• JUNTA DE INVESTIGACIONES TÉCNICAS •

DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES

POR RAMÓN IRIBARREN CAVANILLES, INGENIERO DE CAMINOS

Para el estudio de la composición granulométrica del árido, deduce teóricamente el autor en este trabajo un método, que compara con las soluciones de Bolomey y Abrams, y afirma que se precisa una amplia experimentación para decidir cuál de ellas es más aceptable. Este plan de ensayos ha sido aprobado por la Superioridad, a propuesta de la Junta de Investigaciones Técnicas y como consecuencia del presente estudio, que nos complace dar a conocer a nuestros lectores.

Composición granulométrica del árido.

Dentro del vasto problema planteado por la total dosificación de hormigones, o sea las proporciones en que conviene mezclar el árido, el cemento y el agua, tiene fundamental importancia la composición granulométrica del árido, tanto por el tamaño de sus componentes como por los huecos que dejen entre sí.

Como a continuación veremos, son, en cierto modo, discrepantes los resultados a que se llega, en esta importante cuestión, aplicando los métodos actualmente en boga, propuestos por eminentes especialistas.

Aun reduciendo el estudio comparativo al de los dos métodos más generalizados, o sea a los de Abrams y Bolomey, se hacen patentes esas discrepancias.

En el método de Abrams, los módulos de finura del árido empleado, o sea la suma de los por cientos que pasan a través de cada uno de los tamices de la serie de Tyler números 3, 3/2, 3/4, 3/8, 8, 14, 28, 48 y 100, dividida por cien, varían en función del tamaño máximo del árido, y también en función de la riqueza, en cemento, del hormigón.

En cambio, el método Bolomey preconiza el empleo de las composiciones granulométricas del conjunto árido-cemento, que se adapten a las leyes parabólicas de tipo

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

en la que P es el porcentaje que pasa por cada tamiz; D y d son, respectivamente, el tamaño máximo del árido empleado y la luz del tamiz considerado, y a es un parámetro, que varía, generalmente entre 10 y 14, según la consistencia del hormigón y la forma de los cantos o granos del árido. Los módulos de finura de los áridos empleados según este método, en los buenos hormigones, resultan prácticamente constantes, para cada tamaño máximo del árido, aun cuando la riqueza del hormigón, en cemento, varíe dentro de ambos límites.

En efecto: Si se admite que, como parece lógico y Fuller comprobó experimentalmente, la ley de máxima compacidad de un árido o, si se prefiere, de un conjunto árido-cemento es la parabólica, es indudable que el parámetro a de esa ley ha de reducirse a 0, pues es absurdo suponer que, a través del tamiz de luz cero, pase un por ciento distinto de cero.

Lo que, probablemente, sucede es que, aun cuando esa primitiva ley de Fuller

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

sea la de máxima compacidad posible, da un porcentaje de sólo el 4,4 % o el 6,2 % para el tamiz número 100, si los tamaños máximos del árido empleado son de 75,1 mm. ó 37,7 mm., entre los que varía, o a los que se aproximan, los corrientemente empleados.

Siendo así que la finura del polvo que pasa a través del tamiz número 100 se aproxima mucho a la del cemento, resulta, como veremos más adelante, que, aun admitiendo que todo ese polvo sea cemento, las riquezas correspondientes al 4,4 % y al 6,2 % sólo suponen las mezclas en volúmenes aparentes: 1 : 14,1 y 1 : 9,8, o sea, respectivamente, las exiguas riquezas de 110 kg./m.^{3} ó 155 kg./m.^{3}

Aunque es axiomático, conviene precisar aquí que los porcentajes que regulan todas estas composiciones granulométricas, tanto las que se refieren al conjunto árido-cemento como al árido sólo, y en las que se trata de obtener el mínimo de huecos posible, se refieren a los volúmenes reales de los materiales, sólidos, que constituyen el árido o el hormigón.

Las reducidísimas dosificaciones a que hemos llegado, para esos hormigones de máxima compacidad posible, siempre que se compriman con la debida energía y no se emplee en ellos más cantidad de agua que la estrictamente necesaria para rellenar los huecos del conjunto árido-cemento, nos prueba que, tanto sus resistencias como sus docilidades, compendio de consistencia y trabazón (1), son muy deficientes.

