

# Los aglomerantes en las obras marítimas

V

## Cura del hormigón <sup>1</sup>

La cura del hormigón hecho fuera del agua (y cuanto del hormigón se diga es aplicable al mortero), es decir, su progresivo endurecimiento en condiciones favorables, es tan necesaria como la adecuada proporción y buena calidad de sus componentes o la correcta fabricación. Especialmente en las mezclas en que entren puzolanas o cementos aluminosos, la cura prolongada es verdaderamente esencial.

Debe realizarse guardando el hormigón, desde el momento en que fragua, en agua o en una atmósfera constante de humedad intensa, evitando sobre todo las desecaciones prematuras, permanentes o alternadas, al abrigo del sol y del viento, y preservándolo muy especialmente de las heladas.

El tiempo de cura podrá acortarse donde la humedad atmosférica sea ordinariamente grande y permanente, pero no convendrá baje nunca de una semana. En climas secos o con endurecimientos lentos ese plazo debe ser mayor, conviniendo con frecuencia ampliarlo hasta un mes, no faltando quien lo haya llevado hasta dos. Particularmente para mezclas puzolánicas y cementos aluminosos, y más en climas algo calurosos y secos, el plazo de cura, que nunca podrá parecer excesivo, debe prolongarse hasta que el endurecimiento pueda llegar a ser casi completo.

La humedad necesaria puede obtenerse mediante riegos directos, continuados o muy frecuentes, pero es preferible, a ser posible, envolver el hormigón en telas, arena o algo equivalente, empapadas constantemente en agua, o bien sumergirlo por entero en ella.

La cura debidamente practicada, con un sistema adecuado de juntas de dilatación si es preciso, contribuye mucho a prevenir la formación de grietas, aumenta la cantidad de agua combinada, facilita y favorece la carbonatación y toda clase de reacciones químicas, lo que es muy importante, máxime cuando se emplean puzolanas, pues todo ello implica aumento de compacidad, impermeabilidad y resistencia química.

## Condiciones de los cementos

El Portland que se emplee debe ser de la mejor calidad, a ser posible de marca avalada por los buenos resultados obtenidos en alguna obra marítima conocida, pues no todos los dan iguales en presencia del agua del mar, y aun la composición y condiciones del de una misma fábrica varían a veces con el tiempo. Ha de ser de fina pulverización, y en ese concepto convendrá prescribir residuos algo más bajos que los exigidos con carácter general en nuestro Pliego oficial de 27 de mayo de 1919. Antes de

<sup>1</sup> Véase el número anterior, pág. 33.

<sup>2</sup> Se adopta la palabra cura, de abolengo castizo y de significación precisa, a ejemplo de lo hecho en los Estados Unidos de América e Inglaterra, donde es de uso corriente aplicada al hormigón.

su admisión debe ser objeto de los análisis y ensayos que en aquél se establecen, con la sistemática frecuencia necesaria para tener la completa seguridad de que las remesas todas llenan por entero las condiciones impuestas. El límite máximo del anhídrido sulfúrico podría ser de 2 por 100 tan sólo, y aun convendría reducirlo más y ventajosamente, según opinan algunos ingenieros. Las pruebas de las pastas de cemento con soluciones de sulfato de magnesio son susceptibles de proporcionar rápidamente, sobre todo si son favorables, indicaciones utilísimas respecto a los resultados que cabe prometerse de los distintos cementos que puedan emplearse. El alto contenido en sílice, 23 por 100 como mínimo, constituye, a juicio de algunos ingenieros, según se indicó ya, garantía eficaz de resistencia a la acción química del agua del mar, y si bien esa afirmación, basada probablemente en los estudios de Le Chatelier y en los experimentos de la isla de Sylt hechos por el laboratorio de Gross-Lichterfelde, no aparece al presente suficientemente comprobada, no estaría desprovisto de fundamento dar la preferencia a los cementos que cumplieran aquel mínimo.

