

UN CUENTO... DE VERDAD, SOBRE COMPACIDAD DE HORMIGONES

Por EDMUNDO SANTOLARIA, Ingeniero de Caminos.

El humorismo que adopta el autor en su trabajo, que justifica con el hecho de dedicarlo a los jóvenes compañeros que se acercan por vez primera a la realidad de las obras, puede ser quizás un buen sistema para que se traten los sanos y atinados consejos y normas que da sobre el tema que en su "prologuillo" califica de eterno.

I. - A modo de prologuillo.

Dedicando exclusivamente estas notas a nuestros compañeros más jóvenes, enamorados de la construcción y de su trabajo a pie de obra, nos atrevemos a publicar para ellos, en nuestra REVISTA, un resumen de los ensayos realizados *sin complicaciones* y con el único material de laboratorio al alcance de todas las obras, consistente en un cubo, una pala, unos moldes de madera (u otro cubo) y una probeta graduada, sobre el tema eterno de la *compacidad de hormigones*, que, aunque nada nuevo y para ellos desconocido podríamos decir, pone sin embargo de manifiesto el enorme *agradecimiento* que, por decirlo así, nos muestra el hormigón, mejorando extraordinariamente su calidad (hasta casi duplicar su resistencia a la rotura), a poco cuidado y atención que en la obra le dediquemos.

Preferimos simplemente relatar los hechos como ocurrieron, dejando la "moraleja" para el final, como en los *cuentos*..., ya que al fin y al cabo entre "chicos" anda la cosa..., y como para tales resulta, por su candor, el articulito.

Pues, señor, érase una vez un airoso y esbelto puente en construcción, cuyas bóvedas, prudentes y experimentadas *manos* las proyectaron de rico hor-

migón de 350 Kg., y las que, al que suscribe, como Ingeniero de la contrata, exigieron unas probetas que, lealmente, y sacadas de la mismísima hormigonera, se enviaron al Laboratorio Central de nuestra Escuela para su rotura a compresión a los veintiocho días.

La grava, era abundante y buena; la arena, riquísima, sacada del propio río que, galante y como agradecido a nuestro celo, se complacía en dejarnos húmeda y magníficamente lavada al pie mismo de la hormigonera; la obra, franca, y en aquellos felices días (cualquier tiempo pasado fué mejor...) todavía no nos escaseaba demasiado el cemento..., todo lo cual, unido a nuestro mejor deseo de conocer de verdad la calidad de la obra que se ejecutaba y nuestro íntimo convencimiento — sin modestias — de hacerlo (así lo creíamos) lo mejor posible, nos hacía esperar el resultado del ensayo con esa apacible y placentera *sonrisa del deber cumplido*...

Sin embargo, nuestro chasco fué "morrocotudo" (... me dirijo a los chicos), y aquí D. Eduardo, al enviarnos el expediente con el resultado del ensayo (cuadro núm. 1), nos "pegó" un disgusto. El rico hormigón, de preciosa y tan lavada arena, destinado a materializar en bóvedas la airosa directriz de los arcos del esbelto puente, resultaba un desgraciado

CUADRO NÚM. 1. — Resumen del expediente de ensayo a compresión realizado por el Laboratorio Central de la Escuela de Caminos, de probetas con dosificación de áridos, según la fórmula clásica por metro cúbico, de 800 litros de grava y 400 litros de arena.

MARCAS EXISTENTES	Carga de rotura Kg./cm. ²	Fecha del ensayo	FORMA DE ROTURA	Estado de humedad
350 Kg. 27-2-46	125	27-3-46	Normal.	Seco.
350 Kg. 27-2-46	108	27-3-46	Plano inclinado.	Id.
350 Kg. 2-3-46	133	30-3-46	Normal.	Id.
350 Kg. 2-3-46	129	30-3-46	Id.	Id.

hormigonucho de la casta más vulgar que, pese a su riqueza y después de veintiocho hermosos días de curado, rompía, haciéndose añicos, con cargas unitarias que apenas llegaban a los 130 Kg./cm.².

