

Nuevo procedimiento de dosificación de los morteros y hormigones fraguados con aplicación de computadores digitales

(Comparación del método con el "Método Completo para el Análisis Químico del Hormigón Endurecido" del CEMBUREAU)

A. RUIZ DE GAUNA
Dr. en Ciencias Químicas

RESUMEN

Se presenta en este trabajo un nuevo procedimiento de dosificación de los conglomerados endurecidos, con validez general, cualquiera que sea el tipo de cemento o la clase de árido que contenga. El método se plantea libre de hipótesis a priori y se determinan simultáneamente la dosificación de cemento, la de árido, la composición química del cemento anhidro y el grado de hidratación alcanzado por el cemento. Las incógnitas halladas no se consideran en forma aislada, sino como un conjunto cuyas partes han de armonizar entre sí.

Se aplica el método a un hormigón que contiene material silíceo y calizo solubles como árido y se comparan los resultados con los obtenidos según el "Método Completo para el Análisis Químico del Hormigón Endurecido" del CEMBUREAU.

0. INTRODUCCION

De entre los problemas que se presentan en un laboratorio de análisis de materiales de construcción, el de determinar la dosificación de cemento en un mortero u hormigón tiene una gran importancia por dos razones:

- a) Por la frecuencia con que llegan al laboratorio este tipo de problemas.
- b) Por la responsabilidad implicada en su correcta resolución, ya que de sus resultados dependen con frecuencia cuantiosos intereses económicos e incluso, en ocasiones, el fallo de los tribunales de justicia.

El problema se viene abordando mediante métodos normalizados, que se fundan en la elección de un "componente guía" que se determina en el conglomerado y en el cemento (cuando se dispone de él) y se supone que está ausente del árido. Cuando no se dispone de muestra del cemento, se adopta un valor medio para el contenido del "componente

guía" en el cemento. En definitiva, se efectúan dos hipótesis y de esas hipótesis dependen los resultados finales.

Existen métodos más elaborados en los cuales se determinan varios componentes químicos (3 ó 4 a lo sumo), pero todos ellos, y aunque en algunos se efectúa el análisis del árido extraído del conglomerado, llevan consigo la realización de hipótesis a priori, implícitas o explícitas, sin posibilidad de confirmación.

En el Instituto "Eduardo Torroja" se ha desarrollado un nuevo método para el análisis del hormigón (I) en el que se afronta el problema partiendo de las siguientes bases:

- 1º) Solamente se recibe en el laboratorio una muestra del conglomerado endurecido. No se dispone del cemento anhidro, ni de los áridos empleados.
- 2º) Todos los componentes químicos del cemento son, o pueden ser, componentes del árido.
- 3º) Se efectúa el análisis químico completo del conglomerado y del árido extraído del mismo.
- 4º) Para los cálculos no se efectúan hipótesis a priori. Se hacen intervenir todos los componentes químicos y se plantean como incógnitas no sólo la dosificación de cemento, sino también la del árido, la composición química del cemento anhidro y el grado de hidratación alcanzado por el cemento. Las soluciones se eligen a posteriori a la vista de todas las soluciones posibles.
- 5º) Los resultados obtenidos no se consideran en forma aislada, sino como formando parte de un conjunto en el que han de armonizar todas sus partes. De las infinitas soluciones encontradas, ya que como se verá más adelante el problema es indeterminado, sólo se tienen en cuenta aquellas en que el conjunto de las incógnitas armonizan entre sí de forma que constituyan resultados posibles de acuerdo con la naturaleza real de los mismos: composición de cementos anhidros y grados de hidratación reales, así como dosificaciones de cemento y de árido no absurdos.

1. NUEVO PROCEDIMIENTO DE DOSIFICACION CON APLICACION DE COMPUTADORES DIGITALES

1.1. Planteamiento del problema con validez general y obtención de fórmulas para el cálculo sin establecer hipótesis a priori

Un conglomerado hidráulico (mortero u hormigón) endurecido es una mezcla de diversas materias, componentes químicos o conceptos analíticos (SiO_2 , Al_2O_3 , etc.) (II) y al mismo tiempo una mezcla de diversos materiales (cemento anhidro, árido y pérdida al fuego surgida en la hidratación), que contienen, al menos dos de ellos (cemento y árido), los mismos componentes químicos que constituyen el conglomerado endurecido.

