

de acero por tensión y de cubos de piedra por compresión.

Como instalación más reciente de este Laboratorio Central, vió S. M. la nueva sala destinada a ensayo de materiales bituminosos, que tanta aplicación tienen en los firmes especiales. El profesor D. Manuel Aguilar, conde de Casa-Rul, que actualmente es representante de los países de habla española en el Comité internacional que se ocupa de unificar y simplificar esta clase de ensayos, explicó el funcionamiento de los aparatos adquiridos para ellos este año por la Escuela.

Terminada la visita, que duró cerca de dos horas, y momentos antes de abandonar el local, Su Majestad el Rey, volviéndose al Director y profesores que le seguían, dijo:

«La Escuela me ha producido una gratísima impresión, y al despedirme debo decirles que sigáis adelante, para llegar a que sea la primera del mundo. Ya lo son en mucho los ingenieros españoles. Para ello, contad siempre con mi ayuda.»

Al salir al jardín para subir al automóvil, los 220 alumnos, que allí se congregaron, prorrumpieron en vivas al Rey, al que, además, aplaudieron calurosamente.

En cuanto partió el automóvil real, el ministro de Fomento abrazó al Director de la Escuela, para felicitarle, y los alumnos dieron vivas a su Ministro y a su Director. Con análogos vítores fueron despedidos los directores generales de Obras públicas y de Ferrocarriles.

Terminaremos esta reseña de la visita regia a la Escuela de Caminos, reiterando a S. M. la gratitud del Cuerpo Nacional de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, ya que éste se siente enaltecido con todo lo que eleve el prestigio de su Escuela especial, y es indudable que los elogios sinceros tributados por el Rey de España, y difundidos por la Prensa periódica, contribuyen poderosamente a acrecentar la fama de que goza nuestro glorioso Centro de enseñanza.

Los aglomerantes en las obras marítimas

I

INTRODUCCIÓN

Planteamiento del problema

En las obras de fábrica marítimas se han empleado toda clase de productos hidráulicos: cal ordinaria mezclada con puzolana en vez de arena; cementos naturales, generalmente de fraguado rápido; cales hidráulicas y los llamados cementos grappier; cementos portland artificiales ordinarios (1); mezclas varias de cales, cementos y materias puzolánicas, y, finalmente, los cementos llamados aluminosos o fundidos, de introducción relativamente reciente.

Los resultados obtenidos han sido muy variables y, en general, poco satisfactorios. La acción frecuentemente violenta de las aguas del mar, favorecida en algunos casos en sus efectos destructores por las arenas y gravas de las playas, los choques de los cuerpos flotantes, el efecto particularmente perjudicial de las heladas en los climas fríos y, más que nada, las reacciones químicas que se producen al contacto del agua y aun del aire marinos, provocan la disgregación de los morteros y hormigones y la oxidación de las armaduras metálicas, a veces muy rápidamente, pero, por lo general, en plazos largos, que han excedido en algunos casos de treinta años en los hormigones macizos.

Con el advenimiento del cemento portland, promotor de un progreso extraordinario y trascendental en las artes constructivas, pudo creerse quedaba resuelto de un modo satisfactorio el problema de la estabilidad de los morteros en el mar y, realmente, los hormigones formados con aquel aglomerante han sido utilizados en los puertos cada vez más exclusi-

vamente y puede decirse que, en no pocos casos, con éxito al parecer completo.

Cediendo más que nada a esa corriente que afectaba a toda clase de construcciones, y con el propósito de obtener hormigones de resistencia mecánica elevada, han sido relegadas al olvido en gran parte las cales hidráulicas que en el Mediterráneo, sobre todo, llegaron a gozar de gran favor, y, lo que es más de lamentar, todos los cementos naturales, de los que una experiencia no escasa había demostrado la inalterabilidad química de algunos. Y no sólo en maniposterías y hormigones ordinarios se ha venido utilizando el portland casi exclusivamente, sino que, pocos años después de la invención del hormigón armado, los constructores tuvieron poco reparo en admitir esa nueva fábrica en las obras marítimas, suponiendo que su resistencia contra la acción del agua del mar sería satisfactoria si se adoptaban precauciones adecuadas.

