

Los aglomerantes en las obras marítimas¹

IX

Los ensayos y las características de los hormigones

La determinación precisa de las proporciones en que los materiales han de entrar en el hormigón que en definitiva se elija para la obra, ha de hacerse mediante ensayos de una serie de mezclas analizadas como acaba de exponerse. Variando convenientemente las proporciones en cada una y relacionando y comparando sus distintas características con el coste podrá venirse en conocimiento de la que con mayor economía mejor llena las que el hormigón debe reunir. Tal es el principal objeto de los ensayos.

Nada hay que decir respecto a la plasticidad, pues ha de partirse del supuesto de que se dará a todas las mezclas la que haya sido fijada de antemano.

Los tiempos de fraguado que resulten indicarán si los aglomerantes ensayados son o no aceptables a este respecto o las precauciones con que algunos habrían de ser empleados.

Es ciertamente la compacidad, de ordinario al menos, la cualidad principal de todo hormigón; pero en el destinado a las construcciones marítimas debe ser generalmente subordinada a la impermeabilidad, que conviene sea muy elevada. Afortunadamente, ambas cualidades son casi siempre compatibles y, según se dijo ya, en directa relación una con otra a igualdad de condiciones.

Especialmente en las mezclas a emplear en el mar conviene obtener la más elevada compacidad posible, no sólo porque contribuirá a elevar la impermeabilidad con la misma proporción de cemento, sino también porque quedarán a la vez favorecidas las demás cualidades del hormigón.

Podría temerse que la proporción de elementos finos de la arena que ha de requerirse para alcanzar la máxima compacidad pudiese provocar el especial peligro de descomposición del cemento que nace cuando hay cierto predominio de aquéllos; pero si la cantidad de Portland sin puzolana que se emplee en el hormigón no baja (como no suele ni debe bajar nunca en las obras marítimas) de unos 450 kilogramos por metro cúbico de arena, la relación al peso total de ésta del de los granos finos no llegará a un cuarto y se hallará muy distante, por tanto, de las que resultan en las mezclas de los experimentos de Alexander y Féret, en que se han revelado tales descomposiciones. Todavía es menor la relación de granos finos inertes al total de la arena en las mezclas de compacidad máxima si se sustituye a una parte del cemento un peso equivalente de puzolana, y tanto por este motivo como por la beneficiosa acción química de ese material, el riesgo de descomposición ha de ser aun más remoto en este último caso.

No debe emplearse en el mar el *sand-cement*. Con sólo que en éste el polvo inerte entre con un peso igual al del cemento, para que la mezcla alcance la compacidad máxima se requiere que la cantidad de Portland, en las condiciones ordinarias de los materiales, no exceda de unos 375 kilogramos por metro cúbico de

arena, en el supuesto de que ésta se halle desprovista por completo de elementos finos. Si existen éstos en proporción apreciable, como ocurre casi siempre, o si la resistencia que el hormigón haya de tener exige dosis algo altas de Portland y, sobre todo, si ambas circunstancias se ofrecen simultáneamente, la compacidad de la mezcla se separará rápidamente de la máxima, que, además, no podrá ser muy elevada por la proporción fuerte de agua que la finura grande del *sand-cement* reclama. A estas circunstancias desfavorables se agrega en tales casos que la división del cemento facilita mucho su ataque químico por las aguas marinas.

Para alcanzar suficiente impermeabilidad en el hormigón requiérese, a más de fuerte compacidad, dosis relativamente elevada de cemento. En los puertos franceses suele exigirse de 450 a 500 kilogramos de Portland para el hormigón ordinario que no haya de estar fuera del agua y de 1 000 a 1 125 kilogramos para el armado, por metro cúbico de arena. El laboratorio Gross-Lichterfelde, de Berlín, después de quince años de experimentos en el mar, preconiza como mínimo unos 650 kilogramos también, por metro cúbico de arena, y el Pliego norteamericano llega a un mínimo de 390 y de 335 kilogramos por metro cúbico de hormigón macizo o armado, según haya de quedar situado en la zona de fluctuación o debajo de ella; lo que para las mezclas que en los Estados Unidos se prescriben equivale a unos 1 230 y 980 kilogramos, en cada caso, por metro cúbico de arena, proporciones estas últimas adoptadas para producir hormigones prácticamente impermeables y que con buenos cementos resisten a la compresión unos 160 kilogramos a los veintiocho días.