El planteamiento de una manera general del problema de determinar la dosificación de cemento a partir de los datos del análisis químico, implica la realización de un balance de material y de tantos balances de materia como conceptos analíticos.

(I) Tesis Doctoral — 20 junio 1970.

(II) Se consideran también como conceptos analíticos, la pérdida al fuego, el residuo insoluble y el complemento a 100 del análisis químico. El complemento a 100 podrá resultar positivo o negativo.

Si se designa por Z_h , Z_a y Z' al porcentaje en peso de uno cualquiera de los conceptos analíticos (residuo insoluble, SiO_2 , Al_2O_3 , etc.), en el conglomerado endurecido, árido y cemento anhidro, respectivamente, secos a $105^\circ\text{-}110^\circ\text{C}$, se obtienen $n-1$ ecuaciones del tipo:

$$Z_h = X \frac{Z_a}{100} + Y \frac{Z'}{100} \quad [1]$$

siendo n el número de conceptos analíticos y X e Y los porcentajes en peso de árido y cemento anhidro contenidos en el conglomerado seco a $105^\circ\text{-}110^\circ\text{C}$.

Efectuando un balance de pérdida al fuego P se obtiene la ecuación:

$$P_h = X \frac{P_a}{100} + Y \frac{P'}{100} + H \quad [2]$$

en la que H representa la pérdida al fuego surgida en la hidratación, contenida en 100 partes en peso de conglomerado endurecido y seco a $105^\circ\text{-}110^\circ\text{C}$.

Finalmente, de un balance de material resulta la ecuación:

$$X + Y + H = 100 \quad [3]$$

En total pueden plantearse $n + 1$ ecuaciones.

Los datos que, en general, pueden obtenerse experimentalmente son: análisis químico del hormigón y análisis químico del árido extraído del hormigón (III).

Las incógnitas a determinar son: porcentaje de árido X , porcentaje de cemento anhidro Y , porcentaje de pérdida al fuego surgida en la hidratación H y composición química del cemento anhidro (n componentes). Las incógnitas son pues $n + 3$.

Siendo las ecuaciones $n + 1$ y las incógnitas $n + 3$, el problema es indeterminado, existiendo dos variables independientes. Si se dan valores a estas variables se obtendrían infinitas soluciones.

Para la elección de las variables independientes, se ha tenido en cuenta que, según se demostró en el reciente trabajo de Tesis mencionado, elegida arbitrariamente la pérdida al fuego P' del cemento anhidro como una de las variables independientes, la otra variable independiente más conveniente es el residuo insoluble R' del cemento anhidro, por ser las variaciones de R' las que menos variación producen en los valores calculados de la dosificación de cemento Y .

Resolviendo el sistema de $n + 1$ ecuaciones citado anteriormente, se obtienen las siguientes fórmulas para el cálculo de las incógnitas:

Composición del cemento anhidro:

$$Z' = \frac{Z_h [(100 - P_a) R' - (100 - P') R_a] - Z_a [(100 - P_h) R' - (100 - P') R_h]}{(100 - P_a) R_h - (100 - P_h) R_a} \quad [4]$$

(III) Se ha considerado el árido como único, de forma que, cuando se haga referencia al árido o a la composición del árido, se entenderá árido medio o composición media del árido.

Dosificación de cemento:

$$Y = \frac{100 [(100 - P_a) R_h - (100 - P_h) R_a]}{(100 - P_a) R' - (100 - P') R_a} \quad [5]$$

Dosificación de árido:

$$X = \frac{100 [(100 - P_h) R' - (100 - P') R_h]}{(100 - P_a) R' - (100 - P') R_a} \quad [6]$$

Pérdida al fuego surgida en la hidratación:

$$H = \frac{100 [R_h (P_a - P') + R_a (P' - P_h) + R' (P_h - P_a)]}{(100 - P_a) R' - (100 - P') R_a} \quad [7]$$

A fines comparativos y para obtener un número que ponga de relieve el grado de hidratación alcanzado por el cemento, independientemente de la dosificación, se calcula la pérdida al fuego P'' de la pasta pura de cemento hidratado (% en peso), la pérdida al fuego p del cemento anhidro contenido en 100 partes en peso de pasta pura hidratada y la pérdida al fuego $P'' - p$, surgida en la hidratación, en 100 partes en peso de pasta pura de cemento hidratada. El cálculo se realiza teniendo en cuenta las relaciones siguientes:

$$\frac{Y + H}{P' \frac{Y}{100}} = \frac{100}{p} \quad [8]$$

$$\frac{100 - P'' + p}{100} = \frac{p}{P'} \quad [9]$$

Relaciones, de deducción inmediata teniendo en cuenta la definición de los parámetros que intervienen en ellas.