No tardaron, sin embargo, en señalarse en todas partes disgregaciones de los morteros y hormigones hechos con cemento portland y con otros aglomerantes en los parajes y circunstancias más diversos, provocando la ruina o el quebrantamiento de algunas construcciones y sembrando justificada alarma entre los ingenieros, pues no se conocían de un modo indudable las causas de los deterioros ni los medios de evitarlos.

Para darse cuenta de la importancia que tales defectos alcanzan, baste citar una estadística oficial, formada en 1922, relativa a setenta y cuatro estructuras de hormigón, hechas con cemento portland, en parajes abrigados de las costas de los Estados Unidos de Norteamérica, comprendiendo obras de todas edades, de las cuales treinta y nueve presentaban deterioros más o menos avanzados, y eso que veinticuatro de ellas habían sido construidas después de 1915.

La estabilidad química de los productos hidráulicos

(1) Estos aglomerantes se designarán en lo que sigue con la denominación de cementos portland o simplemente portland.

cos en el mar ha sido objeto de profundos estudios y prolongadas investigaciones; pero, por desgracia, a la hora presente no puede aún afirmarse se haya llegado a conclusiones sobre la materia generalmente aceptadas. Para unos, la descomposición del cemento portland y la disgregación que produce en las fábricas en que entra, cuando no es engendrada por las acción de las heladas, obedece siempre a mala calidad del cemento o de los otros materiales utilizados, a su defectuoso empleo o a la conjunción de estas causas. Para otros, el portland, como otros aglomerantes hidráulicos, es siempre atacable, más o menos fácilmente, por las soluciones de las sales marinas, y en vano será pretender que las construcciones en puertos y costas resistan íntegramente mientras no se disponga de un cemento immune a tales acciones.

La primera opinión parece prevalecer aún hoy en Inglaterra, mientras que en Norteamérica, donde era general hasta hace pocos años, va perdiendo rápidamente adeptos, pudiendo afirmarse que no la comparten ya a la hora presente la mayor parte, por no decir la casi totalidad de los ingenieros, químicos e investigadores del mundo entero.

Debe consignarse, sin embargo, que no son pocos los que, aun admitiendo en principio la vulnerabilidad química del portland sometido a la acción del agua marina, consideran que pueden construirse con él fábricas prácticamente indestructibles o, por lo menos, muy duraderas, siempre que aquel material sea de buena calidad y se adopten las precauciones adecuadas, especialmente si se trata de estructuras constituidas por hormigón en masa y no expuestas a la acción violenta de las olas ni a otros desgastes.

A más de las aguas marinas, a que el presente trabajo se circunscribe, ejercen sobre los cementos temible acción destructora las selenitosas y, en general, las alcalinas y sulfurosas, y también las que contienen fuertes dosis de ácido carbónico y las que son extraordinariamente puras. Además, otras varias sustancias son igualmente capaces de atacar químicamente al portland.

Es de notar que, con la excepción de ciertos cementos naturales y algunos de los llamados mezclados, y muy probablemente también los aluminosos, todos los productos hidráulicos se hallan tan expuestos como el portland a los ataques de las aguas indicadas.

Objeto del presente trabajo

En materia de composición química de los cementos, antes y después del fraguado, y de las reacciones químicas que se producen en éste y en el período subsiguiente del endurecimiento, así como en lo relativo a las reacciones químicas de las aguas marinas sobre los productos hidráulicos, las opiniones que se sustentan en la actualidad, después de un siglo de estudios e investigaciones, son no poco dispares y, a lo que parece, basadas algunas veces, más bien que en hechos bien comprobados y de interpretación inequívoca, en conjeturas diversas, más o menos fundadas y razonables.

