

Los cementos para trabajos en el mar¹

II

La lucha contra las descomposiciones

Lo expuesto en el artículo anterior permitirá darse cuenta de las condiciones en que debemos colocarnos para evitar tanto como sea posible las causas múltiples de descomposición por agentes externos, y en particular por el agua de mar, que las reúne todas:

1.º *En primer lugar, evitar la porosidad, es decir, hacer morteros u hormigones compactos.*

Esta condición es evidentemente indispensable para evitar las heladuras o los efectos de las sales trepadoras; es igualmente necesaria para reducir tanto como sea posible las superficies de contacto con los agentes químicos. Por otra parte, no se puede, teóricamente, obtener un hormigón absolutamente compacto, puesto que la hidratación de todos los cementos está acompañada, como ha manifestado LE CHATELIER, de una disminución de volumen absoluto. No se puede, pues, lograr más de una porosidad mínima. Además, es necesario descontar siempre la producción eventual de grietas de contracción.

2.º *Oponerse, por una constitución química apropiada de los cementos, a los diferentes factores químicos de descomposición que hemos encontrado.*

a) VICAT, prevenido sobre todo por los fenómenos de hidrólisis y de descomposición por MgO , había llamado la atención sobre los peligros de una composición demasiado caliza y recomendado adoptar el valor más elevado posible del índice de hidraulicidad $SiO_2 + Al_2O_3$ afirmando que un cemento en el cual $CaO + MgO$ este índice alcanzara la unidad, sería indescomponible.

La contrariedad está en que aumentando la proporción de arcilla en los cementos portlands, se disminuye muy rápidamente su valor hidráulico; tanto que actualmente se hace exactamente lo contrario para fabricar los portlands modernos de alta resistencia.

b) Hay, sin embargo, un medio de evitar la dificultad, y BRED, guiado precisamente por la afirmación de VICAT, ha descubierto el cemento fundido, aumentando enormemente la proporción de alúmina y reduciendo simultáneamente casi a nada la de sílice. El índice de hidraulicidad del cemento fundido es superior a la unidad. Y su inalterabilidad perfecta ha confirmado completamente las ideas proféticas de VICAT.

c) Antes del descubrimiento de BRED, un procedimiento ya empleado en la antigüedad y tomado en consideración por VICAT, había permitido obtener resultados interesantes: consistía en bloquear el hidrato de cal, liberado por el fraguado, mezclando al mortero puzolanas, es decir, sustancias naturales o artificiales capaces de fijar esta cal, combinándose con ella.

En lugar de mezclar la puzolana en el momento del empleo, se ha tenido en seguida la idea de fabricar un cemento puzolánico, moliendo juntas las proporciones convenientes de cemento y puzolana. La So-

ciété de LAFARGE había constituido así un cemento a base de arcilla calcinada, el cual suponía un progreso considerable sobre los cementos portlands desde el punto de vista de la inalterabilidad. LAFARGE lo ha abandonado actualmente por el cemento fundido, puesto que es mucho más indescomponible y al mismo tiempo da resistencias incomparablemente más elevadas. Es que, efectivamente, el principal defecto de los cementos puzolánicos es dar morteros de endurecimiento lento y de resistencias mediocres.

d) Para evitar la formación de la sal de Candlot, era indicado fabricar cementos portlands exclusivamente silíceos, o conteniendo una proporción extremadamente reducida de alúmina. Es lo que se logra con el cemento artificial Doble Cocción de Lafarge, el cual, dando las resistencias de un portland excelente, no contiene más que 3 por 100 de alúmina, con indicios de hierro. Por otra parte, MICHAELIS había preparado Cementos de hierro, en los cuales las proporciones habituales de hierro y alúmina de los portlands clásicos estaban invertidas.

En todos los casos se ha observado una mejora neta de la resistencia química. Pero mejora únicamente.