Aproximándose el mínimo volumen de huecos, de conjunto árido-cemento de ese compacto hormi-

(1) Véase la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, de abril y mayo de 1940.

gón, graduado según la ley de Fuller, al 20 %, y quedando, en él, un volumen de pequeñas burbujas de aire del orden del 5 %, resulta que el agua estrictamente necesaria para totalizar con el aire, el volumen de aquellos huecos, se aproximará a 150 $\frac{l}{m.^3}$ por lo que la relación en peso, $\frac{\text{agua}}{\text{cemento}}$, será $\frac{A}{C} = \frac{150}{110} = 1{,}36$, a la que corresponden muy bajas resistencias.

También la consistencia será excesivamente dura, para la colocación en obra del hormigón, y si, para ablandarla, tratamos de aumentar la dosificación de agua, además de disminuir aún más la resistencia, destrabaremos totalmente ese hormigón, tan pobre en cemento, o polvo fino.

Para mejorar, tanto la resistencia como la consistencia y trabazón, de ese teóricamente compacto hormigón, cuya fabricación, repetimos, exigiría una enérgica compresión, es, pues, preciso aumentar su dosificación en cemento, lo que, aun disminuyendo un poco, muy poco, su máxima compacidad teórica, es posible que no disminuya, o hasta que aumente algo, la que prácticamente se consiga; pero sí es seguro que este aumento de riqueza ha de suponer una disminución de la relación $\frac{\text{agua}}{\text{cemento}}$, o sea un aumento de resistencia, y también han de mejorar la consistencia y la trabazón, o sea la docilidad del hormigón obtenido.

Así, tan lógicamente, llegamos, partiendo de la parábola de máxima compacidad de Fuller,

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

probablemente la más aproximada verdad en todo esto, a las parábolas tipo Bolomey:

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

en las que el parámetro a viene determinado, generalmente, en los buenos hormigones, por la riqueza en cemento, o sea tanto por su resistencia como por consistencia, y no solamente por esta última cualidad, como parece indicar Bolomey.

Unicamente cuando se requieran bajas resistencias a hormigones blandos, el parámetro a vendrá determinado por la riqueza en el conjunto polvo-cemento, no en cemento, solamente, del hormigón.

También debe influir en la determinación de este parámetro, además de la forma de los cantos o granos, su tamaño máximo, D.

En estas parábolas, del conjunto árido-cemento, tipo Bolomey,

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

en las que podemos suponer, fijado ya el tamaño máximo del árido D y la forma de sus cantos y cuyo parámetro a es distinto y mayor que cero, principalmente por exigirlo así la resistencia del buen hormigón, el árido sigue siendo el mismo, aunque se aumente mucho la riqueza en cemento, o sea que el árido será siempre el de la ley de Fuller,

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

al que le hemos quitado, para sustituirlo por cemento, todo el polvo fino, que pasa por el tamiz número 100, y, como consecuencia de esta constancia del árido, su módulo de finura seguirá siendo el mismo, aunque se varíe mucho la riqueza en cemento del hormigón.

Si, por el contrario, Abrams llega a la conclusión, que parece más lógica, de que el módulo de finura del árido, que quizás más propiamente debiera denominarse módulo de rudeza del mismo, crece a medida que la riqueza aumenta, ¿cuál de estos dos métodos es más aceptable?

Aun cuando, partiendo de la parábola de máxima compacidad de Fuller,

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

hemos llegado, razonadamente, a las de tipo Bolomey,

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

veamos cómo, quizás, con más lógica aún, y con la misma base, se llega a resultados similares a los obtenidos por Abrams.

Si para proporcionar al hormigón la riqueza exigida, principalmente por su resistencia, no hemos dudado en empezar, con toda lógica, por sustituir todo su polvo fino, o sea el que pasa por el tamiz número 100, por el cemento, que tan similar le es en finura de molido y consiguientes cualidades volumétricas y de amasado, ¿no es más lógico que, al tener que aumentar aún más la riqueza, el exceso de cemento necesario sustituya al tamaño siguiente de polvo, o sea al retenido en el citado tamiz número 100, que también se le aproxima en tamaño, en lugar de sustituir, parcialmente, a todos los tamaños del árido, incluso a los más grandes?

