

Los aglomerantes en las obras marítimas ¹

VI

Mezclas de Portland y puzolana

Entre todas, son sin duda las mezclas de cemento Portland y puzolana las más interesantes porque, sobre proporcionar aglomerantes capaces de afrontar con éxito la acción química destructora de las aguas marinas, reúnen las buenas condiciones de suficiente resistencia mecánica, fraguado no demasiado lento y precio generalmente aceptable. La puzolana, además, con su bajo peso específico, dos y media veces, término medio, menor que el del Portland, y con su alto poder de colmataje, aun siendo elevada la proporción de elementos finos de la arena, aumenta considerablemente la compacidad, impermeabilidad, plasticidad y, en alguna medida, la elasticidad de las mezclas.

No dejan, sin embargo, estas combinaciones de ofrecer algunos inconvenientes: dificultad en España, sobre todo en obras de pequeña importancia, de proporcionarse puzolanas que ofrezcan toda garantía y de incorporarlas debidamente al cemento; peligro de provocar un fraguado demasiado rápido con la adición de puzolana de excesiva finura, ésta no muy recomendable tampoco en proporciones algo fuertes, por exigir aumento de agua, que reduce la compacidad y resistencia; alteración a que están expuestas las mezclas con un almacenamiento prolongado; lentitud del endurecimiento en los primeros días, lo que puede dar origen a degradaciones en los hormigones que hayan de sufrir poco después de hechos la acción de las aguas, y, finalmente, necesidad, más imprescindible que con los cementos solos, de que la cura sea larga y se verifique en atmósfera muy húmeda.

Con mayor o menor dificultad, tales inconvenientes pueden vencerse. Los análisis y ensayos y las precauciones que cabe adoptar para garantizar la genuina procedencia de productos justamente acreditados han de permitir obtenerlos, más o menos caros, de las condiciones debidas. El peligro de los fraguados muy rápidos no parece ser muy de temer y puede obviarse generalmente, sobre todo no llevando a límites excesivos la pulverización. La alteración de que las mezclas son susceptibles antes de su empleo cabe prevenirla con el envasado en barriles y, mejor, pues este procedimiento encarece bastante el producto, empleando tan sólo mezclas de fabricación relativamente reciente. Las degradaciones a que da lugar en casos determinados la lentitud del endurecimiento en los primeros días se han evitado alguna vez, como en otra parte se indica, recubriendo las superficies con lechada de cemento aluminoso, y también cabría recurrir a las lechadas y, preferiblemente, a los enlucidos oportunos con el de Zumaya. Por último, el mayor rigor y duración de la cura no es sujeción de importancia, traducándose tan sólo en mayor cuidado.

Quedan sólo los inconvenientes anejos a la operación de la mezcla que, como es sabido, es esencial produzca, con grado de finura elevado, una perfecta

homogeneidad. Los procedimientos que en la práctica pueden seguirse son éstos: molienda conjunta, en la fábrica, del clinker y puzolana, conforme autoriza para las obras del Estado la Real orden de 5 de diciembre de 1925, pudiendo obtenerse por tal medio, mejor que por ningún otro, una mezcla íntima, fina y homogénea, que si no exalta, como se había creído, las cualidades de la puzolana, permite sacar de ella el máximo beneficio, resultando muy cómodo el procedimiento para los constructores, si bien requiere, en cambio, inspección y vigilancia asiduas, no fáciles de ejercer, y no se presta bien a variar las proporciones de los componentes, según las circunstancias de cada caso puedan aconsejar; molienda en la obra misma del clinker y la puzolana, tal como se prevé en nuestro Pliego, lo que exige una instalación importante y competencia especial en el personal encargado, sólo posibles en grandes obras, como pueden ser muchas de las que han de ejecutarse en los puertos; molienda en la obra de la puzolana tan sólo y adición al final del cemento para hacer homogénea la mezcla, operación menos delicada y que no requiere instalación tan importante como en el procedimiento anterior, y, finalmente, mezcla en la obra del cemento y puzolana previamente pulverizados, bien utilizando un molino para aumentar algo la finura a la vez que se efectúa íntimamente la mezcla, bien realizando ésta, sin pretender aumentar la finura, con aparatos adecuados, de cuya eficacia dependerá la bondad del procedimiento.

Íntil parece indicar que en todo caso la puzolana deberá estar seca al tiempo de su molienda y de la mezcla.

