

689-47

Evaluación de los resultados de los ensayos a compresión del hormigón de obra

R. C. SHARMA

Indian Concrete Journal, enero 1972, pág. 24

En estos últimos años, en la India, se está dedicando gran atención al control estadístico de la calidad durante su elaboración y valoración del producto acabado. En este artículo se trata de una forma breve de los métodos empleados para esta finalidad en la producción del hormigón.

La interpretación de los resultados de los ensayos es de por sí una técnica altamente especializada. Los ensayos y los resultados de los mismos pierden gran parte de su significado si son incorrectamente interpretados o si sus resultados son utilizados irreflexivamente en la práctica. Bien sea para estudios de investigación o para ensayos de rutina, cada resultado de un ensayo es indicativo de un aspecto específico. Por ello es de importancia capital que los resultados de los ensayos se evalúen juiciosamente y se analice exactamente su significado. Esto es particularmente cierto cuando la valoración de los ensayos de compresión resultan de los hormigones de obra.

Por ser el hormigón un material heterogéneo existe un cierto número de factores que afectan a los resultados de los ensayos, obtenidos de los testigos moldeados a pie de obra. Estos factores pueden o no estar realmente presentes en el hormigón de la estructura. Sin embargo la resistencia de los cilindros de control es generalmente la única evidencia tangible de la calidad del hormigón de una estructura, tal como lo establece el ACI Committee 214 (1). Por consiguiente los datos sobre la resistencia a la compresión son importantes para establecer un criterio, pero deben tenerse en cuenta sus limitaciones. A causa de la posible disparidad entre las resistencias de los testigos de ensayo y la capacidad para soportar las cargas una estructura, es peligroso tener excesiva confianza en datos sobre resistencias, inadecuados. También es equivocado llegar a la conclusión de que la resistencia de una estructura está en peligro cuando un simple ensayo deja de cumplir las exigencias de resistencia especificadas.

Para obtener hormigón de calidad controlada, es importante adoptar medidas para el control de la calidad en todas las etapas de:

- (I) producción, transporte, acopios y uso de los áridos, y
- (II) producción, transporte, vertido, compactación y curado de los hormigones.

La importancia de las personas cualificadas y de experiencia para realizar las requeridas operaciones en la obra no debe sobrevalorarse. Incluso cuando, independientemente del grado de control que se mantenga en la producción del hormigón y de los áridos para el hormigón, algunas de las variaciones en la calidad del material pueden producirse y deben ser aceptadas.

Además de las variaciones fortuitas, los resultados de tales ensayos están generalmente sometidos a dos principales causas de variación; a saber: variaciones en las propiedades de los constituyentes del hormigón que se está ensayando, y discrepancias en los métodos de ensayo. Por ejemplo, y como explicación, las variaciones en las propiedades del hormigón pueden ser debidas a factores, tales como:

- (I) cambios en la relación agua/cemento, como resultado de un mal control del contenido de agua total en las mezclas de hormigón;
- (II) falta de uniformidad en la granulometría de los áridos;
- (III) variaciones en las características de los áridos, cuando sea debido a que los suministros se están haciendo desde más de un punto de origen, o bien a cambios en el estrato o a interferencias geológicas;
- (IV) variaciones en las características del cemento, a causa de que el suministro se obtiene de más de una fábrica, o a cambios en el tipo de cemento, como, por ejemplo, de un cemento portland normal a un cemento puzolánico o a un cemento siderúrgico;
- (V) variaciones en la temperatura y condiciones de curado durante el amasado del cemento, confección de las probetas y en el período de endurecimiento.

Las variaciones debidas a discrepancias en los métodos de ensayo pueden ser originadas por alguna o algunas de las siguientes causas:

- (I) procedimientos de toma de muestras inadecuados;
- (II) falta de uniformidad en los métodos para confeccionar las probetas de ensayo;
- (III) cambios en las condiciones de curado;
- (IV) manipulación inadecuada de las probetas;
- (V) moldes defectuosos;
- (VI) deficiencias en las máquinas de ensayo.

Incluso, en el caso de que existiese suficiente control para reducir al mínimo las variaciones del primer tipo, el proyecto se penaliza innecesariamente cuando las variaciones debidas a las causas citadas en segundo lugar son excesivas. Los buenos métodos de ensayo reducirán estas variaciones y tendrán que establecerse procedimientos de ensayo normalizados y realizados al pie de la letra. Es responsabilidad del laboratorio realizar los ensayos con toda exactitud y juzgar que el hormigón será innecesariamente penalizado si los ensayos muestran dispersiones superiores a las que realmente existen. Es obvio que será muy poco probable que el promedio de los resultados de una serie de resistencias de un determinado hormigón resulte representativo de la verdadera resistencia de tal hormigón; más bien ello es únicamente un valor aproximado.