Obsérvese, y ello es muy importante, que el empleo de puzolana ha de permitir, con menos peso de aglomerante, lograr en el hormigón impermeabilidad equivalente.

Si a la vez que alta impermeabilidad se quiere obtener la mayor compacidad posible, ésta marcará un límite a la proporción de cemento. Empleando arenas desprovistas de elementos finos, el hormigón alcanzará la compacidad máxima con dosis de unos 1 080 kilogramos de Portland de 3,1 de peso específico por metro cúbico de arena de condiciones medias. Adicionando de 40 a 50 kilogramos de puzolana a cada 100 de cemento, las dosis de éste en las mismas condiciones serán tan sólo de unos 480 y 420 kilogramos, y las de aglomerante 672 y 630 kilogramos, aproximadamente. Si se emplean arenas con elementos finos, sin que éstos predominen, las cantidades de Portland, o de Portland y puzolana, para obtener la compacidad máxima pueden sufrir mucha reducción dependiente de la impermeabilidad y de la resistencia que hayan de alcanzarse.

A conclusiones algo parecidas puede llegarse si, en vez del cemento Portland, se emplea la cal hidráulica.

Procedimiento de ensayo. Resultados a obtener.

La cantidad de mortero que ha de emplearse en los ensayos ha de estar comprendida, conforme a lo

¹ Véase el número anterior, pág. 113.

dicho, entre 1,30 y 1,40 de la de vacíos que contenga el volumen aparente de la piedra machacada, con objeto de obtener la mayor compacidad; parece que la proporción óptima suele ser generalmente igual a 1,35, y bastará probablemente atenerse a ésta en todas las mezclas.

Con el mismo objeto se adoptarán para las dimensiones relativas de arena y piedra las indicadas precedentemente.

Los ensayos deberán versar sobre proporciones metódicamente variadas de los componentes, incluso los que integren el aglomerante cuando esté formado por mezclas. El análisis de cada una dará a conocer, entre otras cantidades, las siguientes: volúmenes absolutos del aglomerante, de la arena en sus tres tamaños y de la piedra que entren en la unidad de volumen de las mezclas frescas, resistencia a la rotura por compresión e impermeabilidad.

Los volúmenes absolutos de los materiales integrantes de la unidad de volumen de las mezclas frescas pueden ser representados por las siguientes letras: c , aglomerante; f , m y g , granos finos, medianos y gruesos, respectivamente, de la arena; a , conjunto de ésta; p , piedra del hormigón, y A , agua. Se designarán: por D el coeficiente numérico que mide la compacidad de la mezcla; por r , la relación de volúmenes absolutos del aglomerante más granos finos de la arena al del resto de la misma; por s , el cociente del volumen absoluto del aglomerante dividido por el volumen de agua más vacíos, igual este último a la unidad menos el valor de la compacidad, y, finalmente, por R la resistencia del hormigón a la rotura por compresión, generalmente a los veintiocho días.

Las cantidades cuya representación acaba de establecerse están ligadas por las relaciones siguientes:

$$a = f + m + g; \quad D = c + a + p; \quad r = \frac{c + f}{m + g};$$

$$s = \frac{c}{1 - D}; \quad D = \varphi(r); \quad R = \Psi(s).$$

Con los datos obtenidos respecto a la serie de mezclas analizadas, podrán dibujarse dos gráficos. En uno, tomando como abscisas de un sistema de coordenadas a escala conveniente las relaciones s de las distintas mezclas, se marcarán en las ordenadas correspondientes los valores, hallados para cada una, de las cantidades siguientes: c (volumen absoluto del aglomerante); f , m , g (ídem de los granos de los distintos tamaños de la arena); p (ídem de la piedra); A (agua), y D (compacidad), acabando por unir con un trazo continuo los puntos representativos de esos diversos valores. En forma análoga se dibujará en otro gráfico una curva cuyas ordenadas representen las resistencias R y las abscisas correspondientes las relaciones s de cada una de las mezclas analizadas.

