

## EL CEMENTO, ese gran desconocido

### Influencia del cemento en la uniformidad de la resistencia del hormigón

**EDUARDO HERRERO NUÑEZ**  
Licenciado en Ciencias

El criterio de resistencia ha tomado carta de naturaleza en las actuales instrucciones para la especificación del hormigón y como índice de aceptación o rechazo.

En la Instrucción española para el proyecto y ejecución de obras de hormigón en masa y armado, se indica que el hormigón deberá tener una resistencia característica igual o superior a la fijada en el proyecto; definiéndose, como resistencia característica, al valor tal que solamente existe una probabilidad del 5 % de obtener resultados de resistencia inferiores a él. Esto puede expresarse matemáticamente mediante la fórmula:

$$R_c = R_m \cdot (1 - 1,64 \cdot V)$$

donde:

$R_c$  = Resistencia característica del hormigón.

$R_m$  = Resistencia media, o sea la media aritmética de los resultados obtenidos en las roturas de probetas del hormigón.

$V$  = Coeficiente de variación unitario, obtenido al dividir las dispersiones cuadrática media de los resultados de roturas por su media aritmética.

Esta fórmula es aplicable cuando el número de resultados es igual o mayor de 30, para un número inferior se utilizan estimadores deducidos del cálculo estadístico.

Cuanto mayor sea el coeficiente de variación (es decir, la dispersión), mayor será la resistencia media necesaria para cumplir la misma resistencia característica.

El concepto de resistencia característica está basado en obtener un nivel de seguridad, llevando implícito una fuerte penalización para la dispersión del hormigón. Esto conduce a que la uniformidad en la resistencia del hormigón sea una condición básica para obtener, con el menor costo, el cumplimiento de las especificaciones.

Ahora bien, es obvio que, a igualdad de todas las demás circunstancias, la resistencia del hormigón es función de la resistencia del cemento y, es conocido, que hay diferencias entre las resistencias del mismo tipo de cemento producido por diferentes fábricas e incluso variaciones en el tiempo, en el cemento de una misma fábrica.

Esta falta de uniformidad en el cemento portland es una causa importante para no con-

seguir resistencias uniformes en el hormigón. Sin embargo, en muchos casos, no es tenida en cuenta en todo su significado por los técnicos encargados del proyecto y control de obras de hormigón.

### ALCANCE DE LA VARIACION DEL CEMENTO

Una estimación del alcance de la variación de la resistencia del cemento en la del hormigón, se puede obtener mediante el uso de la fórmula de Bolomey que permite prever la resistencia a compresión de hormigones y morteros.

Esta fórmula, muy sencilla, es para hormigones considerados totalmente compactos; es decir, sin aire ocluido:

$$R = K \cdot \left( \frac{C}{A} - 0,50 \right);$$

donde  $C$  y  $A$  son los pesos respectivos de cemento y agua,  $R$  la resistencia a compresión y  $K$  un coeficiente específico que depende de la resistencia del cemento, de la edad del hormigón y de las condiciones de puesta en obra y conservación.

Para ver la influencia del cemento, vamos a considerar a éste como la única variable, permaneciendo idénticas todas las demás circunstancias.

Para este caso, podemos poner el coeficiente  $K$  como dependiente únicamente de la resistencia del cemento.

Entonces podemos deducir el valor de este coeficiente  $K$  en función de la resistencia del mortero normalizado de cemento.

En efecto, aplicando la fórmula de Bolomey al mortero normalizado de cemento, indicado en el Pliego Español para la Recepción de Conglomerantes Hidráulicos PCC H-64, y cuyas características son:

$$\text{— relación } \frac{\text{cemento}}{\text{arena}} = 1/3,$$

$$\text{— relación } \frac{\text{cemento}}{\text{agua}} = 2,$$

tenemos:

$$r = K \cdot (2 - 0,5) = K \cdot 1,5; \text{ en donde } r \text{ es la resistencia del mortero normalizado.}$$

Sustituyendo, nos queda:

$$R = \frac{r}{1,5} \cdot \left( \frac{C}{A} - 0,5 \right);$$

que nos relaciona, en las condiciones consideradas, la resistencia del hormigón con la del cemento, expresada ésta mediante la resistencia del mortero normalizado.

En la tabla siguiente tenemos la particularización de esta fórmula para las relaciones agua/cemento más usuales.