Llegamos así, sustituyendo sucesivamente por cemento los porcentajes del árido retenido por los tamices, de menor a mayor, a una solución, que denominaremos teórica, por ser la más lógica, en teoría, y que, al aumentar los módulos de finura del árido, como consecuencia del aumento de riqueza del cemento, se aproxima más a la solución tipo Abrams que a la de Bolomey.

Expuesto todo esto, vamos a tratar de precisarlo más aún en lo que sigue.

Para ello, comencemos por determinar el Cuadro número 1, referente a la ley parabólica de Fuller:

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

de máxima compacidad posible.

En la columna (1) se determina, en relación con el tamaño máximo D, las luces d de cada uno de los diez tamices de la serie de Tyler, empleados, generalmente, en el análisis granulométrico y en la determinación de los módulos de finura. La razón de la progresión geométrica de estas luces es 2.

En la columna (2) se determinan los por cientos P, que pasan cada uno de estos tamices de luz d obtenidos mediante la aplicación de la repetida ley,

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

Las columnas (3) y (4) se refieren a los por cientos retenidos por los tamices. En la (3) se determinan los por cientos totales retenidos por el tamiz considerado, o sea la diferencia, a 100, de cada uno de los por cientos correspondientes de la columna (2); y en la (4) se determinan los por cientos parciales retenidos por cada tamiz, o sea la diferencia entre el por ciento correspondiente de la columna (3) y su inmediato superior.

Las columnas (5) y (6) se refieren al tamaño máximo D del árido, o sea a la luz D del tamiz, cuyo inmediato inferior retiene ya un porcentaje apreciable, prácticamente más del 15 %, del árido o árido-cemento. En la columna (5) se indican los números de los tamices, en la que los cuatro superiores corresponden a sus luces, indicadas en pulgada o subfracción, y los seis inferiores corresponden al número de mallas por pulgada. En la columna (6) están indicadas las luces correspondientes en milímetros.

Y, por último, en la columna (7) se indican los módulos de finura de la ley Fuller, correspondientes a cada uno de los tamaños máximos de las columnas (5) ó (6), y que se obtienen, de abajo arriba, totalizando, de arriba abajo, los tantos por uno de la columna (3), o sea para D = núm. 100, corresponde el módulo cero; para D = núm. 48, corresponde el módulo 0 ÷ 0,293 = 0,293; para D = núm. 28 corresponde el módulo 0 ÷ 0,293 0,50 ÷ 0,793, y así sucesivamente, hasta obtener el módulo 6,694, para el tamaño máximo, D = núm. 3, o sea 75,11 mm.

De este cuadro núm. 1 deducimos el cuadro número 2, de módulos de finura del árido, empleado en la composición ganulométrica, que hemos denominado teórica y que, como hemos indicado anteriormente, se

CUADRO NÚM. 1

LEY PARABÓLICA DE FULLER $P = 100 \sqrt{\frac{d}{D}}$

(1) Dimensión del tamiz d	(2) Porcentaje que pasa C_r	PORCENTAJE RETENIDO (3) Total P_r	PORCENTAJE RETENIDO (4) Cada tamiz	TAMAÑO MÁXIMO D (5) Número del tamiz	TAMAÑO MÁXIMO D (6) Luz en mm.	(7) Módulo de finura
D	100,0	0	0	3	75,11	6,694
$\frac{D}{2}$	70,7	29,3	29,3	3/2	37,70	5,738
$\frac{D}{4}$	50,0	50,0	20,7	3/4	18,85	4,800
$\frac{D}{8}$	35,4	64,6	14,6	3/8	9,42	3,888
$\frac{D}{16}$	25,0	75,0	10,4	4	4,70	3,012
$\frac{D}{32}$	17,7	82,3	7,3	8	2,36	2,189
$\frac{D}{64}$	12,5	87,6	5,2	14	1,17	1,439
$\frac{D}{128}$	8,8	91,2	3,7	28	0,59	0,793
$\frac{D}{256}$	6,2	93,8	2,6	48	0,295	0,293
$\frac{D}{512}$	4,4	95,6	1,8	100	0,147	0

obtiene partiendo de la ley Fuller y sustituyendo, por el cemento necesario para dar al hormigón la riqueza requerida por la obra, el polvo fino del árido, así como los porcentajes, de este árido, retenidos por los tamices más pequeños, necesarios para totalizar el porcentaje de volumen real de cemento requerido por la referida riqueza del hormigón.

