

Los aglomerantes en las obras marítimas¹

X

Método aproximado para hallar la composición de los hormigones

Partiendo de los supuestos admitidos, el procedimiento que se ha descrito conduce a determinar las proporciones de las mezclas con el mayor rigor que la práctica permite; pero para una primera aproximación, o cuando se trate de cantidades pequeñas u obras poco importantes, o en los casos, que deben ser excepcionales, en que no pueda disponerse de un laboratorio adecuado, cabe hallar dichas proporciones más sencillamente, aunque con menos rigor, admitiendo que el hormigón, a más de plástico, alcanzará compacidad muy cercana a la mayor que puede obtenerse en la práctica, y admitiendo también otros supuestos que, sin ser de una exactitud completa, conducen a resultados que de ella no se separan mucho.

He aquí indicada a continuación la manera de proceder:

El tanto por ciento en peso, F , de elementos finos que deberá contener la arena que se emplee, referido al total de la misma, ha de ser el que fija la fórmula siguiente, que se basa en el supuesto de que la mezcla alcanzará la compacidad máxima:

$$F = \frac{1}{1+r} \left[100 \times r - \frac{\frac{1}{p} + \frac{f}{p'}}{10 \times (1-p)} C \right]$$

En esta fórmula representan:

C , kilogramos de cemento a emplear por metro cúbico de arena comprimida y en estado seco;

r , relación de los volúmenes absolutos de los elementos finos (o sea, suma de los de esta clase que entren en el metro cúbico de arena y del aglomerante correspondiente constituido por cemento solo o adicionado con puzolana) a los de los elementos medianos y gruesos de la arena. Puede aceptarse para r el valor aproximado de 0,6, que ha obtenido experimentalmente Leclerc du Sablon, si se trata del hormigón, y el de 0,5 de los experimentos de Férét si el mortero ha de emplearse solo;

n , volumen de los vacíos contenidos en un metro cúbico de arena seca. Aunque muy variable, en la de granos desiguales suele estar comprendido entre 0,34 y 0,42. Lo mejor será deducirlo mediante ensayos, lo que exigirá algunos tanteos si la arena disponible requiere, en cantidad algo importante, la corrección de que luego se hablará;

p y p' , pesos específicos, respectivamente, del cemento y de la puzolana cuya mezcla forme el aglomerante. Para el Portland pueden admitirse 3,1 y 3,2 como valores extremos de p ; p' es igual, aproximadamente, a 1,25 en las puzolanas más empleadas;

f , relación de pesos de puzolana a cemento. Puede decirse que en la práctica varía entre 0,3 y 0,6, pero actualmente es lo más frecuente que no baje de 0,4

y exceda poco de 0,5. Cuando, por alguna circunstancia especial que pueda justificarlo no haya de emplearse puzolana, se tendrá $f = 0$.

Asignando a C en este último caso, si se usa el Portland, el valor de 450 kg, mínimo aconsejable generalmente para las obras expuestas a la acción de las aguas marinas, se obtendrá el correspondiente de F . Comparándolo con el tanto por ciento en peso que se encuentre efectivamente para los elementos finos contenidos en la arena disponible que se pretenda utilizar, ensayada a tal fin mediante cribado con zaranda de malla adecuada, podrá venirse en conocimiento del exceso o defecto de dichos elementos y, por tanto, de la resta o adición que de los mismos ha de ser objeto dicha arena para obtener en definitiva la que produzca compacidad próximamente máxima.

Cuando se empleen mezclas de Portland y puzolana con valor de f comprendido entre 0,4 y 0,6, la cantidad mínima de aglomerante podría reducirse a 400 kg, y aun quizá, en algún caso, a 350 por metro cúbico de arena seca. Resultaría así, por tanto,

$$C = \frac{400}{1+f} \text{ kilogramos} \quad \text{o} \quad C = \frac{350}{1+f} \text{ kilogramos.}$$

El total del peso del aglomerante tendría por expresión en este caso $(1+f)C$ kg.