No existe mayor unanimidad aun respecto a la estructura interna del cemento y a la causa determinante de la resistencia que alcanza.

Falta, pues, en realidad, a fabricantes de cementos y constructores de obras marítimas, un guía

científico que marque el camino del éxito y de la eficacia para resistir los destructores efectos de las aguas salinas. Y como, evidentemente, no es posible suspender la construcción de aquellas obras, porque responden a necesidades públicas inaplazables y con frecuencia trascendentales, no cabe tampoco, en las que se van ejecutando, dejar de adoptar cuantas precauciones se consideren razonablemente eficaces para prevenir, en la medida de lo posible, nuevos fracasos que, aparte la infructuosa pérdida de riqueza que suponen siempre, son causa de temores justificados y de perjuicios, a veces considerables, para el tráfico marítimo.

El presente trabajo, basado sobre todo en el estudio de las publicaciones de los últimos años sobre el empleo en el mar de los aglomerantes, persigue, como principal objetivo, deducir y señalar las reglas y precauciones de orden práctico que, hoy por hoy, puedan estimarse más justificadas para prevenir o, por lo menos, aminorar la destrucción de los morteros. Es de esperar que no ha de pasar mucho tiempo sin que las investigaciones, actualmente en vías de realización en muchas partes, acaben por arrojar plena luz sobre la cuestión y proporcionen soluciones satisfactorias de orden práctico al viejo y arduo problema de la estabilidad química de los aglomerantes empleados en el mar.

PROCESO QUÍMICO DE LA DESCOMPOSICIÓN

Composición química de los productos hidráulicos

Lo que a continuación se expone se refiere principalmente a los cementos portland, aunque es aplicable en gran parte a los demás productos hidráulicos, con la excepción de los cementos aluminosos.

Se admite generalmente que la composición del portland está formada esencialmente por silicatos y aluminatos cálcicos.

Algunos de los investigadores más modernos suponen que esos cuerpos son un aluminato tricálcico y los silicatos bicálcico y tricálcico, atribuyéndose a este último componente un papel preponderante en lo que a la resistencia se refiere. En contacto con el agua, los dos primeros elementos citados no desprenden cal libre, mientras que el último se transforma, más o menos completamente, en hidrato de cal y en silicato monocálcico, según unos, o sílice hidratada, según otros.

Algunos químicos asignan al portland composición fundamental distinta a la indicada. Lafuma ha expuesto últimamente que el *clinker* de los cementos está formado por mezclas de silicatos monocálcicos, bicálcicos y tricálcicos y de cuatro distintos aluminatos cálcicos.

El mismo investigador supone que los cementos aluminosos forman, durante el fraguado y endurecimiento, silicato monocálcico y aluminato bicálcico hidratados, con desprendimiento de hidrato de alúmina en vez de cal, como en el portland.

Alteraciones químicas en los productos hidráulicos

La cal libre que se desprende durante el fraguado y la que el cemento puede contener antes de su empleo se combina con el ácido carbónico contenido en el aire o disuelto en el agua, formándose en el

interior o en la superficie de los morteros y hormigones carbonato de cal.

Según la opinión más generalizada, la cal libre es también atacada por las sales marinas, especialmente o exclusivamente por el sulfato de magnesia, al ser introducidos los morteros en el mar, formándose sulfato de cal con depósito de magnesia, según unos, y produciéndose, según otros, además, sulfoaluminato de cal al combinarse el sulfato calizo con los aluminatos.

De todos modos esas reacciones quebrantan la resistencia, bien por el empobrecimiento que en la masa produce la exudación de los cuerpos solubles formados, bien por un efecto de expansión de los nuevos compuestos, que ocupan mayor espacio que los cuerpos de que proceden, o bien, en fin, por sustituir a las materias con poder cementicio otras que no tienen esta cualidad.