Cosas peores se han visto, es verdad, y en la Instrucción oficial se admiten como lógicos, resultados

todo, al ser *el arco*, por decirlo así, *donde teníamos puestas todas nuestras complacencias*; y aunque bien elegida la directriz, en ningún punto ni posición desfavorable de sobrecarga, el prudente y discretísimo *coeficiente de seguridad* dejaba de mantenerse a la altura digna que su alcurnia y responsabilidad exigían,

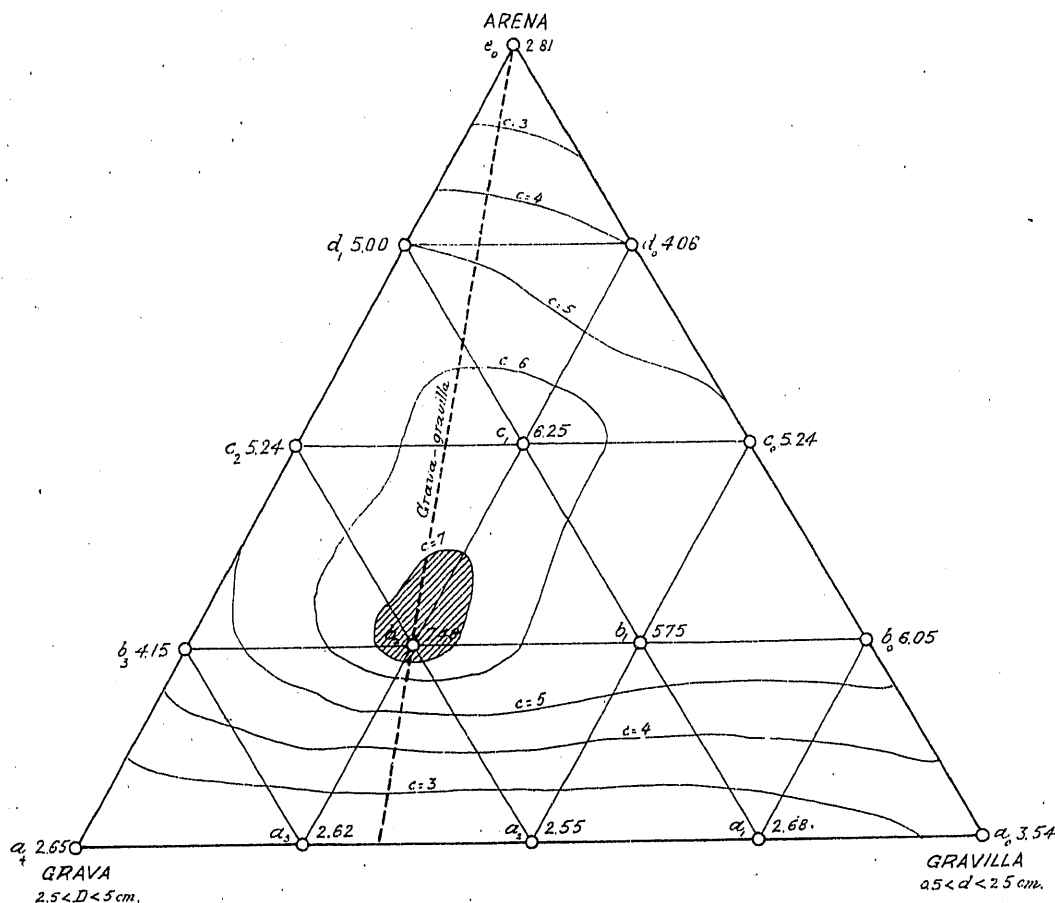


Fig. 1.ª — Diagrama triangular de las distintas mezclas y curvas de compacidad relativa.

análogos (1); pero confesamos que era tal nuestra confianza en que se hacían las cosas *como el mejor*, que aquella nuestra plácida sonrisa se nos arrugó algún tanto, ya que, según nuestros "cálculos" — en los que, desde luego, ni remotamente se nos había ocurrido pensar en nada que tuviera relación con Poisson ni Bolomey —, una rotura *decente*, y de acuerdo con las circunstancias, esmero en la ejecución y nuestro entusiasmo, no esperábamos pudiera producirse antes de los 160 ó más Kg./cm.².

