

HORMIGONES CON DOSIFICACION DE ARIDOS DISCONTINUA

Por RAMÓN MALLOL FORNÉ, Ingeniero de Caminos.

Trata el autor de las ventajas que puede reportar al hormigón el dosificar los áridos por el método de Vallette, o sea, con gradación discontinua, que si bien hace aumentar el coste de dichos áridos, proporciona economías de cemento y otras ventajas que detalla en su trabajo, proponiendo que se hagan experiencias sobre el particular.

Siendo la relación $\frac{\text{agua}}{\text{cemento}}$ o, con mayor generalidad, una relación de tipo análogo entre el agua, los huecos y el cemento que entran en la composición de un hormigón, el único factor del que, en definitiva, depende la resistencia de un hormigón, es del mayor interés cualquier nuevo paso que se dé en la tarea de conseguir, para una determinada clase de obra y con unos determinados medios de colocación en ella, una dosificación de áridos y de cemento que permita disminuir al máximo aquella relación; es decir, obtener la estrictamente necesaria docilidad con la menor cantidad de agua posible.

Por lo que respecta a la importancia que deba darse al volumen de huecos, durante mucho tiempo se ha dicho que era la misma que la del agua. Así Féret, en primer lugar había dado la fórmula:

$$\text{Resistencia} = k \cdot \left(\frac{C}{A+H} - 0,3 \right)$$

donde C debe expresarse en peso y H en volumen, y, más tarde la modificó por la

$$R = K \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{a+h}{c}} \right)^2$$

donde a , h y c vienen en volúmenes reales, o lo que es lo mismo:

$$R = K \cdot \left(\frac{1}{1 + 3,1 \cdot \frac{A+H}{C}} \right)^2$$

expresando C en peso.

Bolomey recogió la misma fórmula primitiva de Féret, elevando el sustraendo a 0,5:

$$R = k \cdot \left(\frac{C}{A+H} - 0,5 \right)$$

Estas dos últimas fórmulas dan valores que no difieren apreciablemente, dentro de los límites prácticos de $\frac{C}{A+H}$ (0,25 a 1 o poco más), siempre que se adopte $K = 10 \cdot k$.

Este valor de k es $R_m/2,7$, siendo R_m la carga de

rotura del mortero normal ($R_m = 400 \text{ Kg./cm.}^2$ a los veintiocho días, para los cementos portland españoles).

Así, según Féret y Bolomey:

$$R \cong \frac{R_m}{2,7} \cdot \left(\frac{C}{A+H} - 0,5 \right) \cong \frac{R_m}{0,27} \cdot \left(\frac{1}{1 + 3,1 \cdot \frac{A+H}{C}} \right)^2$$

Sin embargo, se ha encontrado posteriormente que la influencia de los huecos es menor que la del agua. Becerril, en la conferencia que en 1934 dió sobre estas materias, en nuestra Escuela, propuso una fórmula del tipo

$$R = K \cdot \left(\frac{1}{1 + 3,1 \cdot \frac{A + \alpha \cdot H}{C}} \right)^2$$

análoga a la segunda de Féret, donde α fuera menor que la unidad, y adelantó que habría de ser del orden de 1/2 a 2/3, probablemente.

Más tarde, Bolomey modificó también la suya, dejándola así:

$$R = k \cdot \left[\left(\frac{\Delta}{2,35} \right)^2 \cdot \frac{C}{A} - 0,5 \right]$$

donde Δ es la densidad del hormigón puesto en obra.

Según ésta, la influencia de los huecos es aún menor que la que correspondería por los valores indicados de α .

De todos modos, lo fundamental es la importancia considerable de la posible reducción del agua, y, aunque menor, de los huecos, para una dosificación en cemento determinada.

Reducir el volumen de huecos es lo mismo que aumentar el volumen real y con él el peso del árido (a cemento constante).

La cantidad de agua que para el amasado con una determinada fluidez (cono de Abrams o mesa de sacudidas) precisa para un peso, P , de árido de tamaños comprendidos entre d_1 y d_2 es, según Bolomey:

$$A = \frac{N \cdot P}{3 \sqrt{d_1 \cdot d_2}}$$

(N para la fluidez 1,7 y materiales redondeados es 0,09. Para diámetros pequeños debe reducirse el valor dado por esta fórmula; así, para $d_1 - d_2$, del orden de 0,15 a 0,30, debe reducirse en un 20 por 100. Para materiales procedentes de machaqueo debe aumentarse en un 20 a 35 por 100).