No disponemos de un pliego de condiciones facultativas relativo a los cementos de Zumaya y similares generalmente aceptado y que pueda servir para eliminar los productos de esa clase defectuosos o de inferior calidad que no convenga emplear en las obras marítimas. Los interesantes trabajos de los ingenieros de Caminos Sres. García Arenal y Castro y algunos otros, constituyen elementos valiosos para formarlos; pero es indudable la conveniencia de proceder actualmente a un nuevo estudio sobre la materia a base de adecuada experimentación que permita fijar concienzudamente las prescripciones que sean indispensables en vista de las finalidades perseguidas, en forma tal que, siendo prácticamente de posible cumplimiento, tienda a crear, en plazo más o menos largo, y quizá mejor gradualmente, un tipo de cemento natural inmune a la acción química de las aguas marinas, capaz de producir las mayores resistencias posibles y en que el fraguado no sea excesivamente rápido.

## Condiciones de las puzolanas

El Pliego de condiciones aprobado por Real orden de 27 de febrero de 1925 establece las que han de reunir los productos puzolánicos que se utilicen en las obras públicas del Estado y las reglas que deben presidir su empleo.

Constituye, sin duda, una plausible orientación fijar prescripciones encaminadas a establecer ensayos rápidos que sirvan de guía en la selección de las puzolanas; pero, dado el estado actual de los conocimientos que sobre la materia se poseen, ha de reconocerse que, en realidad, no existe medio práctico de traducir en fórmulas precisas las condiciones que debe reunir una puzolana en lo que se refiere a fraguado y resistencias mecánica y química de sus mezclas con cales o cementos expuestas a la acción de las aguas marinas o selenitosas.

El análisis químico difícilmente podrá revelar las

cualidades relativas de puzolanas diversas. Con casi igual composición, unas resultan excelentes, mientras otras poseen escasa cantidad de la energía que en ellas se busca. Es más, escorias de altos hornos con idéntica composición química, tienen cualidades puzolánicas muy distintas, según hayan sido o no granuladas y aun según el procedimiento de granulación empleado. Podrá el análisis químico constituir un elemento valioso de juicio para averiguar si una puzolana que se supone de una clase determinada lo es en efecto, o si ha sido adulterada, y aun eso no con gran precisión tratándose de las que no tienen composición muy uniforme; pero la fijación de límites precisos para los principales cuerpos integrantes de productos que suelen ser heterogéneos y de composición bastante diferente, puede conducir a crear barreras que algunos buenos tarden en franquear y a dejar el paso libre a otros que en las obras no llenen el cometido que se les asigna o que ofrezcan en grado mínimo la energía que las buenas puzolanas han de tener y en la cual debe descansar principalmente el valor que se les reconozca.

A este propósito podrá recordarse que las puzolanas de Arucas, Kagoshima (Japón), frecuentemente el buen tras y otras, no llenan las condiciones exigidas en cuanto a proporción de agua combinada se refiere, a pesar de tratarse de productos de los que puede decirse en términos generales que han resistido satisfactoriamente la prueba de la experiencia, especialmente los dos últimos.

Mayor justificación tiene fundar la determinación del grado de energía de las puzolanas en el de la resistencia mecánica que ofrecen sus mezclas con la cal ordinaria, aun cuando no está bien probado que ambas cantidades estén ligadas por una ley invariable.

A este propósito se indicará que en la determinación química de la cantidad de sílice soluble y demás elementos atacables por las soluciones alcalinas que una puzolana contenga, es aconsejable el empleo del método de Féret, modificado por Poulsen <sup>1</sup>.

De lo que precede parece lícito deducir que, aun debiéndose reconocer el valor práctico de las pruebas de nuestro Pliego, sobre todo para determinar las cualidades relativas de las puzolanas de condiciones parecidas, es siempre indispensable la mayor cautela en la admisión de productos nuevos cuando no avala sus buenos resultados, a más de ensayos comparativos de laboratorio, una experiencia adecuada, sin que deba verse en esta indicación un criterio sistemático contrario a la aceptación de productos que no hayan recibido con éxito largas aplicaciones.