Empezamos por sentirnos *insatisfechos*, sobre

nos *repugnaba* la idea de que aquel arco tan atrevido y gentil, para el que con tanto esmero se levantaron cimbras y corrigió encofrados, pudiera resultar de un hormigón que, pese a su apellido (de 350 Kg. nada menos), no fuera mejor que el de los estribos destinados a sostenerlo, o que el de su séquito y corte en el alzado de sus muros de acompañamiento.

Uno a uno, y por separado, fuimos analizando cada material, dosificaciones, manipulación y puesta en obra, sacando como consecuencia que, como paella con mal cocinero, de muchas cosas buenas sólo un mal guisote habíamos obtenido, lo que nos hirió bastante... y de aquí el porqué de nuestras "manipulaciones".

(1) Hormigón tipo B, de 350 Kg. de cemento y 205 litros de agua por metro cúbico de áridos. Resistencia a la rotura a los 28 días, 130 Kg./cm.².

II. - Los ensayos.

Empezamos por separar en montones muestras de los tres áridos, GRAVA, GRAVILLA y ARENA (las dos primeras se obtenían en obra mezcladas, pero para nuestro estudio preferimos, naturalmente, separarlas mediante cribado, pensando en una posible corrección posterior).

Se aceptó como unidad de volumen el de una medida de madera, de dimensiones $0,30 \times 0,30 \times 0,20$, de las empleadas para la dosificación de cemento en las hormigoneras, llenándola de cada uno de los áridos, de los que se mezclaban distintas unidades de volumen, según fuera la combinación ensayada.

Estos volúmenes se mezclaron entre sí mediante dos *paleos* (dos vueltas), que se vió resultaba suficiente en todos los casos, llenándose de estas mezclas un cubo metálico de los empleados en obra, de 10,480 litros de capacidad, procediéndose, después de bien enrasado en cada caso, a determinar el volumen de huecos mediante relleno de agua hasta hacerla rebosar,

con una probeta de 500 centilitros, graduada de 5 en 5 c. c.

Se hicieron en total 15 ensayos de mezclas distintas, correspondientes a los 15 puntos afijos de los mismos en el diagrama triangular que adjunto se acompaña (fig. 1.^a).

En el Cuadro núm. 2 se detallan:

Columna 1: La *designación* o letra correspondiente al punto representativo del ensayo en el diagrama triangular, teniendo en cuenta que la proporción en volumen de uno de los áridos de la mezcla es proporcional a su distancia al lado opuesto al vértice designado por el árido que se considera.

Columnas 2, 3 y 4: Los volúmenes de cada uno de los tres áridos que integran la mezcla.

Columna 5: La cantidad de agua, en litros, precisa para enrasar el cubo, rellenando todos los huecos de la mezcla colocada en su interior.

Columna 6: El % de huecos deducido de los datos anteriores.

Columna 7: Un *índice de compacidad* de obten-

CUADRO NÚM. 2. — Resultados de los ensayos.

1 Designación	3 VOLUMEN DE ÁRIDOS			5 Agua — Litros	6 % huecos	7 Índice compacidad
	2 Grava	Gravilla	4 Arena			
a_0	0	4	0	2,900	27,70	3,54
a_1	1	3	0	3,900	37,20	2,68
a_2	2	2	0	4,100	39,22	2,55
a_3	3	1	0	4,000	38,21	2,62
a_4	4	0	0	3,950	37,70	2,65
b_0	0	3	1	1,730	16,50	6,05
b_1	1	2	1	1,820	17,40	5,75
b_2	2	1	1	1,400	13,35	7,48
b_3	3	0	1	2,520	22,10	4,15
c_0	0	2	2	2,000	19,10	5,24
c_1	1	1	2	1,605	15,30	6,25
c_2	2	0	2	2,000	19,20	5,24
d_0	0	1	3	2,585	24,70	4,06
d_1	1	0	3	2,100	20,00	5,00
e_0	0	0	4	3,730	35,80	2,81

ción rápida y sencilla (proporcional a la inversa del % de huecos) que ponga de manifiesto la compacidad relativa de una mezcla respecto a otra, y que en el diagrama triangular se ha anotado como cota del afijo de cada mezcla.

