Ing. Belisario Maldonado Pérez

Fórmulas sobre resistencia de hormigones en función de la calidad del cemento y racionalización de nuestras Especificaciones

La Dirección General de Obras Públicas solicitó del Taller de Ensayes de la Universidad de Chile, a principios de 1942, datos comparativos sobre resistencias de hormigones confeccionados con diversas clases de cementos portland.

En la nota-respuesta que el Jefe del Taller señor Thomas envió al Director General, se acompañó un gráfico que en abscisas tenía la cantidad de cemento en Kg. por metro cúbico de hormigón; y en ordenadas, las correspondientes resistencias a la compresión, en Kg/cm^2., a 28 días, de cubos normales de 20 cm. de arista.

En el gráfico se dibujaron dos curvas: una para hormigones confeccionados con cementos de primera clase (más de 500 Kg./cm^2. de resistencia a la compresión a 28 días de cubos de mortero normal); y otra para hormigones confeccionados con cementos de segunda clase (poco más de 400 Kg./cm^2. de resistencia).

Pues bien, se observó este hecho curioso:

Que ambas curvas, entre las abscisas 170 y 340 Kg./m^3, eran sensiblemente rectas y paralelas.

A través de este hecho entreví la posibilidad de obtener una fórmula sencilla que expresara la resistencia de un hormigón, en función de la cantidad y de la calidad del cemento, aceptando condiciones standard en los materiales inertes (ripios y arenas); y un criterio uniforme al calcular las dosificaciones.

Haciendo experiencias con los ripios y arenas que corrientemente se emplean en nuestras construcciones (o sea que con dificultad cumplen con nuestras especificaciones) observé que calculando las dosificaciones de modo que la arena llene los huecos del ripio más un 20%, obtenía resistencia muy parecidas al promedio general sacado de la estadística del Taller, que cubre varios miles de pruebas de hormigones realizados a lo largo del país para diversas obras.

Comprobado este hecho, y verificado para distintas dosis de cemento, procedí a calcular dosificaciones según el siguiente procedimiento:

Sean:

A.—Kilógramos de cemento por metro cúbico de hormigón.
γ.—Peso específico del cemento.
X.—Litros de ripio por metro cúbico de hormigón.
H.—Huecos del ripio, expresado en tanto por uno.
Y.—Litros de arena por metro cúbico de hormigón.
h.—Huecos de la arena, expresado en tanto por uno.
H^2O.—Litros de agua por metro cúbico de hormigón.

La ecuación de partida dice que la suma de los macizos de los distintos materiales, para que el hormigón resulte compacto, debe ser igual a mil litros:

$$\frac{A}{\gamma}+X(1-H)+Y(1-h)+H^2O=1000$$

El valor de Y lo hemos fijado con un 20% de exceso sobre los huecos del ripio:

$$Y=1{,}2\ H\ X$$

La cantidad de agua debió obtenerse en cada caso por el método del cono de Abrahms. Pero el suscrito, aprovechando la copiosa estadística del Taller de Ensayes confeccionó una fórmula que ha dado muy buenos resultados, y que exime de la experimentación para estudios con ripios corrientes:

$$H^2O=168-0{,}276A+0{,}000775A^2$$

Esta dosis de agua es la mínima que aceptan los constructores chilenos en sus obras; y produce lo que hemos denominado un «hormigón trabajable» (Consistencia pastoso-fluída).

Resolviendo este sencillo sistema, calculé las dosificaciones que me interesaban, confeccioné cubos de los distintos hormigones, y realicé con ellos las pruebas clásicas de resistencia a la compresión.

Debo dejar constancia de que la granulometría de los inertes estaba lejos de ser la óptima, y de que, mejorándola, se obtenían aumentos bastantes fuertes en las resistencias; de la misma manera, la «angulosidad» de materiales tales como chancados de rocas con planos de clivage muy definidos, hacían subir las resistencias en un 20% y aún más.

En el presente estudio no me preocupo ni de la granulometría ni de la angulosidad. El primer asunto ha sido abordado por el Ing. Eduardo Paredes, en su estudio sobre Concretos Vibrados; y el segundo, está en el programa de trabajos del Taller para el año 1943.