En cuanto al cemento fundido, con su 40 por 100 de alúmina, parece a primera vista que no debería resistir más de algunos días a la formación de la sal de Candlot. Pero LAFUMA ha demostrado, por un estudio químico muy interesante¹, que esta sal no podrá disgregar el cemento fundido. En efecto, la hidratación de este aglomerante pone en libertad no cal, sino alúmina. En estas condiciones no se forma el aluminato tricálcico, sino el aluminato bicálcico. Y esta última sal abandona a la solución acuosa en equilibrio una cierta proporción de alúmina (50 miligramos por litro). Por consiguiente, las soluciones de sulfato actúan, no sobre el aluminato sólido, sino sobre la alúmina en solución, y, según el principio recordado anteriormente, no hay producción de fuerzas de disgregación.

Tal es la demostración científica, muy sencilla, de la inalterabilidad del cemento fundido. Hemos de añadir que LAFUMA ha demostrado que las condiciones para que se forme en la hidratación de un cemento aluminato bicálcico, en lugar de aluminato tricálcico, son casi exactamente satisfechas para un valor del índice de hidraulicidad igual a 1, lo que comprueba las opiniones de VICAT.

Como se ve, todo esto es claro y descansa sobre bases exclusivamente científicas, y no, como se nos ha reprochado, sobre un «dogma presentado como indiscutible».

Y esto nos lleva a responder a otras críticas hechas al cemento fundido, y las cuales no son más serias.

Los Sres. Ferrer Vidal y Margarit han reprochado al cemento fundido el tener una composición muy variable, lo que ocasiona forzosamente variaciones de propiedades, mientras que el cemento portland es siempre idéntico a sí mismo. En apoyo de estas afirmaciones citan las cifras de BRED, según las cuales

¹ Véase el número anterior, página 233.

¹ LAFUMA: *Recherches sur les aluminates de calcium thèse de Doctorat. París, 1925.*

la sílice varía de 5 a 15 por 100 y la alúmina de 35 a 45 por 100.

Pero puesto que nuestros estimados contradictores dicen haber ensayado numerosas muestras de cemento fundido comercial, ellos las habrán seguramente analizado, y han podido convencerse de que las variaciones de sus constituyentes son notablemente más reducidas. No se debe olvidar que las cifras de BIED se refieren a ensayos previos de puesta a punto de una fabricación, ahora bien normalizada.

No es menos cierto que el cemento fundido *tolera* variaciones más importantes que los portlands, es decir, que se obtienen características prácticamente equivalentes, dentro de límites de composición que son más amplios para el cemento fundido que para los portlands.

Esto es un hecho reconocido, y, francamente, no puede ser más que *una ventaja* del cemento fundido. ¿Desde cuándo se piensa reprochar a un producto su elasticidad en un dominio cualquiera?

Además, si es bien cierto que en una fábrica de cemento portland se tiene poca amplitud para la composición química (y esto es una dificultad de fabricación y no un mérito), no es menos sabido que *de una fábrica a otra o de una firma a otra* la composición de los cementos portlands (y hablamos únicamente de los cementos de buena calidad) manifiesta variaciones muy notables. Es suficiente analizar cinco o seis portlands tomados en el mercado para ilustrarse sobre este punto. Por ejemplo, la alúmina varía ordinariamente de 4 a 8, o sea de sencillo a doble; el óxido de hierro, de 2 a 3,5 ó 4, o sea, también, de sencillo a doble; la magnesia, que no es un elemento deseable, de 0 a 3 por 100, o algunas veces más.

Nos parece inútil insistir.

Otro reproche. Los Sres. Ferrer-Vidal y Margarit dicen haber ensayado varias muestras de cemento fundido según el método de ANSTETT, y haber obtenido resultados irregulares: ciertas muestras resistirían, mientras que otras se expansionarían.