En casi todas partes, a igualdad de peso, resulta más barata que con Portland exclusivamente la mezcla en que entra puzolana, debido al menor coste de ésta, que compensa con creces los gastos de efectuarla más los de pulverización, con lo cual los morteros puzolánicos, aun con dosis de aglomerante algo mayores que los hechos a base de Portland sólo, representan un gasto igual y frecuentemente menor. En España, hasta ahora, no resulta así a veces, pero es de esperar que esta situación desaparezca, pues nada puede justificarla, sobre todo si se emplean productos puzolánicos de la Península y aun de Canarias.

No estará de más hacer notar que si las mezclas han de dar buenos resultados, será preciso que cada uno de sus componentes llene las condiciones adecuadas, que las proporciones se fijen acertadamente, basándose en la experiencia sobre todo, y que alcancen en el momento del empleo un estado de homogeneidad completo.

Proporciones en las mezclas de Portland y puzolana

El Pliego oficial de condiciones para la recepción y empleo de puzolanas, aprobado en 27 de febrero de 1925, señala el procedimiento a seguir para fijar la proporción en las mezclas de cemento y puzolana que hayan de emplearse. Se basa en la determinación de la cantidad de cal susceptible de combinarse

¹ Véase el número anterior. página 53.

con la sílice contenida en un peso dado de puzolana para formar el silicato monocálcico. Esa determinación ha de efectuarse, bien químicamente, bien hallando la proporción de la pasta de cal y puzolana que produzca la máxima resistencia a la tracción. Deducida, por otra parte, la cantidad de cal libre del cemento, después de transcurridos siete días del fraguado, puede fijarse la de puzolana necesaria para neutralizarla.

El procedimiento parece sencillo y razonable, pero no deja de suscitar algunas objeciones.

Dando por admitido que la unión de puzolana con cal se traduce en la formación del silicato monocálcico, no está demostrado que la máxima resistencia a la tracción correspondiente a una mezcla de puzolana con determinada proporción de cal constituya la medida de la neutralización de ésta por su combinación con la sílice, pues a dicha resistencia pueden contribuir también otras combinaciones con la alúmina y el óxido de hierro de la puzolana. Confirman esto algunos experimentos de P'éret, quien llega a afirmar que no se encuentra ninguna relación bien neta entre la resistencia máxima de las mezclas puzolánicas de cal y la máxima proporción de cal neutralizada.

El plazo de siete días a contar del fraguado que se indica para deducir la cal libre que en el cemento pueda formarse, parece excesivamente reducido.

El procedimiento también deja de tener en cuenta los importantes efectos físicos que la puzolana produce en las mezclas en que entra, variables con la composición de éstas, que afectan a la compacidad y, por tanto, a la estabilidad química, a la resistencia mecánica y a la impermeabilidad.

Por lo demás, conviene recordar que no suele haber grandes diferencias, a lo que parece, entre las cantidades de cal que son capaces de neutralizar las distintas puzolanas que suelen emplearse corrientemente.

Obsérvese que la proporción de puzolana que en cada caso convendrá aceptar, a más de la composición granulométrica de las mezclas y de las condiciones de las puzolanas y cementos, ha de depender también de la resistencia que haya de alcanzarse, de la exposición de las fábricas a la acción del oleaje y hielos, del grado de salinidad de las aguas, etc.

Todo eso tiende a demostrar que para hallar la relación correcta en que, para formar morteros y hormigones, deben entrar un Portland y una puzolana determinados, no puede bastar en rigor el procedimiento prescrito en el Pliego de referencia. Dado lo que sobre la materia puede darse hoy por generalmente admitido, parece que lo mejor sería completarlo con los ensayos directos de un mortero normal en que el aglomerante se hallase constituido por mezclas con distintas proporciones de los componentes mismos que se pretenda utilizar, o mejor quizá, de morteros y hormigones con proporciones iguales o análogas a las que se piense emplear en las obras y cuyo aglomerante lo formasen cantidades variables de puzolana y cemento. Las pruebas deberían ser las normales de resistencia, de la mayor duración posible, por lo menos a noventa días, y, además, las de inmersión en agua del mar y en soluciones de sulfato de magnesia, también durante el mayor tiempo posible. A falta de pruebas más fehacientes, podrá admitirse como la mezcla mejor aquella que proporcione resistencias más elevadas y

que, a la vez, haya soportado bien la acción del agua marina y con menos deterioros la de la solución de sulfato magnésico. Con todo esto, los resultados de los ensayos prescritos en el Pliego y los datos que pueda suministrar la experiencia de otros empleos satisfactorios de la misma puzolana o de otras de energía parecida, se podrá deducir cuál debe ser la proporción que conviene preferir y que, dicho sea de paso, no suele resultar muy diferente con los distintos cementos y puzolanas.