TABLA I

agua/cemento	cemento/agua	$R = \frac{r}{1,5} \cdot \left( \frac{C}{A} - 0,5 \right)$
0,40	2,5	$R = 1,33 r$
0,50	2	$R = r$
0,60	1,666	$R = 0,78 r$
0,70	1,428	$R = 0,72 r$
0,80	1,25	$R = 0,5 r$

Es decir, que nos queda, para cada relación agua/cemento, una expresión  $R = K_1 r$ .

Consideramos ahora la Norma del American Concrete Institute sobre la Evaluación de los resultados de ensayos a compresión del hormigón (ACI 214-65) respecto a la calificación del hormigón en función del coeficiente de variación obtenido. (Tabla II).

TABLA II  
Niveles de control de hormigón

TIPO DE OPERACION	COEFICIENTE DE VARIACION			
	Excelente	Bueno	Regular	Malo
Variaciones totales:				
En obra	Inferior a 10	De 10 a 15	De 15 a 20	Superior a 20
En laboratorio	Inferior a 5	De 5 a 7	De 7 a 10	Superior a 10
Variaciones dentro de cada amasada:				
En obra	Inferior a 4	De 4 a 5	De 5 a 6	Superior a 6,0
En laboratorio	Inferior a 3,0	De 3 a 4	De 4 a 5	Superior a 5

Generalmente, un porcentaje grande de los hormigones fabricados en obra tienen un coeficiente de variación total entre el 15 y el 20 %.

Según la tabla, estos coeficientes de variación en obra son correspondientes a coeficientes de variación entre 7 y 10 % cuando se hacen hormigones en laboratorio.

Sí, como hemos dicho al principio, atribuimos toda la variación al cemento, podremos ver las variaciones máximas que éste puede tener para permitir la obtención de hormigones con coeficiente de variación dentro de los límites citados.

Para ponernos en el caso más desfavorable, consideramos el límite superior para el coeficiente de variación del hormigón, tomando el correspondiente a hormigones hechos en

laboratorio, puesto que aquí las variaciones ajenas a las características de los materiales están reducidas al mínimo. Es decir, que supondremos el coeficiente de variación del 10 % para nuestras consideraciones.

Sean  $R_1 < R_2 < R_3 \dots \dots \dots < R_n$  los resultados ordenados de menor a mayor, obtenidos para la misma dosificación de hormigón y correspondientes respectivamente a cementos cuyas resistencias en mortero normalizados son  $r_1 < r_2 < r_3 \dots \dots \dots < r_n$ .

Expresando las resistencias del hormigón en función de las del mortero de cemento, tenemos:

$$\begin{array}{l} R_1 = K_1 r_1 \\ R_2 = K_1 r_2 \end{array} \quad \left| \begin{array}{c} \cdot \\ \cdot \end{array} \right. \quad \left| \begin{array}{c} \cdot \\ \cdot \end{array} \right. \quad R_n = K_1 r_n$$

Si llamamos respectivamente  $R_m$  y  $S$  a la media aritmética y desviación standard del conjunto de resultados del hormigón, tendremos que el coeficiente de variación será:

$$V = \frac{S}{R_m} \times 100;$$

quedándonos para el valor 10 %, la expresión:

$$10 = \frac{S}{R_m} \times 100 \text{ ó } S = 0,1 R_m.$$

Sean  $r_m$  y  $s$  la media aritmética y la desviación standard de los resultados del cemento. Como al multiplicar o dividir un conjunto de resultados por una constante, queda multiplicada o dividida por la misma constante la desviación standard del conjunto, podemos poner:

$$S = K_1 \cdot s \text{ ó } s = \frac{S}{K_1} = \frac{0,1}{K_1} \cdot R_m$$

Por otra parte, la distribución de resultados del mortero normalizado de cemento sigue la ley normal o de Gauss y, en esta distribución, el 99,7 % de los resultados se sitúan a menos de tres desviaciones standard a uno y otro lado de la media. O sea, que casi todos los resultados estarán comprendidos entre  $r_m - 3s$  y  $r_m + 3s$ . Podemos, por tanto, considerar a  $r_m - 3s$  como el valor mínimo para el mortero de cemento y a  $r_m + 3s$  el máximo.

