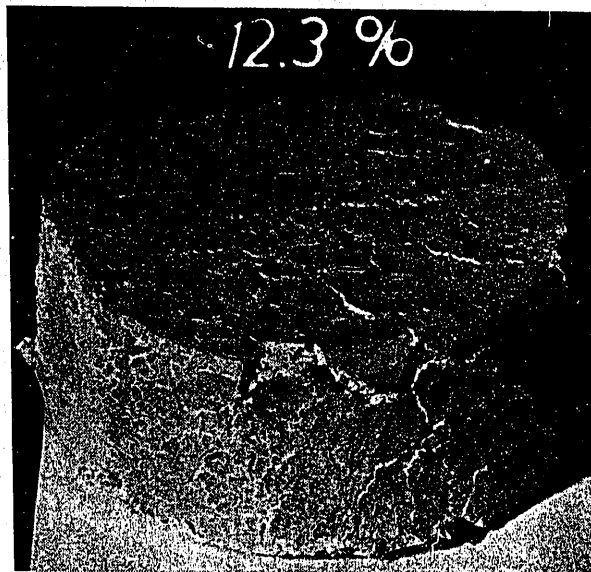


4

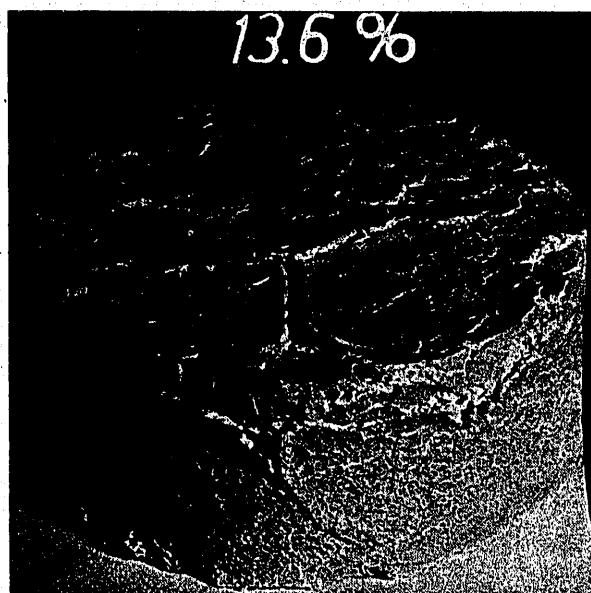
Fig. 2.^a — Resultado de las pruebas ANSTETT. Los números indicados bajo las fotos demuestran el grado de la disgregación por acción de los sulfatos. % = el porcentaje del contenido de C_3A .



5



6



7

Fig. 2.^a — Resultado de las pruebas ANSTETT. Los números indicados bajo las fotos demuestran el grado de la disgregación por acción de los sulfatos. % = el porcentaje del contenido de C_3A .

y hormigón pretensado, ya que como cemento normalizado cumple las especificaciones españoles P-250 y PAS-150. En la tabla II podemos ver las resisten-

TABLA II. — Resistencia, en Kg./cm.², del cemento Sulfadur, según las nuevas Normas españolas.

DÍAS	FLEXO-TRACCION			COMPRESION		
	Sulfadur	P-250	PAS-150	Sulfadur	P-250	PAS-150
3	39	—	—	162	—	—
7	49	37	27	231	167	94
38	72	56	43	365	250	150

cias del cemento Sulfadur, fabricado en España, comparadas con las mínimas especificadas para los cementos P-250 y PAS-150.

