

# METODO PARA DETERMINAR LA DOSIFICACION DEL HORMIGON FRAGUADO

Por JUAN M.<sup>a</sup> CORONAS y VICENTE IRANZO, Doctores en Ciencias Químicas.

Del Laboratorio Central de Ensayo de Materiales de Construcción.

*No es necesario encomiar el interés que para nosotros tiene la determinación de la dosificación del hormigón fraguado, ya que permite la inspección de obras ejecutadas; así que, al presentar en nuestra REVISTA este nuevo método, sólo haremos realzar que en las diversas comprobaciones que de él se han hecho se han observado resultados muy aproximados.*

A pesar de la indiscutible importancia práctica del problema de determinar la cantidad de cemento empleado en la fabricación de hormigones más o menos antiguos, y de la frecuencia con que se acude a los Laboratorios de ensayos de materiales en solicitud de dichas determinaciones, la insuficiente comprobación experimental a que han sido sometidos los pocos métodos propuestos para la resolución de este problema y la diversidad de materiales que pueden ser utilizados han impedido confiar en los resultados obtenidos al aplicar métodos siempre poco rigurosos y de los que se desconocían no tan sólo los límites de error a que podían conducir, sino incluso las limitaciones o modificaciones que debían tenerse en cuenta al aplicarlos a los materiales españoles.

Se dejaba sentir, pues, la necesidad de precisar las posibilidades de resolución del problema, de fijar un método de aplicación general, cuya exactitud—probada experimentalmente en la mayor variedad posible de casos—fuese claramente suficiente, y de establecer los límites de error máximo probable a que dicho método pudiera conducir.

No puede haber método alguno que permita recuperar inalterado el cemento del hormigón que ha experimentado ya la acción del fraguado. Aun cuando se puedan desagregar los componentes del hormigón, no resulta satisfactoria la separación puramente mecánica de cemento fraguado y áridos. Así, el método Loman (1), que trata de conseguir esta desagregación enfriando rápidamente en agua fría el bloque de hormigón, previamente sometido durante cuatro horas a la temperatura de 800-900 grados centígrados (atronado), consigue resultados satisfactorios en la separación y determinación de los áridos empleados (grava y arena), si bien, naturalmente, sólo en el caso de ser éstos de naturaleza silíceo, siempre que la desagregación por enfriamiento brusco vaya seguida de ataque químico de los áridos separados por tamizado, al objeto de librarlos del cemento adherido. Este puede llegar a ser del orden del 18 por 100 del cemento total, según se deduce de los valores consignados en su trabajo.

Con el empleo de reactivos químicos no se consigue atacar total y exclusivamente el cemento, pues los reactivos utilizados, capaces de atacarle, disuelven también, casi sin excepción, mayor o menor cantidad de áridos y dejan inalterado el residuo insoluble del propio cemento, y, además, la pérdida por disolución viene a incluir también el agua retenida por el cemento al fraguar y endurecer, lo cual impide en todo caso un cálculo directo.

Se ha intentado llegar al conocimiento de la dosificación de un hormigón directamente, sin desagregar ni atacar el bloque investigado. Holtschmidt (2), en 1934, intentó conseguirlo mediante el empleo de los rayos X. Cuando éstos atraviesan una probeta de hormigón o mortero de forma plana, la distribución de zonas claras y oscuras en el roentgenograma obtenido depende de la proporción cemento-áridos. Para interpretar las placas fotográficas es necesario compararlas con otras obtenidas a partir de probetas de composición conocida, escurpulosamente preparadas e igualmente humedecidas. El método, no obstante, es muy inseguro, pues entre otras cosas los materiales inertes muy finos tienen igual acción que el cemento (3).

Todo método que pretenda ser de aplicación bastante general tendrá que ser, forzosamente, un método indirecto. De hecho, casi todos los métodos que han sido propuestos se basan en determinar en el hormigón la cantidad de un elemento que, existiendo en abundancia en el cemento, no entre a formar parte de los áridos o esté contenido en ellos en cantidad muy escasa o combinado químicamente en forma distinta de como se encuentra en el cemento, lo cual puede permitir hacer la separación deseada mediante ataque apropiado. Aun los métodos como el de Loman (1), que tratan en algunos casos de determinar directamente los áridos, tienen que acudir al cálculo indirecto para la determinación del cemento. Cada uno de los tres métodos que propone Loman para la determinación de la cantidad de cemento: el de la pérdida al fuego, el de la sílice y el del pignómetro, incluyen, en último extremo, la determinación de parte del cemento (cuando me-

nos, la adherida a los áridos) a partir del valor en sílice soluble.

La existencia en el hormigón de dos áridos diferentes, como mínimo, además del cemento y el agua retenida, ha impedido prácticamente toda determinación general de la proporción de los componentes (cemento, arena y grava).

En el caso extremo de áridos síliceos absolutamente inatacables, los métodos que se han propuesto determinar la proporción de los componentes tratan de conseguirlo por separación de los áridos, inalterados (método de Loman) o por separación previa de la grava y análisis de la proporción cemento-arena en el mortero, con ayuda de alguno de los métodos empleados en la determinación de la dosificación de morteros, de los cuales trataremos en otro trabajo (método indicado por Malette) (4).

Según Malette, se desagrega mecánicamente un kilogramo de hormigón, tratando de evitar en lo posible el cuarteamiento de la grava que lo integra y que se separa después con tamiz apropiado. Para separar el mortero adherido a la grava se remueve ésta enérgicamente en una cubeta bajo el chorro del agua. Resulta difícil aceptar ya "a priori", que tal método pueda conducir a una separación cuantitativa de la grava y el mortero, y, de hecho, es prácticamente imposible en un buen hormigón conseguir esta separación.

El método de Loman, cuyo fundamento hemos indicado ya, exige disponer de una mufla eléctrica, con capacidad para bloques de unos cinco kilos de peso, y, además, conduce a valores bajos en áridos, siempre que, aun siendo de naturaleza sílicea, se cuarteen sensiblemente por acción de las tensiones que provoca el brusco enfriamiento, o siempre que tengan una pérdida al fuego sensible.

No es necesario, empero, en la práctica, llegar a determinar la proporción de los componentes del hormigón; en todo caso, como máximo, la relación cemento-árido total. La Instrucción española para el Proyecto y Ejecución de Obras de Hormigón, de fecha 20 de marzo de 1944, de acuerdo con la tendencia actual en otros países, precisa sólo las condiciones mecánicas que deberá cumplir el hormigón para deducir por ellos su contenido en cemento, expresado en kilogramos por metro cúbico de hormigón fraguado. Bastará, pues, en general, conocer con suficiente exactitud la riqueza en cemento; y en este sentido, de mayor generalidad, ha sido orientado nuestro trabajo, el cual nos ha permitido llegar a resultados totalmente satisfactorios, según lo atestiguan los valores que figuran en la parte experimental del mismo, y aun a conseguir con suficiente aproximación la relación cemento-árido total, incluso con hormigones integrados por áridos total o parcialmente calizos. Si bien en este último aspecto no nos parece prudente sentar aún conclusiones definitivas.