Por consiguiente, el aumento de volumen real (disminución de huecos) debe procurarse hacerlo con los granos mayores posible, para que en A aumente no sólo el numerador, cuyo aumento será siempre de un orden relativamente pequeño, sino el denominador, que de este modo es susceptible de hacerlo en una medida mucho más grande, con lo que A disminuirá. Dicho de otro modo: no deberán introducirse granos cuyos tamaños sean tales que, sin contribuir suficientemente a disminuir los huecos, contribuyan, en cambio, a aumentar el agua a emplear.

Féret, a últimos del siglo pasado, estudiando mezclas de arenas y gravillas, llegó a la conclusión de que operando con tres conjuntos de granos: gruesos, finos e intermedios entre ambos, y haciendo variar la proporción de cada uno de ellos en una mezcla, cada vez que la relación

$$\frac{\text{granos gruesos} + \text{granos medios}}{\text{granos finos}}$$

pasaba próximamente por 2, se obtenía un mínimo de huecos, y que el mínimo *minimorum* se obtendría para: granos medios = cero.

Así, operando con granos gruesos de 100 a 50, medios de 50 a 20 y finos de 20 a 10, la variación de las compacidades de las diferentes mezclas obtenidas al variar las proporciones entre sí, en un trián-

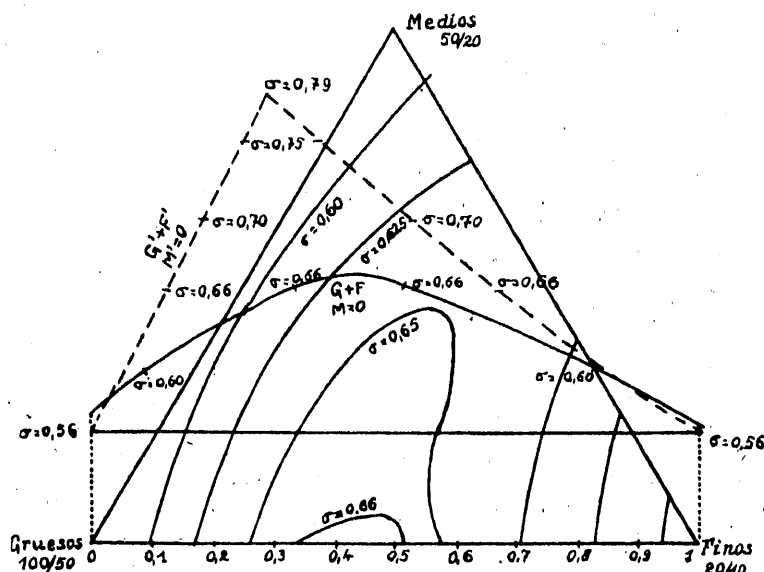


Fig. 1.ª — Compacidades de mezclas secas.

gulo de Féret (en cada vértice supuesto, colocado un peso proporcional al peso empleado del árido respectivo; el punto correspondiente es el centro de gravedad de esos 3 pesos), obtuvo el resultado de la figura 1.ª, Leclerc du Sablon, en 1927.

La línea de trazo seguido $G + F$, representa el corte por el plano vertical GF de la superficie que está representada así en curvas de nivel. Como se ve, el máximo de los máximos de compacidad se obtiene para $M = 0$, y $\frac{G}{F}$ casi igual a 0,5.

La línea de puntos representa el corte por el mismo plano GF de la superficie que análogamente se obtendría operando con granos gruesos de 25 a 16, finos de 3,2 a 1,6 e intermedios de 16 a 3,2.

De ahí se deduce que los granos intermedios son nocivos desde el punto de vista de la eliminación de huecos.

Pensando en que, siendo así, su introducción en una granulometría habría de producir un aumento en el agua de amasado necesaria que no vendría suficientemente compensado por la disminución de huecos que se produciría, poco menor que si no se hubiese empleado más que árido todo él del tamaño máximo, Vallette ha propuesto recientemente en *Travaux* emplear para los hormigones una dosificación de áridos que se separa de las granulometrías continuas que venían estando en boga.