Se han ensayado también las resistencias de probetas cúbicas de hormigón de 20 cm. de arista, confeccionadas con Sulfadur y áridos de 0-30 mm. Los resultados fueron:

Kg./m. ³ de hormigón	Relación pesos	Agua-cemento	3 Días Kg./cm. ²	7 Días Kg./cm. ²	28 Días Kg./cm. ²
200	1 : 10	0,74	94	125	253
235	1 : 8,4	0,63	138	186	343
270	1 : 7,3	0,55	169	226	404
300	1 : 6,4	0,50	208	281	472

La contracción del cemento Sulfadur es bastante pequeña en comparación con un cemento portland normal, molidos ambos a igual finura, propiedad muy interesante para la fabricación de grandes masas de hormigón. Los resultados obtenidos con la prueba de contracción, según Graf-Kaufmann, han sido:

T I E M P O	Sulfadur	Portland normal
Después de 28 días	—0,40 mm.	—0,67 mm.
Idem de 2 meses	—0,48 »	—0,76 »
Idem de 3 »	—0,55 »	—0,80 »
Idem de 6 »	—0,57 »	—0,85 »
Idem de 1 año	—0,58 »	—0,93 »

Por su composición mineralógica, el cemento Sulfadur desarrolla muy poco calor durante su fraguado y posterior endurecimiento, como se puede ver en la tabla III.

TABLA III. — Temperaturas del cemento Sulfadur y Portland Normal P-250, durante el principio de su endurecimiento. Agua de amasado, 30 por 100.

T I E M P O	Sulfadur	P-250
5 horas	28° C.	33° C.
10 »	37° C.	56° C.
15 »	38° C.	45° C.
20 »	33° C.	36° C.

El desarrollo de las resistencias mecánicas en el cemento Sulfadur puede favorecerse con la adición de cloruro cálcico, igual que en los normales, sin que ello suponga influencia desventajosa para su resistencia a los sulfatos.

Las resistencias pueden mejorarse notablemente con un tratamiento de vapor a presión, pues este cemento reacciona intensamente con él.

Se han realizado ensayos en este sentido, con prismas de 4 × 4 × 16 cm., con arena de 0-5 mm., con una relación de pesos de 1 : 3 y consistencia débilmente plástica.

Los prismas, calentados durante dos horas a 60° C., presentaban, después de 24 horas, la siguiente resistencia:

Flexo-tracción, 40 Kg./cm.². Compresión, 175 kilogramos/cm.².

Después de calentar durante siete horas con vapor recalentado a 8 atmósferas, los prismas alcanzaron a las veinticuatro horas las resistencias:

Flexo-tracción, 133 Kg./cm.². Compresión, 651 kilogramos/cm.².

3.2. RESISTENCIA A LOS SULFATOS DEL CEMENTO SULFADUR.

En los anteriores apartados hemos visto que el cemento Sulfadur se comporta como un excelente portland normal; sin embargo, debido a su proceso de fabricación y composición, presenta una alta resistencia a los sulfatos. Esta resistencia se debe, principalmente, a la carencia total de C₃A, que impide la peligrosa formación de sulfoaluminato. En las figuras 3.^a y 4.^a se han reproducido secciones pulimentadas de un clinker normal y del clinker Sulfadur, observándose en este último que el material intersticial aparece de color uniforme, sin trazas de C₃A. Como quiera que el cemento está prácticamente desprovisto de cal libre y para trabajarlo hasta con una baja relación de agua/cemento, se pueden conseguir fácilmente hormigones de gran capacidad y estabilidad.

Independientemente de las consideraciones teóricas, este cemento se somete a diversas pruebas para comprobar su estabilidad. En muchas ocasiones se

le compara con otros tipos de cemento, especialmente con cementos utilizados para terrenos y aguas seleccionadas.

Los ensayos efectuados han demostrado en todos los casos la innegable superioridad del cemento Sulfadur, en relación con los ataques de los sulfatos.

