

687-22

ensayo de hormigones endurecidos de cemento portland mediante microscopía

J. M. FERNANDEZ PARIS
Profesor Ingeniero Técnico

C. F. BAQUEDANO COLL
Profesor Ingeniero Civil

introducción

En los laboratorios de control de materiales de construcción se presenta, en determinadas ocasiones, la necesidad de investigar las posibles causas que han motivado los fallos en hormigones endurecidos. Este problema, muy complejo en su esencia, ha despertado el interés de numerosos investigadores, afrontándole desde diferentes puntos de vista y empleando técnicas diversas.

La naturaleza de los áridos, su distinta procedencia, el tipo de conglomerante empleado, los aditivos añadidos, la elaboración y puesta en obra, las características propias del hormigón como material y las modificaciones —favorables o desfavorables— del medio ambiente en que desarrolla sus cualidades, hacen que cada uno de los métodos tenga únicamente validez en determinadas condiciones. Así, los métodos químicos establecidos para determinar el contenido de cemento como una de las partes del problema planteado, requieren el conocimiento previo de la naturaleza del árido (silíceo o calizo) o disponer de una muestra del conglomerante utilizado (1) (2).

Algunos investigadores, como Axon (3), Polivka, Kelly y Best (4) han desarrollado métodos, para estimar la composición de la mezcla original de los hormigones, basados en las propiedades físicas de las pastas endurecidas de cemento portland estudiadas por Powers (5).

La experiencia adquirida en las Secciones de Físico-Química y Microscopía del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento con este tipo de problemas, ha permitido comprobar que la metodología desarrollada en este trabajo conduce a resultados aceptables, al menos desde el punto de vista tecnológico, y, para lograrlo, ha sido preciso conjuntar una serie de ensayos descritos por otros autores, objetivamente seleccionados y ordenados, así como analizar las distintas determinaciones para su puesta a punto.

El procedimiento a seguir pretende dar las directrices de trabajo para esclarecer este problema, sin que esto pueda considerarse como una sistemática definitiva para resol-

verlo, puesto que, en ciertos casos, se precisará del auxilio de otras técnicas, como rayos X, espectroscopía de rayos infrarrojos, análisis térmico diferencial, etc.; no obstante, cada uno de los ensayos que integran este procedimiento, en cuanto a realización se refiere, están avalados por una práctica continuada llevada a cabo en este Instituto.

Metodología operativa

La finalidad del procedimiento es determinar la composición original, volumétrica y ponderal, de los tres componentes principales de un hormigón endurecido: cemento, árido y agua.

El contenido de cemento en el hormigón se calcula mediante la expresión:

$$D = 31,575 \cdot \frac{100 - 0,99 (p - a) - A}{1 + 0,60 m},$$

en la que:

D = kg de cemento por m^3 de hormigón;

p = porosidad del hormigón, expresada en tanto por ciento en volumen.

a = humedad absorbida por la cantidad de áridos presentes en el hormigón, expresada en tanto por ciento en volumen;

A = cantidad de áridos presentes en el hormigón, expresada en tanto por ciento en volumen, y

m = factor de madurez del hormigón.

Esta expresión, basada en la deducida por Powers (5), y Axon (3), ha sido puesta por los autores en función de parámetros que se pueden determinar mediante ensayos físico-químicos y microscopía, y responden a una terminología usual.

Por consiguiente, cuando se realizan ensayos con hormigones endurecidos, se necesita efectuar un conjunto de operaciones, cuyo orden lógico es el siguiente:

- 1.º Toma de muestra.
- 2.º Disgregación de la muestra.
- 3.º Lavado de los áridos.
- 4.º Determinación de la densidad de los áridos.
- 5.º Determinación de la humedad absorbida por los áridos.
- 6.º Análisis químico de la pasta cementante.
- 7.º Determinación de la porosidad del hormigón.
- 8.º Recuento mediante el microscopio.