Sustituyendo en ellas los valores de H e Y , se obtienen las fórmulas que dan el grado de hidratación del cemento:

$$P'' = \frac{(100 - P') (R_h P_a - R_a P_h) + 100 (P_h - P_a) R'}{(R_h - R_a) (100 - P') + R' (P_h - P_a)} \quad [10]$$

$$p = \frac{P' [(100 - P_a) R_h - (100 - P_h) R_a]}{(R_h - R_a) (100 - P') + R' (P_h - P_a)} \quad [11]$$

$$P'' - p = \frac{100 [R_h (P_a - P') - R_a (P_h - P') + R' (P_h - P_a)]}{(R_h - R_a) (100 - P') + R' (P_h - P_a)} \quad [12]$$

1.2. Obtención de los datos necesarios para los cálculos

Para calcular las incógnitas mediante las formulas [4], [5], [6], [7], [10], [11] y [12], es necesario conocer la composición del conglomerado, la composición del árido medio y los valores de las variables independientes P' y R' .

1.2.1. Valores de P' y R'

1.2.1.1. Valores de P'

Para cubrir los posibles valores de P' correspondientes a los distintos tipos de cemento, pueden establecerse los intervalos que se expresan en el Cuadro I.

C U A D R O I

Tipo de cemento	Intervalo de variación de P'
Aluminoso	0,15 a 1,00
Portland, siderúrgico y puzolánico	1,00 a 6,00
De Adición (con adición caliza)	6 a 20 (IV)

Dando valores a P' desde 0,15 hasta 20 se cubre todo el campo de posibles valores.

1.2.1.2. Valores de R'

El intervalo de valores adoptados para los diferentes tipos de cemento, se da en el Cuadro II.

C U A D R O II

Tipo de cemento	Intervalo de variación de R'
Portland, siderúrgico y aluminoso	0,7 a 3
Puzolánico	3 a 10
De Adición con carga caliza	0,7 a 3
De Adición con carga silícea	Mayor de 3

(IV) Para un cemento de Adición conteniendo hasta un 35 % de materia inerte total, dada ésta por la suma del residuo insoluble y de doble del % CO₂, se tiene:

$$2 \% \text{ CO}_2 + \text{RI} \leq 35;$$

de donde:

$$\% \text{ CO}_2 \simeq \text{P}' \leq \frac{35 - \text{RI}}{2} < \frac{35}{2} = 17,5 < 20.$$

Este 35 % es el máximo contenido de materia inerte total permitido por el Pliego español vigente.

Dando valores a R' desde 0,7 hasta 10, se cubre el campo de posibles valores para los cementos tipo portland, aluminoso, siderúrgico, puzolánico y de Adición con adición de naturaleza caliza.

1.2.2. *Análisis químico del conglomerado y del árido medio*

1.2.2.1. *Extracción del árido medio*

Dada la transcendencia que para la exactitud de los resultados tiene la extracción del conglomerado de una muestra de árido que sea realmente representativo del árido contenido en el mismo, esta operación debe realizarse con el máximo cuidado e interés.

Si el conglomerado es un mortero, la extracción del árido para su análisis puede efectuarse directamente del conglomerado original.

Cuando el conglomerado es un hormigón, las fracciones de árido de distinto tamaño (árido grueso y árido fino) pueden ser de diferente naturaleza. En este caso se separa, por medios mecánicos, el hormigón en dos partes: una parte formada por el árido más grueso totalmente exento de pasta de cemento y otra parte, denominada "mortero enriquecido", conteniendo *toda la pasta de cemento hidratada* y el árido más fino. La frontera o tamiz que separa las 2 partes, dependerá del grado de adherencia de la pasta de cemento al árido y deberá ser lo más pequeño posible dentro de la máxima seguridad sobre la absoluta ausencia de pasta de cemento en el árido separado. En la mayoría de los casos ensayados, el tamiz Tyler n.º 3 (6,680 mm de luz de malla) resultó conveniente.