\* \* \*

Todos los métodos publicados para la determinación del cemento en hormigones puede decirse que derivan del método debido a Kriege (6), que data del año 1924 y está basado en que el ácido clorhídrico ataca fácilmente a los silicatos cálcicos existentes en el cemento y no a los otros silicatos o a la sílice libre que integran, ordinariamente, los áridos empleados. Fundamentalmente, el método consiste en atacar con ácido clorhídrico y someter el residuo a la acción de hidróxido sódico caliente para disolver la sílice gelatinosa que haya podido separarse en el tratamiento ácido; determinar la sílice en los líquidos filtrados y, conocido el contenido en sílice del cemento, calcular la cantidad de cemento correspondiente a la sílice soluble hallada. Se realiza la determinación, por lo menos, por triplicado a partir de muestras de diez gramos y se utiliza ácido 3,3 N en caliente y la solución de NaOH, N.

Este método, sin más variación que emplear pesos de muestras menores (2 gramos), ha sido adoptado desde 1936 como *standard* por ASTM con la designación C 85-36, y el método dado a conocer por Menegline (19) no difiere prácticamente del adoptado por los americanos.

El propio trabajo de Kriege indica ya que entre las cuatro determinaciones practicadas sobre una misma muestra de hormigón llegaron a encontrarse diferencias de más de 0,4 en el tanto por ciento de sílice. Teniendo en cuenta que los valores de sílice eran del orden de 2,8 a 7,2 por 100 (12 a 24 por 100 de cemento de 21,75 por 100 de sílice), estos significarían unas divergencias que podían llegar a ser del 14 por 100 del cemento hallado. Esta falta de reproducibilidad en los resultados, llevados a cabo sobre una misma muestra finamente pulverizada del hormigón, determina que en las normas ASTM, al adoptar el método, prescriban llevar a cabo la determinación por triplicado. La modificación del método, adoptada por las normas americanas, de emplear en el análisis muestras de dos gramos, tiende, evidentemente, a exagerar aún más los errores, si bien con ello trata de obviar, en parte, una de las dificultades: la lentitud del filtrado de la solución alcalina.

De los ensayos hechos en este laboratorio sobre este método, hemos podido deducir que estas divergencias son frecuentes y, además, que los resultados tienden a ser marcadamente altos.

Esta tendencia había sido ya puesta de manifiesto por Gallo (9), en 1927, quien llegó a obtener resultados tan discrepantes con respecto a la dosificación empleada, que llegó a afirmar taxativamente que el método analítico de Kriege para la determinación de la sílice activa en los conglomerados hidráulicos no puede aplicarse. Aun cuando Gallo parece haber obtenido valores realmente anormales, no cabe duda que el método Kriege lleva ya en sí una causa de error. Las discrepancias proceden, en gran parte, del

empleo de la solución de hidróxido sódico para disolver la sílice separada por el tratamiento ácido y del empleo de pequeño peso de muestra. El tratamiento con hidróxido para la determinación del residuo insoluble del cemento, y, en general, el tratamiento análogo empleado para separar los silicatos solubles de la arena y silicatos insolubles en arcillas, se ha sustituido, desde hace años, en la casi totalidad de métodos analíticos modernos, por el tratamiento con carbonato sódico. Esta sustitución es necesaria, como probaron Lunge y Millberg (7), pues el hidróxido puede disolver parcialmente el cuarzo pulverizado, e inclusive la solución de carbonato sódico puede disolver cantidades sensibles si se trata de materiales en estado de extrema división.

Se ha intentado evitar el peligro del ataque por álcalis, suprimiendo su empleo. Florentin (10) indica que el ácido clorhídrico, de  $d = 1,12$ , disuelve, a 15 grados centígrados, íntegramente el cemento, dejando, prácticamente, intactados la arcilla y otros silicatos (arena). A pesar de ello, el propio Florentin recomienda el empleo de solución caliente de carbonato sódico al 5 ó 6 por 100, para asegurar la total disolución de la sílice del cemento. Ensayó el método exclusivamente con morteros, sobre muestras de cuatro gramos, y obtuvo errores del 6 por 100 en uno de los dos casos estudiados con cemento Portland.

Killig (11) recomienda también el ataque del hormigón con clorhídrico diluido frío y el empleo de pesos de muestras pulverizadas del orden de 100 gramos. Los resultados, empero, acostumbra a ser bajos en cemento.

Platzmann (12) indica que puede evitarse la separación de la sílice durante el ataque por ácidos y, por tanto, el uso de álcalis, siguiendo a Grün, al hervir el hormigón pulverizado con agua antes de añadir el ácido de ataque (1:1) en volumen mitad al del agua empleada, de forma que el ácido resultante tenga la concentración 1 : 3.

El método de la pérdida al fuego, recomendado por Loman, y el del pignómetro, conducen a la determinación del cemento por caminos totalmente diferentes, pero no pueden ser aplicados más que en el caso de áridos completamente inalterables. El tercer método indicado en su trabajo, el de la sílice, es ya una aplicación del método Kriege, con la diferencia de que al haber separado ya la casi totalidad de los áridos antes del ataque del cemento y, por otra parte, al atacarse el cemento adherido a los áridos sin estar éstos triturados, el error por el empleo de la potasa cáustica se reduce, en estas condiciones, al mínimo, máxime al emplear muestras de varios kilos de peso. En el ensayo efectuado por Loman, el error fué del 4 por 100 por exceso. Pero, como hemos hecho notar, tampoco el tercer método de Lo-

man podría seguirse en el caso de áridos calizos.

El método alemán prescrito por las normas DIN (5), que se propone determinar la relación cemento-árido total, y comprende cuatro casos diferentes, según los materiales de que se disponga y su naturaleza, sigue el ataque con NaOH. El ataque se efectúa sobre el bloque de hormigón, ligeramente cuarteado, y emplea, sucesivamente, ácido clorhídrico diluido, caliente, de densidad, aproximadamente, 1,03 y solución de hidróxido sódico al 2 por 100. Se calcula el cemento, en caso de no ser los áridos esencialmente silíceos (único caso en que podría calcularse con bastante aproximación a partir de la pérdida al fuego y del residuo insoluble), a partir también de la cantidad de sílice soluble hallada. El error puede ser menor, debido a haberse empleado muestras no pulverizadas de varios kilos de peso. El método lleva consigo, no obstante, la incomodidad de manejar grandes cantidades de material y la larga duración del ataque.

Se ha tratado también de determinar el cemento a partir de la cal soluble (13), pero este método sólo es aplicable, naturalmente, en caso de áridos silíceos.

\* \* \*

Esta breve reseña de los principales métodos y de las variantes sugeridas por unos y otros autores permite formarse una idea clara de la falta de seguridad de los métodos analíticos seguidos en la determinación de la sílice, y con ello los errores que puede entrañar la determinación del cemento en un hormigón usual, por este método que parece ser el único de aplicación general. Los métodos de análisis químico empleados no eran suficientemente reproducibles.

