FABRIQUEMOS HORMIGONES MEJORES Y MAS BARATOS

Por J. C. LE MORVAN, E. C. P.,
Ingenieur-Conseil.

Trata el presente trabajo de la técnica y características del hormigón aircado. La personalidad del autor, eminente Ingeniero francés, especializado en las técnicas americanas, de las que ha sido constante observador y frecuentemente partícipe, hacen que su trabajo sobre estos hormigones, de uso muy difundido, aunque reciente, ofrezca un indiscutible interés desde el punto de vista teórico y práctico.

La inclusión de aire en los hormigones es, actualmente en los Estados Unidos, una cuestión que se considera definitivamente resuelta: todo lo concerniente a la acción benéfica del aire, quinto constituyente del hormigón, ha sido reglamentado en los "Concrete Manuals", y no se concibe un hormigón fabricado de otra forma.

Esta tendencia se preveía desde 1946, y ya la habíamos indicado en enero de 1947 en el *Bulletin du Comité Français de l'Association Internationale des Grands Barrages*. Es lógico, por lo tanto, extrañarse ante la reticencia de ciertos Ingenieros europeos en adoptar e incluso ensayar la nueva técnica.

Probablemente, una de las mayores razones de esta actitud es que la inclusión de aire exige el empleo de un "producto efervescente", preparado y vendido por un fabricante que, por razones comerciales, se cuida muy bien de revelar su composición exacta. Esto no puede satisfacer en modo alguno el cartesianismo de los Ingenieros europeos, y todavía menos el de las gentes de laboratorio, cuyo dictamen, al término de sus experiencias, se reduce a elogiar los méritos del elixir "X" o de los polvos "Y" para el mejoramiento de las cualidades del hormigón.

¿Es preciso, por este motivo, privarse de las ventajas indudables de una técnica nueva? Esto sería, evidentemente, ridículo, y rehusando a adoptar a ojos cerrados las pequeñas recetas del buen hormigón americano, se pueden poner en evidencia las razones suficientes para que la inclusión de aire no pueda, lógicamente, ser desechada ni despreciada. Haremos aquí un brevísimo informe de lo que es la inclusión de aire en el hormigón.

El método consiste en introducir, con el agua de amasado, una pequeña cantidad de materia capaz de provocar la formación de un gran número de burbujas repartidas en la masa del hormigón fresco, y cuyo volumen total oscile entre el 2,5 y el 5 % del volumen del hormigón.

Cualquiera que sea la composición química del producto efervescente, lo esencial es obtener, en ausencia de toda reacción química entre el producto y el cemento, burbujas de pequeño diámetro cuya tensión superficial sea suficiente para asegurar su estabilidad.

La experiencia ha demostrado que las modificaciones introducidas en las caracterísctcas del hormigón son óptimas cuando la proporción volumétrica de aire en el mortero es del orden del 4 %, con burbujas de un diámetro comprendido entre 2 décimas y 5 centésimas de mm.

* * *

La composición racional de un hormigón está ligada estrechamente al destino que se le asigna, y las cualidades que se exigen de él son función de la naturaleza y características de la obra que se ha proyectado y calculado y se desea construir con él. Entre estas características distinguiremos las siguientes:

— por una parte, la carga máxima que el hormigón pueda resistir, habida cuenta del coeficiente de seguridad prefijado;

— en segundo lugar, las condiciones en que deberá vivir, conservando sus cualidades, es decir, las intemperies, la presencia de aguas puras o de aguas selenitosas, etc.

Estudiar el hormigón destinado a la construcción de esta obra particular, significa: "Buscar, en función de los materiales e instalaciones de que se dispone, la composición susceptible de proporcionar *al mínimo precio posible* el hormigón dotado de todas las cualidades requeridas desde el doble punto de vista: resistencia y duración".

El buen hormigón será, en suma, el resultado de un balance bien hecho: el estudio de su composición no debe dejar lugar a ninguna decisión *a priori*, ni a consideraciones puramente teóricas o convencionales.

Acabamos de enumerar las tres características esenciales del hormigón: resistencia, duración, precio.