Se obtiene así (fig. 1.^a) una serie de puntos, cada

Del simple análisis de estas curvas se desprende la influencia que sobre la compacidad ejerce la mayor o menor proporción de cada árido en la mezcla, por lo que, con ellas a la vista, resulta comodísimo jugar con los distintos volúmenes de áridos para obtener el resultado óptimo dentro de unas manipulaciones míni-

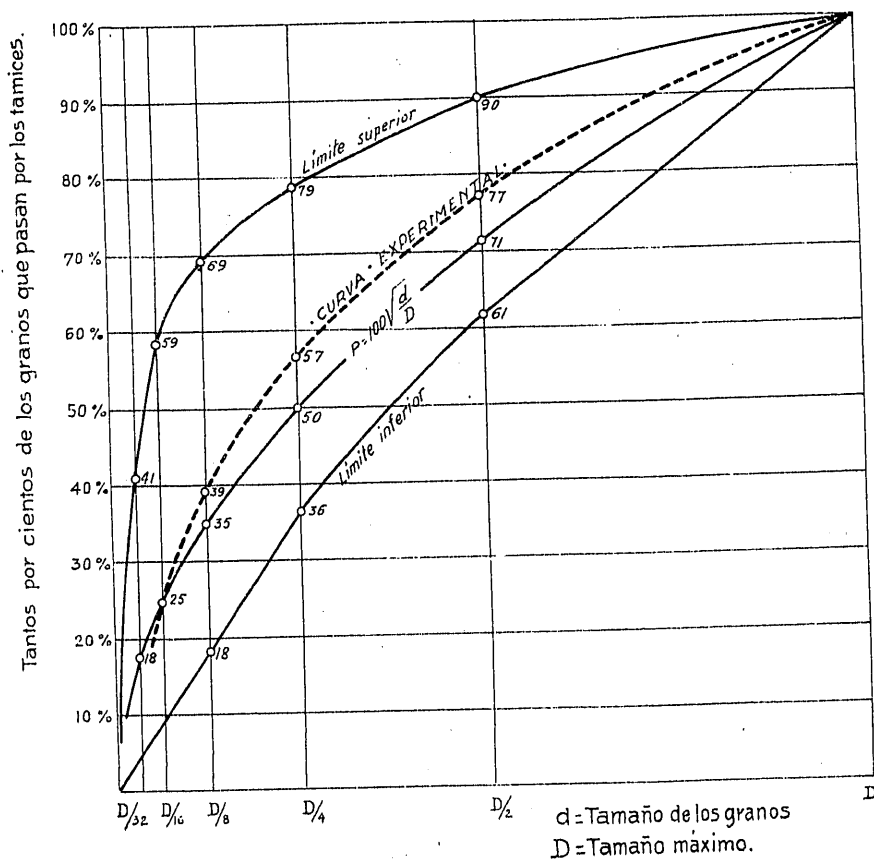


Fig. 2.^a — Análisis granulométrico de la mezcla de áridos, deducida según los ensayos.

uno de los cuales representa, por su posición, una mezcla distinta de volúmenes de grava, gravilla y arena. Las cotas de estos puntos vienen a ser como sus *compacidades relativas* (columna 7 del cuadro núm. 2), por lo que en el mismo diagrama, y para su mejor interpretación, se han representado las "curvas de nivel" de los *índices de compacidad*, 3, 4, 5, 6 y 7, que definen la *zona de compacidad máxima* (rayada en la figura) correspondiente, según estos ensayos, a una mezcla (punto b_2) en que los volúmenes a mezclar estén en la relación aproximada:

Grava	2	} Compacidad máx.
Gravilla	1	
Arena	1	

mas compatibles con la economía en la mano de obra.