Insisto, pues, en el objeto perseguido en este trabajo: Fórmulas que den resistencias de hormigones confeccionados con materiales inertes de uso corriente. No se trata de dar la resistencia que corresponde a una determinada combinación de ripio y arena, sino de obtener, dada la dosis de cemento y su calidad, un promedio de las resistencias que se obtendrían en el país para dicha dosificación y calidad de cemento.

Los resultados de las experiencias realizadas, se acompañan en el cuadro siguiente. Las resistencias se anotan en cuatro columnas, correspondientes a las cuatro clases de cemento con las cuales se experimentó. El valor S que encabeza cada columna, es la calidad del cemento, expresada por la resistencia a la compresión a 28 días, de cubos de mortero normal.

CUADRO N.° 1

Dosificación Kg. de cemento por m.³ de hormigón	Resistencia del hormigón a 28 días (Kg/cm².)			
	S=350	S=400	S=500	S=550
170	72	103	146	
226	..	149	197	
300	174	208	255	275
340	..	229	279	
396	..	259		

Los valores tabulados me permiten establecer la fórmula:

$$(I) \quad R = 0{,}8\,A + 0{,}5\,S - 235$$

Que interpreta el cuadro N.° 1 de experiencias, con mucha fidelidad entre 170 y 340 Kg./m³., como lo demuestra el cuadro que sigue:

CUADRO N.° 2

Dosificación Kg. de cemento por m³. de hormigón	Resistencia del hormigón a 28 días (Kg/cm².)			
	S=350	S=400	S=500	S=550
170	76	101	151	176
226	120,8	145,8	195,8	220,8
300	180	205	255	280
340	212	237	287	312

Como puede observarse, la fórmula es aplicable con seguridad muy grande al cemento nacional corriente (S un poco mayor que 400) y a un buen número de los cementos portland importados (S un poco mayor que 500).

Los cementos con S=350 ó 550 son muy escasos; por esto es que sólo experimenté comprobaciones con ellos. No obstante, se puede presumir con mucha certeza que la fórmula tiene validez dentro del campo comprendido entre 350 y 550 Kg/cm².

Comparemos ahora los valores tabulados de la fórmula I—que interpretan las experiencias—con la estadística del Taller:

Dosificación (Kg/m³)	Resistencia (Kg/cm²)
113	40
142	70
170	100
226	140
283	180
300	200
340	220
396	250
452	280

Para hacer la comparación, tenemos que ponernos en el caso del producto nacional de tipo corriente (S=400 Kg./cm²). Vemos que entre los valores límites definidos más arriba (A comprendido entre 170 y 340 kg/m³) hay valores muy semejantes; pero que fuera de ellos, la estadística se aparta de la fórmula.

Persiguiendo el objeto de ampliar el contenido de la fórmula que se busca, encontré

II) $$R = 1{,}333\ A - 0{,}001168\ A^2 + 0{,}5\ S - 295\ (*)$$

que es más complicada que I, pero que interpreta mejor a la Estadística, según puede verse en el cuadro que sigue:

Dosificación (Kg/m³)	Resistencia (Kg/cm²)
142	70,4
170	97,5
226	146,9
300	200
340	218
396	250
452	270

(*) Es probable que experiencias más prolijas y numerosas permitan descomponer el término 0,5S, en una función de potencias de S. Para nuestros fines prácticos; esta fórmula ya es exageradamente precisa.

El conocimiento por una fórmula del valor medio R de resistencia de los diversos hormigones, permite racionalizar las especificaciones sobre la materia.

En efecto, ha sido costumbre de aceptar como mínimo admisible en hormigones pobres, un valor próximo al 65% de la resistencia media; y en hormigones ricos, un valor próximo al 85%. Poniendo:

$$R_{min} = [0{,}558 + 0{,}000645\ A]\ R$$

se cumple con la condición de que, para la dosis de 142 Kg/m³, la resistencia mínima admisible es el 65% de la media. De aquí, el tanto por ciento sube uniformemente hasta alcanzar el 85% para la dosificación de 452 Kg./m³.