En efecto, el precio comprende dos partes: una, función del precio de los materiales, y la otra, de la economía de su puesta en obra más o menos correcta (vibración fácil, buen vertido sobre los encofrados, disposición adecuada de las armaduras). Una cuarta característica será la manejabilidad.

La composición óptima, en cada caso particular, se deducirá de un estudio comparativo en el cual intervienen: la resistencia, la duración, la manejabilidad y el precio de los materiales.

Afirmamos acto seguido que el estudio del hormigón, emprendido bajo estas bases racionales, conducirá normalmente a adoptar la inclusión de aire.

Nos hallamos muy lejos de adoptar recetas trasnochadas, dosificaciones de cemento fijadas de antemano, granulometrías teóricas y relaciones agua-cemento tiránicas. Antes bien, no siendo nuestro propósito acometer el estudio de los hormigones en su conjunto, nos limitaremos a citar las propiedades que le comunica la inclusión de aire, señalando de pasada las ventajas susceptibles de intervenir en el balance anteriormente citado.

* * *

Si, en el hormigón ordinario, los huecos observables al microscopio tienen formas cualesquiera, los del hormigón tratado son sensiblemente esféricos y mucho más pequeños. Se cuentan cientos de miles de millones por yarda cúbica.

Todas estas esferas que quedan comprendidas principalmente entre los granos de arena, de dimensiones entre los tamices 16 y 50, están limitadas por membranas capilares dotadas de una gran tensión superficial. Resulta así una gran cohesión en el mortero fresco, que es suficiente para evitar la disgregación del hormigón y, asimismo, permite su transporte a largas distancias, sin requerir su modificación a la llegada.

Esta primera ventaja se traduce en ganancias apreciables sobre las obras: todos los recipientes de hormigón se vacian bien, aun cuando su vaciado se haga esperar; el transporte sobre cinta se puede efectuar con grandes pendientes, etc. En suma: se puede alcanzar un mejor rendimiento de las instalaciones y una reducción del tiempo perdido. Los contratistas nos han afirmado que el beneficio real, desde este solo punto de vista, era ya superior a los gastos de compra y utilización del producto efervescente. Pero estas mismas burbujas, en el momento de poner en obra el hormigón, facilitan la distribución de las partículas. Colocadas entre los granos de arena, rígidos y angulosos, que se adaptan mal al movimiento de los granos vecinos, los esferoides de aire deformables disminuyen el coeficiente de rozamiento interno del hormigón. El cemento y el agua, al no tener que desempeñar el papel esencial de lubricantes de la masa, hacen que la cantidad de agua de amasado pueda disminuirse de un modo notable, obteniéndose hormigones equivalentes desde el punto de vista de sus cualidades de puesta en obra. Entonces la relación agua-cemento mejora y, si la resistencia a obtener lo permite, se podrá disminuir la dosis de cemento.

Aunque luego insistiremos sobre este particular, volvamos a la puesta en obra del hormigón.

La inclusión de aire disminuye su rigidez, y por lo tanto se puede colocar fácilmente, llenando mejor y con más exactitud los moldes y recubriendo mejor las armaduras. El tiempo de vibración necesario para esta colocación correcta disminuye en la proporción de 5 a 1, los vibradores mismos dejan de sufrir y podríamos citar una obra en que, por primera vez, los vibradores se atascaban porque la distribución del producto efervescente debía haber sido detenida durante dos días. ¿Quién es el constructor a quien no interesen ventajas tan interesantes?

Debe notarse el hecho indudable de que la vibración tiende a hacer salir las burbujas, mas en una proporción tal, que su acción benéfica subsiste casi totalmente. En realidad, es fácil regular la proporción de aire necesaria en el amasado para que el 4 % deseable se conserve en el mortero aun después de la puesta en obra y vibración.

Hablemos ahora de la exudación que acompaña con mucha frecuencia al hormigón ordinario cuando se pone en obra, sobre todo si la proporción de cemento es pequeña. La inclusión de aire la suprime totalmente en todo hormigón bien estudiado. Trataremos de analizar lo que ocurre en los dos casos.