Hemos intentado encontrar un método de determinación de la sílice activa del cemento que no adoleciera de este defecto y fuera, además, de fácil realización. Para el ataque hemos seguido las indicaciones consignadas en el trabajo de Platzmann, pues un ensayo previo nos convenció de que permitía obtener casi la totalidad de la sílice del cemento aun sin tratamiento alcalino. Como queda, no obstante, una parte de sílice sin disolver, que, por lo demás, es bastante mayor cuando por ser el árido calizo disminuye grandemente la concentración final del ácido de ataque, juzgamos necesario el tratamiento del residuo con solución de carbonato sódico al 5 por 100. Para facilitar la filtración del líquido alcalino y evitar que pase turbio, la solución de carbonato sódico al 5 por 100 empleada contenía, además, un 5 por 100 del cloruro sódico (14). Al propio tiempo, orientado el trabajo en el sentido de encontrar el cemento, expresado en kilogramos por metro cúbico de hormigón fraguado, partimos en nuestros ensayos de 20 gramos de muestra media pulverizada hasta pa-

sar por el tamiz número 30 (121 mallas por centímetro cuadrado), procedente de la trituración íntegra de un bloque de siete kilogramos de peso. Con esta pulverización moderada, empleando la solución de carbonato sódico en vez de la de hidróxido sódico, y siendo el peso de muestra 10 veces mayor que el empleado por el método ASTM, conseguimos, en efecto, obtener así resultados satisfactorios.

Se prepararon en el Laboratorio probetas de hormigón de dosificación conocida y se tomaron las mayores precauciones, a fin de que se pudiera conocer la riqueza en cemento de los bloques en el momento de someterlos al análisis. Con determinaciones por duplicado de una misma muestra, las discrepancias obtenidas en el tanto por ciento de sílice son, a lo sumo, de 0,19 por 100, lo que viene a corresponder a 7 por 100 de cemento. Tomando la medida de las dos determinaciones, los valores obtenidos difieren de los verdaderos en menos del 4 por 100 en el peor de los casos, siempre que se conozca el tanto por ciento de sílice del cemento empleado, lo que significa una diferencia de menos de 11 kilos por metro cúbico de hormigón fraguado. La manipulación resulta fácil y segura. En la parte experimental de este trabajo quedan consignados los valores obtenidos.

Otra cuestión merecía ser estudiada con detalle. A menudo no se dispone, en el momento del análisis, del cemento que se empleara en la fabricación del hormigón, ni se dispone tampoco del resultado de un análisis practicado en aquella fecha. Se sabe, en general, cuál es el tipo de cemento empleado; en la mayoría de los casos, cemento Portland. Los americanos, siguiendo a Kriege, estiman que podrá tomarse como valor medio en sílice, en estos casos, la cifra 21,75 por 100. Los alemanes acostumburan a considerar el valor medio 21,5 por 100 (5), pero también 22 por 100 (13).

Los límites extremos entre los que puede oscilar la sílice en el cemento Portland son, por lo demás, bastante diferentes en los distintos países. En tanto, Kriege (6) indica que suelen oscilar entre 21 y 22,5; Lea-Desch (15) dan la composición de diez cementos portland ingleses de tipo normal con valores que oscilan entre 18,88 y 23,73 por 100 de sílice; la de diez cementos Portland ingleses, de endurecimiento rápido, con valores comprendidos entre 17,98 y 22,08, y la de 12 cementos Portland americanos que tienen valores de 20,1 a 24,1 por 100. Charisius (16) da la composición de cinco cementos Portland alemanes, de contenido en sílice que varía entre 17,82 a 21,92 por 100, y Villavechia señala valores comprendidos entre 19 y 26 por 100 (17).

Era preciso, pues, fijar el valor medio correspondiente a los cementos españoles. La media en sílice de 71 muestras de cemento Portland analizadas

recientemente en este Laboratorio resultó ser 20,5 por 100.

La adopción de un valor medio para la sílice del cemento Portland entraña, evidentemente, una causa de error que podrá ser tanto mayor cuanto mayores sean los límites entre los que pueda oscilar el verdadero contenido. La variabilidad es siempre de suficiente importancia para que los valores de cemento calculados a partir del valor medio tengan una inseguridad que les hace casi inaceptables. En las 71 muestras de cementos Portland españoles consideradas se han encontrado valores extremos de 17,63 y 23,31. Los límites extremos de error a que puede conducir resultan ser de  $\pm 14$  por 100. Como a este error posible ha de añadirse el probable, que lleva consigo la determinación de la sílice, resulta que, de no conocerse la composición del cemento, el error total puede ascender a  $\pm 18$  por 100.

Ello parece señalar la conveniencia de que se prescribiera la obligación de solicitar de un laboratorio oficial la determinación cuantitativa de la sílice de un cemento que haya de ser empleado en obras de hormigón de alguna importancia, al objeto de poder conocer después, en todo momento, y con suficiente exactitud, la dosificación del cemento en el hormigón fraguado. Esta determinación analítica, por lo demás, puede hacerse en poco tiempo, empleando el método rápido consignado en los nuevos métodos para el análisis del cemento Portland, aprobados por el Ministerio de Obras Públicas con fecha de 24 de julio de 1943 (*Boletín Oficial* 4 de agosto de 1943), y su coste es insignificante.

El método propuesto nos permite determinar el cemento de un hormigón fraguado, en kilogramos por metro cúbico, con un error inferior al 4 por 100, cuando se conoce el valor de la sílice del cemento; si se pudiera fijar, pues, la cantidad de agua retenida y de  $\text{CO}_2$  fijado por el hormigón, podría hallarse el árido por diferencia.

El análisis del hormigón se realiza sobre la muestra, desecada al aire, por ser estas condiciones las de mayor interés práctico. En tal estado, la suma  $\text{agua} + \text{CO}_2$  antes aludida varía, según hemos podido comprobar, con el contenido en cemento, y puede ser de más del 8 por 100 referido al peso de hormigón.

Al calentarlo en la estufa, a 110 grados centígrados, pierde una parte de agua; pero otra parte, más firmemente unida a los componentes del cemento, es retenida aún por el hormigón. En la actualidad, no existe método bastante seguro que permita determinar el agua total (\*). La pérdida al fuego incluye la

(\*) En este Laboratorio está en curso el estudio de un procedimiento que permita determinar el agua retenida por el hormigón desecado a 110° C.

correspondiente al cemento y al árido, además del agua. La pérdida que experimenta el hormigón al ser calentado a 450 grados centígrados, a cuya temperatura no se descomponen sensiblemente los carbonatos (9), que puede considerarse, según Gallo, como medida del agua retenida, no parece conducir, no obstante, a resultados satisfactorios.

Para determinar con bastante aproximación la relación cemento-árido, si bien es preciso tener en cuenta el agua y el  $\text{CO}_2$  retenidos, no es necesario, en cambio, determinarlos con toda exactitud. Un error del 10 por 100 en la determinación de éstos, afectará apenas en el 1 por 100 al valor del árido, hallado por diferencia.

En el hormigón desecado al aire y pulverizado no puede quedar, prácticamente, más que el agua y el  $\text{CO}_2$  retenidos por el cemento en una u otra forma, difícil de precisar (18). La cantidad total puede esperarse que sea, aproximadamente, proporcional a la de cemento existente, siempre que se trate del mismo tipo de cemento.