El hormigón, seco a 105°-110°C, se pesa antes de su división en las dos fracciones, y éstas se pesan aisladamente después de nuevo secado a 105°-110°C. Conocidos los pesos del árido limpio y del "mortero enriquecido" contenidos en el hormigón, los resultados de dosificación obtenidos a partir de los análisis del "mortero enriquecido" y del árido extraído de éste pueden referirse al hormigón original.

Las operaciones, tanto de división del hormigón en dos fracciones como de extracción de una muestra de árido del "mortero enriquecido", se facilitan teniendo en cuenta que no importa la alteración de la granulometría original del árido, siendo exclusivamente los puntos esenciales los siguientes:

- a) Absoluta ausencia de pasta de cemento en el árido grueso separado.
- b) Toda la pasta de cemento debe estar en el "mortero enriquecido".
- c) Representatividad, en cuanto a composición química, del árido extraído del "mortero enriquecido".

1.2.2.1.1. *Separación del hormigón en dos fracciones*

La operación se realiza rompiendo en primer lugar el hormigón mediante una prensa de compresión. Los trozos disgregados se siguen rompiendo con un martillo procurando golpear con el efecto y en los lugares más convenientes para romper la mínima cantidad de árido y separar la máxima cantidad de piedras. Finalmente se limpian las piedras individualmente, con la ayuda de un pequeño martillo y cincel finamente afilado.

El tamaño de la muestra de hormigón será función del tamaño máximo del árido. Pueden utilizarse en los casos normales muestras de 1,5 a 2 kg.

Se adoptarán las precauciones necesarias para evitar la pérdida de material por proyección o en forma de polvo.

1.2.2.1.2. *Extracción del árido medio del “mortero enriquecido”*

El “mortero enriquecido” se divide por cuarteos en dos fracciones: una destinada al análisis químico y otra para extraer el árido (unos 300 g).

La operación de extracción de la muestra de árido debe efectuarse con paciencia y meticulosidad. Se considera como árido representativo del contenido en el “mortero enriquecido”, el extraído y limpio comprendido entre el tamiz por el que pasó el “mortero enriquecido”, Tyler n.º 3 (6,680 mm de luz) y el Tyler n.º 100 (0,147 mm de luz).

La separación y limpieza del árido se efectuará en forma distinta según que el árido sea soluble o insoluble en ácidos. Este extremo se comprobará ensayando con ácido clorhídrico (1:5) caliente una pequeña muestra de árido extraído.

a) *Arido insoluble en ácido clorhídrico (1:5) caliente*

Se realiza la separación mecánica del árido mediante frotamiento contra una superficie dura y áspera, que podrá ser una plancha metálica o el interior de un mortero grande de porcelana. Los trozos de mortero que no se disgreguen por este tratamiento se romperán con un pequeño martillo. Se alternará el frotamiento y rotura del mortero con tamizados por tamices de 2 mm, 1 mm y 0,147 mm de luz.

Realizada esta disgregación y limpieza mecánicas hasta un grado prudencial, sin necesidad de ser exhaustivo, se tratan, las tres fracciones de árido por separado, en vasos de precipitado con ácido clorhídrico 1:5 caliente (unos 60°C) agitando de vez en cuando con una varilla de vidrio. Este tratamiento se repetirá varias veces utilizando nueva cantidad de ácido en períodos de 10 minutos. El número de veces que se repetirá el tratamiento dependerá de las características de la pasta de cemento. A partir del 5.º tratamiento y en los sucesivos, se observará con una lupa cada fracción de árido, suspendiendo la limpieza cuando no se observen granos de mortero o de pasta de cemento. Si es necesario, se eliminarán uno a uno los pocos granos de árido con pasta o los propios granos de mortero que se observen. Es preferible eliminar algo de árido que dejar algo de pasta sin eliminar.

A continuación se lavan dos veces por decantación en el mismo vaso con agua destilada caliente, cada fracción de árido, y finalmente, reunidas las tres fracciones sobre el tamiz de 0,147 mm, se lavan con el chorro de agua hasta que las aguas de lavado no den reacción ácida. El árido así separado y limpio se seca a 105°-110°C para proceder a su análisis.

b) *Arido soluble total o parcialmente en ácido clorhídrico (1:5)*

En este caso, la disgregación y limpieza mecánica, efectuada como en el caso a), debe ser exhaustiva. Los tamizados por los tamices de 2 mm, 1 mm y 0,147 mm de luz, que al principio se efectúan en seco, se terminan realizando bajo el chorro de agua con el fin de observar mejor los granos de árido con pasta adherida o los propios granos de mortero. Estos últimos se rompen con un martillo y los granos de árido con pasta se limpian con un cuchillo si es posible, y si no, se eliminan. En los lavados con agua los tamices de 2 mm y 1 mm deben estar colocados sobre el de 0,147 mm para retener las partículas que se desprendan.