Si los ensayos han sido suficientemente numerosos y variados con respecto a la relación r de aglomerante más parte fina de la arena a elementos medianos y gruesos de ésta, la curva que dibuje los valores D de las compacidades contendrá un máximo D_m , al que corresponderán valores determinados de los distintos materiales integrantes de la mezcla de que se trate, los cuales, en la escala adoptada, serán dados por la intersección de cada una de las curvas representativas de dichos valores con la ordenada correspondiente al de la compacidad máxima. Obsérvese que para alcanzar el más elevado grado posible de

compacidad podrán variarse, no sólo la proporción de arena fina, sino también las relativas de granos medianos y gruesos.

Por otro lado, se formará la relación $\frac{c_m}{1 - D_m} = s_m$, mediante la cual la curva de resistencia dará la correspondiente a la mezcla de compacidad máxima, R_m , que no coincidirá generalmente con la resistencia que el hormigón haya de ofrecer. Diferirá poco de ella, sin embargo, cuando empleándose buenos materiales haya de ser dicha resistencia muy elevada; pero la separación entre una y otra será grande cuando la exigida del hormigón sea muy baja con relación a la que podría alcanzar con buenos materiales y proporción de cemento bastante para que la mezcla ya endurecida resultase suficientemente impermeable.

En ambos casos, la corrección de las cantidades integrantes de la mezcla de compacidad máxima es de suponer permitirá a menudo, sin rebajar mucho ésta, llegar a reducir a una diferencia aceptable la que separe las resistencias correspondientes a dicha compacidad y la fijada para el hormigón.

Tratándose de resistencias muy elevadas, tales como las que exige el hormigón armado, la cantidad de elementos finos que la arena podrá contener si aquél no ha de separarse sensiblemente de la compacidad máxima, habrá de ser pequeña y hasta nula cuando se emplee puzolana.

Por el contrario, la proporción de dichos elementos deberá ser tanto mayor cuanto más baja sea la resistencia necesaria en el hormigón. El empleo de puzolana, con proporción moderada de arena fina, ha de permitir encontrar una mezcla cuya resistencia se separe poco de la necesaria y corresponda a una compacidad muy cercana a la máxima.

Es de creer que en los hormigones destinados a construcciones marítimas en que entren Portland y por lo menos un 40 por 100 del peso de éste de puzolana, difícilmente podrá resultar económica la adición de polvos inertes, que supone una operación más y acaso instalaciones especiales, y que, probablemente, será más barato forzar la proporción de aglomerante o la de puzolana en éste, evitando los inconvenientes y coste que aquella adición supone tratándose de pequeñas cantidades y los riesgos que entraña con cantidades grandes. Es de observar que estas circunstancias pueden dejar de concurrir en las fábricas no marítimas.

Para resistencias bajas cabe recurrir también, no obstante la preterición no siempre justificada de que ahora son objeto, a las buenas cales hidráulicas con mezcla de puzolana, y aun acaso sin ella en las obras construídas en el Mediterráneo con riqueza suficiente de aglomerante que hayan de estar constantemente sumergidas y poco expuestas a desgastes, y cabe recurrir, quizá mejor que a nada, a los cementos del tipo Zumaya, correctamente fabricados, aun cuando no sea tan grande como en el Portland su uniformidad, lo que ha de traducirse en algún exceso de material sobre lo estrictamente necesario.

Como se ve por lo que precede, el procedimiento descrito viene, en definitiva, a derivar las proporciones en los componentes del hormigón de las que corresponden a la compacidad máxima y a la resistencia fijada, eligiendo una mezcla que en lo posible difiera poco de una y otra; se comprende, sin embargo, que en vez de la compacidad podría partirse de la impermeabilidad y adoptar la mezcla que llegando o re-

basando un límite de antemano fijado para ella ofreciera también, por lo menos, la resistencia deseada. Podría igualmente fundarse la elección y el procedimiento, a la vez, en la impermeabilidad, compacidad y resistencia del hormigón, y eso será, sin duda, lo más conveniente en obras marítimas cuando se disponga de tiempo suficiente para los ensayos y su importancia lo justifique.

Es indudable que, a más de las condiciones de carácter técnico, han de tenerse en cuenta para la elección de materiales y proporciones del hormigón, otras de orden práctico, y muy principalmente las económicas a que ya se han hecho algunas referencias. A ellas habrá necesidad frecuentemente de sacrificar algo la compacidad, sobre todo cuando la resistencia, muy sensible a ella, lo consienta, y aun, en la medida de lo posible, esa misma resistencia, siempre que no haya de padecer la seguridad ni pueda incurrirse en peligros de descomposición.