#### Productos puzolánicos utilizables en España

En los puertos de Italia son en la actualidad usadas casi exclusivamente las puzolanas de Bacoli (cerca de Pozzuoli, en el golfo de Nápoles) y de las cavernas de San Pablo y Salone y algunas más de los alrededores de Roma; pero las primeras son las más empleadas porque, hallándose junto al mar, suelen resultar más baratas. El ingeniero Luiggi, que viene hace tiempo preconizando su empleo, advierte a los compradores de las puzolanas de Bacoli,

mucho más fáciles de adulterar que las de Roma, que deben tratar con proveedores de confianza, o, mejor, hacer vigilar su excavación y embarque en las canteras mismas. La composición química de estas puzolanas se halla comprendida dentro de los límites fijados en nuestro Pliego. En un caso han sido utilizadas en España para formar cementos puzolánicos a base de Portland.

El tras, ya conocido de los romanos, viene empleándose hace muchos años en escala grande, en Alemania y Holanda especialmente, aunque también se ha utilizado mucho en Dinamarca, Bélgica, Francia y otros países, entre ellos, muy recientemente, en los Estados Unidos de América.

El mejor tras parece es el renano, formado por la toba azul que se encuentra por debajo de otras capas de colores gris y amarillento, procedente del valle de la Nette, en la región del Eifel, cerca de Andernach y del Rhin. El tras arenoso es de calidad más inferior, lo mismo que el procedente de las tobas leucíticas.

Su composición química se halla dentro de las proporciones exigidas por nuestro Pliego, salvo, a veces, la referente a la cantidad de agua combinada. Sin embargo, parece que ésta no baja, en el mejor tras, del 7 por 100, y ésta suele ser, a más de la resistencia de las mezclas con cal, la condición a que en Alemania se atienden principalmente los compradores para cerciorarse de que el tras es efectivamente de la calidad mejor.

Puede obtenerse ese material sin moler, estado en que es más difícil la adulteración, pero el comercio lo suministra en polvo, de ordinario con residuo de un 18 por 100 en el tamiz de 900 mallas por centímetro cuadrado, y también, a lo que parece, con residuo de 46 por 100 en el de 5 000 mallas; es decir, en ambos casos con mucha menor finura de la requerida por nuestro Pliego, que en esta parte es excesivamente riguroso.

Se cree generalmente que de las puzolanas de Canarias hasta el presente ensayadas ha dado los resultados más satisfactorios la de Arucas (Gran Canaria), que constituye un yacimiento de cenizas volcánicas de gran volumen y, a lo que parece, de bastante homogeneidad. Se han empleado también, especialmente en el puerto de La Luz, las cenizas volcánicas de la Isleta, no tan homogéneas ni abundantes, según se asegura, pero con la ventaja de hallarse muy cerca de aquel puerto. Es lo más probable que en dichas islas existan otros varios yacimientos utilizables. En la Península han sido objeto estos productos de análisis y pruebas, pero no se han empleado aún en sus obras marítimas. Lo interesante sería concentrar la explotación en los yacimientos que mejores condiciones reunieran, a fin de que pudieran sus productos ser objeto de una exportación económica, cosa que hoy no sucede.

Según el testimonio del ingeniero de Caminos don Manuel Benítez, de especial competencia en estas materias, la puzolana de Arucas llena las condiciones de carácter químico de nuestro Pliego, salvo la relativa a la cantidad mínima de agua combinada, a pesar de lo cual la resistencia obtenida en nada cede a las mejores italianas que, por lo visto, se han tomado como modelo. Convendría, pues, cerciorarse, mediante una experimentación adecuada, de si no sería posible, sin inconvenientes, reducir el límite fijado para la cantidad de agua, pues esto consti-

<sup>1</sup> Véase la comunicación de J. L. Wenthall y A. Poulsen al Congreso de Navegación de El Cairo de 1926.

tuirá una facilidad que debemos de perseguir para emplear las puzolanas de Canarias si realmente reúnen, como todo induce a creer, condiciones adecuadas.

De las puzolanas que desde hace poco tiempo han empezado a emplearse en los puertos de la Península, procedentes de yacimientos en ella situados, no se posee actualmente experiencia de duración bastante que permita formar augurios fundados y seguros respecto a la resistencia y protección que a la larga pueden comunicar a los hormigones y morteros en que entren cuando se empleen en el mar. Esto no obstante, los resultados obtenidos, con una sola excepción conocida, parece van siendo considerados como satisfactorios hasta el presente.

