

EL ANALISIS DEL HORMIGON FRESCO EN EL CONTROL DE OBRAS

Vladimiro VALDES R.*

RESUMEN

A pesar del avance que ha experimentado la tecnología del hormigón y de los numerosos métodos desarrollados para el análisis del hormigón fresco, aún no se cuenta con un ensayo que se pueda considerar óptimo para el control en obra.

Después de describir y analizar algunos métodos gravimétricos oficializados por las normas alemanas para determinar la razón agua cemento y reconstituir los componentes del hormigón, se comentan dos procedimientos desarrollados en IDIEM para el control del hormigón y que han sido aplicados en obra.

INTRODUCCION

Las resistencias mecánicas y la durabilidad del hormigón se determinan mediante el ensayo de probetas que porporcionan información a 3, 7 o 28 días de su fabricación.

La tecnología del hormigón ha intentado, desde hace bastante tiempo, la búsqueda de procedimientos que puedan dar un temprano diagnóstico de la calidad del hormigón endurecido. Acelerando el proceso de endurecimiento

* Académico del IDIEM.

por medio de agua caliente o vapor se puede obtener, al cabo de algunas horas una resistencia que puede correlacionarse con la potencial a 28 días. Estos métodos presentan algunas desventajas que los hacen poco prácticos y no siempre confiables. En efecto, cualquier ensayo que se efectúe con el hormigón endurecido no permitirá un diagnóstico lo suficientemente rápido como para efectuar alguna enmienda a tiempo. Por otra parte, el endurecimiento acelerado depende del árido y tipo de cemento empleados. Por ello, la correlación entre la resistencia acelerada y la normal dependerán de la composición del hormigón.

Los habituales ensayos de control del hormigón, tales como determinación de la docilidad, contenido de aire, densidad etc. están más bien orientados a verificar su uniformidad antes que a obtener información de su calidad.

En la búsqueda de un ensayo que permita información de la calidad del hormigón a partir de las características del hormigón fresco y a los pocos minutos de su fabricación, se han desarrollado numerosos métodos gravimétricos, químicos, eléctricos y fisiconucleares que intentan obtener separadamente algunos de los componentes del hormigón que más influyen en su calidad, tales como el agua de amasado o cemento, o bien, para determinar directamente la razón agua cemento. De estos parámetros, naturalmente el más importante es el último de los nombrados, ya que de éste dependen fundamentalmente las propiedades del hormigón endurecido.

Los métodos de más aceptación son los gravimétricos por ser más prácticos. Del resto, el más conocido es un método químico desarrollado por Kelly y Vail que obtiene separadamente el contenido de agua añadiendo a la muestra de hormigón una solución de NaCl y el cemento a partir de su contenido de CaO. Este método también presenta algunas limitaciones para su aplicación.

La norma DIN 1045 ha introducido el valor de la razón agua cemento como exigencia para verificar la calidad de hormigones de características especiales. Aunque con algunas limitaciones, permite el reemplazo de probetas a compresión por la determinación de la razón agua cemento. En la DIN 1048 se indican procedimientos para efectuar los ensayos. Por su parte, la DIN 52171 proporciona un método para reconstituir la composición del hormigón a partir de una muestra de aproximadamente 40 kg, la que posteriormente debe dividirse en tres sub-muestras.

Las normas chilenas INN vigentes no contemplan como ensayo de control al análisis del hormigón fresco. Sin embargo, el IDIEM ha elaborado un anteproyecto de la norma NCh 170 —la que actualmente está en revisión— en el que se propone agregar como ensayo de control al análisis del hormigón fresco para determinar en obra las cantidades de sus componentes. Al hacerlo obligatorio junto con el ensayo de probetas a 28 días, se podría obtener algún tipo de correlación entre la razón agua cemento y la resistencia del hormigón, lo que finalmente permitiría que el control del hormigón fresco fuera un ensayo alternativo del de probetas a 28 días, a semejanza de lo dispuesto por la norma DIN 1045.