Toma de muestra

La elección de la muestra de hormigón tiene una gran importancia, ya que debe ser representativa del conjunto total. Las porciones seleccionadas han de reunir todas las ca-

racterísticas del hormigón a estudiar, por ejemplo, la textura de la muestra deberá corresponder a la de todo el material.

Las dimensiones de las probetas usadas para los ensayos están relacionadas con el tamaño máximo del árido, y se establece, como criterio general, que para el caso de los áridos de tamaño normal —inferior a 40 mm—, debe tomarse dos probetas cúbicas no menores de 10 cm de arista (6).

Una de las probetas se cortará, mediante un disco de diamante, en ocho porciones de $5 \times 5 \times 5$ cm aproximadamente. Esta operación se realiza con el fin de facilitar su posterior introducción en una mufla y abreviar el proceso de secado.

El fraccionamiento de algunos áridos, debido a esta operación, no afecta en absoluto a los resultados.

La otra probeta se cortará de manera que se obtenga una laja de $10 \times 10 \times 2,5$ cm aproximadamente, que se reservará para posterior pulido y observación microscópica. La parte restante se seccionará de manera que se obtengan otras dos porciones de $5 \times 5 \times 10$ cm aproximadamente, que ulteriormente servirán para determinar la porosidad del hormigón.

Disgregación de la muestra

La probeta, seccionada en ocho porciones de $5 \times 5 \times 5$ cm, como se indicó anteriormente, se introduce en una mufla a temperatura ambiente y se eleva paulatinamente hasta alcanzar 400°C , operación que debe durar, aproximadamente, unas tres horas, a fin de evitar un desprendimiento violento de gases, que pueden deteriorar la mufla. Se extrae la muestra y se deja enfriar en un desecador hasta temperatura ambiente.

Si después de este tratamiento, se logra desmenuzarla manualmente, se podrá proseguir la operación de disgregación; en caso contrario, se volverá a repetir el tratamiento térmico, llevando la temperatura hasta 600°C , desde la temperatura ambiente. Este último tratamiento puede repetirse tantas veces como sea necesario, para lograr un fácil desmenuzamiento. Para facilitar la operación conviene mantener la probeta a 600°C durante una hora.

La separación de los componentes del hormigón deberá efectuarse por frotamiento del material entre las yemas de los dedos, si bien puede ser necesario, para lograr su fractura, golpearla muy levemente dentro de un mortero de acero.

A continuación se procede a tamizar la muestra disgregada, obteniendo las fracciones siguientes:

- superior a 5 mm;
- entre 5 y 2 mm;
- entre 2 y 0,5 mm;
- entre 500 y 100 micras;
- entre 100 y 61 micras;
- entre 61 y 53 micras, e
- inferior a 53 micras.

Esta primera separación es necesaria para facilitar el estudio independiente de los áridos y el conglomerante.

Lavado de los áridos

Con una pequeña porción de cada una de las cuatro primeras fracciones, obtenidas en la operación anterior, se realiza un ensayo cualitativo, mediante la adición de ácido clorhídrico, para determinar la naturaleza silíceo o caliza de los áridos.

En el caso que el árido sea *totalmente silíceo*, las cuatro primeras fracciones se reúnen en una cápsula de porcelana de tamaño apropiado, y se tratan con una disolución de ácido clorhídrico al 10 por 100 en cantidad suficiente para cubrir las por completo y que en ningún momento, durante la operación, queden al descubierto. Se cubre la cápsula con un vidrio de reloj y se dispone sobre un baño de vapor de agua, durante 30 minutos; transcurrido este tiempo, se decanta el líquido, con el suficiente cuidado para no perder árido, seguido de una serie de lavados y decantaciones con agua hasta eliminar la reacción ácida.

La cápsula con los áridos se dispone en una estufa a la temperatura de 105°C, hasta conseguir peso constante.