En los apartados siguientes iremos dando los re-

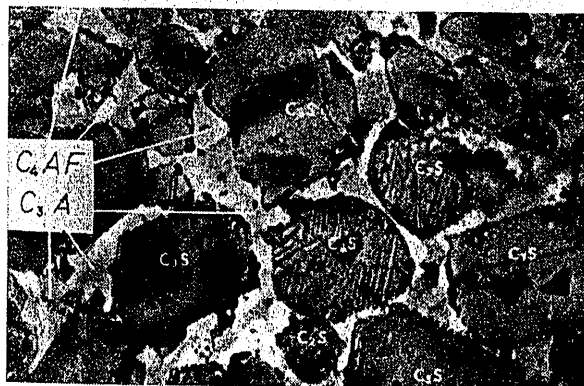


Figura 3.^a

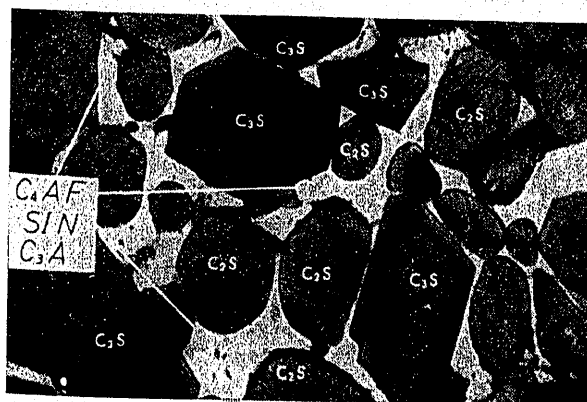


Figura 4.^a

sultados obtenidos, y aunque para no alargar demasiado este trabajo lo presentamos en forma resumida, tenemos en preparación un trabajo más extenso, que deseamos publicar, y en el que se detallarán todas las experiencias.

3.2.1. Ensayos con probetas en soluciones sulfatadas.

En las figuras 5.^a y 6.^a presentamos fotografías de probetas cúbicas y prismáticas, confeccionadas con pastas puras de cemento, conservadas en una solución de sulfato sódico al 5 por 100 durante veinticuatro meses. Las probetas Sulfadur, izquierda de las fotografías, se mantuvieron intactas, mientras que las otras, confeccionadas con cemento de escorias y pu-

zolánicos, se atacaron y destruyeron entre los seis y diez meses.

Se han realizado una serie de ensayos sobre probetas prismáticas de $4 \times 4 \times 16$ cm., según DIN 1164. Las probetas se sometieron a diferentes tratamientos antes de someterlas a la acción de las soluciones agresivas de sulfato sódico y sulfato magnésico, independientemente al 1,8, al 2 y al 5 por 100. Correspondiente a una concentración de SO_3 de 10 000 a 30 000 mgr./litro. Cuando se empleó mortero en lugar de pasta pura de cemento, se utilizó arena del Rhin de 0,7 y 0,5 mm., según los casos. Las probetas se observaron a diferentes edades y las últimas observaciones se realizaron a los cuarenta y dos meses, junio del año pasado. El estado de las probetas se clasifica de acuerdo con la figura 7.^a en una escala convencional, que va del 1 al 7, según lo que sigue:

Estado 1. — La probeta está intacta, sin grieta alguna.

Estado 2. — La probeta presenta muy pocas grietas finísimas en las esquinas.

Estado 3. — La probeta tiene grietas muy finas en las esquinas.

Estado 4. — La probeta presenta grietas más gruesas en las esquinas. Hay principios de destrucción.

Estado 5. — Existen grietas gruesas y extensas. Las esquinas están destruidas.

Estado 6. — Aparecen las grietas gruesas y extensas. Destrucción de las caras extremas.

Estado 7. — Destrucción completa de la probeta.

Los resultados son variables en cuanto a los cementos puzolánicos, de escoria y portland normal, que se ensayaron juntamente con el Sulfadur.

Morteros con relación agua/cemento igual a 0,75, conservados en soluciones de los sulfatos sódicos y magnésicos al 2 por 100, eran atacados entre los dos y cinco meses y acabaron todos destruidos antes de cuarenta meses (estado 7). El mortero Sulfadur, sometido conjuntamente al mismo tratamiento, conservó el estado 1 a los cuarenta y dos meses.

Otros ensayos realizados a base de morteros, más ricos y con una relación agua/cemento de 0,55, dieron mejores resultados. De todas formas, el estado 3 se presentó en los otros cementos entre los seis meses y el año. Algunas probetas se destruyeron totalmente. El Sulfadur, por el contrario, se mantuvo en el estado 1, probetas intactas, durante los veinticuatro meses que duró el ensayo.