Si, por ejemplo, suponemos que el tamaño máximo del árido es $D = 3$, o sea 73,11 mm., y la riqueza requerida por la obra, tanto en lo que a la resistencia como a la docilidad se refiere, es de 300 kg./m.^{3}, que, como más adelante veremos, corresponde al 12,4 % de volumen absoluto de cemento en relación al volumen total absoluto del conjunto árido-cemento, tenemos, en la figura 1.ª, que la composición granulométrica teórica vendrá representada por la recta $A\,B$, y la rama de la curva de Fuller, $B\,C$.

Así, se ha sustituído, tanto el 4,4 % de polvo fino, como los porcentajes retenidos en los tamices números 100, 48 y 28 por el cemento, para totalizar las riquezas de éste, representadas por el 12,5 %. La curva correspondiente al árido solamente será la $C\,D\,F$.

La curva de Bolomey, correspondiente a esa misma riqueza, sería la $C\,A$, y la de su árido, $C\,F$.

El módulo de finura de ese árido, de la solución Bolomey, será constante, por mucho que se aumente la riqueza, y siempre que el tamaño máximo del árido sea el mismo, pues siempre vendrá representado por el área $C\,F\,F'$. Por el contrario, los módulos de Abrams, así como los teóricos, aumentan a medida que la riqueza del hormigón, en cemento, aumenta.

Volviendo al Cuadro núm. 2, referente a la graduación teórica, tenemos que, en su columna (1), indicamos los números de los tamices más pequeños,

CURVAS DE COMPOSICIONES GRANULOMETRICAS

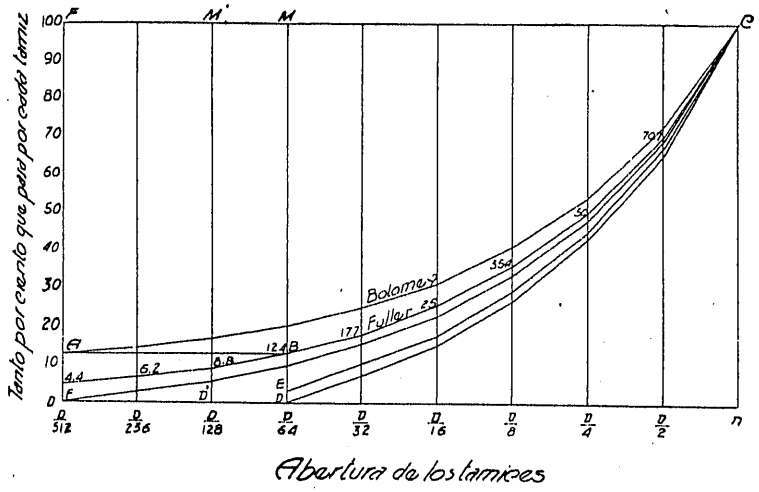


Figura 1.ª

cuyo porcentaje retenido de árido no ha sido preciso sustituir por el cemento necesario para dar la riqueza requerida al hormigón. En el ejemplo anterior, el tamiz número 14.

Aunque las riquezas correspondientes, en volú-

CUADRO NUM. 2

MÓDULOS DE FINURA TEÓRICOS

(1) Número del menor tamiz que retiene árido	PORCENTAJES APROXIMADOS DE HUECOS: (2) Del árido $h = 25 + 20\,\frac{d}{D}$	(3) Del árido cemento $h' = 20 + 20\,\frac{d}{D}$	DOSIFICACIONES: (4) Volumen aparente 1 : n	(5) Peso kg./m.^{3}	TAMAÑO MÁXIMO DEL ÁRIDO: Núm. 3 (75,1 mm.)	3/2 (37,7 mm.)	3/4 (18,8 mm.)	3/8 (9,4 mm.)	4 (4,7 mm.)	8 (2,36 mm.)	14 (1,17 mm.)	28 (0,589 mm.)	48 (0,295 mm.)
3	45	40	1 : 0	1860	10	9	8	7	6	5	4	3	2
3/2	39	34	1 : 0,33	1440	9	8	7	6	5	4	3	2	1
3/4	35	30	1 : 0,75	1080	8,59	7,59	6,59	5,59	4,59	3,59	2,59	1,59	0,59
3/8	32	27	1 : 1,3	800	8,23	7,23	6,23	5,23	4,23	3,23	2,23	1,35	0,64
4	30	25	1 : 2,08	570	7,92	6,92	5,92	4,92	3,92	2,92	1,99	1,19	0,54
8	28	23	1 : 3,13	425	7,66	6,66	5,66	4,66	3,66	2,70	1,81	1,07	0,47
14	27	22	1 : 4,47	300	7,43	6,43	5,43	4,43	3,47	2,55	1,71	0,99	0,41
28	26	21	1 : 6,8	215	7,25	6,25	5,25	4,27	3,34	2,44	1,63	0,93	0,38
48	26	21	1 : 9,8	155	7,12	6,12	5,12	4,16	3,24	2,36	1,57	0,89	0,35
100	25	20	1 : 14,1	110	7,0	6,0	5,02	4,08	3,18	2,31	1,53	0,86	0,33