Si los áridos son *calizos*, o *parcialmente calizos*, las cuatro primeras fracciones se reúnen en una cápsula de porcelana de tamaño apropiado, y se tratan con una disolución de citrato de dimetilamina (192,6 g de ácido cítrico cristalizado y 891 ml de dimetilamina acuosa al 33 por 100, completando hasta 3 litros con agua destilada), en cantidad suficiente para cubrirlos por completo y que en ningún momento, durante la operación, queden al descubierto. Este tratamiento debe mantenerse un tiempo aproximado de 30 minutos. Este tratamiento disuelve el cemento no hidratado y no actúa sobre la porción hidratada.

Transcurrido este tiempo, se decanta el líquido, con el suficiente cuidado para no perder árido, seguido de una serie de lavados y decantaciones con agua hasta eliminar la reacción básica.

Con el fin de eliminar posibles residuos de pasta hidratada adherida a los áridos, se les tratará, una sola vez, con una disolución de ácido clorhídrico (1 : 99), en frío, frotando el material con una mano de mortero recubierta de goma, e inmediatamente se decantará y someterá a una serie de lavados y decantaciones con agua hasta eliminar la reacción ácida.

La cápsula con los áridos se dispone en una estufa a la temperatura de 105°C, hasta conseguir peso constante.

Determinación de la densidad de los áridos

Los áridos, previamente desecados, como se ha indicado en la operación anterior, se separan, mediante un tamizado, en las dos fracciones siguientes:

- superior a 5 mm (árido grueso),
- inferior a 5 mm (árido fino),

y se determina el porcentaje ponderal de ambas fracciones.

Esta separación permite determinar, independientemente, la densidad del árido fino y grueso.

Las densidades se determinan, en partes alícuotas de cada fracción, mediante pesada en una balanza de laboratorio, con una precisión de 0,01 g; y medida de los volúmenes en un picnómetro. Los autores recomiendan el empleo del Picnómetro Beckman modelo 930, por su rapidez y reproducibilidad de resultados.

La relación entre el peso, expresado en gramos, y el correspondiente volumen, expresado en cm³, indica la densidad de cada fracción.

La densidad de los áridos se calculará mediante la siguiente expresión:

$$d_t = \frac{a_g}{100} \cdot d_g + \frac{a_r}{100} \cdot d_r,$$

donde:

d_t = densidad de los áridos (g/cm³);

a_g = tanto por ciento, en peso, de la fracción de árido grueso;

d_g = densidad del árido grueso (g/cm³);

a_r = tanto por ciento, en peso, de la fracción de árido fino, y

d_r = densidad del árido fino (g/cm³).

Determinación de la humedad absorbida por los áridos

La humedad absorbida se determina en partes alícuotas de cada fracción.

El material se dispone en un pesasustancias, previamente tarado, y se pesa.

Los pesasustancias, sin cubrir, se introducen en una campana de vacío junto con un recipiente que contenga una disolución acuosa de ácido sulfúrico (1 : 1) en peso. Se practica el vacío, mediante una trompa de agua, y en estas condiciones se mantienen durante 24 horas.

Transcurridas éstas, se extraen los pesasustancias, se cubren con sus correspondientes tapas, y se pesan inmediatamente.

La relación entre la ganancia de peso y el peso original de la muestra, expresada en porcentaje, indica la humedad absorbida por los áridos.

La humedad absorbida por los áridos, se calculará mediante la siguiente expresión:

$$a_p = a_g \cdot \frac{P_2 - P_1}{P_1 - P} + a_r \cdot \frac{P'_2 - P'_1}{P'_1 - P'},$$

en la cuál:

a_p = humedad absorbida por los áridos, expresada en tanto por ciento ponderal;

a_g = tanto por ciento, en peso, de la fracción de árido grueso;

P_2 = peso de la muestra de árido grueso y del pesasustancias, después del tratamiento (gramos);

P_1 = peso de la muestra de árido grueso y del pesasustancias, antes del tratamiento (gramos);

P = tara del pesasustancias, que contiene el árido grueso (gramos);

a_f = tanto por ciento, en peso, de la fracción de árido fino;

P'_2 = peso de la muestra de árido fino y del pesasustancias, después del tratamiento (gramos).