MÉTODOS GRAVIMÉTRICOS PARA EL ANÁLISIS DEL HORMIGÓN FRESCO

De los numerosos métodos desarrollados, se comentarán en este artículo solamente los gravimétricos recomendados por las normas alemanas y, posteriormente, dos de los experimentados en IDIEM

Control de la razón agua cemento por secado del hormigón

En el procedimiento por secado de la muestra, normalizado por la DIN 1048 -1^{ra} parte, la razón agua cemento a/c se obtiene de la igualdad:

$$a/c = \frac{\rho_h \cdot A_1}{C \cdot Ph}$$

en que:

ρ_h = Densidad aparente del hormigón fresco, kg/m³

A_1 = Cantidad de agua obtenida por secado de la muestra, kg

C = Dosis de cemento del hormigón, kg/m³

Ph = Masa de la muestra, kg

El procedimiento supone el secado de la muestra hasta obtener la condición de saturado con superficie seca de los áridos, puesto que no se contempla corrección del agua de absorción de ellos. Como hay que recurrir a la dosificación para obtener la cantidad de cemento, este método pierde su valor como ensayo de control. Un 3% de diferencia en la dosis de cemento puede originar un error de 0.02 en la razón a/c obtenida.

Control de la razón a/c según método Thaulow

Aquí la relación a/c se obtiene a partir del peso hidrostático de la muestra de hormigón fresco:

$$a/c = \frac{Ph}{T - V} (FH_C + k \cdot FH_G) - (1 + k)$$

Siendo:

Ph = Peso en aire del hormigón colocado en el recipiente Thaulow, kg

T = Peso del contenido del recipiente (hormigón + agua), kg.

V = Capacidad de agua del recipiente,

k = Relación árido total seco/cemento, kg.

$FH_C = (\rho_C - 1)/\rho_C$ ρ_C = densidad real del cemento, kg/dm³

$FH_G = (\rho_G - 1)/\rho_G$ ρ_G = densidad real del árido total, kg/dm³

Este ensayo tiene como principales inconvenientes que se debe recurrir a la dosificación para obtener la relación árido/cemento y la densidad real de árido total.

Reconstitución de los componentes del hormigón fresco según DIN 52171

De una muestra representativa de hormigón (aprox. 40 kg), se separan dos porciones P_1 y P_2 , de 5000 g cada una, siendo el sobrante la porción P_3 . La porción P_1 se destina a determinar la cantidad de agua por secado en una fuente de calor

Con la muestra P_2 se obtiene el árido total G_1 , a partir del tamizado húmedo del hormigón por el tamíz DIN 0.2 mm*. Para ello es necesario conocer o determinar separadamente la fracción fina del árido < 0.2 mm que fue eliminada junto con el cemento. El árido total de la muestra resulta de la siguiente igualdad: $G_1 = G_{L1} \cdot 100\%/100\% - \bar{f}$, siendo G_{L1} el árido total seco retenido en el tamíz 0.2 mm y \bar{f} el porcentaje de la fracción fina del árido. Con P_3 se obtiene la densidad aparente ρ_h del hormigón fresco compactado.

La composición del hormigón, en kg/m^3 , resulta como sigue:

$$\begin{aligned} \text{Aglomerante} &= ((P_0 - G_1)/5000 \text{ g}) \cdot \rho_h \\ \text{(Cemento + aditivo)} & \end{aligned}$$

$$\text{Arido total} = (G_1/5000 \text{ g}) \cdot \rho_h$$

$$\text{Agua} = ((5000 \text{ g} - P_0)/5000 \text{ g}) \cdot \rho_h$$

En que: P_0 = peso seco del hormigón P_1

Si bien este método puede ser adecuado para reconstituir, en forma aproximada, la composición del hormigón, no lo es tanto como método de control de la razón a/c ya que no consulta corrección por absorción de los áridos en el cálculo del contenido de agua. La fracción de árido fino < 0.2 mm debe determinarse en ensayo separado o aportarse como dato. Finalmente, en la obtención del agua y cemento pueden producirse errores al emplear muestras diferentes¹.

Método Thaulow modificado²

En IDIEM se estudió una modificación al método originalmente propuesto por el noruego S. Thaulow, de tal forma que la relación de mezclado árido/cemento sea una incógnita más a determinar a través del análisis de la muestra y no dependa de la información del fabricante del hormigón. También se evitó tener que recurrir a la dosificación para obtener la relación árido grueso/árido fino, a partir de la cual se determina el factor hidrostático** ponderado del árido total.