Pero precisamente LAFUMA, en el trabajo ya citado¹, ha tenido ocasión de estudiar de cerca la técnica de la prueba llamada de ANSTETT (que dicho sea, ha sido propuesta por primera vez por LE CHATELIER), y ha observado que la cristalización del sulfoaluminato estaba acompañada siempre de esfuerzos de dilatación y que, para que el ensayo sea correctamente efectuado, es preciso comprimir las briquetas bajo una presión de lo menos veinte kilogramos por centímetro cuadrado. En estas condiciones, el cemento fundido previamente endurecido no manifiesta, en oposición al portland, ninguna deformación, ni aun después de dos años, mientras que las briquetas apisonadas ligeramente doblan de volumen en tres días.

Las anomalías observadas por los Sres. Ferrer-Vidal y Margarit provienen, pues, de irregularidades en la aglomeración de las briquetas, a menos que no provengan de otra variación insospechada del procedimiento operatorio.

Por otra parte, debemos protestar de que se haya dicho que los constituyentes del cemento aluminoso son *de naturaleza bastante semejante* a los que forman el cemento portland. No se trata de buscar constituyentes *análogos*, sino constituyentes *idénticos*. Ahora bien, el constituyente esencial del primer cemento es el aluminato monocálcico, que no existe en

el segundo; y éste debe sus propiedades hidráulicas al silicato tricálcico, que no existe en el cemento fundido. El solo constituyente común que encuentran los Sres. Ferrer-Vidal y Margarit es el silicato bicálcico. Pero, según el mismo HANS KUHLE, *no hay silicato bicálcico en el portland bien cocido*.

Por lo demás, estamos completamente de acuerdo con los Sres. Ferrer-Vidal y Margarit, en que por encima de las teorías están los hechos. Veamos, pues, los hechos: desde que se emplean cementos en el mar no se ha cesado de señalar sus descomposiciones. ¿Será esto, pues, una leyenda? En todos los países se han nombrado Comisiones de experiencias, que trabajan desde hace varias decenas de años para investigar los mejores medios de prevenir estos accidentes. Es, pues, que hay un peligro bien reconocido.

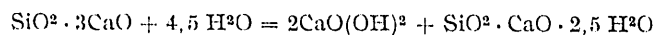
Y nos limitaremos a citar, respecto a los ensayos ejecutados en Francia, con los diferentes tipos de aglomerantes, según las resoluciones de la Commission des Chaux et Ciments, la conclusión dada por FERRET, director del Laboratorio «des Ponts et Chaussées» de Boulogne-sur-Mer, a continuación de un estudio¹ muy importante aparecido recientemente: *Respecto a las descomposiciones, los productos que, hasta el presente, deben inspirar más confianza, son los cementos aluminosos.*

Algunas consideraciones teóricas

No quisiéramos abusar de la confianza de nuestros lectores, por lo que vamos a procurar examinar lo más brevemente posible la discusión teórica planteada por nuestros contradictores.

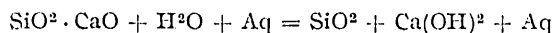
Hidrólisis de los cementos.—Debemos también, respecto a esto, disipar una confusión. *La cal liberada por la hidratación de los cementos* no debe ser confundida con el fenómeno de hidrólisis.

La reacción de hidratación del silicato tricálcico descubierta por LE CHATELIER:



es una reacción *total* o *irreversible* poniendo en juego, para una molécula de silicato tricálcico, una cantidad limitada de agua, con liberación *completa* de dos moléculas de cal hidratada.

Es completamente diferente a las reacciones de hidrólisis, que son esencialmente *reversibles* y *limitadas*. Por ejemplo, el silicato monocálcico hidratado, puesto en contacto con un exceso de agua, sufre una descomposición hidrolítica estudiada igualmente por LE CHATELIER:



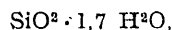
limitada por la reacción inversa. La ley de las fases muestra que, para una cantidad dada de agua, la descomposición se para cuando la solución ha tomado una concentración en cal constante (para una temperatura dada). Si se añade agua, la hidrólisis recommienza hasta que se alcance la misma concentración, y así sucesivamente hasta la descomposición completa del silicato en sílice coloidal.

La concentración en cal limitando la reacción ha sido encontrada por LE CHATELIER de 52 miligramos por litro.