Se hará observar de pasada que de la fórmula que da el valor F de los elementos finos del árido se deduce inmediatamente la siguiente, que expresa en kilogramos por metro cúbico de arena la cantidad de cemento requerida para obtener la compacidad máxima cuando en aquélla faltan dichos elementos por completo y no se le añaden:

$$C = \frac{100 \times r \times (1-n)}{\frac{1}{p} + \frac{f}{p'}}$$

Con las cantidades mínimas de aglomerante indicadas, o sean 450 kg de Portland en un caso y 400 ó 350 kg de Portland y puzolana en el otro, más un metro cúbico de arena corregida, comprimida y en estado seco, se amasará el mortero, dándole la consistencia plástica adecuada y midiendo exactamente el volumen que resulte, que se designará por M . Ese mortero se unirá a su vez a uno aparente

de piedra, también seca, igual a $\frac{M}{1,35 \times V}$ m³, para

formar el hormigón, cuyo volumen, H , deberá igualmente medirse con exactitud. Las dimensiones de los elementos de la arena y la piedra habrán de guardar en todo caso la relación precedentemente fijada. Se recordará que con la letra V fué designado en otra parte el volumen de los vacíos contenidos en un metro cúbico de la piedra que se emplee.

Con todo esto se conocerán las proporciones en que deben entrar en el hormigón los distintos elementos que lo integran, incluso la cantidad total de agua, A , que haya necesidad de invertir para que alcance la consistencia fijada, a cuyo efecto habrá

¹ Véase el número anterior, pág. 133.

de medirse oportunamente con toda exactitud. A este propósito se recordará que, salvo requerimiento especial, las normas norteamericanas fijan la consistencia en las cantidades siguientes, que se refieren a la prueba de aplastamiento (*slump-test*) ordinaria: 76 mm para el hormigón macizo y las piezas de grandes dimensiones del armado; 152 mm para los postes y paredes verticales de este último material, llegando a 203 mm para las placas delgadas horizontales. Tratándose de obras marítimas, acaso esas cifras resulten algo pequeñas, especialmente si se usa puzolana.

Empleando como cemento el Portland, las proporciones serán las siguientes:

Cemento, $\frac{400}{1+f}$ kg, ó $\frac{350}{1+f}$ kg si se adiciona puzolana, y 450 kg si no se adiciona;

Puzolana, $\frac{400 \times f}{1+f}$ ó $\frac{350 \times f}{1+f}$ kg;

Arena corregida y seca, 1 m³;

Piedra, $\frac{M}{1,35 \times V}$ m³.

Si las proporciones se quieren referir al metro cúbico de hormigón habrán de dividirse por H las anteriores cifras.

Es indudable que para practicar los ensayos, en vez de hacerlo con un metro cúbico de arena, con- vendrá operar con cantidad mucho menor.

Las resistencias del hormigón, si se prescinde de ensayos directos, podrán conocerse mediante alguna de las fórmulas o ábacos publicados que las den, aunque sólo sea aproximadamente, en función del cemento y agua invertidos. Entre las más sencillas pueden indicarse estas dos:

$$R = 15 \left(\frac{c}{100 \times A} - 5 \right); \quad \log R = 2,9931 - 1267,7 \frac{A}{c},$$

en las que R representa la resistencia al aplastamiento en kilogramos por centímetro cuadrado a los veintiocho días, c el número de kilogramos de aglomerante y A el de metros cúbicos de agua empleados por metro cúbico u otro volumen cualquiera de hormigón.

La primera de esas fórmulas ha sido dada por Bolomey, y, aunque menos digna de confianza que otras posteriores del mismo profesor, es recomendable por su sencillez; la segunda es la de Abrams en forma logarítmica, con los coeficientes propuestos por el ingeniero McMillan modificados para la traducción en medidas métricas. En rigor, los resultados que se obtengan deben multiplicarse por coeficientes que expresen las relaciones de las resistencias que ofrezcan las pastas puras del aglomerante que haya de emplearse a las que tienen las pastas análogas de los Portland suizos, en un caso, y los norteamericanos, en otro.

Si los valores que de esa suerte se deduzcan para R son iguales o superiores a las resistencias que deba ofrecer el hormigón, las proporciones antes halladas, con la corrección que haya requerido la arena, podrán considerarse aceptables. Si, por el contrario, dichas resistencias son inferiores a las necesarias, habrá de aumentarse la cantidad de aglomerante por encima de lo admitido *a priori* como límite inferior requerido por la impermeabilidad; para ello, auxiliándose de las mismas fórmulas antes aludidas y algún tanteo si es preciso y mediante procedimien-

to igual al indicado, podrá deducirse la corrección que la arena necesite y las proporciones de un hormigón con la misma formado que, teniendo compacidad próximamente máxima o, por lo menos, relativamente muy alta, ofrezca también la resistencia deseada.

De lo indicado puede igualmente inferirse la marcha a seguir para hallar las proporciones de un mortero que haya de emplearse solo, con plasticidad y resistencia determinadas y compacidad que se aproxime mucho a la máxima prácticamente posible.

De un modo análogo podrán deducirse las proporciones de las mezclas cuando se emplee cal hidráulica o cemento que no sea Portland.