De cuanto se ha expuesto puede lógicamente inferirse la importancia que ha de concederse a los resultados experimentales. En todo caso será imprescindible, una vez elegida una puzolana, tomar todas las precauciones necesarias para asegurar la autenticidad de su procedencia y evitar las adulteraciones.

Otros productos puzolánicos se utilizan en el Extranjero.

En algunas costas mediterráneas, de Grecia e Italia principalmente, se ha empleado mucho la tierra de Santorin, a pesar de que contiene bastantes granos inertes y es poco homogénea. En Francia viene usándose principalmente la *gaize*, ahora siempre cocida, así como otros productos puzolánicos. Dinamarca utiliza como puzolana, aparte el tras, la tierra de infusorios llamada *mo-ler*, últimamente previa calcinación. En Portugal se han estudiado y empleado las cenizas volcánicas de las Azores, que deben de diferenciarse poco de las de Canarias. Finalmente, en el Japón parece se utiliza mucho la puzolana de Kagoshima, que se considera excelente.

Ninguno de estos productos que se acaban de citar, ni otros muchos naturales e industriales que van apareciendo y ensayándose en diversos países, parecen susceptibles de gran aplicación comercial en España.

No sucede lo mismo con las escorias de altos hornos granuladas, que aquí también se producen y son la base de la industria de cementos de escorias y otros, respecto a los cuales convendrá tener en cuenta las observaciones formuladas en otra parte antes de su adopción en las obras marítimas.

#### Mezclas de productos hidráulicos

Para las mezclas de cal ordinaria y puzolana en grano se recomienda en Italia la proporción en volumen de uno de la primera, empleada en pasta, por dos o tres de la segunda, según la riqueza de la cal

en óxido y de la puzolana en sílice y alúmina, y sólo cuando se requiere acelerar el fraguado o aumentar la resistencia se añaden de 100 a 200 kg de Portland por metro cúbico de mortero. Se aconseja cribar la puzolana, para separar los granos demasiado gruesos, y hacer el amásado en molinos cuyas muelas la pulvericen algo y aumenten así su energía.

Las mezclas de cal en polvo o pasta y de puzolana pulverizada reciben en la actualidad pocas aplicaciones en las construcciones marítimas; su empleo no deja de ser delicado. Las mismas mezclas, con adición de cemento Portland, usadas en Alemania y muy poco aceptadas en otros países, van siendo sustituidas, al menos en las obras importantes, por otras que dan mayores resistencias. No hay motivo para suponer que esas combinaciones, escrupulosamente formadas, no resistan bien el ataque químico de las aguas marinas; según prueban obras con ellas construídas hace tiempo; pero su resistencia relativamente baja y lo lento del fraguado y aun del endurecimiento cuando no entra el Portland, no pueden compensar la reducción que cabe obtener en el coste de las fábricas, generalmente pequeña en nuestros puertos si se compara con los que alcanzan las hechas con cementos naturales de fraguado rápido, más seguros y de resistencia análoga.

Mucho mejores resultados que de las mezclas anteriores cabría esperar de las de cal hidráulica y puzolana, sobre todo, empleando en lugar de ésta escorias básicas granuladas. Con todo, aunque esta mezcla ha recibido algunas aplicaciones, no parece que se haya extendido su empleo.

Las combinaciones de las escorias granuladas con la cal ordinaria e hidráulica y con el cemento Portland dan lugar a resistencias elevadas. Su aplicación a las obras marítimas no se ha generalizado, quizá porque, aun siendo las escorias buenas y de calidad uniforme, las pruebas experimentales hechas conducen a pensar que la protección que aportan contra los ataques de las aguas marinas es notablemente menor que la obtenida con las buenas puzolanas naturales. En Alemania es donde mayor uso se ha hecho de estos productos, considerándose especialmente aptos para oponerse a la descomposición química los llamados cementos de altos hornos y, más aún, los cementos portland de hierro, en que no entra la cal.

Los morteros a base de mezclas de Portland y Zumaya, a más de los inconvenientes que apuntados quedan en otra parte, no ofrecen aún la completa garantía que sólo puede dar una larga experiencia que, si existe, es poco conocida. Al lado de éxitos, parece que se han registrado algunos resultados desfavorables, si bien se desconocen sus causas y, por tanto, si aquéllos han podido evitarse.

José NICOLÁU

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos