

Los cementos para trabajos en el mar

Con este título, y firmado por los señores D. G. Esteban de la Reguera y D. E. Rengade, técnicos ambos de la casa S. A. des Chaux et Ciments de Lafarge et du Teil, ha aparecido en la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, correspondiente a 1.º de noviembre de 1930, un artículo en el cual se hace referencia a un trabajo firmado por el que aquí suscribe en primer lugar.

En dicho trabajo se hacían afirmaciones que han servido a los autores del artículo en cuestión para fundamentar una serie de consideraciones acerca del interesantísimo problema de la acción del agua de mar y de las aguas selenitosas sobre los hormigones fabricados con distintos cementos para llegar finalmente a la conclusión (natural y lógica para sus autores) de que el único cemento que resiste impávidamente aquella destructora acción es el cemento fundido de su fabricación.

Al contestar a las mencionadas alusiones, importa, en primer lugar, hacer constar que existe alguna diferencia de concepto entre lo que se atribuye al que suscribe y lo realmente publicado en dicho artículo. Lo expuesto entonces y sostenido ahora es claro y sencillo: Don Eduardo Castro, en un artículo muy interesante publicado el mes anterior en la revista *Cemento*, decía que la cal libre en los cementos es una de las causas, tal vez la principal, de su alterabilidad en el agua de mar y en las aguas selenitosas. *Partiendo de esta afirmación* decía entonces el que suscribe: «¿Cómo se explica que pensando así el Sr. Castro, y siendo uno de los miembros que más han colaborado en la redacción del nuevo Pliego nacional de condiciones publicado en febrero último, no haya sido incluida entre esas condiciones la prueba de la cal libre (CaO), conociéndose como se conocen en la actualidad métodos rápidos y seguros para poder apreciar con exactitud la dosis que de ella puede contener un cemento?»

Esta insinuación en favor de la adopción de un ensayo para la determinación de la cal libre tuvimos el gusto de verla casualmente reproducida en la revista norteamericana *Pit & Quarry*, de 8 de octubre último (página 80). Otros trabajos han aparecido en diferentes países en apoyo de la misma idea; por lo que se refiere a Norteamérica, citaremos, además del anterior, otro artículo titulado «La cal libre en el cemento portland», de S. L. Meyers (*Rock Products*, número 24, 23-XI-1929). En él, conforme detallaremos luego, se recomienda el ensayo diario de la cal libre que pueda contener el clinker. En Alemania, el doctor Haegermann, director del Laboratorio de Karlsruhorst y conocida personalidad entre los técnicos del cemento, ha publicado recientemente un interesantísimo trabajo, cuya detenida lectura recomendamos a todo el que se interese por estas cuestiones; en la revista alemana *Zement* (núm. 42, de 16-X-1930) expone el resultado de sus investigaciones; según ellas, los cementos que tienen más del 2 por 100 de cal libre no resisten ya la prueba a la ebullición, y si pasan del 4 por 100, ni siquiera la del agua fría.

Todo lo cual demuestra la importancia de la determinación cuantitativa de la cal libre (CaO), y creemos justifica sobradamente la antes mencionada indicación.

Igualmente, al referirse el que suscribe a lo manifestado por el Sr. Castro en su citado artículo acerca de los tipos de cementos más adecuados, a su juicio, para ser empleados en el agua de mar, decía que el ideal lo constituirá un cemento que, poseyendo todas las características del portland (o de los supercementos), se hallare totalmente exento de cal libre (es decir, de CaO libre) y fuere de fabricación y precio corrientes.

Esto es lo único expuesto en el aludido trabajo de la revista *Cemento*; no está, pues, ajustado a la realidad lo que en el mencionado artículo de los señores De la Reguera y Rengade se atribuye al que suscribe.

Un cemento portland de las características especificadas no es difícil de obtener; cuando un portland está bien dosificado y bien cocido no debe contener cal libre en cantidad apreciable.

Corfirmando la posibilidad de esta solución están las innumerables obras ejecutadas en los puertos con cemento portland corriente, desde fechas remotas y sin que en ellas se haya observado deterioro alguno.