En un ensayo realizado para comparar la resistencia de los sulfatos de un cemento puzolánico con el Sulfadur, se puso nuevamente de manifiesto la superioridad del último.

Se compararon probetas de consistencia casi plástica, de mortero 1 : 3 y pasta pura. El ataque se realizó por conservación, en soluciones al 5 por 100 de sulfato sódico y sulfato magnésico, que supone una condición de extrema dureza. Las observaciones han durado treinta y seis meses y los resultados han sido:

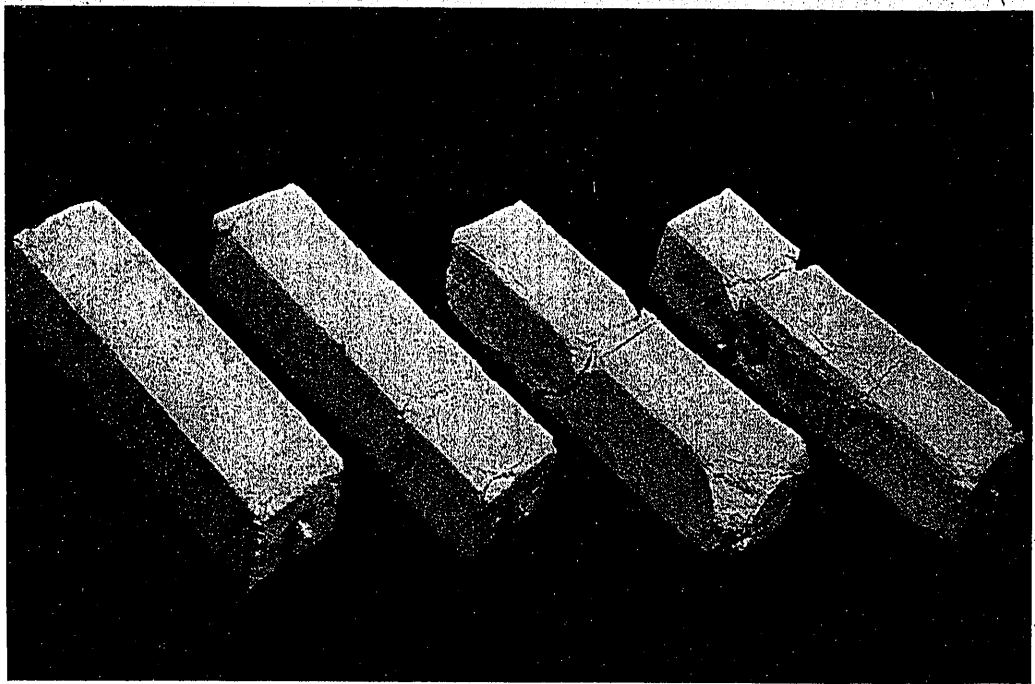


Figura 5.ª

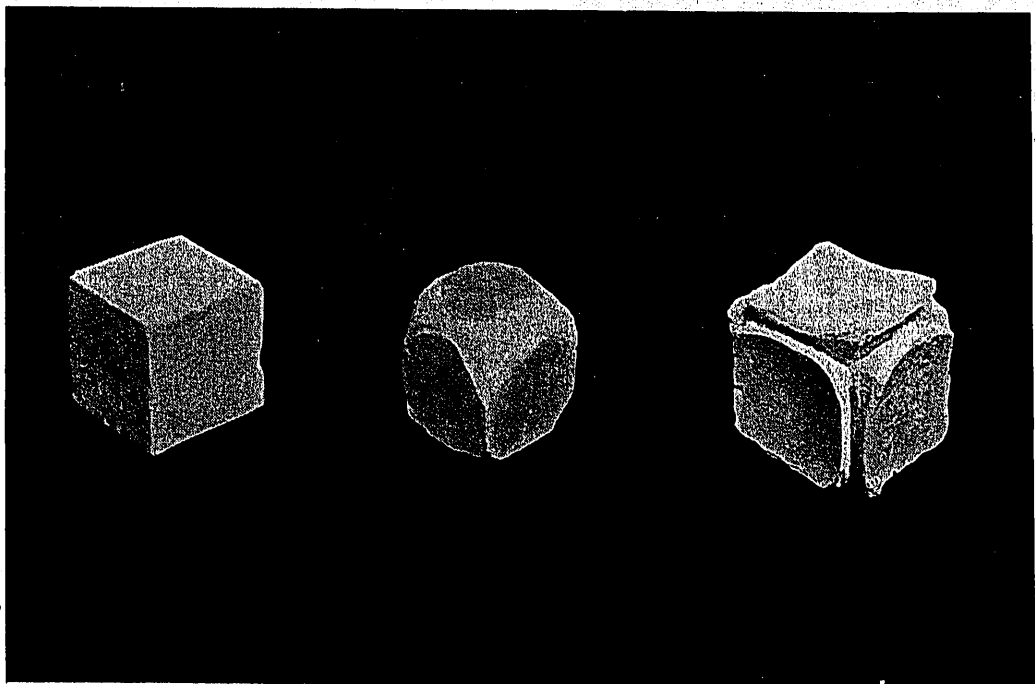


Figura 6.ª

1.º Las probetas, a base de cemento puzolánico 30:70, de pasta pura, se destruyeron a los veinticuatro meses en ambas soluciones.

2.º Las probetas con mortero puzolánico se conservaron bien (estado 2) en la solución de sulfato sódico; dicho estado se apreció a los veinticuatro meses. En la solución magnésica, el estado 2 aparece a los seis meses; el estado 4, a los veinticuatro meses, y a los treinta y seis meses, las probetas presentaban el estado 5.

3.º Las probetas confeccionadas con cementos

Sulfadur puro y con mortero 1:3, se comportaron de forma idéntica: inalteradas a la solución sódica y con finísimas grietas (estado 2) en la solución magnésica a los treinta y seis meses.

3.2.2. *El cemento Sulfadur ante el ensayo de la A.S.T.M.*