Los resultados teóricos que se obtienen con este método son sensiblemente mejores que los que se alcanzan con aquellas granulometrías, como veremos más adelante. En cuanto a su manipulación, podemos decir que por los modestos ensayos que nosotros hemos llevado a cabo, parece no existir inconveniente alguno por este lado en seguir el camino propuesto por Vallette: con dosificación por m.³ de 330 Kg. de cemento, 880 litros de grava de 60 a 40 mm., 385 litros de gravilla de 11 a 5 mm., 136 litros de arena de 1,6 a 0,8 mm. y 120 litros de agua, no presentó destrabado ninguno, y sometido a un apisonado a mano algo enérgico, pero perfectamente práctico, nos resultó un hormigón bien fabricado. Obsérvese que la relación agua-cemento es sólo de 36,5 por 100, realmente cifra muy baja para un hormigón apisonado y de una riqueza no extraordinaria.

Alcanzamos también buen resultado con la dosificación de 496 Kg. de cemento, 880 litros de grava de 40 a 60, 385 litros de gravilla de 11 a 5 mm., sin arena, y con 140 litros de agua por m.³. Aquí la relación agua-cemento es de 28 por 100.

Parece, pues, muy interesante el nuevo método propuesto, y creemos que trasladarlo a las páginas de nuestra REVISTA significaría que, compañeros con más medios que nosotros, multiplicarán las experiencias, y en caso de obtener en ellas los resultados positivos que se prevén, introduciendo entre nosotros aquella modificación en la manera de dosifi-

car los áridos, habremos dado un paso más hacia la consecución de los mejores y más económicos hormigones.

Por lo pronto, el mismo Vallette recuerda la dosificación empleada en la presa de l'Aigle, explicada en *Le Génie Civil* de 15 de marzo de 1944. Se emplearon tres conjuntos de áridos: de 250 a 100 mm., de 30 a 10 mm. y de 3 a 0, sin tamaños intermedios, de acuerdo con lo que propone el citado Ingeniero.

* * *

Desde que Bolomey dió su conocida ley para la dosificación del conjunto árido-cemento de un hormigón, han sido ya diversas las proposiciones de apartarse de la curva indicada por él.

Entre nosotros, Becerril, observando que aquella ley de Bolomey daba unas proporciones grandes de elementos finos y que, por consiguiente, exigía cantidades de agua algo fuertes, propuso la conocida modificación de la de Röss:

$$n = a + \left(50 - \frac{a}{2}\right) \cdot \left[\sqrt{\frac{d}{D}} + \frac{d}{D}\right].$$

Más tarde, en febrero de 1937, Faury, estudiando hormigones con árido redondeado y de diámetro máximo 20 mm., propuso una nueva curva que se halla situada entre la de Bolomey y la de Röss-Becerril; la proporción de granos finos es intermedia entre las de estas dos, y la de elementos gruesos es prácticamente igual que la de la última. Con respecto a la de Bolomey, además de dar menos finos, como se ha dicho, supone la supresión de una parte de elementos medios (0,5 a 10 mm.), a cambio de ser reemplazados por gruesos (10 a 20). La curva de Faury no es ya continua, sino que presenta un punto singular para el diámetro 10 (igual a 0,5 del máximo empleado en sus experimentos).

En 1941, nuestro Profesor Iribarren (REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS de abril), fundado exclusivamente en razonamientos de una lógica que parece aplastante, propuso que a medida que fuera aumentándose la riqueza en cemento por m.³ de hormigón, simultáneamente fueran suprimiéndose iguales volúmenes reales de áridos finos, empezando por los de mayor finura y continuando por los diámetros sucesivamente mayores. Su razonamiento partía del propósito de alcanzar la máxima compacidad y con los diámetros mayores posible. De este modo se alcanzan módulos de finura, para los áridos, superiores a los indicados por Abrams, y que, como éstos, aumentan al aumentar la riqueza en cemento de la mezcla. Abrams, a su vez, ya había propuesto unos módulos de finura superiores a los de Bolomey.

Con la dosificación de áridos propuesta por Vallette recientemente, se da un paso más allá en el mismo sentido que los que acabamos de recordar, es decir: eliminación de finos por una parte, siempre que

haya suficiente cantidad de cemento para sustituirlos, y por otra, eliminación de tamaños intermedios, dando saltos bruscos de un tamaño al siguiente de una cierta escala. De este modo, las cosas se retrotraen al estado en que las fijó Féret en las fechas indicadas.

Manera de fijar la composición de los hormigones por el procedimiento de Vallette.

a) Para la obra que se trate de realizar, se empezará por fijar el tamaño máximo, D_1 , del árido. Este valor de D_1 debe ser el mayor posible.