Por cada obra marítima importante que el cemento aluminoso pueda presentar en su historial, el cemento portland las puede presentar a centenares, aun contando solamente las de un éxito indiscutible; y si en las estadísticas no hiciésemos figurar las pertenecientes a Francia y a sus colonias y protectorados, donde el factor económico ha sido tal vez subordinado a un interés patriótico, el cemento aluminoso apenas si podría presentar obra alguna de importancia que le pudiese servir de referencia suficientemente antigua entre las obras marítimas.

Se nos observará que en algunos casos los hormigones de portland han sufrido deterioros en obras sumergidas en el mar o en aguas peligrosas; pero ¿por qué razón debe atribuirse al portland de un modo único y exclusivo la responsabilidad de tales deterioros, cuando en la preparación y puesta en obra de los hormigones intervienen factores de tan variada naturaleza y cuya trascendencia es muy superior a la de las insignificantes dosis de cal libre que puede haber en el cemento, si éste es como debe ser?

Los mismos Sres. De la Reguera y Rengade, al final de su trabajo, y al proponer el empleo del cemento fundido, preconizan asimismo la *compacidad* de sus morteros. ¿No es esto un tácito reconocimiento del peligro que ofrece una dosificación baja y una deficiente fabricación de los hormigones?

Es natural: lo mismo si se fabrica el hormigón con cemento fundido que si se fabrica con cemento portland se corre el riesgo de un percance cuando las dosificaciones son demasiado áridas y el hormigón no resulta suficientemente compacto. Precisa, por lo tanto, ante todo, que los hormigones reúnan esas condiciones indispensables. En esto estamos de acuerdo.

Hasta aquí alcanza la contestación a lo que hace referencia al tema planteado por el que suscribe en el artículo de la revista *Cemento*, y que no ha sido fielmente interpretado por los Sres. De la Reguera y Rengade. Pero ya que dichos señores aprovechan la oportunidad para hacer una serie de manifestaciones destinadas a hacer prevalecer el cemento fundido

en detrimento de materiales más acreditados y seguros, aprovechamos también esta ocasión para refutarlas, valiéndonos, más que de nuestros modestos conocimientos, de las autorizadas opiniones de los maestros en tales materias, a fin de que, avaladas por prestigiosas firmas, nuestras afirmaciones tengan todo el valor que les presta el ser fruto de interesantísimos estudios y prolongada experiencia.

Nos anima a ello también una carta que hemos recibido recientemente de una de esas prestigiosas personalidades de fama mundial; en ella se hacen, entre otros, los siguientes comentarios al artículo de los Sres. Rengade y De la Reguera:

... «El artículo de la casa Lafarge induce a error, puesto que confunde los conceptos de cal libre (CaO) y de hidrato cálcico (CaO₂H₂)»...

... «Es una afirmación gratuita, más aún, reconocidamente falsa, que la reacción del cemento portland con el agua de mar y otras aguas agresivas sea debida principalmente al hidrato cálcico existente en el cemento endurecido»...

Hace asimismo una terminante afirmación relativa a la supuesta influencia de las adiciones puzolánicas al cemento portland, a las que reconoce únicamente un efecto puramente mecánico, sin el más mínimo efecto químico sobre el hidrato cálcico.

Una vez comentados algunos de los puntos esenciales del artículo de los Sres. De la Reguera y Rengade, volveremos sobre tales afirmaciones fundamentales, así como nos extendemos un poco sobre las ideas que hoy día prevalecen entre los técnicos del cemento a propósito de tales materias, y que han venido a sustituir a otros conceptos anticuados y erróneos que no merecen ya ser acogidos en ningún trabajo verdaderamente científico.