P'_1 = peso de la muestra de árido fino y del pesasustancias, antes del tratamiento (gramos), y

P' = tara del pesasustancias, que contiene el árido fino (gramos).

La humedad absorbida, expresada en tanto por ciento en volumen, se calcula mediante la expresión:

$$a_v = a_p \cdot d_t,$$

siendo

a_v = humedad absorbida (% en volumen);

a_p = humedad absorbida (% en peso), y

d_t = densidad de los áridos (g/cm^3).

Análisis químico de la pasta cementante

Esta determinación se realiza en la fracción inferior a 53 micras con objeto de conocer la composición del conglomerante empleado, sobre la base de que dicha fracción queda en su mayor parte constituida por la pasta cementante, si se ha procedido con el suficiente cuidado al disgregar el hormigón.

El análisis químico debe expresarse en función de los componentes siguientes: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , Perdida al Fuego y Residuo insoluble.

Posteriormente, el análisis se expresa, únicamente, en función del porcentaje de los componentes anhidros siguientes: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , y SO_3 .

El análisis deberá asignarse al tipo de cemento a que corresponda (portland, siderúrgico, puzolánico, etc.).

El análisis químico puede realizarse mediante cualquiera de los métodos tradicionales para cemento portland.

Determinación de la porosidad del hormigón

Una de las porciones de hormigón de $5 \times 5 \times 10$ cm, reservadas para esta determinación, se deseca en una estufa a 105°C hasta peso constante, y se anota dicho valor, después de haberla enfriado en un desecador hasta temperatura ambiente.

Se sumerge en un vaso con suficiente cantidad de agua, para que durante esta parte de la determinación no quede, en ningún momento, al descubierto.

El vaso con la probeta se dispone en una campana de vacío, conectada a una trompa de agua. El vacío se mantiene durante 24 horas.

Transcurrido el tiempo indicado, se extrae la probeta y se seca el agua superficial, utilizando un paño poco absorbente, por ejemplo, una tela de hilo e inmediatamente se pesa. Tan pronto como se realiza esta pesada, se vuelve a pesar sumergida en agua.

La porosidad del hormigón se calcula mediante la expresión siguiente:

$$p = 100 \cdot \frac{P_2 - P_1}{P_2 - P_3},$$

en la que:

p = porosidad del hormigón (%);

P_2 = peso de la probeta saturada (gramos);

P_1 = peso de la probeta seca (gramos), y

P_3 = peso de la probeta saturada y sumergida en agua (gramos).

Con los valores anteriores es posible calcular las densidades aparente y real del hormigón, mediante las expresiones:

$$\text{Densidad aparente} = \frac{P_1}{P_2 - P_3} ; \text{ Densidad real} = \frac{P_1}{P_1 - P_3}.$$

Recuento mediante el microscopio

Una de las caras mayores de la laja de hormigón, de $10 \times 10 \times 2,5$ cm, reservada para esta determinación, deberá someterse, antes de proceder a su observación microscópica, a un desbaste previo y a un posterior pulido.

La operación de desbaste se realiza disponiendo sobre un vidrio plano, de dimensiones adecuadas, polvo de carburo de silicio o similar de un grado de finura de 240 mallas/cm², y se agrega agua destilada para formar una suspensión que permita el deslizamiento suave de la probeta.

El desbaste de la probeta se prosigue hasta lograr una superficie plana. Y se somete a un lavado cuidadoso hasta eliminar totalmente los restos de abrasivo.

El pulido se efectúa de modo análogo al desbaste, utilizando polvo de carburo de silicio o similar de una finura de 600 mallas/cm².

La operación se concluye con un secado de la probeta en el medio ambiente, que se puede acelerar mediante un chorro de aire.