El mismo Vallette dice que puede fijarse el valor de D_1 entre 0,8 y 1,0 del valor del radio medio, R , de la parte de pieza a hormigonar, entendiéndose por radio medio la relación entre el volumen a hormigonar y el área de las paredes, incluyendo como tal la de la superficie libre. Para el hormigonado de un firme, por ejemplo, esta regla conduce a adoptar $D_1 = 0,4$ a $0,5$ del espesor del revestimiento (a esto equivale lo que Escario dice que se propuso en el Congreso de La Haya). De este modo resulta tenido en cuenta el "efecto-pared" o aparente repulsión de los granos gruesos por las paredes del encofrado. En hormigón armado, el efecto-pared se presenta también junto a las armaduras, y para tenerlo en cuenta con suficiente garantía, Vallette asegura que es más que suficiente con que, al aplicar su método, se cuente como si el árido de máximo tamaño empleado tuviera 10 litros más de huecos por metro cúbico de los que realmente tenga.

Faury dice que para piezas de hormigón armado, si los materiales son redondeados, puede tomarse $D_1 = 3/4$ de la distancia libre entre armaduras, y si son angulosos, D_1 máximo = $2/3$ de ella.

Fijado D_1 de este modo, se escoge un primer conjunto de granos que llamaremos *elemento primario*, de diámetros comprendidos entre D_1 y d_1 . El ideal sería que d_1 fuese igual a D_1 ; si esto se consiguiera, en primer lugar el agua de amasado necesaria para este elemento primario sería mínima; pero, además, los huecos que entre sí dejarían estos granos serían del tamaño máximo que permitiría la obra a ejecutar, cuyos huecos, para ser rellenados — en la forma que se dirá —, permitirían, a su vez, emplear granos de mayor tamaño que si los huecos fuesen más pequeños, y así sucesivamente.

Como no es prácticamente posible una igualdad de todos los granos entre sí, puede admitirse $d_1 = 0,5$ a $0,6 D_1$, aproximadamente.

No conviene d_1 más pequeño; por ejemplo, $d_1 = 0,2$ a $0,5$ de D_1 , porque el volumen total de huecos sería, de todos modos, poco inferior al que tendría un conjunto de granos uniformemente iguales a D_1 ; los huecos son, naturalmente, más pequeños, pero, en cambio, son más numerosos. No se obtendría, pues, ventaja apreciable ninguna desde el punto de

vista de la compacidad, y en cambio habría de ser mayor la cantidad de agua para el amasado, para una determinada fluidez, para sí y para los sucesivos elementos de relleno.

b) *Hormigón primario*. — Sea H_1 el coeficiente de huecos de este árido, D_1/d_1 , en estado seco; A_1 el agua de amasado que requiere la unidad de volumen aparente de este árido, que puede deducirse, por ejemplo, de la fórmula de Bolomey, fijada la consistencia que se desea obtener y determinando previamente el peso, P , de esta unidad de volumen aparente.

$(H_1 - A_1)$ será el coeficiente de huecos del árido D_1/d_1 , mojado.

La compacidad, o coeficiente de macizos, del árido seco será $\sigma_1 = 1 - H_1$, y la del mismo árido mojado, $\sigma'_1 = 1 - H_1 + A_1$.

Empecemos la experimentación con un volumen aparente, sin apisonar, P_1 , de árido D_1/d_1 ; el total volumen de huecos mojados será $P_1 \cdot (H_1 - A_1)$.

Preparemos ahora este mismo volumen de pasta de cemento igual a $P_1 \cdot (H_1 - A_1)$.

Si se mezcla esta pasta con aquel árido, el volumen que se obtiene es un poco superior al primitivo V_1 ; en cambio no se consigue que esta pasta refluya, y para llegar a este refluido debe añadirse un pequeño exceso de pasta. En el momento en que este efecto empieza a aparecer, se ha alcanzado un volumen aparente total $P'_1 = \frac{P_1}{1 - \alpha_1} > P_1$.

Por consiguiente, para obtener un metro cúbico de hormigón de esta forma, debe partirse, en litros, de un volumen aparente de árido $P_1 = 1000 \cdot (1 - \alpha_1)$.

El volumen de pasta de cemento para este metro cúbico de hormigón es, en litros = $1000 - \text{macizos de } P_1 \text{ mojado} = 1000 - P_1 \cdot (1 - H_1 + A_1) = 1000 - \alpha_1$.