Atacabilidad del cemento fundido por las aguas sulfatadas

En su trabajo, lo mismo que en algunos anteriores, los Sres. De la Reguera y Rengade, al tratar, como de un dogma indiscutible, de la *inalterabilidad absoluta* del cemento aluminoso bajo la acción de las aguas agresivas, mencionan ensayos y certificados, así como nombres autorizados. No podemos poner en duda la legitimidad de los resultados de tales ensayos, avalados por respetables firmas, ni tampoco las aseveraciones de técnicos dignos de nuestra mayor consideración, pero tampoco podemos dudar de lo que hemos visto bien de cerca, esto es, de los resultados obtenidos en nuestro propio laboratorio, en ensayos efectuados por químicos imparciales que han comprobado, por ejemplo, que el cemento aluminoso *unas veces resistía la prueba de Anstett y otras veces no la resistía*, dando en estos casos resultados marcadamente inferiores a los que daba un portland de fabricación corriente.

De todo ello hemos tenido que colegir forzosamente que, aun aceptando la hipótesis de que el cemento aluminoso *teóricamente debe resistir*, resulta en la *práctica que muchas veces no resiste* la acción del sulfato cálcico, por lo menos en las muy duras condiciones en que tal acción se comprueba con el ensayo de Anstett. En cambio, es fácilmente comprobable que son varios los cementos portland de tipo normal que lo soportan. Desde luego conviene observar que la mayor o menor resistencia a la prueba de Anstett no siempre guarda un paralelismo perfecto con las

dosis de cal libre en el cemento: forzosamente intervienen otros factores secundarios que pueden modificar el resultado.

Invitamos a cuantas entidades dispongan de un laboratorio apropiado a que repitan particularmente y por su parte tales ensayos, no con muestras seleccionadas de éxito seguro, sino con los cementos corrientes en el mercado, tanto portland como aluminosos, siguiendo precisamente el procedimiento especificado por la misma casa Lafarge en su folleto *Ciment fondu.—Ciment électrofondu*, y que es el mismo que en el antes mencionado artículo de la revista *Cemento*, recomendábamos se adoptara para averiguar con prontitud la mayor o menor conveniencia del empleo de un cemento en circunstancias o terrenos peligrosos.

Irregularidad e inconstancia de características del cemento fundido

La única consecuencia que de la diversidad de resultados obtenidos deducíamos y seguimos deduciendo es que el cemento aluminoso, sin duda *por las dificultades o irregularidades de su proceso de elaboración, no ofrece en grado suficiente la garantía de unas características constantes con las que es indispensable contar en obras de carácter tan delicado como las obras marítimas, especialmente las de los puertos y las que deben cimentarse en aguas selenitosas.*

El mismo M. J. Bied, inventor del cemento fundido, en su obra póstuma *Recherches industrielles sur les chaux, ciments et mortiers* (Dunod, París, 1926) da como composición de los cementos aluminosos análisis que varían entre límites bastante amplios. Dice así:

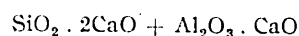
... «Su análisis varía entre límites más extensos que para el cemento portland artificial; pueden resumirse en el cuadro siguiente:

SiO ₂	5 %	10 %	15 %
Al ₂ O ₃	45 %	40 %	35 %
Fe ₂ O ₃	15 %	10 %	15 %
CaO	35 %	40 %	35 %

¿Qué constancia de características puede exigirse a cementos de composición tan variable?

La composición del cemento aluminoso y la del cemento portland

El cemento aluminoso no está tan sólo compuesto por aluminatos cálcicos, sino que, aun dejando aparte el hierro y sus compuestos, entran también en su composición los silicatos, como ya se adivina con sólo examinar las importantes dosis de sílice en él contenidas. M. Bied así lo reconoce al afirmar que la composición de los cementos fundidos responde sensiblemente a la fórmula



Contiene, pues, silicato dicálcico lo mismo que el cemento portland.

M. Bates, que en los Estados Unidos (en el Bureau of Standards, de Washington) estudió también los cementos fundidos, admite como uno de sus componentes principales el sílico-aluminato cálcico

Según dicha teoría,

...«el endurecimiento tiene lugar por la *contracción y desecación* (aun en el seno del agua) *de una masa de gel*; si bien pueden contribuir algo y en forma secundaria determinados procesos de cristalización, éstos no deben representar en modo alguno la parte esencial del problema, ya que en tal caso las micro-fotografías de cementos endurecidos pondrían de manifiesto las plaquitas y agujas cristalinas que aparecen como resultado de los procesos de cristalización en los cementos, cuando éstos se tratan con exceso de agua.»