El recuento microscópico se realiza con el Ocular Integrador I de la casa Zeiss y 50 aumentos. La técnica que se emplea es la de luz reflejada, preferible el sistema Ultropak, aunque puede realizarse con una sencilla lupa binocular.

En el recuento se consideran como componentes del hormigón el árido, la pasta y los huecos, debiéndose recorrer cinco líneas paralelas a una de las aristas de la cara e igualmente repartidas sobre la sección observada. Sobre cada línea se recuentan 1000 puntos y, por consiguiente, la estimación de los componentes en toda la superficie se hace sobre un total de 5000 puntos.

El resultado se expresa en tanto por ciento, que se homologa al volumen de cada componente en la probeta; por lo tanto:

$$\begin{array}{rcl} & & \% \\ \text{Aridos} & = & \frac{A}{100} \\ \text{Pasta} & = & \frac{P}{100} \\ \text{Huecos} & = & \frac{H}{100} \end{array}$$

Cálculo de la composición

Para poder aplicar la expresión

$$D = 31,575 \cdot \frac{100 - 0,99 (p - a) - A}{1 + 0,60 m}$$

anteriormente expuesta en la metodología operativa, únicamente falta calcular los parámetros a y m .

El primero, definido como la humedad absorbida por los *áridos presentes* en el hormigón estudiado, y que no debe confundirse con la humedad absorbida por los áridos (a_v), se calcula:

$$a = a_v \cdot \frac{A}{100}$$

El parámetro m , denominado "factor de madurez", representa la fracción de cemento que se ha hidratado, y que es función de la edad del hormigón y de las condiciones de curado (7).

Como valor de m se adopta el que corresponda, según la tabla siguiente:

Edad del hormigón	I	II	III	IV
7 días	0,54	0,50	0,50	0,50
14 días	0,63	0,58	0,58	0,58
28 días	0,71	0,67	0,63	0,63
2 meses	0,79	0,75	0,67	0,67
3 meses	0,83	0,79	0,71	0,71
6 meses	0,92	0,83	0,75	0,71
1 año	0,96	0,88	0,79	0,71
2 años	1,00	0,92	0,83	0,71
3 años	1,00	0,94	0,88	0,71
4 años	1,00	0,96	0,90	0,71
5 años	1,00	0,98	0,92	0,71
6 años	1,00	1,00	0,94	0,71
7 años	1,00	1,00	0,96	0,71
8 años	1,00	1,00	0,98	0,71
9 años	1,00	1,00	0,99	0,71
10 años	1,00	1,00	1,00	0,71

Columna I: Hormigón curado en humedad continua en laboratorio.

Columna II: Hormigón de estructuras en contacto con la humedad del suelo, tales como: pavimentos y muros de contención.

Columna III: Hormigones secos y eventualmente humedecidos por la acción de lluvias, tales como: puentes, barandillas, estribos de puentes, etc.

Columna IV: Hormigones secos que no sufren acción de lluvias, tales como: columnas, vigas, forjados de edificios.

Cuando se desconoce la edad del hormigón puede adoptarse para m el valor de 0,81 sin cometer un apreciable error. Este valor corresponde a un curado de 1 a 2 años en las con-

diciones III, de 3 a 6 meses en las condiciones II, o de 2 a 7 meses en las condiciones I. Es, pues, razonable, salvo para las condiciones IV en las que deberán sustituirse por 0,71.

La cantidad de cemento anhidro, expresado en porcentaje volumétrico, se calcula mediante la expresión:

$$C_a = \frac{100 - 0,99 (p - 1) - A}{1 + 0,60 m},$$

en la que los parámetros tienen el mismo significado que en la expresión anterior.