Para confirmarlo hemos calculado el agua retenida (incluido el  $\text{CO}_2$ ) por las probetas analizadas, de las que conocíamos el contenido de cemento, grava y arena. Los valores encontrados vienen a ser del orden de 35 partes de agua por 100 de cemento inicialmente empleado. Aprovechando los datos consignados en el trabajo de Loman, hemos podido deducir que en las probetas que analiza, no obstante ser las dosificaciones muy diferentes, sigue cumpliéndose, aproximadamente, esta relación entre agua y cemento en el hormigón desecado al aire. En vista de esto, como la relación cemento-árido basta conocerla aproximadamente, proponemos su cálculo a base de considerar como agua el 35 por 100 del cemento hallado, de forma que si C y A representan, respectivamente, el tanto por ciento de cemento y áridos:

$$A = 100 - C - 0,35 C = 100 - 1,35 C.$$

Hemos obtenido así la relación cemento-áridos en los bloques analizados, con una diferencia inferior a 5 por 100. Nos proponemos, sin embargo, confirmar experimentalmente, en un mayor número de casos, la constante de proporcionalidad adoptada para el cálculo de agua +  $\text{CO}_2$ .

Indiquemos, finalmente, que todo intento de seguir un cálculo indirecto para la determinación aislada de arena y grava resulta inaplicable. El sistema de tres ecuaciones que puede establecerse, teóricamente, cuando se dispone de los materiales con que se ha fabricado el hormigón:

$$\begin{aligned} S_c + x S_g + y S_a &= (1 + x + y + z) S_h; \\ C_c + x C_g + y C_a &= (1 + x + y + z) C_h; \\ P_c + x P_g + y P_a + z &= (1 + x + y + z) P_h; \end{aligned}$$

en el que  $x, y, z$  son los pesos de grava, arena y agua por unidad en peso de cemento, y  $S, C$  y  $P$  los valores de sílice, cal y pérdida al fuego de los diferentes materiales, no conduce a resultados satisfactorios. Los subíndices  $a, c, g$  y  $h$  representan, respectivamente, arena, cemento, grava y hormigón. Como es sabido, el análisis indirecto es siempre poco aproximado, en general; errores relativamente pequeños en las determinaciones químicas necesarias pueden conducir a divergencias notables en los valores calculados indirectamente.

## PARTE EXPERIMENTAL

1. *Preparación y conservación de los bloques de hormigón.*—Para la mayor eficacia de nuestro estudio, hemos procurado operar sobre muestras de hormigones de composición conocida con la mayor exactitud posible y de dosificación aproximada a la empleada frecuentemente en las obras de hormigón.

Se tuvieron en cuenta todas las combinaciones que se pueden presentar, en lo que hace referencia a la naturaleza silícea o caliza de los áridos. Se prepararon, pues, hormigones con los dos áridos silíceos (núm. 1), arena caliza y grava silícea (núm. 2), con arena silícea y grava caliza (núm. 3) y con ambos áridos calizos (núm. 4).

Además, como en este Laboratorio se prepararon hace algún tiempo hormigones y morteros con adición de polvo calizo, con miras a estudiar la influencia de esta adición sobre la resistencia al ataque del agua del mar, se preparó también un hormigón con polvo calizo, además de la arena y grava caliza. Caso, evidentemente, de complejidad todavía mayor.

Con los materiales cuya composición queda indicada en la tabla número 1 se hicieron las cinco mezclas que se indican a continuación (tabla núm. 2).

TABLA NÚM. 1.—Composición química de los materiales utilizados

|                       | Cemento Portland | Arena silícea del Manzanares | Grava silícea del Jarama | Arena caliza | Grava caliza | Polvo calizo |
|-----------------------|------------------|------------------------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Sílice soluble . . .  | 21,3             | 0,11                         | 0,07                     | „            | „            | „            |
| Residuo insoluble .   | 0,24             | 98,0                         | 81,3                     | 14,5         | 9,8          | 24,5         |
| Alúmina . . . . .     | 7,1              | 0,58                         | 0,93                     | 3,8          | 2,2          | 5,8          |
| Oxido férrico . . .   | 2,5              | „                            | „                        | „            | „            | „            |
| Cal . . . . .         | 61,9             | 0,31                         | 7,4                      | 43,7         | 47,4         | 36,2         |
| Magnesia . . . . .    | 1,9              | „                            | „                        | 0,81         | 0,94         | 1,2          |
| Anhidrido sulfúrico.  | 1,5              | „                            | „                        | 0,4          | 0,95         | 1,7          |
| Pérdida al fuego . .  | 2,9              | 0,58                         | 9,5                      | 35,7         | 38,6         | 30,5         |
| Sin dosificar . . . . | 0,46             | 0,42                         | 0,89                     | 0,09         | 0,11         | 0,1          |
| TOTALES . . . . .     | 100,00           | 100,00                       | 100,00                   | 100,00       | 100,00       | 100,00       |
| Humedad . . . . .     | 0,66             | „                            | „                        | „            | „            | „            |

Se pesaron los materiales y se mezclaron en la hormigonera del Laboratorio, que se había limpiado cuidadosamente antes y cuyas paredes se humedecieron con agua, al objeto de evitar pérdidas de este componente. Con cada una de las cinco mezclas se prepararon cinco probetas cúbicas de 15 centímetros de arista y una sexta probeta menor, a fin de aprovechar la totalidad de la mezcla preparada. Al efectuar el amasado de la primera mezcla se juzgó prudente no ponerle más agua para reducir al mínimo las pérdidas en los moldes, por lo que, al llenar éstos con la mezcla número 1, hubo necesidad de realizar un ligero apisonado, ya que el hormigón resultante parecía pobre en mortero y agua.

Por esta razón, en la preparación de las mezclas restantes se tomaron pesos de arena algo mayores y se aumentó la cantidad de agua de amasado, con lo cual se amasó mejor la mezcla, se hizo más plástica y se evitó el apisonado.

Los moldes, junto con la placa de asiento, habían sido pesados antes de llenarlos y se pesaron también inmediatamente después de haberlos llenado. Se efectuó el desmolde de las probetas a las veinticuatro

TABLA NÚM. 2.—*Dosificación de los hormigones en peso*

| Mezcla número              | 1<br>—<br>Grs. | 2<br>—<br>Grs. | 3<br>—<br>Grs. | 4<br>—<br>Grs. | 5<br>—<br>Grs. |
|----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Gravilla silicea . . . . . | 25 000         | 25 000         | »              | »              | »              |
| Gravilla caliza . . . . .  | »              | »              | 25 000         | 25 000         | 25 000         |
| Arena silicea . . . . .    | 11 300         | »              | 12 300         | »              | »              |
| Arena caliza . . . . .     | »              | 12 300         | »              | 12 300         | 11 300         |
| Polvo calizo . . . . .     | »              | »              | »              | »              | 1 000          |
| Cemento . . . . .          | 5 800          | 5 800          | 5 800          | 5 800          | 5 800          |
| Agua . . . . .             | 2 650          | 3 475          | 3 050          | 3 400          | 3 450          |
| PESO TOTAL . . . . .       | 44 750         | 46 575         | 46 150         | 46 500         | 46 550         |