Sigue diciendo el profesor KÜHL, en su libro *Zementchemie in Theorie und Praxis*:

«El agua forma con los elementos superficiales de las partículas de cemento una masa esponjosa de gel que es la que suministra la primera cohesión entre dichas partículas. Este gel, que al principio tiene escasa consistencia, se va concentrando a medida que va perdiendo el agua. Aparte de la pequeña influencia que en tal concentración pueda tener la desecación hacia el exterior en el caso del fraguado al aire, la verdadera causa de la eliminación del agua de la masa de gel y, por consiguiente, de la contracción y consolidación que de ello se deriva es la denominada *absorción interna*. Con esta expresión se quiere significar que los núcleos de los gránulos de cemento todavía no atacados van progresivamente hidratándose; se forman entonces nuevas masas de gel, cuya hidratación se efectúa a expensas del agua contenida en el gel exterior, que de este modo viene obligado a concentrarse y contraerse. Este proceso va progresando hasta tanto que el núcleo ha reaccionado en toda su masa. En los cementos en que el molido no es muy fino, tal proceso dura años.»

No entraremos en detalles acerca de la subsiguiente transformación en productos cristalinos del gel desecado, transformación lenta que exige años enteros antes de poder ser apreciada con el microscopio polarizador.

Según lo dicho, no interviene en el proceso de formación de los hidrosilicatos e hidroaluminatos más agua que la primera fijada por la formación de las primeras masas de gel exteriores. Esto explica perfectamente la *ausencia de una rápida difusión del hidrato cálcico* hacia el agua ambiente; explica también que, manteniéndose *confinada y sin intercambio con el exterior* la fase líquida del coloide formado, puedan efectuarse las reacciones del fraguado, lo mismo si éste se efectúa en el aire húmedo que si se efectúa en el seno de las aguas, y lo mismo si éstas son dulces que si son saladas. La acción disolvente del agua exterior o la acción química de las sales que contiene, sólo la superficie más externa del gel debe soportarla, salvo que una acción mecánica o física de un orden cualquiera (corrientes de agua, acciones capilares, etc.) provoque el arrastre de dichas capas de defensa y *deslave* el mortero formado. Los hormigones demasiado áridos adolecen de esta clase de defectos; la escasez del elemento coloidal de trabazón, ante la gran masa de agregado inerte impide la debida continuidad de las capas de protección y acarrea la destrucción de la masa.

La defensa por el gel

Esto es lo que ocurrió en los primeros tiempos del empleo del portland en las obras de los puertos: los ingenieros constructores, entusiasmados ante las resistencias adquiridas por los bloques de hormigón a las pocas semanas, y sin tener en cuenta consideraciones del orden de las que preceden, por el desconocimiento que entonces había de los procesos ver-

daderos del fraguado y por la carencia de datos experimentales seguros, iban reduciendo progresivamente las dosificaciones, llegando a cifras tan peligrosas como las de 150 kilogramos de cemento por metro cúbico de hormigón.

Así se construyeron algunos puertos y así se han tenido bastantes fracasos, siendo milagroso que haya algunos de los así contruidos que se mantengan todavía en buen estado, a pesar de todo.

Lo dicho de la acción disolvente del agua debe decirse, por otra parte, de la acción de los iones contenidos en ella.

Cierto es que hay algunos aluminatos cálcicos que tienen mayor susceptibilidad que otros para la formación de la temida sal de Candlot (el famoso *bacilo* del cemento). En cambio, los hidrosilicatos y ferritos cálcicos que forman gran parte de los geles de protección de los gránulos del cemento portland fraguado no son víctimas de esta acción. Es materia sobre la cual todavía no se ha dicho la última palabra por tratarse de fenómenos de índole sumamente compleja. M. Bied, en su obra tantas veces citada, dice muy bien:

«¿Cuál es la acción de los sulfatos sobre los aglomerantes hidráulicos? — *Adhuc sub iudice lis est.*»