Una vez efectuada la limpieza manual y al chorro de agua, hasta que no se aprecien

con la lupa rastros de pasta de cemento, se pasa el árido existente sobre cada tamiz a sendas cápsulas de porcelana y se efectúan cuatro tratamientos con ácido clorhídrico (1:10) a la temperatura ambiente. Cada tratamiento será de unos 3 minutos de duración como máximo, agitando cada 30 segundos y deteniendo el ataque por dilución con agua hasta que cese la efervescencia. Se decanta el líquido de cada cápsula y se efectúa a continuación el siguiente tratamiento.

Después del último tratamiento, se lava cada fracción de árido por decantación en la propia cápsula, dos veces con agua destilada caliente y después ocho veces con agua fría. Se secan a 105°-110°C en las mismas cápsulas y se pesan por separado.

Se toman de cada fracción de árido, las cantidades F_1 , F_2 y $F_{0,147}$ calculadas, para obtener una muestra total de 40 gramos, mediante las proporciones:

$$\frac{F_1}{P_1} = \frac{F_2}{P_2} = \frac{F_{0,147}}{P_{0,147}} = \frac{40}{P_1 + P_2 + P_{0,147}};$$

en las que P_1 , P_2 y $P_{0,147}$ son los pesos de cada fracción seca a 105°-110°C.

Con las fracciones F_1 , F_2 y $F_{0,147}$ se vuelven a efectuar las operaciones de limpieza mecánica, tamizado en seco y observación visual, dedicando especial atención a la fracción $F_{0,147}$. Al final se realiza un único tratamiento con ácido clorhídrico 1:10 a la temperatura ambiente durante 3 minutos, se reúnen las tres fracciones sobre el tamiz de 0,147 milímetros, se lava con agua hasta que no dé reacción ácida y se seca a 105°-110°C. El árido queda así dispuesto para su análisis.

1.2.2.2. *Análisis químico*

El procedimiento de análisis químico no se considera parte esencial del método, pudiendo analizarse el "mortero enriquecido" y el árido extraído utilizando cualquiera de los métodos existentes para atacar la muestra disolviendo la sílice del cemento y dejando en el residuo insoluble la sílice procedente del árido. La única condición es que ambos materiales se analicen por el mismo método.

Se lavará, calcinará y pesará el residuo insoluble para calcular su porcentaje, y en los líquidos filtrados, procedentes de la determinación de la sílice, se determinarán el resto de los componentes: trióxido de azufre y óxidos de hierro, aluminio, calcio y magnesio.

Las muestras antes de ser analizadas, se trituran y muelen hasta que pasen por el tamiz de 1 mm de luz.

Se recomienda no husar muestras pequeñas para el análisis. Muestras de 10 a 20 gramos se consideran convenientes.

En el ejemplo presentado en este trabajo se determinó la sílice soluble según la Norma N.E.L.C., 501-a (Norma de Ensayo del Laboratorio Central de Ensayo de Materiales de Construcción — Madrid), con las modificaciones necesarias para determinar, al mismo tiempo, el residuo insoluble y el resto de los componentes químicos. Estos últimos se hallaron por procedimientos gravimétricos clásicos.

1.3. **Determinación de las soluciones**

Con los resultados del análisis químico del conglomerado, del árido medio y los valores de las variables independientes que se expresan en el Cuadro III, mediante un computa-

dor digital provisto del programa correspondiente, se calculan los valores de las incógnitas dados por las fórmulas [4], [5], [6], [7], [10], [11] y [12]. Se obtiene así una tabla de resultados o "barrido previo" al campo de soluciones, de cuyo estudio se deduce el tipo de cemento empleado y se elige, en función de éste, el intervalo de soluciones posibles. Se da como solución para cada incógnita el valor medio correspondiente al intervalo (V).