TABLA NÚM. 3.—*Mezcla número 1*

| Probeta número | Peso molde vacío + placa asiento | Peso molde + placa asiento + hormigón recién hecho | Peso de la probeta de hormigón recién ejecutado | Peso de la probeta a las 24 horas |
|----------------|----------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 1              | 14 494                           | 22 610                                             | 8 116                                           | 8 009                             |
| 2              | 14 320                           | 22 282                                             | 7 962                                           | 7 889                             |
| 3              | 14 369                           | 22 254                                             | 7 885                                           | 7 822                             |
| 4              | 14 469                           | 22 655                                             | 8 186                                           | 8 098                             |
| 5              | 14 203                           | 22 198                                             | 7 995                                           | 7 937                             |
| 6              | 14 237                           | 18 532                                             | 4 295                                           | 4 280                             |

TABLA NÚM. 4.—*Peso de las probetas*

| Probeta número | Mezcla n.º 1  |                | Mezcla n.º 2  |                | Mezcla n.º 3  |                | Mezcla n.º 4  |                | Mezcla n.º 5  |                |
|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
|                | Re-cién hecha | A las 24 horas | Re-cién hecha | A las 24 horas | Re-cién hecha | A las 24 horas | Re-cién hecha | A las 24 horas | Re-cién hecha | A las 24 horas |
| 1              | 8 116         | 8 009          | 8 168         | 8 040          | 8 172         | 8 067          | 8 227         | 8 156          | 8 222         | 8 170          |
| 2              | 7 962         | 7 889          | 7 982         | 7 882          | 8 041         | 7 953          | 8 079         | 7 991          | 8 071         | 7 985          |
| 3              | 7 885         | 7 822          | 8 087         | 7 975          | 8 088         | 8 002          | 8 067         | 8 015          | 8 087         | 8 025          |
| 4              | 8 186         | 8 098          | 8 218         | 8 090          | 8 389         | 8 258          | 8 332         | 8 242          | 8 307         | 8 248          |
| 5              | 7 995         | 7 937          | 8 058         | 7 940          | 8 120         | 8 032          | 8 318         | 8 240          | 8 096         | 8 005          |
| 6              | 4 295         | 4 280          | 5 555         | 5 499          | 4 792         | 4 754          | 4 613         | 4 551          | 4 200         | 4 168          |
| Peso total     | 44 439        |                | 46 068        |                | 45 602        |                | 45 636        |                | 44 983        |                |

horas de su ejecución, se pesaron nuevamente, se numeraron convenientemente y se conservaron al aire hasta el momento de ser analizadas.

En la tabla número 3 se indican detalladamente los resultados de estas operaciones, relativos a la mezcla número 1, y en la tabla número 4 se indican directamente los pesos de todas las probetas preparadas con cada una de las mezclas ya indicadas, inmediatamente después de haber llenado los moldes y al desmoldarlas a las veinticuatro horas.

2. *Composición de las probetas analizadas.*—Resulta de los datos anteriores que entre el peso total de la mezcla preparada y el del hormigón contenido en los moldes existe una diferencia que puede atribuirse a las pérdidas de pasta durante las operaciones de llenado de moldes, y que por la forma en que se han efectuado las operaciones debe suponerse que corresponde exclusivamente al mortero. La composición del mortero, integrado por arena, cemento y agua en las cuatro primeras mezclas, y por estos mismos materiales y polvo calizo en la mezcla número 5, se deduce de los datos consignados en la tabla número 2. Conocida la composición del

TABLA NÚM. 5

| Mezcla número. | Composición del mortero, en tanto por uno |           |                  | Pérdida total (mortero) $P$<br>Grs. | Pérdida en cemento $P_c = c P_t$<br>Grs. | Pérdida en arena $P_a = a P_t$<br>Grs. | Pérdida en polvo calizo $P_p = p P_t$ |
|----------------|-------------------------------------------|-----------|------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|
|                | Cemento $c$                               | Arena $a$ | Polvo calizo $p$ |                                     |                                          |                                        |                                       |
| 1              | 0,294                                     | 0,572     | »                | 311                                 | 91                                       | 178                                    | »                                     |
| 2              | 0,289                                     | 0,570     | »                | 507                                 | 136                                      | 289                                    | »                                     |
| 3              | 0,274                                     | 0,582     | »                | 548                                 | 150                                      | 319                                    | »                                     |
| 4              | 0,270                                     | 0,572     | »                | 864                                 | 233                                      | 494                                    | »                                     |
| 5              | 0,269                                     | 0,524     | 0,046            | 1 567                               | 422                                      | 822                                    | 73                                    |

mortero, puede calcularse inmediatamente que parte de la pérdida total corresponde al cemento, a la arena o al polvo calizo. La tabla número 5 resume los resultados obtenidos.

Estas pérdidas determinan una pequeña variación en la composición de los bloques con respecto a la de la mezcla primitiva, pues afecta a los componentes del mortero, y ha sido tenido en cuenta al calcular, en la forma que a continuación indicamos, la composición de los bloques sometidos al análisis. La otra pérdida que experimentan las probetas ya preparadas al conservarlas al aire, que se manifiesta marcadamente a las veinticuatro horas y que sigue después durante bastantes días, corresponde a la pérdida de agua por desecación de las mismas.

Se dejó transcurrir más de año y medio desde la fecha de ejecución de las probetas hasta la de su análisis. Después de este tiempo las probetas conservadas al aire habían alcanzado, prácticamente, peso constante y podían ser consideradas probetas desecadas al aire. Se pesaron entonces, se midieron las aristas del cubo y se calculó el peso específico del hormigón.

Si llamamos  $M$  al peso de la mezcla inicialmente preparada y  $P_t$  a la pérdida total durante las operaciones de llenado de los moldes, el peso de hormigón que pasa a llenarlos es  $M - P_t$ , y el cemento contenido en esta cantidad de hormigón será el inicial,  $C_i$ , disminuido en el que entra a formar parte del mortero perdido, calculado según la expresión  $P_c = cP_t$ , en la que  $c$  es el tanto por uno de cemento en el mortero.

En el hormigón que ha pasado a llenar los moldes, el tanto por uno de cemento, inmediatamente después de haberlos llenado, vale, pues:

$$\frac{C_i - P_c}{M - P_t}$$

y si  $p_i$  es el peso del bloque recién hecho y  $p_f$  el peso final del mismo, en el momento de analizarlo,

$$C = \frac{(C_i - P_c)p_i}{(M - P_t)} \times \frac{100}{p_f}$$

será el tanto por ciento de cemento en el hormigón fraguado sometido al análisis.

De manera totalmente análoga pueden calcularse los tantos por ciento de arena, grava o polvo calizo. El agua y el  $\text{CO}_2$  retenidos por el hormigón desecado al aire, puede calcularse entonces por diferencia. La tabla número 6 indica los valores obtenidos.

3. *Método seguido en el análisis.*—La muestra de hormigón sometida al análisis debe ser tomada con sumo cuidado, a fin de que reúna, efectivamente, las características de la obra y hormigón que se investiga. Su tamaño no será menor de cinco kilogramos; cuando la grava sea de tamaño superior a siete centímetros, el peso de la muestra deberá ser superior a 10 kilogramos.

La muestra se conservará al aire hasta constancia de peso ( $\pm 5$  gramos cuando el peso de la muestra sea de unos cinco kilogramos, y  $\pm 10$  gramos cuando el peso sea superior a 10 kilogramos). El bloque íntegro, una vez cuarteado ligeramente, se reduce a polvo fino en un molino de bolas apropiado. Para fragmentarlo ligeramente resulta ventajoso emplear la prensa para ensayos de compresión, siempre que la forma de la muestra enviada lo permita; se debe aumentar lentamente la presión, al objeto de evitar pérdidas por proyecciones, y se colocan unas bandejas de cartón fuerte que se adapten al plato inferior de la prensa para poder recoger todos los materiales que la integran.

Una vez pulverizada la muestra, se guarda una porción de un kilo en un frasco bien cerrado. Se pesan 20 gramos de muestra, con aproximación del centígramo, en un vaso de precipitados de forma alta, de unos 600 centímetros cúbicos. Se añaden 150 centímetros cúbicos de agua hirviendo, se hierve agitando continuamente durante dos o tres minutos, se aparta el mechero, se añaden lentamente 150 centímetros cúbicos de ácido clorhídrico (1 : 1) frío, se agita enérgicamente hasta que cese la efervescencia y se sigue agitando aun tres minutos más. Se deja en reposo hasta que se haya depositado el residuo insoluble y se decanta el líquido sobre un embudo Buchner de porcelana, de 10 centímetros de diámetro, conectado a la trompa de agua con poca

TABLA NÚM. 6.—Características de las probetas analizadas

| Mezcla número | Probeta número | Peso de la probeta desecada al aire Grs. | Volumen de la probeta c. c. | Densidad del hormigón | Composición centesimal del hormigón |       |       |              |                       |
|---------------|----------------|------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------|-------|--------------|-----------------------|
|               |                |                                          |                             |                       | Cemento                             | Grava | Arena | Polvo calizo | Agua (por diferencia) |
| 1             | 5              | 78,51                                    | 32,64                       | 2,41                  | 13,08                               | 57,3  | 25,5  | •            | 4,12                  |
| 2             | 3              | 78,37                                    | 32,97                       | 2,38                  | 12,69                               | 56,0  | 26,0  | •            | 4,41                  |
| 3             | 1              | 80,09                                    | 33,08                       | 2,42                  | 12,64                               | 55,9  | 26,8  | •            | 4,66                  |
| 4             | 1              | 80,05                                    | 34,22                       | 2,37                  | 12,54                               | 56,3  | 26,6  | •            | 4,56                  |
| 5             | 1              | 80,23                                    | 33,53                       | 2,39                  | 12,25                               | 57,0  | 23,9  | 2,11         | 4,74                  |

presión y al que se habrá adaptado un disco de papel de filtro algo rápido. Se trata el residuo en el vaso con 80 centímetros cúbicos de ácido clorhídrico (1 : 3) frío, se agita enérgicamente tres minutos, se deja reposar, se decanta y se repite el tratamiento otras dos veces. Se lava después por decantación dos veces con porciones de 80 centímetros cúbicos de agua hirviendo y, finalmente, se pasa el residuo al filtro y se lava tres o cuatro veces con el chorro del lavador.

El filtrado debe ser completamente claro; de no ser así, debe filtrarse de nuevo, utilizando para ello otro filtro. Se pasa a un matraz aforado de un litro y se diluye con agua hasta el enrase.

El residuo y el filtro se pasan a un vaso de 400 centímetros cúbicos y se tratan con 80 centímetros cúbicos de solución de carbonato sódico ( $\text{CO}_3\text{Na}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) al 5 por 100, que contiene, además, 5 por 100 de cloruro sódico. Se calienta a temperatura próxima a ebullición y se mantiene quince minutos en estas condiciones, removiéndolo con la varilla de vez en cuando. Se deja reposar hasta que se deposite el residuo en el fondo del vaso, se decanta sobre el embudo Buchner, se lava cuatro veces por decantación con 80 centímetros cúbicos de agua hirviendo cada vez. Se pasa el residuo sobre el filtro y se lava con el chorro del lavador dos o tres veces.

El filtrado se pasa a un matraz aforado de 500 c. c. y se completa el volumen con agua destilada.

Para la determinación de la sílice se toman 250 centímetros cúbicos de los filtrados ácidos y 125 centímetros cúbicos de la solución alcalina, que se evaporan a sequedad, conjuntamente, en una cápsula de porcelana. Se añaden al residuo 20 centímetros cúbicos de ácido clorhídrico diluido (1 : 1), y se digiere sobre el baño maría durante diez minutos, cubriendo la cápsula con un vidrio de reloj. Se diluye la solución con 40 centímetros cúbicos de agua

destilada caliente, se filtra en caliente y se lava la sílice un par de veces con ácido clorhídrico diluido (1 : 99) y, finalmente, con agua hirviendo hasta que las aguas de lavado no den reacción de cloruros. El filtrado y las aguas de lavado se evaporan nuevamente a sequedad, y se mantiene la cápsula con el residuo una hora a 105-110 grados centígrados. Se trata el residuo con 20 centímetros cúbicos de ácido clorhídrico diluido (1 : 1) y se deja diez minutos en digestión sobre el baño maría. Se diluye con 40 centímetros cúbicos de agua destilada caliente, se filtra sobre otro filtro y se lava, como se hizo con la porción mayor de sílice separada anteriormente.

Se pasan los dos filtros con la sílice que contienen a un crisol previamente pesado, se carbonizan los filtros a baja temperatura y se calcina después a 1 100-1 200 grados centígrados hasta peso constante.

El tanto por ciento de sílice soluble del hormigón encontrado (media de dos determinaciones) por este procedimiento, dividido por el tanto por uno de sílice en el cemento empleado, da el tanto por ciento de cemento en el hormigón. Conocida la densidad de éste es fácil calcular la dosificación del cemento, expresada en kilogramos por metro cúbico.

La densidad convendrá determinarla en un bloque de hormigón de varios kilogramos de peso, mediante la balanza hidrostática. Se hallará el peso del bloque desecado al aire y se determinará después su volumen, para lo cual, y a fin de evitar que absorba agua durante esta determinación, se dejará antes durante veinticuatro horas sumergido en agua.