menes reales C_r de cemento, en relación con los volúmenes reales de árido o material pétreo P son las correlativas de las columnas (2) y (3) del Cuadro núm. 1, para hacer estudio comparativo con los resultados obtenidos experimentalmente por Abrams, determinemos, aproximadamente, las riquezas correspondientes, tipo americano, o sean los volúmenes aparentes de árido que se mezclan con un volumen aparente de cemento.

Para precisar estas dosificaciones, los americanos admiten que un pie cúbico de cemento, o sea 28,3 litros, pesan 94 libras, o sea $94 \times 0{,}453 = 42{,}5$ kg., lo que equivale a admitir que el peso específico aparente de cemento, en el grado de compacidad que adquiere al efectuar las medidas de su volumen aparente en obra, es de $\frac{42{,}5}{28{,}3} = 1{,}5$, y que dicha compacidad es de $\frac{1{,}5}{3{,}1} = 0{,}485$, suponiendo que el peso específico real del cemento es 3,1.

El volumen aparente C_a del cemento valdrá, en función de su volumen real C_r, $C_a = \frac{C_r}{0{,}485}$.

El volumen aparente P_a del árido valdrá, en función de su volumen real P_r y de su porcentaje h de huecos, $P_a = P_r \frac{100}{100-h}$.

Luego $n = \frac{P_a}{C_a} = \frac{48{,}5}{100-h} \times \frac{P_r}{C_r}$, y admitiendo, con suficiente aproximación para este estudio comparativo, que el por ciento h de huecos de los áridos, graduados según la ley de Fuller, varía según una ley parabólica desde $h = 25$ % para el constituído por todos los tamaños hasta $h = 45$ % para el constituído por un solo tamaño de la serie de tamices, tenemos la ley $h = 25 \div 20 \sqrt{\frac{d}{D}}$ con la que se constituye la columna (2) de este segundo cuadro que nos ocupa.

Aunque los huecos reales difieran bastante de los aproximados, así determinados, los resultados obtenidos serán sensiblemente los mismos, para este estudio comparativo.

Así obtenemos la columna (4) de dosificaciones, $1 : n$, en volúmenes aparentes de cemento y árido, cuyos denominadores n son, de arriba abajo,

$$n = \frac{48{,}5}{100-45} \times \frac{0}{100} = 0;\ n = \frac{48{,}5}{100-39} \times \frac{29{,}3}{70{,}7} = 0{,}33;$$

$$n = \frac{48{,}5}{100 \div 35} \times \frac{50}{50} = 0{,}75, \text{ etc.},$$

$$\text{hasta } n = \frac{48{,}5}{100-25} \times \frac{95{,}6}{4{,}4} = 14{,}1.$$

Si deseamos conocer, también aproximadamente, las dosificaciones correspondientes, en kilos de cemento por metro cúbico de hormigón, basta admitir, también con suficiente aproximación para la finalidad propuesta, que el porcentaje de los huecos, h', del conjunto árido-cemento, en el hormigón, varía según la ley, $h' = 20 \div 20 \sqrt{\frac{d}{D}}$ con lo que obtenemos la columna (3), de la que deducimos la (5) mediante la sencilla fórmula:

Riqueza en $\frac{\text{Kg.}}{\text{m.}^3} = 10\ (C_r \times 3{,}1) \frac{100-h'}{100}$, o sea, de arriba abajo: $10 \times 100 \times 3{,}1 \frac{60}{100} = 1\,860$ kilogramos/m.^{3}; $10 \times 70{,}7 \times 3{,}1 \frac{66}{100} = 1\,440$ kg./m.^{3}; $10 \times 50 \times 3{,}1 \frac{70}{100} = 1\,080$ kg./m.^{3}, etcétera, hasta $10 \times 4{,}4 \times 3{,}1 \frac{80}{100} = 110$ kg./m.^{3} Estas riquezas en kg./m.^{3} se refieren a consistencias muy secas, en las