El cemento, para reaccionar, necesita solamente el 18 % de su peso de agua, pero se sabe que para "mojar" el cemento y convertirlo en una pasta plástica es preciso un 25 a 30 %. Si se tiene en cuenta la cantidad de agua necesaria para mojar los agregados, y especialmente la arena fina, se llega a un peso del agua del 50 a 80 % del peso del cemento, según sea la granulometría empleada y la plasticidad obtenida.

La cantidad de agua remanente, no susceptible de combinarse, es considerable: 30 a 70 % del peso del cemento, lo que representa, habida cuenta de las densidades, un volumen poco más o menos equivalente al volumen absoluto del cemento utilizado. Este exceso de agua es, sin embargo, estrictamente indispensable en el caso general para que la película de agua que rodea a las partículas de cemento y los granos de arena tenga espesor suficiente para desempeñar el papel de una lámina lubricante; si no ocurre así, el hormigón no será manejable.

Cuando el hormigón ha sido colocado, la hidrólisis de los granos de cemento las recubre de un gel y se sueldan entre sí. El agua remanente expulsada de las zonas de soldadura se reúne en gotas cada vez más gruesas que, más ligeras que la pasta de cemento, se elevan y aparecen en la superficie libre del hormigón, dejando como estelas canales capilares que se rami-

fican, debido a la presencia de granos de arena. Estos canales permanecerán abiertos después del fraguado; insistiremos sobre ello más adelante, por su importancia capital para la duración del hormigón. Precisemos en este punto que no pueden ser ni las investigaciones referentes a la granulometría ni los perfeccionamintos de los métodos de puesta en obra (vibración, hormigón al vacío, etc.) los que pueden modificar este estado característico que resulta de la presencia de agua remanente migratoria.

El hormigón ordinario es, según esto, un material microfisurado; pero si en este hormigón sustituímos una parte de los granos de arena fina por sendas burbujas de aire, la cantidad de agua remanente podrá disminuirse con igual plasticidad, y además, este agua habrá perdido su carácter migratorio. Estará ligada a las burbujas minúsculas de aire por solicitaciones proporcionales a la tensión capilar en la superficie de cada burbuja, equivalentes a una presión exterior. Las causas de la exudación habrán desaparecido. Al mismo tiempo, habremos realizado una economía apreciable: la de la arena fija, el más oneroso de los agregados. En muchas obras en que la granulometría interna de la arena es pobre en la zona de los finos, las burbujas de aire en inclusión corregirán esta deficiencia de un modo casi gratuito.

Por el contrario, para que el agente efervescente cumpla su papel correctamente, es esencial que los materiales sean desprovistos del polvo en el mayor grado posible. La presencia de "filler" en el hormigón tiene, por lo demás, los más perniciosos efectos sobre su impermeabilidad y su resistencia a las heladas, y juzgamos que en todos los casos es preferible eliminarlo.

* * *

Para hacer comprender la influencia del aire en inclusión sobre la vida ulterior del hormigón, expondremos lo que ocurre después de su puesta en obra y durante el fraguado del cemento.

Tanto si ha habido exudación como si no, el agua remanente ha sido expulsada de las zonas de soldadura y ha circulado más o menos en la masa del hormigón, reuniéndose notablemente en la parte inferior de los agregados grandes. Sin embargo, en el momento en que se produce el fraguado hay una disminución del volumen total silicato + agua combinada. Se produce un vacío que tiene por efecto atraer hacia el interior de la masa el agua periférica y el aire, si el hormigón no se ha mantenido húmedo. A este fenómeno debe atribuirse el secado brusco y muy limpio de los paramentos de las obras en el momento en que se produce el fraguado Este vacío habrá tenido también por efecto hacer comunicarse entre sí las burbujas de agua agrupadas en los intervalos comprendidos entre los granos, creando así un nuevo sistema de fisuras microscópicas. Un hormigón que acaba de fraguar lleva normalmente, según esto, una red ramificada de canales capilares y de vacíos un poco menos importantes rellenados de agua o de aire y comunicados entre sí.