Nótese que las dificultades para fijar debidamente en cada caso la dosis de puzolana son del mismo carácter, aunque probablemente mayores, si se ha de hacer con todo rigor, que las ya señaladas para determinar la calidad relativa de aquel material mediante ensayos de laboratorio, y hacen pensar en la necesidad de apoyarse, en cuanto sea posible, en la experiencia más que en nada.

Mezclando puzolana y Portland, ambos de buena calidad, en cantidades variables, se obtiene, generalmente, la máxima resistencia con la mezcla en que aquellos productos están en la relación de uno a dos, en peso; la de uno a uno produce a corto plazo resistencia menor, aunque no mucho; mas a medida que, a partir de esta relación, va aumentando la cantidad de puzolana, la resistencia de la mezcla baja rápida y fuertemente. Obedeciendo a estos hechos, sin duda, y contando con que un exceso de puzolana sobre el requerido por la resistencia mecánica máxima, no sólo no perjudicaría, sino que aseguraría la estabilidad química frente a la acción de las sales marinas, muchos constructores empezaron por adoptar mezclas con cantidades casi iguales, siempre en peso, de puzolana y Portland; pero la reducción de resistencia mecánica que esto implicaba sobre la que cabe obtener con la misma cantidad de aglomerante y, además, lo pequeño de dicha resistencia al principio, que puede ser causa de deterioros en las fábricas expuestas desde el primer momento a la acción del mar, aconsejaron rebajar la relación a uno de puzolana para dos de Portland, y aun menos, lo que viene practicándose en Francia y otras partes desde hace tiempo, al parecer sin inconvenientes.

La sustitución de una cantidad de Portland por otra de igual peso de puzolana afecta poco, en general, al cabo de no mucho tiempo, a la resistencia mecánica de los morteros mientras la finura del aglomerante no varíe y la parte sustituida no exceda de un tercio de la total, o sea mientras la relación de Portland a puzolana no baje de dos, y aun, tratándose de mezclas sumergidas en el agua del mar y de plazos de un año o más, la proporción de puzolana puede ser algo mayor sin que la resistencia se resienta mucho. Cuando en la práctica no ocurra así, cabe atribuirlo a alguna o a varias de las causas siguientes: falta de energía de la puzolana, es decir, que sea inferior a la que proporcionan las que se consideran como mejores; que la mezcla de los dos elementos del aglomerante no haya sido suficientemente íntima; que no se haya empleado en completo estado de homogeneidad o que haya sufrido el cemento los efectos de la humedad; y, finalmente, que no haya sido la cura bastante larga o no se haya verificado en una atmósfera constante de intensa humedad.

Como indicación que puede servir de complemento a las que proporcionen los ensayos y a cuanto se

acaba de exponer, se anotan a continuación las cantidades de puzolana que, según diversos autores, deben ser mezcladas con cada 100 kg de cemento Portland para formar los morteros y hormigones de las obras marítimas:

Foerster, 40 kg para el hormigón armado, en general, indicando que en las obras de puertos (refiriéndose a Alemania probablemente) se emplean de 60 a 80 kg, si bien Schülze, en su tratado *Seehafenbau*, y otros autores citan varias construcciones en que la proporción fué de 40 kg; Hambloch, tratadista alemán, aconseja como máximo 55 kg; Morsch, de 40 a 53 kg; Féret, 50 kg; Bénézit, de 43 a 57 kg; Luiggi, refiriéndose al hormigón armado, de 33 a 50 kg; Poulsen, 33 kg para la tierra de diatomeas cocida y 72 kg para el tras. Los autores alemanes se refieren todos al tras renano y Luiggi a las puzolanas de Roma y Bacoli.

En Holanda, donde se utiliza el tras, una proporción bastante empleada ha sido la de 40 kg; pero en las distintas obras ha variado entre 20 y menos, y 55 kg, llegándose, excepcionalmente, en un caso, a 100 kg. Algunas de dichas construcciones, hechas en 1909, se hallaban en buen estado en 1922. En los Estados Unidos se han adoptado recientemente, en un puerto para el hormigón armado, 38 y 55 kg de tras. En Italia se construyó, hace tres o cuatro años, un puente, también de hormigón armado, so-

metido a la influencia de las aguas marinas, en que la mayor proporción de puzolana fué de 38 kg.

Las cifras anteriores se han tomado de publicaciones diversas en que, salvo las francesas, italianas y dinamarquesas, figuran referidas al volumen, y como las densidades del Portland y puzolana en polvo, tal como éstos se emplean en las obras, son algo variables, no se puede garantizar que aquéllas, al ser traducidas en peso, resulten de una completa exactitud.

En los nuevos diques en construcción del puerto de Valencia, donde, a propuesta del ingeniero de Caminos Sr. Maese, se ha realizado la más importante aplicación hecha en España de morteros puzolánicos, el aglomerante está formado por cemento Portland y puzolana de la Península, de dos procedencias distintas, en la proporción de 50 kg en ambos casos. El hormigón para los cajones (que no tienen armaduras) está formado por 470 kg de aglomerante puzolánico, 0,4 m³ de arena y 0,8 m³ de piedra machacada, y el destinado a rellenar dichos cajones para constituir los bloques, por 211 kg de igual aglomerante, 0,445 m³ de arena y 0,890 m³ de piedra machacada. Las resistencias a la compresión a los veintiocho y noventa días han resultado para el primer hormigón, tal como se fabrica, iguales, respectivamente, a 365 y 461 kg por centímetro cuadrado, en el caso de una puzolana y a 234 y 344 kg, en el de la otra.

José NICOLÁU

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Estado actual de algunas cuestiones de Geofísica geológica

I

La Geofísica, ciencia que estudia los fenómenos físicos de carácter general que ocurren en la Tierra, está progresando con gran rapidez. Sus investigaciones, principalmente las relativas a la gravedad, la isostasia, el volcanismo, la sismología, y el magnetismo y radioactividad de las rocas, arrojan resultados de mucho interés para la Geología y sus aplicaciones. Por ello no estará de más que, los que como los ingenieros, deben conocer varias de las aplicaciones de aquella ciencia, sigan los progresos de la Geofísica en las cuestiones con ella relacionadas.

Se ha terminado recientemente la obra alemana *Lehrbuch der Geophysik*, editada por el Dr. B. Gutenberg, de la Universidad de Francfort, en cuya confección se ha encargado cada materia a un especialista eminente. También se ha publicado, en el año 1926, otro interesante libro, aun cuando simplemente de vulgarización, titulado *Our mobile Earth*, por el profesor norteamericano R. A. Daly, de la Universidad de Harvard. Ambos libros han servido principalmente de base para la preparación de estas notas que, tratando de cuestiones de las que se ha ocupado en otras ocasiones la REVISTA ¹, se contraen a la formación y permanencia de continentes

y mares y a los movimientos lentos de la corteza terrestre, los cuales determinan, tanto los epirogénicos, o sea de grandes macizos continentales, como los orogénicos, que dan lugar a las grandes cordilleras que existen o han existido en nuestro planeta.

Como antecedentes a los referidos temas es preciso decir algo respecto al origen de la Tierra y a la constitución de sus partes superficial e interna, para lo que prescindiremos de ciertos detalles muy conocidos.

Origen y desenvolvimiento de la Tierra

La hipótesis más admitida hasta el presente siglo era la propuesta primero por Kant, desarrollada después por Laplace y modificada luego por varios astrónomos, según la cual la Tierra formaba parte de una nebulosa en estado gaseoso, dentro de la que se formó todo el sistema solar. Se supone que, al contraerse la nebulosa, por el enfriamiento de su materia rodeada por los fríos espacios interestelares, se achataría según la dirección del eje de rotación, que poseía desde un principio, y, al dilatarse por ello su ecuador, se desprenderían masas anulares nebulosas que dieron lugar a la formación de los planetas, quedando el Sol como cuerpo central.

La referida hipótesis ha sido sustituida, por la mayoría de los actuales astrónomos y geólogos, por la propuesta por el norteamericano Chamberlin, que ha

¹ Año 1925, páginas 523 y 556, y año 1927, pág. 1.