Dice a continuación que en un artículo, cuyo autor no menciona, se atribuye una importancia enorme al *cloro-aluminato de cal*, o sea el $Al_2O_3 \cdot 3CaO \cdot 2CaCl_2 \cdot 10H_2O$; cosa que vendría a explicar los resultados hallados experimentalmente por la Sociedad Lafarge, según los cuales en el agua de mar *interesa más disminuir la alúmina que disminuir la cal; mientras que en las aguas únicamente sulfatadas es más interesante reducir la cantidad de cal presente. La alúmina libre en exceso no representa, pues, un elemento protector, sino que podría llegar a ser todo lo contrario*, cuando intervienen los cloruros. Es mucho más segura la protección que produce la sílice gelatinosa y los hidrosilicatos coloidales; no se conocen compuestos peligrosos derivados de la sílice, ni con los cloruros ni con los sulfatos.

Los cementos portland bien preparados y bien empleados *disponen de esa defensa*, así como de la que le proporcionan los compuestos férricos y de otra naturaleza, acerca de lo cual sería aún prematuro hablar, debiendo sólo adelantarse la prometedora impresión que dan ya los estudios y ensayos realizados y que se siguen realizando.

La *protección coloidal* es, según todo lo dicho, la verdadera defensa de los cementos durante su fraguado y su endurecimiento: primero, contra la *disociación por hidrólisis* (que amenazaría lo mismo los cementos aluminosos que los portland); segundo, contra el *éxodo* de las soluciones concentradas en cuyo seno se produce el endurecimiento (tanto en unos como en otros cementos), y, finalmente, contra la *entrada de los agentes destructores* (cloruros, sulfatos, etcétera, que, como hemos visto, atacan en mayor o menor escala también a los cementos aluminosos). Esta entrada, según Bied (obra citada), *va siempre precedida* de la difusión del hidrato cálcico hacia el exterior y, por consiguiente, de la ininterrumpida hidrólisis de los componentes del cemento; evitando ésta se evita aquélla. Dice haber comprobado personalmente, sobre muestras procedentes del Arsenal de Dakar, que en todos aquellos casos en

que, como consecuencia de una economía exagerada el constructor empleaba arena mala u hormigón mal hecho, se observaba dicho éxodo de la cal del interior al exterior, y sólo se podía evitar el peligro haciendo, cuando aún era tiempo, inyecciones de cemento. Siempre yendo a parar al mismo resultado: a buscar la protección por el gel. La misma eficacia que se atribuye a algunas adiciones puzolánicas para mejorar los cementos (o mejor aún sus morteros) tendría su explicación, mejor que en la avidez por la cal, en la aptitud de tales puzolanas para formar precipitados coloidales de sílice o silicatos gelatinosos que son los que proporcionan la verdadera protección creando una barrera entre los compuestos cálcicos y aluminosos de la masa del cemento y los agentes exteriores que los destruirían si tuvieran acceso hasta ellos.

El cemento aluminoso recurre también a dicha protección, como no puede menos de suceder siendo hidrolizable como el portland y como todos los cementos; en efecto, no es difícil de comprobar la presencia de una película blanca coloidal de gel de alumina que lo recubre, y que procede indudablemente de la hidrolización de los aluminatos.

Conclusiones

Mucho queda por estudiar en el campo del endurecimiento de los cementos, yaun pueden evolucionar las ideas sobre esta materia, de la misma manera que han cambiado radicalmente en estos últimos años. Pero por encima de las teorías están los hechos, y éstos demuestran que en las obras marítimas y aguas selenitosas, los cementos portland bien elaborados y bien empleados dan resultados excelentes y ofrecen dos ventajas indiscutibles sobre los cementos especiales: *primera*, ofrecen la garantía de una constancia de composición y de resultados indispensables en obras de importancia y de responsabilidad; *segunda*, su precio más bajo favorece el empleo de mezclas más ricas, huyendo de economías mal entendidas de material, que son el verdadero peligro en las obras marítimas y lo que ha dado lugar a la casi totalidad de los fracasos que se lamentan.