El peso hidrostático de una muestra de hormigón fresco es igual a la suma de los pesos hidrostático de cada uno de sus componentes. A partir de esta definición y, considerando que el peso hidrostático del agua es cero, se obtiene:

$$C' = P'h - G'_L - \frac{FH_f}{FH G_L} \cdot \frac{\bar{f}}{(1 - \bar{f})} \cdot G'_L \quad a$$

* Reemplazado por tamíz 0.25 mm, según lo indica la norma DIN 1048-72, párrafo 3.3.1.

** Se denomina factor hidrostático de un cuerpo C a la expresión $\rho_C - 1/\rho_C$ o también a la relación P'_C/P_C , siendo ρ_C la densidad real de C y P'_C y P_C sus pesos hidrostáticos y en aire respectivamente.

En que:

C' = Peso hidrostático del cemento

$P'h$ = Peso bajo agua de la muestra de hormigón

G'_L = Peso hidrostático del árido total lavado sobre tamices ASTM N° 4 y N° 100

FHf = Factor hidrostático del árido bajo tamiz ASTM N° 100

\bar{f} = Contenido ponderado de finos bajo tamiz ASTM N° 100 aportado por los áridos (expresado en tanto por uno).

La relación de mezclado árido/cemento, k_m , determinada a partir de la muestra ensayada es:

$$k_m = \frac{G'_L}{C'} \cdot \frac{FH_C}{FHG_L} \cdot \frac{1}{(1 - \bar{f})} \quad b$$

La proporción de los áridos grueso y fino existente en la muestra se calcula a partir de las siguientes igualdades:

$$g = \frac{g'_L}{FHg_L} \cdot \frac{1}{(1 - \bar{f}_g)} \quad y \quad F = \frac{F'_L}{FHF_L} \cdot \frac{1}{(1 - \bar{f}_F)}$$

donde:

g = Arido grueso de la muestra, que queda retenido en tamiz ASTM N° 4.

F = Arido fino de la muestra, que pasa por tamiz ASTM N° 4.

\bar{f}_g y \bar{f}_F = Contenido de finos bajo tamiz ASTM N° 100 (en tanto por uno) aportados por los áridos grueso y fino.

g'_L y F'_L = Peso hidrostático de los áridos grueso y fino lavados en tamiz ASTM N° 100.

FHg_L y FHF_L = Factor hidrostático de los áridos grueso y fino lavados en tamiz ASTM N° 100.

Finalmente, para calcular la razón agua cemento a/c se aplica la fórmula de Thaulow, pero reemplazando el factor k de la dosificación por el obtenido de la igualdad b e introduciendo el factor hidrostático ponderado del árido total.

Este método por pesada hidrostática permite calcular la densidad real del hormigón fresco y, al conocer su densidad aparente, también es posible verificar su contenido de aire y reconstituir, en forma aproximada, la composición del hormigón.

La modificación introducida al método original supone el tamizado humedo de la muestra de hormigón. A través del tamiz ASTM N° 100 se elimina la fracción fina < 0.149 mm (en la que está contenida el cemento) y para separar el árido grueso lavado se incorpora al ensayo un tamiz ASTM N° 4.

Para el cálculo de k_m se debe conocer los pesos hidrostáticos del árido total lavado y del cemento contenidos en la muestra. Este último se obtiene por cálculo (igualdad a), lo que obliga a la determinación de algunas constantes tales como porcentaje del árido fino menor que tamiz ASTM N° 100 separado por lavado y su factor hidrostático, así como los factores hidrostáticos del cemento y del árido total lavado. Este último puede ser obtenido directamente de la

muestra de hormigón, registrando su peso seco. Para determinar la razón a/c hay que conocer, además, el factor hidrostático del árido total G .

La aplicación en obra ha demostrado que el ensayo debe hacerse en forma muy cuidadosa y con pesadas muy precisas. La duración de toda la operación en terreno, en la que no se incluye la determinación de las constantes, no es inferior a 45 minutos. Variaciones en las constantes ya sea por errores de ensayo o por incluir materiales no representativos de la muestra, pueden producir errores en los resultados finales. Cuidado especial merece la determinación del porcentaje de material más fino que el tamiz N° 100, ya que cualquier diferencia hará variar la cantidad de cemento que se obtenga del análisis del hormigón, por lo cual este ensayo debe efectuarse precisa, cuidadosa y frecuentemente.

Método por secado y tamizado húmedo de una muestra de hormigón³

En la búsqueda de un procedimiento más directo, es decir, que no dependa de mucha información previa que pueda introducir errores y significar mayor esfuerzo operacional, se ha desarrollado en IDIEM un trabajo experimental para determinar el contenido de agua por secado del hormigón en una fuente de calor y, a continuación, las cantidades de áridos grueso y fino a partir del tamizado húmedo de la muestra por los tamices ASTM N°s 4 y 100.

Para el cálculo de la razón a/c se deben conocer solamente dos características de los materiales componentes del hormigón. La más importante de ellas, por su influencia en los resultados y por ser la más inestable de las constantes requeridas, es el contenido de árido fino < 0.149 mm. El porcentaje de dichos finos se obtiene utilizando el mismo equipo del ensayo y en la forma usual de lavado. Esta constante, como ya se ha dicho, debe verificarse con cierta frecuencia para evitar errores en la determinación de los áridos. La absorción es otro dato que se debe conocer previo al cálculo y su determinación no requiere mayores comentarios.

La relación agua cemento a/c se obtiene a partir de las siguientes igualdades:

$$G = \frac{g_L}{(1 - f_g)} + \frac{F_L}{(1 - f_F)} \quad a$$

$$a_o = \frac{g_L \cdot \bar{a}_g}{(1 - \bar{f}_g)} + \frac{F_L \cdot \bar{a}_F}{(1 - \bar{f}_F)} \quad b$$

$$a/c = \frac{P_h - (P_o + a_o)}{P_o - G} \quad c$$

En que:

a_o = Agua de absorción del árido total.

a_g y a_F = Absorción de los áridos grueso y fino (en tanto por uno).

Si se conoce la densidad aparente del hormigón fresco compactado, es posible reconstituir, en forma aproximada, la composición del hormigón.

A diferencia del método anterior, aquí solamente se deben aportar dos datos que son ajenos a la muestra; esto lo hace más directo y por ello, más confiable. Por otra parte, si el secado se efectúa a temperaturas superiores a 250°C, también debiera evaporar el agua combinada químicamente con el cemento.

La cantidad de agua obtenida por secado es generalmente mayor que la real. Esto se debe a que el cemento aporta la humedad que ha absorbido del ambiente. En efecto, muestras de cemento sometidas a temperaturas de 110°C acusaron pérdidas de peso del orden del 1%. A mayores temperaturas el cemento continua perdiendo peso, por lo que conviene tener esto presente para no exagerar el secado o efectuar las correcciones necesarias.

En cuanto a la duración del ensayo, si se considera el tiempo ocupado en determinar las numerosas constantes del método Thaulow modificado, el procedimiento por secado no demanda más tiempo que el anterior.

CONSIDERACIONES FINALES

Un método ideal para el análisis del hormigón fresco debiera reunir las siguientes condiciones: a) ser de corta duración, b) sencillo de ejecutar, c) de resultados confiables y d) no depender de información ajena a la muestra.

La duración del ensayo debiera ser tal, que permita contar con información antes de la colocación del hormigón en los encofrados, ojalá no sobrepasar los 20 minutos. El procedimiento y equipo empleados debieran ser comprensibles y sencillos, incluso para personal no especializado. Toda información requerida para el ensayo debiera obtenerse directamente de la muestra analizada, sin el empleo de datos de la dosificación tales como relación de mezclado, contenido de finos, densidad real de los áridos o del cemento etc. Si se recurre a información ajena a la muestra, sea esta obtenida de la dosificación o de otros ensayos adicionales, se debería tener la seguridad de que los resultados finales serán lo suficientemente precisos. El error de ensayo no debiera ser superior al 2%.

Parece ser que en el actual estado en que se encuentra la tecnología del hormigón, no existe aún un método que cumpla todas las anteriores condiciones señaladas. El método por secado propuesto por la DIN 1048, aunque cumple relativamente con los puntos a) y b), pierde validez al incorporar como dato al ensayo la dosis de cemento de la dosificación, especialmente cuando el suministro de éste no se aplica en bolsas sino por medio de silos. El método por pesada hi-

drostática de la norma alemana requiere de técnicas más cuidadosas y mediciones muy precisas en su ejecución. Los resultados pueden resultar falseados si el peso específico de los áridos no es constante o si las relaciones árido/cemento y árido grueso/árido fino de la muestra no corresponden a las de la dosificación. De menor importancia es la variación del peso específico del cemento, debido a que la cantidad de cemento en el hormigón es baja en comparación con los áridos.