¹ LAFUMA: *Thèse*, pág. 67.

¹ R. FERRET: *Revue des Mat. de Const.*, septembre 1926.

Inversamente, si se trata la sílice coloidal por el agua de cal, se vuelve a formar el silica tomonocálcico, pero en presencia de un exceso de agua de cal, este compuesto absorbe aún nuevas cantidades de cal hasta tener la fórmula



que se aproxima al silicato bicálcico anunciado actualmente por KUHL. Pero las leyes de la físico-química muestran precisamente que no se trata de una combinación definida, pues LE CHATELIER ha encontrado que, aumentando la cantidad de agua en contacto de este silicato de $1,7 \text{ H}_2\text{O}$, no se observa más concentración constante: ésta disminuye progresivamente de 1 gr a 52 miligramos, y no se fija en este valor más que cuando la composición del precipitado se convierte en $\text{SiO}_2 \cdot \text{CaO}$.

El silicato monocálcico es, pues, claramente el solo compuesto definido hidratado existente, y la cal que él fija en las soluciones más concentradas es únicamente debida al fenómeno bien conocido de absorción.

Todas estas investigaciones de LE CHATELIER datan de 1887. Es verdaderamente sensible que ciertos autores hayan perdido el recuerdo al punto de presentar la hidrólisis de los cementos como una novedad.

Tomemos ahora el cálculo del hidrato de cal existente en estado libre en un mortero de portland endurecido. No tendremos en cuenta la cal absorbida por el silicato monocálcico. Iremos aún más lejos, y adoptaremos la hipótesis de la formación de un silicato bicálcico. Como en el cemento inicial, supuesto bien cocido, toda la cal está en el estado de silicato tricálcico (según KUHL mismo), esto quiere decir que en el mortero se debe encontrar una molécula de cal libre (74) por una molécula de sílice (60). Como los portlands encierran normalmente 20 por 100 de sílice, esto hace precisamente $\frac{20 \times 74}{60} = 24,66$, y no 3 a 4 por 100.

¿Se dirá que esta cifra es demasiado fuerte, puesto que, en realidad, una débil proporción de cemento se hidrata en el endurecimiento, permaneciendo el resto inalterable? Esto no será serio; se trata de conocer la proporción de cal libre en el cemento que ha obrado como cemento. Los granos inalterados no juegan otro papel que las piedras del hormigón, que nadie piensa en hacer intervenir en el cálculo.

Volvamos ahora a la hidrólisis: los Sres. FERRER VIDAL y MARGARIT han hecho una pequeña experiencia destinada a probar que el cemento fundido, desleído en 100 veces su peso de agua, da una solución en la cual se puede comprobar la presencia de cal libre por la fenoltaleína.

¿Esta experiencia era muy necesaria para cualquiera que esté, aunque poco, al corriente de la química de los cementos? Los Sres. Ferrer-Vidal y Margarit ¿han olvidado los importantes estudios de LAFUMA¹, de LANSING WELLS² y de LERCH y BOGUE³? Estos autores han estudiado, por los métodos más modernos, la hidrólisis de los constituyentes de los cemen-

tos, silicatos y aluminatos, y de los cementos del comercio. Han comprobado las cifras de LE CHATELIER para los silicatos, calculado la concentración de hidrólisis para los aluminatos, determinado las constantes de equilibrio, medido los pH de las soluciones, etc. La hidrólisis de los cementos, estudiada en todos sus detalles, ha llegado a ser del dominio vulgar. Pero, precisamente por esto nadie, a la hora actual debe confundir la proporción limitada y extremadamente débil de cal en solución liberada por hidrólisis en las condiciones normales de empleo de los cementos, con las dosis importantes de cal cristalizada resultante de la hidratación del silicato tricálcico, constituyente principal de los cementos portlands.