CUADRO NÚM. 3

MÓDULOS DE FINURA DE ABRAMS

Dosificación en volumen aparente cemento - árido	TAMAÑO MÁXIMO DE LOS AGREGADOS							
	3	3/2	3/4	3/8	4	8	14	28
1 - 12. . . .	6,20	5,35	4,60	3,80	2,95	2,40	1,80	1,20
1 - 9. . . .	6,25	5,40	4,65	3,85	3,05	2,45	1,85	1,30
1 - 7. . . .	6,40	5,55	4,75	3,95	3,20	2,55	1,95	1,40
1 - 6. . . .	6,50	5,65	4,85	4,05	3,30	2,65	2,05	1 50
1 - 5. . . .	6,60	5,80	5,00	4,20	3,45	2,75	2,15	1,60
1 - 4. . . .	6,85	6,00	5,20	4,40	3,60	2,90	2,30	1,70
1 - 3. . . .	7,15	6,30	5,50	4,70	3,90	3,10	2,50	1,85
1 - 2. . . .	7,55	6,70	5,90	5,05	4,20	3,40	2,70	2,00
1 - 1. . . .	8,20	7,35	6,50	5,60	4,75	3,80	3,00	2,25

que el agua, más las pequeñas burbujas de aire, llenan, estrictamente, el volumen de huecos del árido-cemento. Para consistencias más blandas, que requieren más agua, los valores de h' serán algo mayores, por lo que las dosificaciones en kg./m.³ disminuyen algo.

Estas leyes, de proporciones mínimas de huecos, h y h', del árido y del conjunto árido-cemento, correspondientes a su máximo asiento y compresión posibles, no son, repetimos, más que aproximadas, y conviene afinarlas más, experimentalmente, para otras interesantes finalidades.

Determinadas así, con suficiente aproximación, las riquezas en volúmenes aparentes de cemento y árido que corresponden a la sustitución, por volumen real de cemento, C_r, de los porcentajes que pasan a través de cada tamiz, vamos a acabar de determinar el Cuadro núm. 2 de módulos de finura teóricos, de los áridos, similar al Cuadro núm. 3, de módulos de finura experimentales de Abrams.

Para ello, comencemos por determinar la que pudiéramos denominar diagonal principal de este Cuadro núm. 2, o sea la comprendida dentro de las líneas reforzadas del mismo.

De abajo arriba y de izquierda a derecha, obtenemos los módulos de finura correspondientes a esta diagonal, dividiendo, en el Cuadro núm. 1, el primer módulo de finura 6,694 de la columna (7) por el último porcentaje 95,6 de la columna (3) y, multiplicándolo por ciento, o sea $\frac{6{,}694 \times 100}{95{,}6} = 7{,}0$.

El siguiente módulo de esta diagonal lo obtenemos dividiendo el segundo módulo de la columna (7) por el penúltimo por ciento de la (3) y multiplicándolo por ciento, o sea $\frac{5{,}738 \times 100}{93{,}8} = 6{,}12$.

Son, en efecto, éstos los módulos de finura correspondientes a la diagonal, puesto que si, por ejemplo, nos fijamos en el tamaño máximo, $D = \frac{3}{8} =$ $= 9{,}4$ mm., el módulo de finura del conjunto árido-cemento, graduado según la ley de Fuller y representado por el área $C\ B\ M$ en la figura 1.ª, sería, columna (7) del Cuadro núm. 1, 3,888.

Si a este conjunto árido-cemento, cuya riqueza en por ciento de volumen absoluto de cemento es $C_r = 12{,}42$, columna (2), suponemos que le quitamos el cemento, obtenemos la curva del árido $C\ D\ M$, cuyo módulo de finura vale $\frac{3{,}888 \times 100}{87{,}6} = 4{,}43$, siendo $87{,}6 = 100 - 12{,}5$, o sea el correspondiente porcentaje de la columna (3).