Es evidente que si en el centro de cada burbuja de agua existe una burbuja minúscula de aire que, gracias a su tensión superficial le habrá servido de nudo, esta burbuja de aire aumentará de volumen en el momento de producirse el vacío; pero dos burbujas próximas permanecerán, a pesar de ello, independientes una de otra. Después del secado completo del hormigón, los vacíos tendrán una forma esférica en lugar de las formas hiperbólicas o exponenciales indicadas por M. Freyssinet, y no se comunicarán entre sí. La inclusión de aire habrá permitido transformar el hormigón, normalmente microfisurado, en un medio microporoso, y esto nos va a explicar sus cualidades de estanqueidad, así como de resistencia al hielo y a las aguas agresivas.

* * *

El movimiento del agua en un hormigón bien fabricado se produce gracias a los canales capilares; su propagación está regida entonces por las leyes de la capilaridad. Desde luego, la presión capilar es inversamente proporcional al diámetro de los canalículos. Todo aumento de sección lleva como consecuencia una reducción de la presión. Este es el papel que desempeñarán las burbujas de aire, que detienen la circulación capilar, como el orificio circular practicado en una lámina de hielo detiene la progresión de una grieta, o mejor aún, como una abertura o ensanchamiento esférico en un tubo capilar detiene la progresión del líquido. En efecto, los hormigones con inclusión de aire se manifiestan muy poco higroscópicos.

Cuando un hormigón embebido de agua se hiela, la superficie helada previamente comunica este efecto a las zonas más profundas, mas sin provocar realmente el efecto de ruptura hasta que la expansión del hielo puede hacerse hacia el exterior. Cuando la temperatura continúa descendiendo, el hielo tiende a progresar, pero el agua se solidifica a una temperatura tanto más baja cuanto menos libre esté. (Los suecos han demostrado que para helar toda el agua de un hormigón se necesita una temperatura de 30° C. bajo cero.) Esta continúa entonces bajo la presión de expansión del hielo, progresando la sobrefusión hasta que, llenado todo el espacio disponible, produce el hielo sus efectos destructores. Cuando, por el contrario, se trate de un hormigón cuyos canales capilares están cortados por expansiones esféricas, éstas siempre se hallarán llenas de aire, al menos parcialmente, cualquiera que sea el tiempo de imbibición del hormigón. En estas condiciones, cuando el hielo avanza a partir de la superficie saturada de agua, las presiones van amortiguándose en las vacuolas que se encuentran sucesivamente. En efecto, se ha comprobado que sólo a 15° C. bajo cero las vacuolas muy

próximas a la superficie contienen hielo, mas ninguna de ellas está completamente llena. La presión de expansión del hielo no ha tenido, por lo tanto, ocasión de producirse.

Se comprende que la resistencia a los hielos y deshielos sucesivos de los hormigones con inclusión de aire sea incomparablemente superior a la de los hormigones ordinarios mejor constituídos.

La alterabilidad de un hormigón, igual que la de una roca cualquiera, es función de su agrietamiento natural. El mecanismo de su alteración por las aguas puras o agresivas es perfectamente comparable al de su alteración por el hielo. El agua que circula en la red de microfisuras intercomunicadas atacará o disolverá la cal liberada por el fraguado del cemento. Esta acción se acelera por la imbibición y desecación alternativas. La cohesión entre los elementos yuxtapuestos del hormigón disminuye paulatinamente por la acción química del líquido, así como por la acción mecánica del hielo. En los dos casos, el hormigón conserva un esqueleto, generalmente intacto, cuya resistencia a compresión es apreciable, como se deduce del hecho de ordenación de los granos de un hormigón bien fabricado y puesto en obra de un modo correcto. Por el contrario, no existe resistencia a flexión, y una acción mecánica muy débil permite desintegrarlo como si fuese un rompecabezas.

Este paralelismo del modo de alteración de los hormigones por el hielo y por las aguas agresivas, justifica el que se tienda a apreciar su grado de duración por la medida de su resistencia a los hielos y deshielos alternativos. Esto es, en suma, una medida indirecta de su grado de fisuración natural.