Amplios estudios de los resultados de los ensayos de resistencias, tanto de los hormigones en obra como en el laboratorio, demostrarán de una manera concluyente que dichos valores se hallan distribuidos densamente en un campo que tiende a seguir una distribución en curva de frecuencia Gaussiana, de acuerdo con la ley de probabilidad normal de las estadísticas. La teoría de las probabilidades proporciona, así, un elemento muy práctico para la valoración de los resultados de los ensayos de resistencias. Como consecuencia de los numerosos factores que tienen influencia sobre la resistencia del hormigón y de las variaciones que cabe esperar, los ensayos aislados no son representativos como una base para actuar y es importante que sea conocida estadísticamente la exactitud de un promedio observado. Esto es necesario para una aproximación realista que pueda fijar unas especificaciones de resistencias. Establecer un valor mínimo absoluto de resistencias no responde a la realidad, porque la resistencia mínima no tiene significación estadística, a no ser que se haga simultáneamente una indicación de que algunos de los resultados serán inferiores al mínimo. Es tal vez poco práctico especificar una resistencia mínima, puesto que la ley de probabilidad normal indica que un resultado de cada 6 ensayos será más bajo que el promedio, a causa de la desviación estándar; que 1 de cada 44 será más bajo que el promedio del doble de la desviación estándar, y que 1 de cada 741 será más bajo que el promedio del triple de la desviación estándar.

La desviación estándar es una medida de la variabilidad de los valores de las resistencias; es el radio de giro del área comprendida bajo la curva de probabilidad teórica, alrededor del centro. Numéricamente se determina de la siguiente forma:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}} ;$$

siendo:

σ = desviación estándar de un conjunto de datos.

x = a un cierto valor de un conjunto de datos.

\bar{x} = promedio de los valores.

n = número de observaciones.

Cuando el número de ensayos es superior a 30, en la anterior ecuación $n - 1$, puede transformarse en n . La desviación estándar viene dada entonces por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}}$$

Para una mayor facilidad de cálculo la ecuación puede aproximarse a:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum x^2}{n} - (\bar{x})^2} ;$$

y, lo que es lo mismo,

$$\sigma = \frac{1}{n} \cdot \sqrt{(\sum x^2) - n(\sum \bar{x})^2}$$

El valor de la desviación estándar determinado por medio de la anterior ecuación puede tomarse como una medida del grado de control y en general, para valorar la calidad de un hormigón. Según Sparkes, el grado de control está por regla general, relacionado con la variabilidad de la resistencia a compresión del hormigón, de forma aproximada, como se expresa a continuación: (2)

Grado de control	Desviación estándar (kp/cm ²)
Excelente	28
Bueno	42
Medio	56
Pobre	70
Nulo	85

La desviación estándar, expresada como un porcentaje de la resistencia media, se denomina coeficiente de variación:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100;$$

siendo:

V = coeficiente de variación.

σ = desviación estándar.

\bar{x} = resistencia media.

La función V hace posible expresar el grado de dispersión en valor porcentual mejor que en un valor absoluto. Este también puede ser utilizado como un índice del grado de control y el estándar general de calidad del hormigón. La tabla 1, según el ACI Committee 214, muestra el coeficiente de variación que puede esperarse en proyectos vigilados. Las clasificaciones de control se basan en la experiencia adquirida con un gran número de proyectos y se presentan como una guía general para evaluar el control del hormigón.

TABLE 1
Estándars de control del hormigón

Clase de operaciones	Coeficiente de variación para los diferentes estándares de control			
	excelente	bueno	medio	pobre
Variación total:				
(I) construcción en general	inferior a 10,0	10,0 a 15,0	15,0 a 20,0	sobre 20,0
(II) control de laboratorio	inferior a 5,0	5,0 a 7,0	7,0 a 10,0	sobre 10,0
Variaciones dentro de una misma mezcla:				
(I) control en obra	inferior a 4,0	4,0 a 5,0	5,0 a 6,0	sobre 6,0
(II) control de laboratorio	inferior a 3,0	3,0 a 4,0	4,0 a 5,0	sobre 5,0

Nota: Estos estándares representan los promedios para cilindros de 28 días calculados a partir de un gran número de ensayos; cabe esperar diferentes valores para otros que sean distintos de los promedios.