HORMIGÓN ARMADO

Consideraciones generales

Los efectos químicos de las aguas marinas sobre el hormigón armado son generalmente mucho más rápidos e intensos y, por tanto, más temibles que sobre el ordinario, debido indudablemente a que se trata de espesores casi siempre más reducidos, lo que equivale a permeabilidad y superficies de ataque proporcionalmente mayores y, sobre todo, a que se suma a las causas que producen en aquél la disgregación el efecto expansivo del óxido de hierro a que la existencia de las armaduras suele dar lugar, suficiente casi siempre para levantar el material que las recubre.

Las manchas de la superficie, que acusan la oxidación de las armaduras, tardan a veces mucho en presentarse, diez años y más, pero los ejemplos de inmunidad de la fábrica resultan en definitiva mucho menos frecuentes que en el hormigón en masa. Eso explica que con respecto al armado no se halle tan generalizada como para aquél la opinión de que los deterioros son debidos exclusivamente a defectos de proyecto, de los materiales o de la ejecución.

De todas suertes, hay también en este caso un terreno de común inteligencia entre los que sustentan las opuestas opiniones, pues nadie deja de reconocer que, cualesquiera que sean las causas a que las disgregaciones deban atribuirse, pueden ser contrarrestadas, más o menos completamente, con las medidas que tiendan a reducir la permeabilidad.

Medios de combatir las disgregaciones

Cuantas medidas y precauciones se han indicado a tal fin anteriormente con relación al hormigón en general son aplicables al armado; pero como en éste es mayor el peligro de disgregación, aquellas medidas y precauciones deben ser aplicadas con rigor más grande.

Aparte de ellas existen algunas peculiares del hormigón armado o que ofrecen modalidades especiales que conviene sean destacadas aquí.

Ante todo es de aconsejar que no se emplee dicho hormigón en mar abierto y, en general, allí donde se halle expuesto al embate violento del oleaje, a menos que lo impongan circunstancias ineludibles. Recuérdese a este propósito que en pocos años han desaparecido casi por completo una docena o más de muelles de recreo de aquel material, levantados no mucho tiempo antes en las playas de California,

no quedando más que uno en Los Angeles, preservado de la destrucción, según se cree, por la acción de los petróleos, probablemente muy densos y asfálticos, que flotaban sobre la superficie del mar y se adherían a las del hormigón.

El proyecto de la estructura ha de obedecer a una concepción especial, con empleo de elementos sencillos, formas robustas y espesores mayores que los usuales, siendo recomendable la adopción de los sistemas estáticamente determinados y, si es posible, que el hormigón en sí no tenga que soportar tracciones algo elevadas. En especial conviene sustraer, en lo posible, las estructuras a choques y vibraciones, empleando tablestacas, pilotes y defensas de madera creosotada o de hormigón que las protejan y refiriendo a tierra firme o a macizos de fábrica los esfuerzos de las amarras de los buques sobre los norayes.

Los desperfectos y disgregaciones que a veces se ha comprobado producen sobre el hormigón las corrientes directas de alta tensión pueden ser prevenidos aislándolas eficazmente y uniéndolas con tierra las armaduras.

Las grietas, facilitando el acceso del agua al interior de la masa, son particularmente temibles. Suelen ser atribuidas a alguna o varias de las siguientes causas: esfuerzo expansivo del óxido de hierro, dilataciones y contracciones, cargas accidentales o definitivas excesivas, proporción muy elevada de aglomerante que provoca una violenta retracción en el fraguado, transporte en malas condiciones de piezas no hormigonadas *in situ* y cura defectuosa.

Contribuyen a la oxidación de las armaduras, a más de las grietas, la insuficiencia de recubrimiento, los defectos locales, como son nidos de grava, vacíos, uniones imperfectas de la masa, etc., que facilitan también el acceso del agua, los corrimientos de las armaduras que con mucha frecuencia ocurren al tiempo del hormigonado acercándolas a los paramentos, la descomposición de los aglomerantes, el empleo de armaduras con un principio de oxidación, etc.

Esta se produce, no sólo en las estructuras bañadas por el agua del mar, sino también en las que se hallan en las proximidades de éste, fuera de su alcance. Puede explicar este hecho la porosidad del hormigón, aun con presiones moderadas, a las corrientes de aire, que está generalmente cargado de humedad y de partículas de sales marinas.