Del cribado de la grava para separar la gravilla se obtuvo que la relación aproximada de ambos volúmenes sin corrección, era ligeramente superior a:

$$\frac{\text{gravilla}}{\text{grava}} \simeq \frac{1}{2};$$

es decir, que hasta en esto se tenía suerte, pues empleando directamente la mezcla grava-gravilla, nos movíamos aproximadamente sobre la recta b_2e_0 del diagrama, que pasa por la *zona óptima*, por lo que nos bastó dosificar en volumen la arena para obtener mezclas próximas a la del punto b_2 de *máxima compacidad*.

Se estableció, por consiguiente, para los áridos, una dosificación en volumen:

Arena	1
Grava-gravilla	3

equivalente a la óptima obtenida en los ensayos y muy distinta a la hasta entonces empleada en obra que respondía a la clásica por metro cúbico de:

800 litros grava,
400 " arena,

cuyo afijo, aunque no muy distante del máximo, resulta de indiscutible inferior compacidad que el de la propuesta.

Y ya metidos en faena, y resultándonos la cosa bastante divertida, quisimos, con la consiguiente desesperación de nuestro encargado, que no comprendía "cómo éramos ahora nosotros los que perdíamos el tiempo en cosas *no certificables*", comprobar también la *granulometría*, y con unos tamices de distintas mallas que por allá nos agenciamos, y un poco de buen deseo en las apreciaciones, allá que nos fuimos metiéndonos con Füller y con su parábola, obteniendo una curva que, como se representa en el gráfico de la figura 2.^a, corta a la clásica

$$P = 100 \sqrt{\frac{d}{D}},$$

por su parte inferior, resultando en general sus ordenadas ligeramente superiores a la citada, pero manteniéndose siempre en una halagadora zona media entre las dos curvas límites que señala la Instrucción

Aun nos faltaba, sin embargo, algo fundamental. Nos referimos nada menos que a ω relación agua-cemento, para la primera de las cuales, y contra nuestro primitivo optimismo, habíamos observado se seguía el cómodo, y por tal extendidísimo, criterio entre los encargados de "para qué echar más, si ya es bastante..., y qué menos le va usted a echar...".

Si, partiendo de la anhelada carga de rotura $R = 170 \text{ Kg./cm.}^2$, entramos en la fórmula de Bolo-mey:

$$R = \frac{R_m}{3 \cdot 6} \left[\frac{1}{\omega} - 0,5 \right];$$

siendo $R_m = 400 \text{ Kg./cm.}^2$, obtendremos para ω el valor:

$$\omega = \frac{\text{agua}}{\text{cemento}} \simeq \frac{1}{2};$$

es decir, una mitad en volumen de agua del peso del cemento empleado, dosificación teórica muy de desear, pero poco conveniente de mantener por encarecer enormemente la mano de obra, al dar al hormigón una consistencia demasiado seca y disminuir su trabajabilidad.

La Instrucción oficial fija para el hormigón tipo B, de 350 Kg., unos 205 litros de agua, valor lógicamente superior en casi 17 por 100 al de 175 litros que, según nuestro estudio, deberíamos emplear para conseguir esa resistencia, y la Instrucción sólo indica, para este tipo, la de 130 Kg./cm.²; pero no resultando admisible, por antieconómica y molesta, la dosificación en agua deducida por la fórmula, dimos por buena la

CUADRO NÚM. 3. — Resumen del expediente de ensayo a compresión realizado en el Laboratorio Central de la Escuela de Caminos, de probetas con dosificación de áridos, deducida del estudio que se relata.

MARCAS EXISTENTES	Carga de rotura Kg./cm. ²	Fecha del ensayo	FORMA DE ROTURA	Estado de humedad
350 Kg. 13-4-46	258	21-5-46	Normal.	Seco.
350 Kg. 13-4-46	275	21-5-46	Id.	Id.
350 Kg. 17-4-46	250	21-5-46	Id.	Id.
350 Kg. 17-4-46	237	21-5-46	Id.	Id.
350 Kg. 20-4-46	267	21-5-46	Id.	Id.
350 Kg. 20-4-46	246	21-5-46	Id.	Id.