4. *Resultados obtenidos.*—En la tabla número 7 se indican los resultados obtenidos en los análisis practicados por duplicado o triplicado en cada una de las cinco probetas analizadas. En la mayoría de casos se procedió a determinar separadamente la sílice solubilizada por el ácido, y la disuelta en el tra-

TABLA NÚM. 7.—*Resultado de los análisis*

| Mezcla . . . . .                             | Núm. 1 |      | Núm. 2 |      | Núm. 3 |      | Núm. 4 |      | Núm. 5 |      |      |
|----------------------------------------------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|------|
| Análisis número . . . . .                    | 1      | 2    | 1      | 2    | 1      | 2    | 1      | 2    | 1      | 2    | 3    |
| Sílice (tratamiento ácido) .                 | 2,34   | 2,40 | 2,14   | 2,41 | •      | 2,26 | 2,32   | 1,90 | 1,93   | 1,64 | •    |
| Sílice (tratamiento con carbonato) . . . . . | 0,45   | 0,20 | 0,49   | 0,24 | •      | 0,44 | 0,41   | 0,70 | 0,71   | 0,84 | •    |
| Sílice soluble. Total . .                    | 2,79   | 2,60 | 2,59   | 2,64 | 2,69   | 2,70 | 2,73   | 2,60 | 2,64   | 2,48 | 2,49 |
| Cal soluble . . . . .                        | 11,3   | 11,4 | 25,3   | 25,3 | 33,2   | 33,4 | 47,2   | 46,9 | 46,4   | 46,1 | •    |

tamiento con carbonato sódico; los valores justifican claramente la necesidad de este segundo tratamiento.

Como sea que en el caso de áridos desprovistos de cal soluble podría utilizarse también el valor de ésta en el hormigón, para hallar el contenido en cemento, hemos procedido a determinarla en los hormigones analizados, al objeto de comprobar la reproducibilidad de los resultados que podrían obtenerse en tales casos con el método indicado. En estos hormigones, dada la naturaleza de los áridos que hemos empleado, no puede llevarse a cabo el cálculo a base del contenido en cal en ninguno de los casos.

Las diferencias entre los diferentes valores de sílice soluble total correspondientes a una misma muestra de hormigón son, como puede verse, suficientemente pequeñas; en el caso más desfavorable son del orden del 7 por 100.

Del tanto por ciento de sílice en el cemento empleado, dado por el análisis, se calcula fácilmente en cada caso a partir del valor medio de sílice soluble total encontrado en el hormigón, el tanto por ciento de cemento existente:

$$C = \frac{\% \text{ sílice hormigón}}{\% \text{ sílice cemento}} \times 100.$$

La tabla número 8 permite comparar los valores obtenidos al calcular de esta manera el cemento contenido en el hormigón con los valores correspondientes al cemento existente, deducidos en la forma que ya hemos indicado. Estos valores se expresan en tanto por ciento en peso y en kilogramos de cemento por metro cúbico de hormigón desecado al aire.

Estos resultados pueden ser considerados plenamente satisfactorios, pues la mayor diferencia observada corresponde a 11 kilogramos de cemento por metro cúbico de hormigón fraguado. El contenido de cemento de un hormigón puede determinar-

TABLA NÚM. 8

| Mezcla número | Sílice soluble total (valor medio) | % cemento  |           | Error % | Kilogramos cemento por m. <sup>3</sup> |           | Diferencia Kgs. por m. <sup>3</sup> |
|---------------|------------------------------------|------------|-----------|---------|----------------------------------------|-----------|-------------------------------------|
|               |                                    | Encontrado | Existente |         | Encontrado                             | Existente |                                     |
| 1             | 2,70                               | 12,68      | 13,08     | — 3,0   | 305                                    | 315       | — 10                                |
| 2             | 2,61                               | 12,25      | 12,69     | — 3,5   | 291                                    | 302       | — 11                                |
| 3             | 2,69                               | 12,63      | 12,64     | — 0,1   | 306                                    | 306       | 0                                   |
| 4             | 2,67                               | 12,53      | 12,54     | — 0,1   | 297                                    | 297       | 0                                   |
| 5             | 2,54                               | 11,92      | 12,25     | — 0,3   | 292                                    | 293       | — 1                                 |

TABLA NÚM. 9

| Mezcla número | Kgs. cemento por m. <sup>3</sup>    |           | Diferencia Kgs. por m. <sup>3</sup> | Error % |
|---------------|-------------------------------------|-----------|-------------------------------------|---------|
|               | Calculado (SiO <sub>2</sub> = 20,5) | Existente |                                     |         |
| 1             | 317                                 | 315       | + 2                                 | + 0,6   |
| 2             | 303                                 | 304       | — 1                                 | — 0,3   |
| 3             | 318                                 | 306       | + 12                                | — 3,9   |
| 4             | 309                                 | 297       | + 12                                | + 4,0   |
| 5             | 303                                 | 293       | + 10                                | + 3,3   |

se, pues, por este método con un error menor de 4 por 100 y, en general, por defecto, según parece poderse deducir de estos ensayos.

Los valores que se hubieran obtenido de no haber podido disponer del cemento empleado, al tener que adoptar para estos cálculos el valor medio de sílice de los cementos Portland españoles, esto es, 20,5, (valor medio de 71 muestras de cemento analizadas) figuran en la tabla número 9.

Los valores obtenidos en este caso serían igualmente aceptables, debido a que el cemento con que se han preparado los hormigones estudiados tiene una cantidad de sílice soluble poco diferente del valor medio hallado para los cementos españoles. En general, pues, las discrepancias serán mayores, y es fácil calcular los errores máximos que podrían llegarse a cometer al tener que recurrir al valor medio indicado. El cemento, efectivamente, hubiera podido presentar valores extremos de sílice del tipo de los encontrados por nosotros entre las 71 muestras analizadas, a saber: 23,31 y 17,63. En el primer caso, el error en la cantidad de cemento, calculado a partir del valor 20,5 en vez de 23,4, sería:

$$\left( \frac{1}{20,5} - \frac{1}{23,3} \right) : \frac{100}{23,3} = \frac{23,3 - 20,5}{20,5} \times 100 = 13,7 \%$$

En el otro caso extremo el error sería, análogamente, de 14,1 por 100, por defecto.

Por tanto, si no se dispusiera del resultado del análisis del cemento empleado en la preparación del hormigón y se tuviese que recurrir al valor medio de la sílice en los cementos Portland, aun cuando se utilizase para ello el valor correspondiente a los cementos españoles, los valores obtenidos tendrían una inseguridad que queda delimitada por las cotas de error máximo  $\pm 14$  por 100, que puede cometerse en los casos extremos que acabamos de con-

siderar. A este error posible deberá añadirse aún el error que puede cometerse en la determinación de la sílice del hormigón, y que de nuestras experiencias resulta ser inferior al 4 por 100, empleando el método indicado. Por tanto, la determinación del cemento contenido en el hormigón podrá venir afectada de un error de  $\pm 18$  por 100, aunque, naturalmente, lo más probable es que los errores efectivos sean menores, pues los valores extremos de sílice, que hemos considerado, no son frecuentes. Por lo general, la sílice de los cementos portland españoles suele variar entre 18 y 22 por 100.