La dosificación del hormigón, en porcentaje volumétrico, se expresa:

$$\begin{array}{rcl} \text{Arido, \% en volumen} & = & A \\ \text{Cemento, \% en volumen} & = & C_a \\ \text{Agua capilar, \% en volumen} & = & P - C_a \\ \text{Agua evaporable, " " } & = & H \\ & & \hline & & 100 \%. \end{array}$$

La dosificación del hormigón, expresada en tanto por ciento en peso de sus materiales originales, viene dada por las expresiones:

$$\text{Aridos \%} = \frac{A \cdot d_t}{A \cdot d_t + 3,1 C_a + (P - C_a + H)} \cdot 100$$

$$\text{Cemento \%} = \frac{3,1 C_a}{A \cdot d_t + 3,1 C_a + (P - C_a + H)} \cdot 100$$

$$\text{Agua total \%} = \frac{P - C_a + H}{A \cdot d_t + 3,1 C_a + (P - C_a + H)} \cdot 100.$$

La relación agua/cemento se determina por la expresión:

$$\text{agua/cemento} = \frac{P - C_a + H}{3,1 C_a}.$$

La relación árido/cemento se determina mediante la expresión:

$$\text{árido/cemento} = \frac{A \cdot d_t}{3,1 C_a}.$$

Con el fin de ilustrar este trabajo se exponen los ejemplos siguientes:

Ejemplo n.º 1

Corresponde al estudio de un hormigón, confeccionado con cemento portland, de una edad aproximada de 2 meses y curado en humedad continua.

a) Densidad de los áridos:

$$\begin{aligned}
 \text{Peso del árido grueso} &= 45,7753 \text{ g} & a_g &= 72,65 \% \\
 \text{Peso del árido fino} &= 17,2294 \text{ g} & a_f &= 27,35 \% \\
 \text{Volumen árido grueso} &= 16,92 \text{ cm}^3 \\
 \text{Volumen árido fino} &= 6,31 \text{ cm}^3 \\
 d_g &= 2,70 & d_f &= 2,73 \\
 d_t &= 2,72 \text{ g/cm}^3.
 \end{aligned}$$

b) Humedad absorbida por los áridos:

$$\begin{aligned}
 a_g &= 72,65 \% & a_f &= 27,35 \% \\
 P_2 &= 55,8091 \text{ g} & P'_2 &= 27,3982 \text{ g} \\
 P_1 &= 55,7753 \text{ g} & P'_1 &= 27,2294 \text{ g} \\
 P &= 10,0000 \text{ g} & P' &= 10,0000 \text{ g} \\
 a_p &= 0,32 \% \\
 a_v &= 0,86 \%.
 \end{aligned}$$

c) Análisis químico de la pasta cementante:

Análisis total		Análisis reducido	
	%		%
SiO ₂	17,33	21,37	
Al ₂ O ₃	4,93	6,08	
Fe ₂ O ₃	2,42	2,98	
CaO	52,25	64,43	
MgO	2,32	2,86	
SO ₃	1,85	2,28	
P. F.	11,07	—	
R. I.	7,91	—	
	100,08 %		100,00 %.

d) Porosidad del hormigón:

$$\begin{aligned}
 P_2 &= 125,52 \text{ g} \\
 P_1 &= 117,35 \text{ g} \\
 P_3 &= 70,91 \text{ g} \\
 p &= 14,96 \% \\
 \text{densidad aparente} &= 2,15 \text{ g/cm}^3 \\
 \text{densidad real} &= 2,53 \text{ g/cm}^3.
 \end{aligned}$$

e) Recuento mediante el microscopio:

				%
Aridos	=	A	=	71,1
Pasta	=	P	=	24,2
Huecos	=	H	=	4,7.

f) Composición original:

$$\begin{aligned}
 a &= 0,61 \% \\
 m &= 0,79 \text{ (ver tabla de valores)} \\
 D &= 314,5 \text{ kg/m}^3 \\
 C_a &= 10,0 \%.
 \end{aligned}$$

Dosificación en volumen		Dosificación ponderal	
	%		%
Aridos	= 71,1	Aridos	= 79,4
Cemento	= 10,0	Cemento	= 12,8
Agua capilar	= 14,2	Agua total	= 7,8
Agua evaporable	= 4,7.		
		Relación agua/cemento	= 0,61
		Relación árido/cemento	= 6,20.