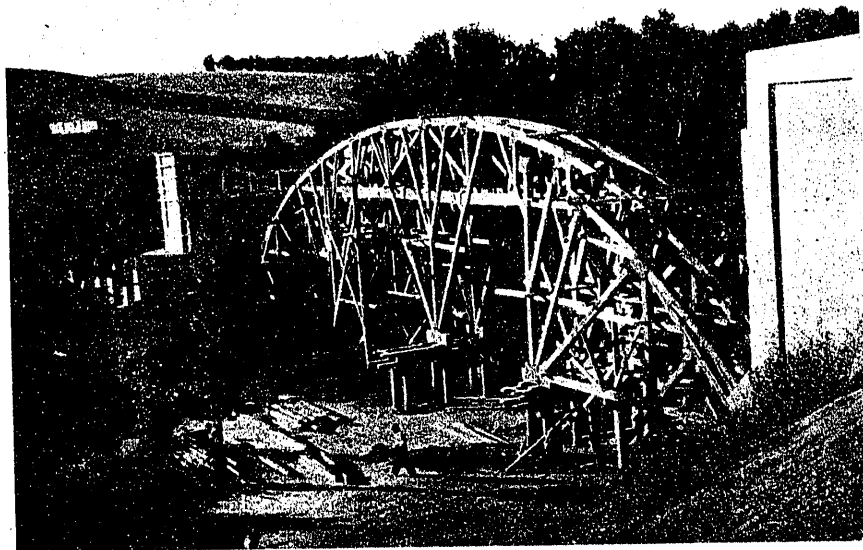
de 205 l./m.³ de la Instrucción, con lo que, sin más enmiendas ni consideraciones, se dieron las órdenes oportunas, fabricándose en tres fechas distintas, y por el mismo vigilante que hizo las anteriores, las seis probetas ensayadas, cuyo resultado satisfactorio puede observarse en el Cuadro núm. 3, copia del expediente del citado ensayo en el Laboratorio Central de la Escuela de Caminos.

toda la obra, para lograr, marchando directamente al grano, una mezcla de áridos adecuada.

III. - Moraleja.

Y ya hemos llegado al final del cuento.

La misión del técnico en las Empresas tiene mucho de *económica*, es verdad, pero esta economía lo-



Cimbra en construcción. Puente sobre el río Adaja, en Arévalo (Ávila), carretera Madrid-Coruña. Proyecto de D. Antonio Díaz Burgos, Ingeniero de Caminos. Jefatura de Puentes y Estructuras.

En el Cuadro núm. 1: Resumen de los ensayos a compresión de probetas hechas con la mezcla clásica de 800 litros de grava y 400 litros de arena, despreciando la segunda, que rompió a los 108 Kg./cm.², y que hasta por la forma de rotura parece defectuosa. se obtiene una media para la rotura de 129 Kg./cm.².

En el Cuadro núm. 3: Resumen de los ensayos a compresión de probetas hechas con la mezcla y condiciones deducidas de estas *manipulaciones*, la media obtenida se eleva a 255,5 Kg./cm.²; es decir, una mejora del 98 por 100 en su resistencia; lo que no deja de ser interesante, y que demuestra ese enorme *agradecimiento* del hormigón a nuestras atenciones de que os hablaba, tanto más si se considera que son apenas precisas un par de horas y por una sola vez durante

gra su más amplia concepción cuando junto a lo económico de lo producido se consigue su óptima calidad.

Una buena organización de obra, una previsión y dirección prudentes y concienzudas pueden ser eficaces para lo primero; en cuanto a lo segundo, muchas son las "variables" de que depende, y cosas son éstas que a nuestras fuerzas llevarían demasiado lejos de nuestro cuento.

Creemos, por consiguiente, debe bastarnos con resaltar que *sólo un poco de atención* ha sido necesario para obtener tan espléndido resultado, ya que es lo cierto que a todos, desde que salimos de la Escuela, nos *encanta* poder construir obras bellas y bien ejecutadas.

Y colorín colorado, este cuento se ha acabado.