Las expansiones medidas en el ensayo A.S.T.M., del que hemos hablado antes (véase 2.1), han sido insignificantes, menores de 0,032 mm. a los veintiocho días y de 0,062 mm. al año. Debiéndose estas expansiones mínimas del Sulfadur al agua de conservación solamente.

3.2.3. *El cemento Sulfadur frente a la prueba Anstertt.*

El cemento Sulfadur se somete en el control normal de fábrica al ensayo de Anstertt, por cuanto nos da una idea anticipada y segura del futuro comportamiento del cemento en relación con su resistencia a los sulfatos. Este cemento cumple satisfactoriamente dicha prueba. En la figura 8.ª podemos ver las foto-

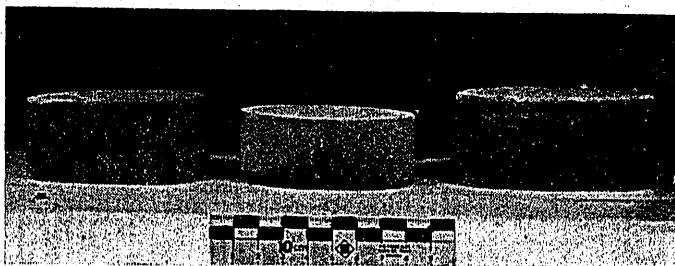


Figura 8.ª

grafías de unas probetas después de sufrir la prueba. La del centro es de cemento Sulfadur; las otras son de cementos ordinarios sometidas a las mismas condiciones.

4. Conclusiones.

Hemos hablado de la posibilidad de ataques de sulfatos a los hormigones y hemos informado acerca de las características más destacadas del cemento Sulfadur, al que consideramos un cemento racional. El hormigón fabricado a base de este cemento no requiere cuidados especiales, distintos de los normales para los hormigones de cementos portland. Solamente debe cuidarse, cuando haya posibilidad de ataque de sulfatos, de no utilizar aditivos que tengan compuestos aluminosos, por el peligro de que se transformen en C_3A .