La defensa por el gel de los cementos

Nosotros habríamos deseado discutir la cuestión tan interesante de la teoría del fraguado y del endurecimiento de los cementos. Pero no podemos abusar más de la atención de nuestros lectores. Acaso tengamos ocasión de tratar de ello más tarde. Nos limitaremos hoy a decir dos palabras de lo que conviene más especialmente a su aplicación al problema de las descomposiciones.

Los Sres. Ferrer-Vidal y Margarit encuentran en la teoría de KUHL un argumento sin réplica en favor de la indestructibilidad de los hormigones de portland: el cemento endurecido, estando al estado de gel impermeable, impide a la vez los cambios del interior hacia el exterior (hidrólisis y salida del hidrato de cal libre) y del exterior hacia el interior (entrada de iones indeseables y en particular del ión SO_3 , origen de la sal de Candlot). Es la «defensa por el gel».

Esta teoría sería muy seductora si no tuviese un defecto capital. Es que, según KUHL mismo, el gel en cuestión es un gel inestable, y que se transforma poco a poco, pero seguramente, en productos cristalizados.

Y entonces, ¿cuál es la «defensa»? Si el gel es necesario para proteger el cemento, esto quiere decir que cuando ha desaparecido el cemento debe ser atacado. Nosotros no hemos dicho nunca otra cosa.

¿Pero se dirá que esta transformación es lenta? KUHL mismo escribe que es ya clara en algunos años. Se comprenderá que es difícil en estas condiciones contar con una resistencia prolongada de las obras de portland.

APENDICE

LISTA DE ALGUNOS TRABAJOS IMPORTANTES EFECTUADOS CON CEMENTO FUNDIDO, EN EL MAR O EN TERRENOS SULFATADOS

Las varias referencias siguientes demostrarán que el cemento fundido no es empleado únicamente en Francia, ni por patriotismo (?):

OBRAS	Epoca del empleo (comienzo del trabajo)	Tonelaje de cemento fundido empleado
Túnel del Col de Bruas (Francia)...	1918	8 000
Warf de la Pointe Noire (Congo)...	1926	350
Puerto del Havre (Francia).....	1926	5 000
Puente sobre el Elorn, en Plougastel (Francia).....	1925	3 000
Trabajos del Estuario de la Gironde (Francia).....	1929	10 000

¹ LAFUMA: *Recherches sur les aluminates de calcium* París, 1925.

² LANSING WELLS: *Reaction of water on calcium aluminates*, n. 34, Bureau of Standards, Washington, 1928.

³ LERCH & BOGUE: *Studies on the hydrolysis of compounds which may occur in Portland Cement*, Bureau of Standards, Washington, 1927.

O B R A S	Epoca del empleo (comienzo del trabajo)	Tonelaje de cemento fundido empleado
Puerto de Halifax (Canadá)..... (La terminación de trabajos exigirá)	1929	14 000 10 000
Nueva fábrica de Ford, en Londres. En construcción. Tonelaje previsto.	1930	4 000
Dique seco del puerto de Cádiz (Continúan los trabajos.)	1929	3 000
Confederación Hidrográfica del Ebro. (Continúan los trabajos.)	1929	4 000
Minas de Cardona (Barcelona), de la Unión Española de Explosivos ... (Continúan los trabajos.)	1929	1 700

O B R A S	Epoca del empleo (comienzo del trabajo)	Tonelaje de cemento fundido empleado
Riegos y Fuerza del Ebro, en sus obras de Balaguer (Lérida)..... (Continúan los trabajos.)	1929	3 000
Coronación del muelle en el Puerto del Pireo (Grecia).....	1928	1 200
Reconstrucción del Puerto Duque de Aosta, en Trieste (Italia).....	1928	775
Reconstrucción del muelle de Sestri Levante (Italia).....	1929	300
Puerto de Mogadiscia (Africa).....	1929	750

Gregorio E. DE LA REGUERA
Ingeniero,
Representante general en España
de la Société Lafarge

E. RENGADE
Doctor en Ciencias
Profesor del Laboratorio Central
de la Société Lafarge

Las recientes electrificaciones de la Compañía de los Caminos de Hierro del Norte de España