Las variaciones de resistencias en el hormigón dentro de una simple amasada pueden encontrarse al computar las variaciones de un grupo de testigos fabricados a partir de la misma mezcla. También es conveniente suponer que una muestra de ensayo de hormigón es uniforme y que cualquier variación entre muestras procedentes del mismo hormigón, fabricadas de una misma toma de muestras, puede ser debida a discrepancias en la fabricación, en el curado y en su ensayo. El muestreo tomado de diferentes partes de una mezcla puede implicar variaciones debidas a la ineficacia de la mezcladora. Los juegos de muestras fabricadas a partir de muestras de diferentes sitios de la amasadora pueden, por consiguiente, ser utilizadas para establecer diferencias entre eficacia de la amasadora y eficacia en los ensayos. Una sola mezcla de hormigón no proporciona suficientes datos para un análisis estadístico y, en consecuencia, se recomienda se hagan juegos de probetas cilíndricas en un mínimo de 10 con objeto de establecer valores confiables. Cuando existan juegos de probetas de 10 o más elementos, la desviación estándar dentro de una misma amasada y el coeficiente de variación pueden calcularse de la siguiente forma:

$$\sigma_1 = \frac{1}{d_2} \cdot \bar{R};$$

$$V_1 = \frac{\sigma_1}{\bar{x}} \cdot 100;$$

siendo:

σ_1 = desviación estándar dentro de un mismo ensayo.

$\frac{1}{d_2}$ = una constante que depende del número de probetas de cada grupo.

\bar{R} = categoría media de los grupos de probetas de un mismo juego.

V_1 = coeficiente de variación dentro de un mismo ensayo.

\bar{x} = resistencia media.

Nota: el valor de $1/d_2$ es de 0,8865 para un juego de dos probetas, y de 0,5907 para un juego de tres probetas.

Se saca como consecuencia que no hay motivo de alarma si, durante la construcción, unos pocos resultados de los ensayos se presentan inferiores al valor de la resistencia requerida. Con una parte seleccionada de resultados que se encuentren por debajo de un valor dado, el límite inferior será $\bar{x} - K \cdot \sigma$; en donde K deberá tener los siguientes valores, que corresponden al número de resultados inferiores a la resistencia deseada:

Valor de K	Resultados observados, inferiores a la resistencia que se desea obtener (en %)
0,5	31
1,0	16
1,5	6,68
2,0	2,50

Esta especificación para los requisitos de resistencias, por consiguiente, incluirá el nivel de probabilidad de los resultados de las resistencias que caen por debajo de la requerida. El Bureau of Reclamation de los Estados Unidos de América especifica que la resistencia del 80 % de las probetas de ensayo deberá ser superior al de la resistencia de proyecto. Por otra parte se recomienda una posibilidad de 1 sobre 6. Esto significa un valor para $K = 1$; el tener un 16 % de los resultados de los ensayos inferiores al promedio para σ es algo que cabe esperar normalmente.

La American Society for Testing and Materials (ASTM) recomienda que el promedio de todos los ensayos de resistencias sean representativos de cada clase de hormigón, así como que el promedio de cualquier serie de cinco ensayos de resistencias consecutivos representativo de cada clase de hormigón deberá ser igual o mayor que la resistencia especificada, y que no debe haber más que un resultado entre diez que tenga un valor promedio inferior al 90 % de la resistencia especificada (3). Por consiguiente no existe justificación para requerir probabilidades tan altas como 1 entre 100 o entre 50. Tal aproximación, basada en la realidad, nos conducirá finalmente a una notable economía de cemento, debido a que, en lugar de recurrir a innecesarias mezclas ricas en cemento, el proyectista puede modificar adecuadamente éstas seleccionando mezclas relativamente más pobres en el caso de estructuras en las cuales la resistencia es el criterio que se especifica para la calidad del hormigón.

REFERENCIAS

- (1) Método recomendado para evaluar los resultados de los ensayos de compresión del hormigón en obra. ACI 214-65. ACI Manual of Concrete Practice, part 1. American Concrete Institute, Detroit, Michigan, USA (1968).
- (2) Sparkes, F.N. El control de la calidad del hormigón: una revisión del punto de vista actual. "Proceedings" de un simposio sobre el proyecto de mezclas y control de calidad del hormigón. Londres (1954).
- (3) Especificaciones normalizadas para el hormigón preamasado. ASTM Designation: C 94-69. American Society for Testing and Materials, Filadelfia, Pennsylvania, U.S.A.