Ejemplo n.º 2.

Corresponde al estudio de un hormigón, confeccionado con cemento portland y áridos de tamaño inferior a 5 mm, de una edad aproximada de 5 años, que proviene de una cubierta expuesta a la acción de los agentes atmosféricos.

a) Densidad de los áridos:

$$\begin{aligned}
 \text{Peso del árido} &= 37,9610 \text{ g} & a_r &= 100 \% \\
 \text{Volumen del árido} &= 22,33 \text{ cm}^3 \\
 d_r &= 1,70 \\
 d_t &= 1,70 \text{ g/cm}^3.
 \end{aligned}$$

b) Humedad absorbida por los áridos:

$$\begin{aligned}
 a_r &= 100 \% \\
 P'_2 &= 57,9249 \text{ g} \\
 P'_1 &= 57,8293 \text{ g} \\
 P' &= 10,0000 \text{ g} \\
 a_p &= 0,20 \% \\
 a_v &= 0,34 \%.
 \end{aligned}$$

c) Análisis químico de la pasta cementante:

Análisis total		Análisis reducido	
	%		%
SiO ₂	17,78		22,04
Al ₂ O ₃	4,74		5,87
Fe ₂ O ₃	2,50		3,10
CaO	52,53		65,10
MgO	1,45		1,80
SO ₃	1,67		2,09
P. F.	14,20		—
R. I.	5,10		—
	<u>99,97 %</u>		<u>100,00 %</u> .

d) Porosidad del hormigón:

$$P_2 = 72,4862 \text{ g}$$

$$P_1 = 69,3243 \text{ g}$$

$$P_3 = 43,2370 \text{ g}$$

$$p = 10,81 \%$$

$$\text{densidad aparente} = 2,37 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{densidad real} = 2,66 \text{ g/cm}^3.$$

e) Recuento mediante el microscopio:

					%
Aridos	=	A	=		71,23
Pasta	=	P	=		15,57
Huecos	=	H	=		13,20.

f) Composición original:

$$a = 0,24$$

$$m = 0,92 \text{ (ver tabla valores columna III)}$$

$$D = 373 \text{ kg/m}^3$$

$$C_a = 11,81 \%$$

Dosificación en volumen		Dosificación ponderal	
	%		%
Aridos	= 71,23	Aridos	= 69,1
Cemento	= 11,81	Cemento	= 21,2
Agua capilar	= 3,75	Agua total	= 9,7.
Agua evaporable	= 13,20.		
		Relación agua/cemento	= 0,46
		Relación árido/cemento	= 5,71.

BIBLIOGRAFIA

- (1) C. L. FORD: *A study of methods for the determination of the portland cement content of hardened concrete*. A.S.T.M. Bulletin 181 (1952).
- (2) LABORATORIO CENTRAL DE MATERIALES: *Determinación de la dosificación de hormigones y morteros fraguados, fabricados con cemento*. Norma NELC 5.01-a.
- (3) E. O. AXON: *A method of estimating the original mix composition of hardened concrete using physical test*. A.S.T.M. Proceedings. Vol. 62 (1962).
- (4) M. POLIVKA, J. W. KELLY y C. H. BEST: *A physical method for determining the composition of hardened concrete*. A.S.T.M. STP núm. 205 (1956).
- (5) T. C. POWERS y T. L. BROWNYARD: *Studies of the physical properties of hardened portland cement paste*. Proceeding of A.C.I. Vol. 43 (1947).
- (6) LEA y DESCH: *Química del Cemento y del Hormigón*. (1960).
- (7) T.C. POWERS: *Physical properties of cement paste*. Proceedings of the Fourth International Symposium Washington 1960. Monograph 43. Vol. II. National Bureau of Standards.