Los métodos propuestos por IDIEM son más adecuados para el control del hormigón que los anteriores, porque son independientes de la dosificación. Obligan, en cambio, a un mayor tiempo de ensayo. El Thaulow modificado puede ser confiable en la medida que también lo sean las constantes que se incorporan al cálculo. El procedimiento por secado y lavado, por la reducida información adicional que requiere, parece ser más adecuado para el control en obra, pese a su largo proceso de ensayo.

Limitaciones de los métodos gravimétricos

Los métodos que utilizan el tamizado húmedo del hormigón y determinan el contenido de material fino menor que tamiz ASTM N° 100 en ensayo aparte, presentan inseguridad en su aplicación cuando los áridos sufren desgaste o trituración durante el mezclado o si tienen mucho contenido de finos segregables. Algunos autores,^{4,5,6} recuperan la fracción fina separada por lavado y por diversos procedimientos: físicos, químicos etc separan el cemento de los finos. Estos métodos, de técnicas más sofisticadas, emplean muestras muy pequeñas de hormigón, generalmente alargan el ensayo e impiden un completo lavado del hormigón al restringir el agua para la operación; están más bien diseñados para trabajos de laboratorio que al control de obra.

Si para mejorar granulometrías se mezclan arenas de diferente contenido de finos, durante el ensayo no es posible separar dichos áridos, lo cual puede inducir a errores si la mezcla de las arenas fué aplicada incorrectamente.

El análisis del hormigón fresco no consulta el empleo de aditivos, pero como la cantidad de éstos generalmente es muy pequeña en el hormigón, el error que introducen es insignificante.

REFERENCIAS

1. BLISCHKE, W. Fehlermöglichkeiten beim Thaulow-Verfahren, *Beton* 6/1979 (junio 1979), pp. 215-216.
2. PAVEZ, W. *Estudio experimental del hormigón fresco. Control de calidad del hormigón por medio del valor a/c*. Memoria para optar al título de Constructor Civil, Universidad de Chile, Santiago 1979.

3. VALDES, V. Control de la razón agua cemento por secado. *Revista del IDIEM*, vol. 18, n° 3, (diciembre 1979), pp. 143–150.
4. RUIZ DE GAUNA, A. y CALLEJA, J. *Métodos de análisis del hormigón fresco*. Monografía del Instituto Eduardo Torroja, n° 320, julio 1974.
5. BAVELJA, R. A rapid method for the wet analysis of fresh concrete. *Concrete*, vol. 4, n° 9, (septiembre 1979), pp. 351–353.
6. MURDOCK, L. The determination of the properties of concrete. *Cement and lime manufacture*, 21 (1948), n° 5, pp. 91–96.
7. OSSA, M. Influencia de la edad y del tipo de almacenamiento en los cemento chilenos. *Revista del IDIEM*, vol. 13, n° 2, 1974.
8. WALZ, K. Prüfung der Zusammensetzung des Frischbetons. Frischbetonanalyse. *Beton* 7/1979, *Beton* 8/1977 y *Beton* 9/1977.
9. WERSE, H.P. Vergleich verschiedener verfahren zur bestimmung des Wasserzementwertes. *Beton und Stahlbetonbau* 9/1970, pp. 222–226
10. BLAUT, H. Erfahrung bei der messung des Wasserzementwertes nach dem Thaulow—Verfahren. *Beton — Fertigteil — Technik*, 8/1972.
11. NAGELE, E. y HILSDORF, H. Die Frischbetonanalyse auf der baustelle. *Beton* 4/1980. pp. 133–138.
12. WAGNER-GREY, U. Wassersementwert und Betondruckfestigkeitsergebnisse von Überwachungsprüfungen. *Beton-Fertgteil-Technik*, 11/1983.

ANALYSIS OF FRESH CONCRETE ON FIELD CONTROL

SUMMARY

Several methods for determining the constituents of fresh concrete and/or the water-cement ratio have been proposed, but none of the procedures examined fully meets the demands which must be made on testing practices if they are to be used on field control.

This paper examines the German standards procedures based on gravimetric measurements for the analysis of fresh concrete or the water-cement ratio determination and two gravimetric methods developed in IDIEM for concrete control on the field.