Por otra parte, la experiencia ha demostrado que los hormigones con inclusión de aire resisten a la acción de las aguas agresivas, y especialmente al agua de mar, mucho más que los hormigones normales mejor constituídos, como era de esperar.

* * *

Para no arriesgarse en la apreciación de las ventajas excepcionales que permite obtener la aireación del hormigón, como acabamos de ver, es preciso limitarse a un estudio de la composición del mismo y a un estrecho control de la cantidad de aire incluído.

Si nos referimos a la fórmula de Feret para determinar la calidad de un hormigón, hemos de admitir que el aire incluído figura con el mismo título que el agua de amasado, como parámetro, y tendremos:

$$R = K \cdot \left[\frac{I}{I + \frac{W + A}{C}} \right]^2;$$

en la que W, A y C son, respectivamente, los volúmenes unitarios de agua de amasado, aire incluído y cemento.

Si, por así decir, incorporamos a la fuerza cierta cantidad de aire en un hormigón cuya relación agua-cemento esté bien estudiada, su resistencia mecánica (*compressive strengh*) no puede sino disminuir.

No obstante, hemos dicho antes que se trataba de sustituir ciertos granos de arena por burbujas de aire, que en realidad desempeñan el papel de agregados provistos de propiedades muy particulares, especialmente en lo que se refiere a plasticidad resultante.

Si, conservando una trabajabilidad (*workability*) suficiente, rehusamos a quitar tanta agua como aire incorporado, la resistencia no debe cambiar. Desde luego, puede ocurrir que la reducción del volumen de agua pueda ser superior al volumen de aire incluído, y la experiencia muestra que, en este caso, se observa un aumento de resistencia.

Prácticamente, en ningún caso se disminuye de un modo apreciable el crecimiento de la resistencia de un hormigón por una dosificación o unos componentes determinados, si se obtienen de la inclusión de aire todas las ventajas que resultan de la posibilidad de reducir las cantidades de agua y de arena que contiene.

Si es difícil alcanzar este resultados en el caso de dosificaciones fuertes (6 sacos por yarda cúbica y aun más), el motivo ha de buscarse en el hecho de que el cemento mismo exige para su hidratación en pasta pura un 25 a 30 % de su peso de agua, en lugar del 18 % estrictamente necesario para el fraguado.

La composición química del producto efervescente puede intervenir y tener un efecto sobre la resistencia: puede contener un plastificante o bien un acelerador del fraguado.

Sin embargo, lo esencial en todos estos casos es la presencia de aire en inclusión, y no carece de interés el aviso prudente de Monsieur G. S. Lalin, del "State Power Board", de Suecia, que utilizaba ciertos albuminoides como agentes portadores de aire. Refiriéndose a las presas de bóvedas múltiples de hormigón armado con dosificaciones ricas, escribe: "Tenemos en Suecia numerosas obras que han sido construídas según nuestra técnica. Es cierto que las resistencias del hormigón a rotura por compresión son generalmente débiles a causa de la inclusión de aire; pero estas obras han resultado excelentes en lo que concierne a impermeabilidad y resistencia al hielo. Por el contrario, no podemos citar ni un solo caso en el cual un ligero exceso de aire incluído haya causado al hormigón daños considerables. La cuestión planteada es averiguar si sería conveniente y útil para el desarrollo de la técnica de los hormigones, que los contratistas e ingenieros comprendiesen la importancia de la regularidad del producto acabado, y tanto más cuando esta cualidad ha de obtenerse, en cierto grado, a expensas de la resistencia a compresión."

En el mismo orden de ideas, y basándonos en experiencias de laboratorio, podemos decir que la ad-

herencia del hormigón a las armaduras disminuye con la aireación, pero aumenta, en cambio, la regularidad de adherencia. Se puede afirmar que esta regularidad, debida a la manejabilidad incomparable del hormigón reciente, compensa de sobra la posible reducción de adherencia propiamente dicha y que la aireación mejora todos los hormigones armados.

Volvamos, para concluir, a la elección de la composición para una obra determinada.