Inútil parece manifestar que, determinados los materiales y proporciones de las mezclas a emplear por los medios y consideraciones expuestos u otros adecuados, convendrá sean aquéllas, en definitiva, objeto de un ensayo final de comprobación.

Procedimiento casi igual al que acaba de reseñarse para el hormigón podrá ser aplicado al mortero a emplear en mampostorías y enlucidos, aun cuando para lograr la compacidad máxima las cantidades de aglomerantes necesarias, referidas al volumen unitario de arena, serán generalmente más reducidas que en aquél.

La práctica de los ensayos requerirá un laboratorio con los elementos indispensables, y entre ellos, a ser posible, una prensa de suficiente potencia para los de rotura por compresión, a menos que se remitan las probetas a otros laboratorios que dispongan de ella y se presten a verificar oportunamente la rotura. En toda gran obra la existencia de un laboratorio debe considerarse hoy de todo punto indispensable y nada puede justificar su omisión, sobre todo en los casos de corporaciones que, como las Juntas de obras de puertos, disponen generalmente de los recursos necesarios, tienen concentrados los trabajos y en las que suele ser vital para la duración de sus importantes obras que morteros y hormigones no sean una mera concepción de gabinete, sin engrane acaso con la realidad, sino el resultado de pruebas hechas teniendo en cuenta, ante todo, los fines perseguidos y esa misma realidad como base, medio probablemente único

de evitar decepciones, a veces dolorosas y casi siempre muy caras en definitiva.

Por todo lo dicho se verá que el método aquí aconsejado para fijar las proporciones de los hormigones difiere bastante de lo que ha venido preconizándose y practicándose.

Durante mucho tiempo la dosificación se hacía casi a sentimiento, empleando cantidades de aglomerante, mayores o menores, según su clase y el destino de las fábricas, sin tener en cuenta la composición granulométrica de la arena, siendo corriente que el volumen del mortero no excediese de la mitad del aparente de la piedra, cualquiera que fuese en ésta la proporción de huecos.

La introducción del Portland dió lugar a tomar como guía, de un modo harto preponderante, la resistencia a la tracción de los morteros, si bien los constructores no tardaron en percatarse de que las mezclas de tal suerte formadas, que frecuentemente requieren cantidades exiguas de aquel cemento, resultaban a veces muy permeables y expuestas en el mar a descomposiciones rápidas.

Eso condujo a elevar la proporción de cemento, considerándose que no debería bajar nunca de 450 a 500 kilogramos de Portland por metro cúbico de arena en las partes sumergidas; pero resultando insuficientes aun estas dosis para oponerse al ataque químico, se ha llegado a las de más de 1 000 kilogramos, con las que se obtiene, a mucha costa por cierto, una gran impermeabilidad que no basta, sin embargo, para obtener seguridad completa contra el riesgo de descomposición, pues en la práctica es muy difícil impedir toda infiltración de agua en la masa.

Asociando el empleo de productos hidráulicos generalmente inmunes al ataque químico, como son las mezclas puzolánicas y los cementos del tipo Zumaya, a dosificaciones que proporcionen compacidad e impermeabilidad muy elevadas, se obtendrá una mejora considerable en los morteros y hormigones, que podrán ser muy duraderos, contrarrestando con éxito de tal suerte las causas que de otro modo conducen a su deterioro.

El método de dosificación de las mezclas antes preconizado es aplicable y recomendable, no sólo para las destinadas a las construcciones marítimas, sino también para todas en general y muy particularmente para las que hayan de emplearse en las sometidas a la acción del agua, como presas, depósitos, acueductos, esclusas, etc.

"José" NICOLÁU
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Cálculo económico de las grandes líneas de transporte de energía eléctrica

Determinación del voltaje y de la sección de los conductores más convenientes económicamente

I.—Deducción de las fórmulas fundamentales

Significación de los diversos símbolos empleados:

A = gastos totales anuales de la transmisión, en pesetas.
 a = constante = pesetas por km de línea y kilovoltio.

b = constante = pesetas por km de línea y mm^2 de sección conductora de los conductores.
 c = constante = pesetas por subestación de transformación y kilovoltio, descontados los transformadores.
 d = constante = pesetas por subestación de