C U A D R O III

P'	R'	P'	R'	P'	R'	P'	R'
0,15	0,7	0,3	0,7	1,0	0,7	2,0	0,7
	1,5		1,5		1,5		1,5
	2,0		2,0		2,0		2,0
	3,0		3,0		3,0		3,0
	6,0		6,0		6,0		6,0
	10,0		10,0		10,0		10,0
3,0	0,7	4,0	0,7	6,0	0,7	9,0	0,7
	1,5		1,5		1,5		1,5
	2,0		2,0		2,0		2,0
	3,0		3,0		3,0		3,0
	6,0		6,0		6,0		6,0
	10,0		10,0		10,0		10,0
12,0	0,7	15,0	0,7	18,0	0,7	20,0	0,7
	1,5		1,5		1,5		1,5
	2,0		2,0		2,0		2,0
	3,0		3,0		3,0		3,0
	6,0		6,0		6,0		6,0
	10,0		10,0		10,0		10,0

Estudiando la tabla de valores de las incógnitas calculadas, se comprueba que, si bien los valores de los diferentes componentes químicos del cemento anhidro varían al cambiar P' y R', sin embargo se mantiene prácticamente constante la relación entre ellos. Esta propiedad permite determinar el tipo de cemento empleado, si se asignan unos valores a la relación entre determinados componentes del mismo.

En el Cuadro IV se dan los intervalos de variación adoptados para las relaciones entre algunos componentes del cemento anhidro.

(V) Se estudia la función que liga cada incógnita con R' supuesta P' constante, comprobándose que en el intervalo considerado la función no presenta discontinuidad.

C U A D R O IV

Tipo de cemento	Intervalos de variación				
	R'	C'/S'	Standard de cal de Kühl (VI)	C'/A'	C'/F'
Portland	0,7 a 3	2,5 a 3,5			
Aluminoso	0,7 a 3	6,0 a 12,0		0,8 a 1,1	2,0 a 4,2
Siderúrgico	0,7 a 3	1,7 a 2,4			
Puzolánico	3 a 10	1,44 a 2,75			
De Adición con carga caliza	0,7 a 3	Mayor de 3,5	Mayor de 105		
De Adición con carga silícea	Mayor de 3	2,5 a 3,5			

Admitiendo que las soluciones “verdaderas” se encuentran comprendidas entre los valores límites del intervalo (VII), cuando el conglomerado fue confeccionado con alguno de los tipos de cemento: portland, aluminoso, siderúrgico, puzolánico o de Adición con adición caliza, mediante las limitaciones de P' y R' dadas en los Cuadros I y II, se pueden obtener intervalos de soluciones lo suficientemente estrechos como para dar el valor medio del intervalo como solución final y obtener un alto porcentaje de resultados con errores inferiores al 5 % (VIII).

No es posible distinguir entre los conglomerados fabricados con cemento portland y árido silíceo insoluble y los conglomerados confeccionados con cemento de Adición con adición silícea, ya que observando las tablas de resultados, se comprueba que al ir aumentando R', disminuyen los demás componentes del cemento pero manteniéndose entre sí en la relación que tienen en el cemento portland. Al aumentar el contenido de carga silícea (R' crece), aumenta la dosificación del conglomerante Y, y disminuye la dosificación de árido X, así como la pérdida al fuego surgida en la hidratación. Todo de acuerdo con lo que sería lógico en este caso y sin que puedan establecerse criterios que determinen cuáles son los valores “verdaderos”, si los correspondientes a R' bajos o a R' altos.

(Continuará)

(VI) Calculado con la fórmula:

$$\frac{100 (C' - 0,7 N')}{2,8 S' + 1,1 A' + 0,7 F'}$$

C', S', A', F' y N' son los porcentajes de CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ y SO₃, respectivamente, en el cemento anhidro.

(VII) Según se demuestra en el trabajo original (Tesis — junio 1970), cuando el árido es poco soluble los valores “verdaderos” de todas las incógnitas tienen una probabilidad, que puede estimarse superior al 80 % de encontrarse en el intervalo de soluciones. La probabilidad es superior al 90 % para la dosificación de cemento.

(VIII) Cuando el árido es poco soluble, el 100 % de las dosificaciones de cemento y de árido se han determinado con error inferior al 5 %. Si el árido es soluble, el error máximo encontrado en la dosificación de cemento fue del 16 % (Tesis — junio 1970).