Sin embargo, al comparar estos resultados con los obtenidos al tomar en consideración el verdadero valor de la sílice del cemento, expuestos en la tabla número 8, se pone de manifiesto, claramente, las grandes ventajas que supone para la utilidad de los resultados obtenidos en la dosificación del cemento en hormigones, el disponer de la muestra de cemento empleado. Si se tiene en cuenta que para proceder al análisis del cemento la cantidad necesaria es muy pequeña, y el coste del análisis, insignificante, se ve cuán conveniente sería, en las obras de hormigón de alguna importancia, en las que en el futuro pueda existir la posibilidad de tener que proceder a la determinación del contenido en cemento que, o bien se conserven muestras de cemento, debidamente precintadas y en recipiente adecuado, o que se solicite de un Laboratorio oficial el análisis del cemento o, simplemente, la determinación cuantitativa de sílice soluble.

partir de los datos que figuran en la tabla número 6, se ha calculado la relación agua-cemento (\*) en las probetas analizadas. Los valores encontrados figuran en la tabla número 10, y en ella se han incluido, además, los valores correspondientes a las probetas que preparara Loman para ensayar el método de dosificación de hormigones, que han podido ser calculados gracias a los datos consignados en su trabajo (\*\*). En todos los diferentes hormigones de cemento Portland considerados, a pesar de ser diferente la dosificación, los materiales y el modo operatorio de su preparación, la relación agua-cemento en el hormigón desecado al aire, toma valores que no difieren mucho del valor medio 0,35. En la misma tabla figuran los tantos por ciento de agua calculados a partir del cemento hallado, con esta constante de proporcionalidad entre agua y cemento. Las diferencias en valor absoluto son del orden de 0,5 por 100 (sólo en la probeta número 2 de Loman la diferencia llega a ser algo mayor del 1 por 100), por lo que al calcular el árido por diferencia, mediante la expresión  $A = 100 - 1,35 C$ , los errores que puede motivar esta imprecisión en el cálculo del agua son, evidentemente, de muy poca importancia.

Puede verse en la misma tabla que los valores hallados para la relación cemento-áridos son suficientemente aproximados; en la mayoría de los casos no se precisan resultados más exactos.

A este respecto, sería conveniente, no obstante, disponer de mayor número de resultados experi-

#### 5. Agua retenida y relación cemento-áridos.—A

(\*) Se incluye en el cálculo del agua el  $\text{CO}_2$  absorbido.

TABLA NÚM. 10

| Ensayo número | Cemento existente<br>% | Agua existente<br>% | Relación agua-cemento | Cemento encontrado<br>% | Agua calculada<br>0,35 C | Relación cemento-áridos |           |
|---------------|------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|
|               |                        |                     |                       |                         |                          | Hallado                 | Existente |
| 1             | 13,08                  | 4,12                | 0,32                  | 12,68                   | 4,44                     | 1:6,5                   | 1:6,3     |
| 2             | 12,69                  | 4,41                | 0,35                  | 12,25                   | 4,29                     | 1:6,8                   | 1:6,5     |
| 3             | 12,64                  | 4,66                | 0,36                  | 12,63                   | 4,42                     | 1:6,6                   | 1:6,5     |
| 4             | 12,54                  | 4,56                | 0,36                  | 12,53                   | 4,38                     | 1:6,6                   | 1:6,6     |
| 5             | 12,25                  | 4,74                | 0,39                  | 11,92                   | 4,17                     | 1:7,0                   | 1:6,8     |
| Loman 1       | 13,31                  | 4,26                | 0,37                  | —                       | 4,66 (**)                | 1:6,2                   | 1:6,1     |
| Loman 2       | 23,24                  | 7,05                | 0,30                  | 24,18                   | 8,45                     | 1:2,8                   | 1:3,0     |
| Loman 4       | 24,42                  | 8,42                | 0,34                  | 24,91                   | 8,72                     | 1:2,7                   | 1:2,7     |

(\*\*) Por no figurar en el trabajo el valor hallado para el cemento, este valor ha sido calculado a base del cemento existente.

mentales que dieran validez general a la hipótesis que nos ha servido para el cálculo y justificar el valor adoptado por la relación agua-cemento en hormigones de cemento Portland, desecados al aire con distintas edades y cantidades de agua de amasado.

### CONCLUSIONES

1.<sup>a</sup> Con muestras de hormigón de cinco o más kilogramos puede hallarse su dosificación en cemento, expresada en kilogramos por metro cúbico, con un error menor de  $\pm 4$  por 100, si se conoce el contenido en sílice del cemento empleado en su fabricación, aun cuando no se disponga de muestra de los áridos.

2.<sup>a</sup> Del análisis de 71 muestras de cemento Portland españoles actuales se deduce que la sílice puede presentar valores extremos de 17,63 y 23,31; el valor medio encontrado es 20,5 por 100. De tener que recurrir a este valor medio, los errores que se podrían cometer en la determinación del cemento podrían llegar a ser, en caso extremo, de  $\pm 18$  por 100, de donde se infiere la conveniencia de poder contar con el análisis del cemento empleado.

3.<sup>a</sup> El agua retenida por el hormigón fraguado, desecado al aire, parece proporcional al cemento Portland existente. La relación agua-cemento (\*) difiere poco del valor medio 0,35, al menos para edades superiores a un año. Puede calcularse el árido total con suficiente aproximación, por diferencia, aplicando la expresión

$$A = 100 - 1,35 C,$$

en la que  $C$  es el tanto por ciento de cemento encontrado.

4.<sup>a</sup> Se ha podido obtener así la relación cemento-áridos, con error inferior al 5 por 100.

5.<sup>a</sup> El método propuesto es de aplicación general si se exceptúan los hormigones fabricados con escorias de altos hornos o con puzolanas.

(\*) Se incluye en el cálculo del agua el  $\text{CO}_2$  absorbido.

### Bibliografía.

1. LOMAN: 1. Mitt. N. Int. Verb. Mat. Prüfung. Zurich (1930), B 167.
2. HOLTSCHMIDT: Bauingenieur, Dd. 15 (1934), 363.
3. Handbuch der Werkstoffprüfung, III. Berlín (1941), 457.
4. MALETTE, J.: Les défauts des mortiers et des Bétons. Paris (1929), 205.
5. DIN DVM 2170: Véase Handbuch der Werkstoffprüfung, III. Berlín (1941), 427.
6. HERBERT F. KRIEGER: Engineering News Record (1924), 892, 92.
7. LUNGE y MILLBERG: Zeitschr. ungew. Chem. (1897), 393-425.
8. TREADWELL: Tratado de Química Analítica, II (1933), 442.
9. GALLO, G.: G. di Chimica Industriale ed applicata, IX (1927), 456.
10. FLORENTIN, M. D.: Comp. Rend., 183, 53 (1926).
11. KILLIG, F.: Laboratoriumsbuch für die Portlandzementfabrik. 2.<sup>a</sup> Aufl. Zement Verlag G. m. b. H.
12. PLATZMANN: Cement and Cement Manufacture (1935), 257.
13. GRUN, R.: "Mörtelbindemittel" en Berl.-Lunge. Chemische - technische Untersuchungsmethoden, III, 8. Auflage Springer-Berlín.
14. STEOPOE, A.: Zement (1935), 758.
15. LEA y DESCH: Química del Cemento y del Hormigón (1941), 130.
16. CHARISIUS, K.: Laboratoriumsbuch für die Zement Industrie (1943), 7.
17. VILLAVECHIA, G.: Dizionario di Merceologia e di Chimica applicata, I, 894 (1928).
18. LEA, F. M.: Cement 5 (1932), 395.
19. MENEGLINI, D.: Ann. Scuola Ing. Padova, 2, 95-9 (1926).