Determinados los módulos de la diagonal principal del Cuadro núm. 2, obtenemos los correspondientes a la zona superior de la izquierda, con sólo aumentar una unidad, al valor correspondiente a cada fila horizontal, cada vez que nos corremos un lugar hacia la izquierda, en la misma fila horizontal.

En efecto, si para la misma riqueza en porcentaje de volumen real de cemento $C_r' = 12{,}5$ %, ó, en volúmenes aparentes, 1 : 4,47, ó sea manteniéndonos en la misma fila horizontal del Cuadro número 2, suponemos que el tamañó máximo del árido pasa de $\frac{3}{8}$ a $\frac{3}{4}$, la curva correspondiente al árido pasa, en la figura 1.ª, de $C\ D\ M$ a $C\ D\ D'\ M'$, y su módulo de finura aumenta en $\frac{M'\ D'}{100} = \frac{100}{100} = 1$.

Análogo aumento, de una unidad, supone cada corrimiento hacia la izquierda, de un lugar en la misma fila horizontal.

Hemos obtenido así los módulos de finura de los áridos correspondientes a los hormigones, en los cuales todo su polvo fino, menor que 0,146 mm., ha sido sustituído por cemento. A estos hormigones los de-

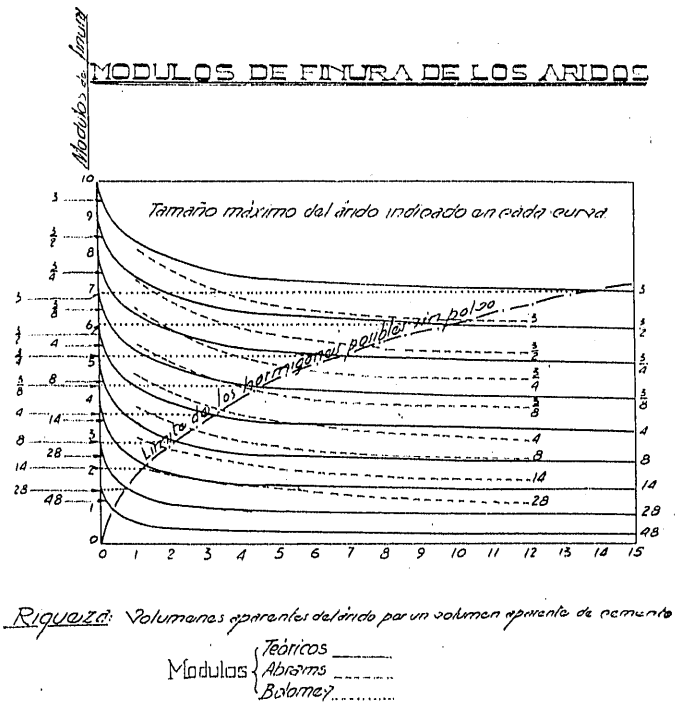


Figura 2.ª

nominaremos, en consecuencia, hormigones sin polvo fino, y su límite es precisamente la diagonal principol, cuya curva límite representativa se dibuja en la figura 2.ª

Excepcionalmente, en el caso de hormigones poco resistentes, y en el de algunos morteros, puede emplearse algo de polvo fino, en sustitución de parte del cemento en esa zona situada sobre la diagonal principal.

Por bajo de esta diagonal, del Cuadro número 2, o de su curva límite representativa en la figura 2.ª, están los hormigones pobres, o sea aquellos en que su polvo fino no puede ser sustituído más que, parcialmente, por el cemento.

Si, por ejemplo, deseamos determinar el módulo de finura correspondiente a la casilla inmediata inferior al módulo de la diagonal principal, 4,43, deter-

minado antes, o sea el que corresponde al tamaño máximo del árido $\frac{3}{8}$, pero cuya dosificación en por ciento de volumen real de cemento sea el 8,8 % en lugar del 12,5 %, le quedará un porcentaje de volumen real de polvo fino de $12,5 - 8,8 = 3,7$ %, que viene representado por $D\,E$ en la figura 1.ª

Si, en estas condiciones, suponemos, para obtener la curva correspondiente al árido, que le quitamos en ese 8,8 % de cemento, obtenemos la curva $C\,E\,M$, en lugar de la $C\,D\,M$, obtenida antes, y su módulo de finura será $\frac{3,888\,(100 - 3,6)}{87,6} = 4,27$.

Análogamente se obtienen los demás módulos situados por bajo de la diagonal principal del Cuadro núm. 2.