No se ha recurrido hasta el presente a los aceros o hierros inoxidables para librarse de la oxidación, sin duda, por el aumento de coste que ello produciría y, sobre todo, porque la industria no los ofrece aún con las características convenientes. Pero es indudable que si los aceros al manganeso, al níquel u otros, o los hierros descarbonados pueden resistir, como parecen demostrar los experimentos, la acción oxidante del mar, aunque no sea de una manera perfecta, su fabricación adecuada al caso y su adopción, junto con la de los hormigones puzolánicos, podría constituir una solución práctica del problema de la duración indefinida de las estructuras marítimas de hormigón armado que, a ser posible, merecería ser desde luego ensayada.

Ha de considerarse esencial el establecimiento de un buen sistema de juntas que, permitiendo la libre dilatación en todos sentidos, evite las grietas debidas a dilataciones y contracciones producidas por

los cambios de temperatura y, sobre todo, por el traguado y, en general, por el humedecimiento y la desecación, pues éstas llegan a ser unas ochenta veces más intensas que las primeras, y cuando se contraen pueden engendrar tensiones en las armaduras comparables a las producidas por las cargas previstas, capaces de traducirse en grietas si la sección total del metal con relación a la del hormigón baja de un cierto límite que por algunos autores suele fijarse en 0,015, aproximadamente.

Al calcular las armaduras de las distintas piezas que no hayan de ser hormigonadas en el lugar mismo que deban ocupar definitivamente, conviene tener en cuenta los esfuerzos a que quedarán sometidas al ser dichas piezas transportadas y colocadas en obra, pues con frecuencia resultan para el hormigón los de mayor intensidad a que puede estar sujeto. Para evitar esto, tratándose de pilotes, se ha propuesto construirlos colocando los moldes verticalmente y transportando las piezas apoyadas en cunas adecuadas.

Las armaduras no deben ser tan numerosas ni estar tan próximas que dificulten el buen hormigonado, prescripción que en bastantes casos ha de ser incompatible con lo aconsejado por algunos ingenieros de que no excedan de 4 mm los diámetros de los redondos, a fin de eludir la concentración de esfuerzos.

La necesidad de que las mezclas resistan sin descomponerse la acción química de las aguas es, evidentemente, más vital aun en el hormigón armado que en el macizo, porque a la destrucción de la fábrica, que puede ser lenta, se agrega el riesgo, más frecuente, de la oxidación, que suele iniciarla y precipitarla. Por ello, el empleo de las puzolanas en este caso resulta verdaderamente imprescindible si no se recurre a los cementos aluminosos, y aun así no podrá garantizarse que se evitará la ruina si, en la medida suficiente, no se consiguen prevenir las grietas y la porosidad excesiva.

Ha sido recientemente sustentada entre nosotros la opinión de que no deben emplearse las mezclas puzolánicas en el hormigón armado, basándose, a lo que parece, en el supuesto de que bajaría demasiado la adherencia del mortero a las armaduras y en el ejemplo de lo que ocurre en el Extranjero, donde, a causa de esa consideración, no se admiten tales mezclas.

No puede, sin embargo, aceptarse que semejantes supuestos sean fundados. Aparte de que no se comprende cómo el abundante hidrato de cal, que nunca falta en los morteros de cemento Portland, especialmente cuando éste ha de emplearse en proporciones elevadas, pueda proporcionar mayor adherencia que el silicato en que se transforma cuando se emplean morteros puzolánicos, la realidad es que conducen generalmente a conclusión contraria a la admitida las pruebas cuyos resultados han sido publicados, los observados en estructuras construidas desde hace años en varias partes, las noticias sobre la materia que son del dominio de los ingenieros y las opiniones terminantes de varios técnicos de autoridad.

Experimentos hechos en Boulogne con hormigón a base de mortero de 400 kg de aglomerante por metro cúbico de arena, después de un año de inmersión en el mar, dieron para la adhesión las siguientes resistencias, expresadas en kilogramos por centímetro cuadrado de superficie de armadura:

14 para el cemento Portland del comercio, de segunda calidad; 45 para mezclas en la proporción de 60 kg de puzolana por 100 de un Portland poco aluminoso; 31 para mezclas de 50 kg de *gaize* cocida por 100 de Portland francés, calidad llamada administrativa, y, finalmente, 33 para cemento de escorias ordinario.

En Ymuiden se ensayaron bloques de hormigón, atravesados por una armadura, con las tres proporciones siguientes, expresadas en volumen: 1,5, 2 y 2 de Portland por 0,5, 1 y 2 de tras por 3 de arena y por 5, 6 y 7 de piedra, respectivamente. Después de diez años de exposición al agua del mar dieron buenos resultados los ensayos de adherencia y, aparte de eso, se comprobó que era excelente el estado del hormigón, que su superficie no presentaba indicios de óxido, que las barras se hallaban en buen estado y, por último, que no pudo descubrirse ninguna acción perjudicial causada por el tras.