Tengamos ahora en cuenta la tabla del método de dosificación de hormigones del Road Research Laboratory (1), que nos da la resistencia media a compresión más probable del hormigón en probetas cúbicas de 15 × 15 × 15 cm en función de la relación agua/cemento.

TABLA III

Relación agua/cemento	Resistencia media más probable a compresión a 28 días (kp/cm <sup>2</sup> )	
	Cemento portland ordinario	Cemento portland de endurecimiento rápido
0,40	471,1	541,4
0,50	372,6	435,9
0,60	281,2	244,5
0,70	217,9	267,2
0,80	175,8	210,9

(1) F. Arredondo — Manual de Dosificaciones. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento.

Aplicando los valores de esta tabla y los encontrados para  $K_1$  en la Tabla I, nos quedan los siguientes valores de  $s$ :

TABLA IV

Relación agua/cemento	Valores de $s$	
	Cemento portland ordinario	Cemento portland de endurecimiento rápido
0,40	35	40,6
0,50	37	43,5
0,60	36	44
0,70	35	43
0,80	35	42

Como se puede observar, se obtiene un valor —prácticamente el mismo— para cada tipo de cemento. Para lo que sigue tomaremos, respectivamente, los valores 35 y 43.

En el Pliego Español para la Recepción de Conglomerantes Hidráulicos, se definen las categorías de cemento señalando las resistencias mínimas que a 28 días debe dar el mortero normalizado. Tenemos así definidos el P-250, P-350 y P-450. Considerando solo el P-350 y P-450 por ser los corrientemente utilizados y estimándolos, respectivamente, como cemento portland ordinario y cemento de endurecimiento rápido, los resultados anteriores nos permiten poner los valores mínimos y máximos que deberá tener el cemento para que su influencia, sobre la resistencia del hormigón, no produzca en éste, un coeficiente de variación superior al 10 %.

TABLA V

Categoría del cemento	Resistencia a compresión a 28 días (kp/cm <sup>2</sup> )	
	Mínimo	Máximo
P-350	350	560
P-450	450	708

Por las estimaciones que hemos hecho al deducir estos valores, podemos considerarlos como los límites máximos permisibles para que la influencia del cemento en el hormigón no lleve, por sí sola, a dispersiones que hagan verdaderamente difícil obtener hormigones cuando menos con una uniformidad regular.

## CONSIDERACIONES SOBRE EL PLIEGO DE CEMENTOS

De lo anteriormente expuesto, se deduce que la fijación única de un límite inferior en la resistencia para definir la categoría de un cemento, no es suficiente desde el momento en que al hormigón se le pide resistencia uniforme, definida mediante fórmulas diferentes de la resistencia mínima.

Son necesarias otras limitaciones para la resistencia del cemento, que permitan acotar sus variaciones a valores acordes con las especificaciones impuestas al hormigón.

En este sentido, nos muestra un ejemplo la nueva norma alemana DIN 1164 sobre cemento en la que las resistencias son limitadas de la forma indicada en la tabla VI.

TABLA VI

Clase	Resistencia a compresión (kp/cm <sup>2</sup> )			
	2 días	7 días	28 días	
	mínimo	mínimo	mínimo	máximo
250 (1)	—	100	250	450
350 L(2)	—	175	350	550
F(2)	100	—		
450 L(2)	100	—	450	650
F(2)	200	—		
550	300	—	550	—

- (1) Solamente para los cementos con débil calor de hidratación, una alta resistencia a los sulfatos o las dos cosas a la vez.
- (2) Los cementos de endurecimiento inicial más lento son designados por la letra L y los que tienen una resistencia inicial más elevada por la letra F.

De esta forma, los cementos Z-250, Z-350 y Z-450 no deben, en ningún caso, sobrepasar la resistencia mínima a 28 días en más de 200 kp/cm<sup>2</sup>. Esto garantiza la uniformidad y supone que en un entorno de  $\pm 50$  kp/cm<sup>2</sup> del valor medio estén en 90 % de los resultados.

Por tanto, creemos que esta forma de especificación para la resistencia del cemento debe ser estudiada en la nueva redacción que se haga del Pliego Español para la Recepción de Conglomerantes Hidráulicos y que, no olvidando que el cemento no es un producto químico puro que se obtiene en laboratorio, se fijen limitaciones acordes a la uniformidad en la calidad que exigen las nuevas instrucciones sobre hormigones, morteros y derivados.