Lo cierto es que la composición química de los morteros de cemento después de ser atacados por las aguas del mar difiere mucho de la que tenían antes, encontrándose abundantes cantidades de magnesia que, sola o con la cal, es el principal elemento de la sustancia blanca, de los característicos filamentos y placas que se presentan en la superficie y son reveladores de una descomposición química más o menos avanzada.

En los cementos no aluminosos, después de endurecidos y no atacados, parece que sólo se encuentra cal, silicato monocálcico y aluminato tricálcico, todos en estado de hidratos.

Relaciones entre la composición química y la resistencia a la descomposición

Hasta el presente no se ha comprobado exista una relación bien definida, que pueda ser de aplicación práctica, entre la composición química de los cementos y su resistencia a la acción del agua del mar. Vicat estableció que, con índice de hidráulicidad igual o superior a la unidad, los productos hidráulicos resisten bien, y aunque esta condición sigue hoy considerándose correcta, no la cumplen los cementos fabricados corrientemente, con excepción, si acaso, de los aluminosos, cuya estabilidad química parece, en efecto, indudable.

Hay que consignar a este propósito, como repetidamente se ha hecho notar, que cementos portland de distintas marcas, y aun a veces los de una misma fábrica, sometidos, en condiciones iguales, a la acción de las aguas marinas o a soluciones de sulfato de magnesia, han dado resultados diferentes, pues mientras algunos se han conservado sin deterioro en largos plazos de observación, otros se han descompuesto, más o menos rápidamente.

También ha surgido la sospecha de que los antiguos no resisten tan bien como los modernos cementos portland, en cuya fabricación se han ido introduciendo las modificaciones adecuadas para alcanzar altas resistencias mecánicas, observación que no comprende los llamados supercementos, cuyos resultados en el mar son aún desconocidos, aunque, dadas sus altísimas resistencias y lo bajo de su índice de hidráulicidad, no pueden inspirar mucha confianza a este respecto.

Se ha creído observar en distintas partes que los cementos fabricados en el período de la guerra han dado resultados muy desiguales, algunos francamente malos, pudiendo sospecharse si a ello han contribuido la mala calidad de algunos carbones empleados, la falta de suficiente ensilado, el exceso de yeso y algún menor cuidado en la fabricación en ciertos momentos.

Recientemente algunos ingenieros conceden gran importancia a la proporción de sílice combinada del portland, pues admiten que su resistencia química a la acción de las aguas del mar es suficiente cuando aquella proporción excede de 23 por 100. Es punto acerca del cual no se han encontrado datos relativos a empleos bastante numerosos y antiguos para que puedan constituir una garantía seria.

Desde los trabajos de Le Chatelier se había creído, generalmente, que una alta dosis de alúmina había de resultar perjudicial; pero, aparte de que esa opinión no se ha visto confirmada para los cementos ordinarios en no pocos casos, los aluminosos parecen desmentirla decididamente.

Alguna duda se ofrece acerca de la cantidad de sulfato de cal que, como máximo, deba considerarse admisible en la composición de los cementos portland a emplear en el mar, no faltando quienes afirman que aquel elemento juega un papel principal en el reblandecimiento que en los morteros se observa a veces; por eso se recomienda la supresión del yeso, si fuese posible, y, en todo caso, que el límite del tanto por ciento de ácido sulfúrico se restrinja a lo que impongan inevitablemente las necesidades de la fabricación. En ese concepto los pliegos de condiciones actuales de recepción de cementos portland acaso son demasiado tolerantes cuando se trata de obras marítimas, especialmente el alemán y el nuestro.

De la resistencia química a la acción de las aguas del mar de un cemento determinado pueden dar indicaciones utilísimas las pruebas aceleradas con soluciones de sulfato magnésico. Las de deformación en frío y en agua hirviendo, que revelan la posible existencia de elementos expansivos, son también de mucha importancia, sobre todo sin la adición de puzolanas.

José NICOLÁU

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.