Otros experimentos hechos han dado generalmente resultados favorables a las mezclas puzolánicas. Lo positivo es que su adhesión a las armaduras es mayor que en las mezclas de cemento solo.

Por otra parte, el empleo de éstas en el hormigón armado, sin ser aún de uso general, como no lo es tampoco en el macizo, ha recibido ya numerosas aplicaciones en varios países, especialmente en Italia, Japón, Alemania y Holanda, y recientemente han entrado por la misma vía los Estados Unidos de América. Ingenieros de experiencia y autoridad reconocida lo recomiendan, y algunos, como Foerster, que goza en Alemania de autoridad en la materia, afirman que no se puede negar la conveniencia de las adiciones de tras en cantidad de 20 a 30 kg por cada 100 de Portland, aun en las obras ordinarias de hormigón armado no expuestas a los efectos de las influencias marítimas, porque la experimentación y la práctica demuestran que con ello se aumenta la resistencia y se hace más plástico y compacto el hormigón. Otros varios ingenieros alemanes y el Ministerio de la Guerra prusiano participan de la misma opinión, si bien algún técnico alemán no la

comparte aún, alegando la falta de experimentos suficientes.

Para las estructuras marítimas de hormigón armado preconiza Foerster la adición de 40 kg de tras a cada 100 de Portland, proporción que aconsejan igualmente varios autores.

Otros ingenieros de autoridad, como Luiggi, preconizan también el empleo de la puzolana en el hormigón armado, y realmente no puede negarse hoy que ese material, a más de alejar el peligro de descomposiciones en el mar, aumenta la impermeabilidad, plasticidad y elasticidad de la masa y la adherencia al acero, cualidades todas verdaderamente apreciables al tratarse de los hormigones armados.

Por lo demás, los resultados mismos de las construcciones marítimas hechas con ese material, datando algunas de 1909, atestiguan con elocuencia que no existen los inconvenientes supuestos y que, por el contrario, de las puzolanas buenas, debidamente empleadas, sólo ventajas cabe prometerse.

El espesor de la capa de hormigón sobre las armaduras, demasiado exiguo, sin duda, en los primeros tiempos, no suele en la actualidad ser menor de 5 cm, y aun se preconiza el de 7,5 para las partes que hayan de estar en la zona en que fluctúen las aguas, llegando el Pliego norteamericano a prescribir un mínimo de 7,5 cm, en general, y de 10 cm en los ángulos. Este aumento de espesor contribuirá a reducir el peligro de que el metal sea atacado, pero puede también ofrecer el inconveniente de tener que aumentar la sección total de las piezas o de las armaduras por efecto de la menor eficacia para la resistencia, debida a la situación de las últimas al quedar más alejadas de la superficie. En los pilotes y apoyos ello habrá de conducir a replegar aquéllas hacia el centro, siendo de aconsejar en tal caso limitarlas en lo posible en la parte superior al nivel del agua y reducir el espesor del hormigón en la que haya de quedar constantemente sumergida. Por todo ello parece convendrá que el límite mínimo del recubrimiento difiera poco de 5 cm, siempre que se empleen los aglomerantes puzolánicos.

José NICOLÁU

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos¹

Cálculo económico de las grandes líneas de transporte de energía eléctrica¹

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

II.—Aplicación de las fórmulas fundamentales

Es preciso, primeramente, para aplicar las fórmulas halladas, dar valores numéricos a todas las constantes que en ellas intervienen:

a , pesetas por km de línea y kilovoltio.

Esta constante se puede descomponer en la suma de otras dos, a' y a'' , correspondiendo la primera al coste de los aisladores y la segunda a la parte del coste de las estructuras, que es proporcional al voltaje.

Suponiendo una distancia media entre estructuras

de 175 m, con los precios actuales de los aisladores de suspensión, y teniendo en cuenta la mayor altura de las estructuras y distancia entre conductores al aumentar el voltaje, con el consiguiente aumento de peso y de cimentaciones, hemos calculado la constante a con los valores siguientes:

Líneas sencillas:

$$a = a' + a'' = 24,5 + 11,5 = 36 \text{ ptas. por km y kilovoltio.}$$

Líneas dobles:

$$a = a' + a'' = 49,0 + 16,0 = 65 \text{ ptas. por km y kilovoltio.}$$

¹ Véase el número anterior, página 135.