J. S. FERRER-VIDAL GUELL
Gerente de la Compañía General
de Asfalto y Portland «Asland»

Adrián MARGARIT
Ingeniero Director de la Sección
de Investigaciones científicas de la
Compañía «Asland»

Una instalación elevadora de aguas residuales empleando el aire comprimido

Recientemente se ha puesto en servicio el alcantarillado de la Línea de La Concepción (Cádiz), que presenta la particularidad de poseer cuatro estaciones elevadoras, accionadas por aire comprimido. Su descripción es el objeto de este artículo.

La Línea es una población bastante extendida y muy llana, situada a lo largo de la bahía de Algeciras; el desagüe de su red cloacal debía hacerse al mar libre y no a la bahía; como consecuencia, el desnivel utilizable era muy pequeño; la longitud de colectores,

grande, y por ello resultaba imposible que la evacuación se realizase por gravedad, si se daban a las canalizaciones pendientes adecuadas, a fin de obtener velocidades suficientes para que no se produjeran sedimentaciones. Si se disponía una sola elevación final, se precisaba que los colectores en la parte próxima a ella estuviesen relativamente profundos y se desarrollasen en terrenos de arena finísima, situados bastante por bajo del nivel del mar; por consiguiente, la construcción hubiera sido cara y la explotación

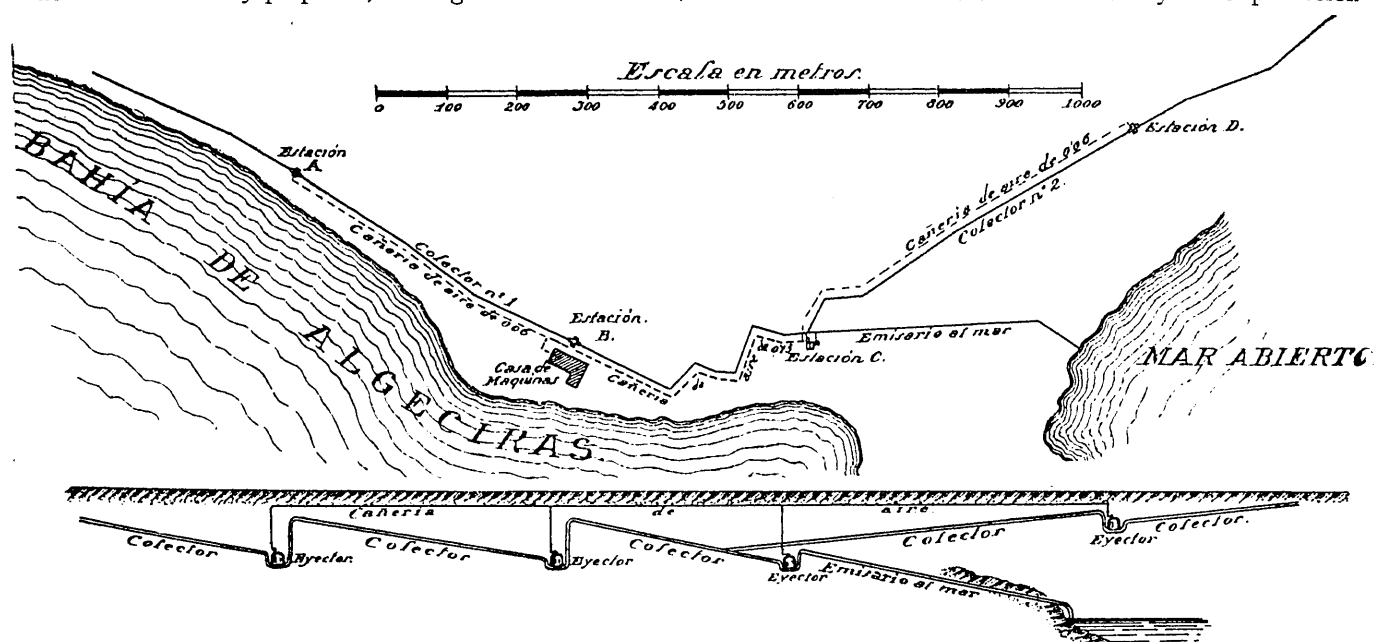


Fig. 1.ª.—Esquema de planta y perfil longitudinal.