Barcelona a Manresa y San Juan de las Abadesas.—Alsasua-Irún

IV

Locomotoras series 7 000 y 7 100

Características generales.—Las locomotoras de ambas series citadas poseen equipos eléctricos idénticos; su única diferencia estriba en la parte mecánica, ya que mientras en las locomotoras de la serie 7 000 todo el peso es adherente y se distribuye en seis ejes motores repartidos en dos carretones (tipo correspondiente a la notación $C_0 + C_0$), las locomotoras 7 100 poseen, además, un eje Bissel en cada extremo, siendo, por consiguiente, del tipo $1 - C_0 + C_0 - 1$.

Estas locomotoras son, en realidad, aptas para el mismo servicio, justificándose el empleo de las últimas mencionadas por la necesidad de no sobrepasar la carga de 15 toneladas por eje motor, máxima admitida por las numerosas obras metálicas existentes en la línea de San Juan de las Abadesas, siendo también muy próxima a dicha cifra—16 toneladas por eje—la carga máxima admitida por los puentes metálicos (algunos de la importancia del viaducto de Ormaiztegui) de la sección Alsasua-Irún.

Las locomotoras de la serie 7 000 (fig. 25), cuyo peso por eje es de 17 toneladas, se utilizan para los servicios de la sección Barcelona-Manresa, y preferentemente para los de mercancías. Las de la serie 7 100 (fig. 26), cuyo peso por eje motor es de 15 toneladas, se emplean en la línea de San Juan de las Abadesas para los servicios de mercancías y para los de viajeros de largo recorrido combinados con la línea de Ripoll a Puigcerdá; en la sección de Barcelona-Manresa, indistintamente con las máquinas 7 000 y para algunos servicios de viajeros de largo recorrido (más allá de Manresa), y, por último, en la sección Alsasua-Irún, exclusivamente para los servicios de mercancías.

El aumento de capacidad que se ha conseguido en las líneas citadas mediante el empleo de las nuevas locomotoras eléctricas se deduce de los datos siguientes:

En el trayecto Moncada-Tarrasa, que constituye el nudo de la sección Barcelona-Manresa, las locomotoras de vapor serie 400 de cuatro ejes acoplados, remolcaban 350 toneladas a la velocidad de 18 km por hora; las locomotoras eléctricas de ambas series 7 000 y 7 100 remolcan 500 toneladas a la velocidad de 30 km por hora. En el trayecto Beasaín-Cegama, que es también el de peores condiciones de la sección Alsasua-Irún, las locomotoras eléctricas citadas remolcan asimismo trenes de 500 toneladas de carga a la velocidad de 30 km por hora, mientras que las de vapor de las modernas series 400, 4 000 y 4 500 sólo remolcaban 340 toneladas a la velocidad de 15 km por hora. Es preciso, además, tener en cuenta que las cargas mencionadas para las locomotoras eléctricas están impuestas como límite por la resistencia de los ganchos de tracción (10 000 kg de carga)¹, y que no agotan ni mucho menos la capacidad de arrastre de dichas locomotoras.

La velocidad máxima que son susceptibles de desarrollar ambos tipos de locomotoras es de 90 km por hora, si bien las normales no pasan de 65 y 35 km por hora, respectivamente, para los servicios de viajeros y mercancías citados.

En cuanto al número de unidades en servicio, se encuentran afectas a las líneas de Barcelona 10 locomotoras de la serie 7 000 y 12 de la serie 7 100; en la sección Alsasua-Irún se utilizan 15 locomotoras de la serie 7 100.

Todas ellas se componen de dos *trucks* o carretones iguales (de tres ejes motores cada uno en las locomotoras 7 000 y de tres ejes motores y uno libre en las 7 100), sobre los que descansa la caja, que a su

¹ Véase el número anterior, página 225.

¹ Esta reducida carga es, hoy por hoy, en España, un tope impuesto a las posibilidades de la tracción eléctrica.