Con los módulos obtenidos teóricamente en el Cuadro núm. 2, y los experimentales de Abrams, dibujamos la figura 2.ª, en la que también indicamos los módulos de finura de los áridos de las soluciones tipo Bolomey, que, en la zona que hemos denominado de hormigones sin polvo, son constantemente iguales, para cada tamaño máximo de árido, a los correspondientes a la diagonal principal del Cuadro núm. 2, y en la zona de hormigones con polvo coinciden con los módulos teóricos.

En la zona de los hormigones sin polvo se observa la discrepancia que existe entre las soluciones Abrams y Bolomey, pues los módulos de los áridos correspondientes a esta última son constantes para cada tamaño máximo del árido, lo que está, a su vez, en franca discrepancia con la solución teórica, en la que, más lógicamente, resulta que estos módulos aumentan a medida que aumenta la riqueza en cemento del hormigón.

Aun cuando, sin haber coincidencia absoluta con los teóricos, resulta que los módulos de finura de los áridos obtenidos experimentalmente por Abrams también aumentan al aumentar la riqueza del hormigón, ¿cuál de estas soluciones tipo Bolomey, Abrams o teórica es más aceptable?

Sinceramente, creemos que la solución tipo Bolomey, que tan fundamentalmente discrepa de las otras dos, tiene pocas probabilidades de ser conveniente para la mayoría de los hormigones ricos en cemento y, consecuentemente, sin polvo fino, y entre la solución Abrams y la teórica, que tan lógicamente hemos deducido, estimamos que esta última es muy posible que sea la verdadera, aun cuando también pudiera suceder que consideraciones de trabazón de los hormigones o de sus condiciones de puesta en obra aproximasen aún más esta solución teórica a la de Abrams e incluso a la de Bolomey en algunos hormigones con polvo.

Como el gráfico de los máximos módulos de finura, de Abrams, resulta independiente de las variaciones de consistencia, que tampoco se han tenido en cuenta en la determinación de los teóricos, y las variaciones de riqueza no afectan a los módulos de los áridos, tipo Bolomey, correspondientes a los buenos hormigones, sin polvo fino, es posible que, al tomar conjuntamente en consideración ambas variaciones, de docilidad y de riqueza, todo quede debidamente armonizado y en orden.

La solución Abrams precisa poco el problema, pues, determinado el módulo de finura, deja en excesiva libertad la verdadera composición granulométrica del árido, que, en cambio, queda totalmente precisada por la solución teórica, cuya exposición quizás haya resultado compleja, pero que, en el fondo, no puede ser más sencilla, pues se reduce a determinar la composición granulométrica del conjunto árido-cemento mediante rectas horizontales similares a la $A\,B$, figura 1.ª, cuya ordenada en el origen, $F\,A$, viene precisada por la riqueza del hormigón, en cemento o en conjunto polvo-cemento, según sean mayores las exigencias de la resistencia o de la docilidad, y la rama $B\,C$ de la ley de Fuller,

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

Esta composición granulométrica teórica, $A\,B\,C$, difiere bastante de la curva de Bolomey, $A\,C$, de la que se han separado ya otros investigadores, que, experimentalmente, la han aproximado a la teórica.

Para dilucidar y tratar de aclarar esta interesante cuestión, se precisa efectuar una amplia experimentación, que tan útil resulta siempre, y muy especialmente en la ingeniería, que es quizá la rama del saber humano en la que con más fundamento puede decirse que la experiencia es la madre de la ciencia.

Como consecuencia de este estudio, y a propuesta de la Junta de Investigaciones Técnicas, ha aprobado la Superioridad el plan de ensayos presentado, que también se extenderá a la curva de Ros,

$$P = 50\left(\sqrt{\frac{d}{D}} + \frac{d}{D}\right)$$

y a su modificación, propuesta por el señor Becerril,

$$P = a + \frac{100 - a}{2}\left(\sqrt{\frac{d}{D}} + \frac{d}{D}\right)$$

y empleada desde hace algún tiempo, por el Laboratorio Central, con resultados satisfactorios.

Tendremos al corriente de los resultados que se vayan obteniendo, como consecuencia de la experimentación que se efectúe, a los lectores de la REVISTA, a los que se agradecerán cuantas sugerencias deseen enviar, en relación con este interesante tema, al autor del presente artículo.