

- 49 -

LA COMPOSICION DE LOS HORMIGONES

R. Vallette

De "REVUE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION" 71, marzo 1949

El problema de la composición de hormigones mejores es uno de los que más preocupan a los usuarios y técnicos. En los últimos tiempos han existido controversias y encuestas cuyos resultados no han sido todo lo halagüeños que era de esperar. El autor trata de poner a punto la cuestión, comenzando con un resumen histórico breve sobre la misma.

Ya en 1892 Feret puso de manifiesto la influencia de la granulometría de los agregados sobre la calidad de los hormigones, exponiendo sus célebres leyes:

1ª. - La resistencia es únicamente función del agua de amasado (E), de los huecos (V) y de la dosificación del cemento (C), en forma de un factor: $\frac{C}{E + V}$, cualesquiera que sean los elementos que entran en la composición del hormigón.

2ª. - La suma E + V está condicionada por la granulometría de los agregados (y la dosificación) y fija, además, la compacidad, porosidad y permeabilidad del hormigón. Para obtener la mejor relación $\frac{C}{E + V}$ hay que emplear una granulometría discontinua con composiciones de mortero al mínimo.

Según los estudios de Abrams, se caracteriza la granulometría por el módulo de finura (suma de residuos sobre una serie de 9 tamices) que se encuentra relacionado, linealmente, con el agua del amasado.

Thomson y Fuller, en los Estados Unidos, para simplificar la cuestión, definen una ley fija de composición

$$P = \sqrt{\frac{d}{D}}$$

(D = granos más gruesos; p = proporción de granos que pasan por el tamiz d). Esta ley, desprovista de fundamento experimental, se extendió por Europa en la forma dada por Bolomey:

$$P = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}}$$

y después fué mejorada por Faury (curva de referencia).

Finalmente, Leclerc y Sablón, mediante un estudio experimental sistemático basado en las leyes de Feret, establecieron las granulometrías discontinuas con dosificaciones pobres en arena.

Los estudios realizados por el autor conducen, por una parte a una tendencia al empleo de granulometrías discontinuas y, por otra, a la dosificación con un mínimo de arena para todas las granulometrías. Establece las escalas de granulometrías discontinuas y los métodos de determinación de las composiciones.

Hormigones óptimos. - Granulometría ideal. - Hormigones con contenido en arena mínimo.

El análisis de conjunto de los estudios realizados hasta la fecha conduce (según el autor) a la conclusión de que las unibases científicas sobre las que descansa la composición de los hormigones, son las leyes de Feret, antes aludidas.

La ley de la resistencia:

$$R = K \left(\frac{C}{C + 3,1 (E + V)} \right)^2$$

indica que es preciso dosificar hormigones sin huecos ($V = 0$) con un mínimo de agua, es decir, que debe existir una granulometría de granos gruesos que se penetren (adapten) bien y que el contenido de finos sea mínimo puesto que el agua "de mojado" es tanto mayor cuanto más finos son los granos. (Agua necesaria para el cemento $0,23 C$, para granos 60/40; 1 % del volumen aparente; 4 % para la arena 10/5, y 30 % para la arena 0,4/0,2).

Para conseguir compacidad, Feret ha mostrado, en el caso de un determinado mortero, que va mejor una composición discontinua con granos medios. Si designamos por \underline{D} y \underline{d} los tamaños extremos de partícula para las clases de árido 1, 2, 3 y 4, se encuentran, como relaciones óptimas:

$$\frac{D_1}{d_1} = 1,5; \quad \frac{D_2}{d_2} = 1,5 \text{ a } 2; \quad \frac{D_3}{d_3} = \frac{D_4}{d_4} = 2$$

Y para las relaciones entre dos clases diferentes:

$$\frac{d_1}{D_2} = 4 \text{ a } 5; \quad \frac{d_2}{D_3} = \frac{d_3}{D_4} = 3 \text{ a } 4.$$

Los granos D deben tomarse del mayor tamaño posible compatible con la naturaleza de la obra a ejecutar. En una tabla del original se dan las cantidades de agua necesarias, en litros por m^3 de volumen aparente, en función de las escalas granulométricas para hormigones de guijarros, de gravilla, morteros y enlucidos. Las relaciones d_n/D_n dadas anteriormente aseguran el relleno de los huecos correspondientes a la clase n . Si estas relaciones se hacen menores se pierde compacidad y si se aumentan se reduce el agua de mojado sin ganancia sensible en la compacidad.

Las granulometrías ideales a que hemos hecho referencia no se cumplen, en general, en las obras. El hormigón deberá modificarse partiendo de gravas y arenas asequibles. Se puede tender, en estos casos, a la granulometría ideal diferenciando netamente los áridos ($D_1/D_2 = 1/7$) cosa que se puede hacer ordinariamente en casi todas las canteras de donde se extraiga el agregado.

La ley de Feret, del mínimo de agua, lleva a investigar sobre el hormigón compacto, trabajable, con un mínimo de arena. Este hormigón será el más resistente, menos poroso y permeable.

Si se disminuye la cantidad de arena por debajo de ese mínimo, se pierde docilidad; si se aumenta, se reduce la relación C/E y por tanto la resistencia. Para determinar este óptimo de arena se puede proceder por tanteos, pero es mucho más sencillo y seguro hacer una determinación sistemática de la composición operando en moldes y siguiendo las líneas que se indican:

Se hace primeramente el mortero compacto trabajable - menos dosificado y luego se le incorpora el máximo de grava que permita conservar la compacidad y trabajabilidad. Se obtiene así el hormigón compacto menos dosificado. Se determina la composición para la dosificación prevista calculando el volumen de arena que es preciso retirar, correspondiente al volumen de pasta a añadir. Esta determinación puede verificarse siguiendo las líneas siguientes:

1º. - Mortero trabajable con dosificación al mínimo.