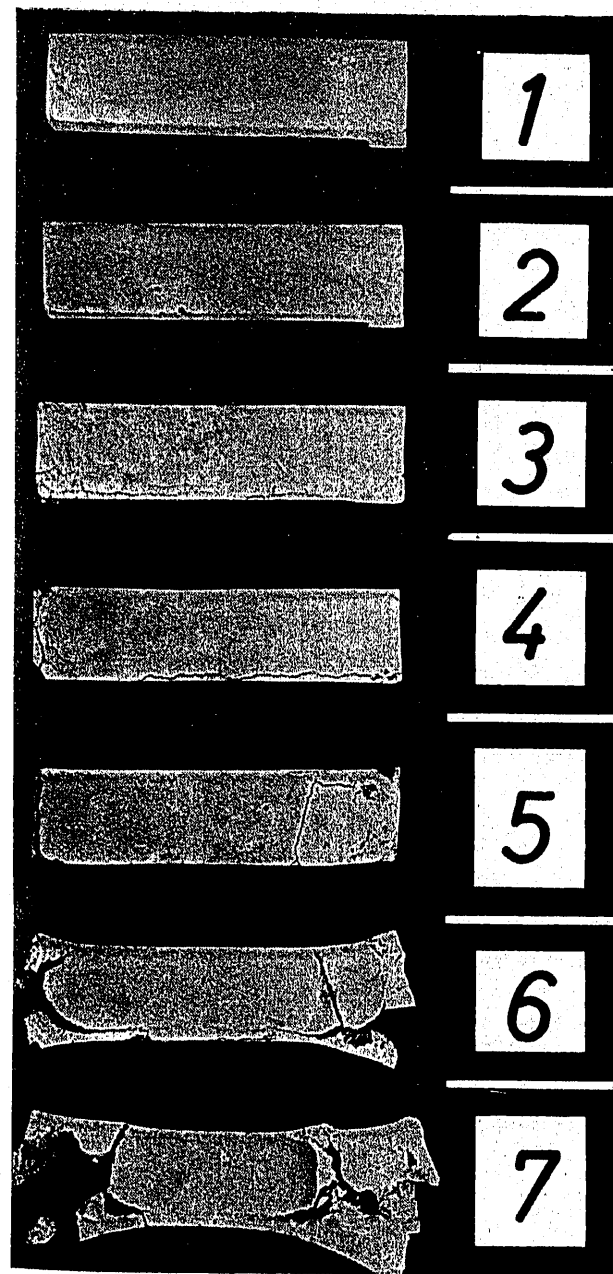


Figura 7.ª

Este cemento es un cemento altamente resistente a los sulfatos, pero de ninguna manera ácido-resistente; por ello hay que cuidar que las soluciones en contacto con él no pasen de ser ligeramente ácidas y su pH no debe bajar de 6. Se debe cuidar igualmente de la cantidad de CO_2 agresivo que contengan las aguas, y en caso de encontrarse con un porcentaje excesivo, debe consultarse al fabricante. Estas consideraciones, que son válidas para cualquier tipo de aglomerante, no deben olvidarse nunca en evitación de desagradables sorpresas.

Finalmente hemos de añadir que el Sulfadur tiene también una excelente resistencia frente a las aguas que contienen cloruros, que en altas concentraciones atacan también a los hormigones por formación de cristales de $3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$, por reac-

ción entre el cloruro cálcico y el C_3A . Reacción imposible en el Sulfadur por carecer de aluminato tricálcico entre sus componentes.

5. Bibliografía.

1. Valdés y Díaz-Caneja, J. M.: Jefatura de Sondeos, Cimentaciones e Informes Geológicos. Boletín número 4, noviembre 1958.
2. Vidal Pardal, M.: Jefatura de Sondeos, Cimentaciones e Informes Geológicos. Boletín núm. 4, noviembre 1958.
3. Laffarga Osteret, J.: Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento. Boletín U.A.M.C., número 83 (1957).