En el caso de hormigón ordinario:

1. Para mejorar la plasticidad, es preciso aumentar las cantidades de cemento y finos.
2. Para conseguir más impermeabilidad, se ha de aumentar asimismo la dosis de cemento.
3. En cuanto a la duración, hay que actuar sobre la granulometría de los finos y también sobre el cemento.

En definitiva, se puede llegar a una composición de hormigón cuyo precio sea desproporcionado con el empleo que se le quiera dar.

En el caso del hormigón aireado, conocemos todos los factores esenciales: plasticidad, impermeabilidad y duración. Sólo queda por hallar la granulometría más económica que, asociada a una dosificación mínima de cemento, origine la resistencia a compresión prefijada.

Consideremos los casos típicos más frecuentes: presas de gravedad, bloques para muelles, muros de sostenimiento y otras obras cuyo peso propio interviene en los cálculos de estabilidad y en los que el coeficiente de trabajo del hormigón alcanza raramente los 300 p. s. i. (libras por pulgada cuadrada). ¿Es razonable continuar exigiendo a este hormigón, como era obligado hacerlo, una resistencia superior a las 3 000 p. s. i. a los veintiocho días?

En la presa de Bluestone hemos visto economizar el 17,5 % del cemento, combinando debidamente las arenas y la aireación, y pronto veremos hormigones de presa que contienen menos de dos sacos de cemento por yarda cúbica.

Interesarse por una técnica que permite tan sensacionales economías, es más que una obligación: es un deber, suficiente para que no se permita vacilación de ningún género.

Un eminente director de laboratorio decía, el año pasado, al final de una conferencia sobre la aireación: "El exceso de alabanzas hechas a esta técnica de elaboración del hormigón le ha acarreado unos perjuicios que las críticas no hubieran podido hacerlo". Y aún más, obsesionado él mismo por este motivo, declaraba: "Se quiere llegar de un solo golpe a vencer sobre todos los campos". Las alabanzas puede que no fuesen excesivas, pero el eminente director llegaba quizás tarde en socorro de un suceso técnico ya asimilado.

Sin duda alguna les queda mucho trabajo a los químicos para perfeccionar la composición del agente efervescente, pero los constructores tienen ya a su disposición numerosas posibilidades para fabricar un hormigón menos caro y más duradero.

Notas.

1.ª No hemos hablado del modo de empleo de los agentes efervescentes. Los distribuidores de estos productos disponen, en la actualidad, de servicios técnicos capaces de aconsejar con eficacia a los constructores que realizan sus primeros ensayos

2.ª A veces se intenta imponer sobre las obras composiciones de hormigón que han dado buenos resultados en el laboratorio, pero que son prácticamente irrealizables o presentan para su puesta en obra dificultades que comprometen seriamente todas sus cualidades.

3.ª En la presa de Castelo de Bode (Portugal), la arena natural de río es muy pobre en finos El estudio previo del hormión había mostrado la necesidad de añadirle una arena de duna y previsto la extracción y transporte de 50 000 yardas cúbicas de ésta a partir de un arenal situado a más de 20 millas de la obra. La corrección de la arena natural se ha obtenido, según nuestras indicaciones, mediante la sola aireación. El producto efervescente ha sido el "Darex", que se utiliza aún en la actualidad en las presas de Cabril y Salemonde (Portugal).

En la presa de Tignes, que será la mayor de Europa, los agregados provienen de la trituración y molienda de una caliza relativamente blanda que da un gran porcentaje de finos. La presencia de este "filler", temible para las cualidades del hormigón, se oponía simultáneamente al desarrollo de burbujas de aire incluído en la masa. El producto efervescente ("Darex") no ha dado los efectos deseados sobre la manejabilidad y resistencia al hielo, que, después del lavado para eliminar el polvo, previsto, por lo demás, en el resto de la instalación, se ha mostrado plenamente eficaz.

5.ª Véase *Une révolution dans les techniques des bétons*. Eyrolles, 1931.

6.ª Los aumentos de resistencia provienen, a menudo, de la sola disminución de la cantidad de arena fina. La fórmula de Feret es insuficiente, por tener en cuenta sólo el agua necesaria para mojar esta arena.