Se miden los huecos de la arena seca (volumen aparente s , densidad aparente y absoluta).

Se humedece la arena (hasta que los granos de la misma dejen traza de humedad sobre la mano). Se mide la cantidad de agua absorbida y se calculan los huecos V en estado húmedo y se incorpora la cantidad de cemento correspondiente a estos huecos ($V = 0,56 C$), con su agua de humectación ($0,23 C$).

Se lleva al molde. Si no hay exhudado es señal de que

la arena no estaba suficientemente mojada para conseguir el mortero compacto trabajable; se completa hasta conseguir la exhudación y se determina el volumen de la arena mojada bs y del agua es.

2º. - Hormigón con dosificación al mínimo. (Puesta en obra) Se incorpora el máximo de grava para que dé un moldeo conveniente. Se deduce la composición por metro cúbico:

$$g, s', c', E'$$

3º. - Se deduce la composición correspondiente a la dosificación $C < C'$, calculando los nuevos volúmenes de arena y agua por las fórmulas:

$$s = (s' + kc') - kc; \quad E = (E' - k'c') + k'c.$$

con:

$$k = 0,56/6 \quad \text{y} \quad k' = 0,23 - ke$$

merced a los coeficientes de compacidad b y de humectación obtenidos en 1º)

4º. - Para $C < C'$. - En principio esto concierne a las granulometrías discontinuas con tres componentes g, s y t correspondientes a los tamaños de grava que se indican en el original.

En la obra, el mortero con dosificación mínima se determina directamente por tanteos y se opera por diferencia de

volúmenes mortero-pasta pura, para obtener el valor de b (compacidad). Todas estas operaciones son sencillas; el moldeo se hace fácilmente puesto que la mezcla es buena y el exudado se controla muy bien. Una adición mínima de agua asegura la trabajabilidad.

He aquí un ejemplo de determinación:

Hormigón con mínimo de arena para viga de puente

Materiales	Peso específico	Densidad aparente	Compacidad D/P	Agua de humectación	Compacidad en húmedo <u>b</u>	Huecos en húmedo	k	k'
Grava 30/16	2,717	1,432	0,53	0,026				
Arena 6,3/0,4	2,55	1,685	0,66	0,140	0,80	0,20	0,70	0,13
(Por relación al volumen aparente)								

a) Mortero de dosificación mínima. - Para 2 litros de arena se necesitan 800 gr. de cemento, 0,280 litros de agua para la arena y 0,185 litros de agua para el cemento.

b) Hormigón vibrado con dosificación mínima. - El resultado completo, sin perder moldeabilidad, se obtiene con una adición de 6,5 kg. de gravilla (4,5 l.) y un suplemento de - 0,12 l. de agua, o sea, en total 0,585 litros. La composición del hormigón por m³ es:

g	s'	c'	E'
1.000	445	179 kg.	131

Para la dosificación C, la arena y el agua se modifican según:

$$s = 570 - 0,7 C; \quad E = 108 - 0,13 C$$

o sea, para una dosificación de 400 kg.:

g	s	C	E	C/E
1.000	290	400	160	2,5

Resistencia: Se mide sobre probetas cúbicas fabricadas con el hormigón. La resistencia prevista puede determinarse empíricamente partiendo de la resistencia R_m del mortero normal, por la fórmula de Feret-Bolomey:

$$R = 0,55 R_m (C/E - 0,50)$$

El coeficiente $0,55 R_m = K$ está de acuerdo con las observaciones experimentales del autor. Cuando $C/E = 2,3$, R_m vale R .

A continuación se hace un examen crítico de las cuestiones anteriores, estudiando el comportamiento de las granulometrías continuas y discontinuas cuando se trata de obtener un hormigón trabajable con una buena compacidad. Con una granulometría continua (6 componentes) se pueden obtener compacidades de 0,70, pero es de destacar que al valor 0,88 se puede -

llegar con una granulometría discontinua de tres componentes. La trabajabilidad no tiene carácter fijo. Lo más importante es asegurarse que todos los granos de áridos están rodados de cemento; esto asegura su movilidad con la menor cantidad posible de agua. Una variación en la granulometría puede hacer variar la cantidad de agua de amasado requerida, en centenares de litros, cuestión ésta que no se tiene en cuenta muy frecuentemente. La retracción y heladicidad también dependen de la granulometría; un hormigón muy compacto es el menos susceptible a la destrucción por las heladas.

En los hormigones aireados, la oclusión de aire reduce la relación $C/E+V$. En los hormigones aireados poco dosificados, la heladicidad es notable debido a que los huecos se sustituyen por microporos sin solución de continuidad, que no son permeables al agua.

El examen de las principales investigaciones realizadas sobre hormigones conduce a la conclusión de que, entre los principios tomados como base (reglas de Feret, compacidad de las mezclas secas o de las amasadas, continuidad de las granulometrías, etc.) solo las leyes de Feret, basadas en la relación $C/V+E$ refleja realmente la composición de los hormigones, teniendo en cuenta el efecto de pared para los moldes o encofrados.

Los estudios realizados por Vallette y sus colaboradores han permitido definir, en función de estas leyes, las granulometrías y composiciones para todos los materiales, dosificaciones, tamaños, empleos del hormigón, etc. Las granulometrías ideales deben ser discontinuas de acuerdo con una escala fijada de límites bastante estrechos. Cualesquiera que sean las granulometrías, las masas deben ser compactas, trabajables y con un contenido en arena mínimo.