Un Kg. de cemento (densidad real = 3,1) ocupa $1/3,1 = 0,33$ litros reales, y supone, además, el empleo, como mínimo, de $A_c = 0,23$ litros de agua para su amasado; en total, para cada Kg. de cemento empleado se ocupan $0,33 + A_c = 0,56$ litros = σ_c litros reales.

Por consiguiente, si llamamos C_1 la dosificación, en peso, de cemento para aquel hormigón antes definido:

$$\sigma_c \cdot C_1 = 1000 - \sigma_1 \cdot P_1,$$

$$C_1 = \frac{1000 - \sigma_1 \cdot P_1}{\sigma_c}.$$

Si la cantidad de cemento disponible para un hormigón fuese C_1 , no debería emplearse otro árido que el D_1/d_1 ; con cualquier otro, el agua a emplear para la consistencia deseada sería mayor; los huecos no serían menores, puesto que operando como se ha dicho no se dejan huecos y la resistencia sería inferior.

Dosificaciones superiores a C_1 serían, evidentemente, prácticamente absurdas, porque las resistencias no serían apreciablemente superiores.

c) *Hormigones binarios*. — Salvo para morteros, la dosificación C_1 es muy superior a todo lo práctico. Las dosificaciones económicamente posibles para hormigones no permiten llegar a rellenar todos los huecos que deja el elemento primario con pasta de cemento.

A medida que $C < C_1$ vaya disminuyendo, deberá, en su lugar, irse introduciendo nuevos granos de árido del que llamaremos *elemento secundario*.

Los granos de este elemento secundario deberán ser poco distintos entre sí, por las mismas razones expuestas para el primario. Puede admitirse que, siendo D_2 y d_2 sus tamaños extremos, $d_2 = 0,5 \cdot D_2$.

D_2 debe ser lo mayor posible, también por las mismas razones que se dijeron para D_1 .

Pero, por otra parte, es preciso que sea netamente inferior a los tamaños D_1/d_1 ; hemos visto, en efecto, en el caso representado en la figura 1.^a, que con $D_1/d_1 = 100/50$ y $D_3/d_3 = 20/10$, y por consiguiente, $D_2 = 0,40 \cdot d_1$; el máximo de compacidad es de 0,66. Con $D_1/d_1 = 25/16$ y $D_3/d_3 = 3,2/1,6$, es decir, con $D_3 = 0,20 \cdot d_1$, es de 0,79 (obtenido por Vallette). Y para $D_1/d_1 = 3,2/1,6$ y $D_2/d_2 = 0,6/0,3$, o sea $D_2 = 0,37 \cdot d_1$, el mismo Vallette ha encontrado $\sigma = 0,90$.

Bolomey, mezclando gravilla de río de $D_1/d_1 = 10/5$ con arena, también de río, de $D_2/d_2 = 1/0,5$, es decir, con $D_2 = 0,2 \cdot D_1$, alcanzó una compacidad de 74 por 100.

En consecuencia de ello, Vallette adopta $D_2 = 0,2$ a $0,3 \cdot d_1$.

Operemos, como en el apartado anterior, con un volumen aparente P_2 , de árido primario D_1/d_1 , cuyos huecos mojados son, en total, $P_2 \cdot (H_1 - A_1)$.

Agreguemos un volumen aparente de granos D_2/d_2 , S_2 , igual al anterior, $S_2 = P_2 \cdot (H_1 - A_1)$.

Llamemos H_2 , A_2 , σ_2 y σ'_2 a los conceptos análogos a los del párrafo anterior, de iguales letras y subíndices 1.

Si, como antes se dijo para los hormigones primarios, preparamos el volumen suficiente de pasta de cemento para que, añadida a la mezcla de P_2 y S_2 , se llegue a obtener, estrictamente, su refluido, al iniciarse éste se habrá alcanzado un volumen aparente

total un poco superior a P_2 , $P'_2 = \frac{P_2}{1 - \alpha_2}$.

Por consiguiente, para obtener de esta forma un metro cúbico de hormigón, debe emplearse, en litros, un volumen aparente de árido primario:

$$P_2 = 1000 \cdot (1 - \alpha_2).$$

Como $\alpha_2 \neq \alpha_1$, $P_2 \neq P_1$.

El volumen aparente de árido secundario, ya hemos dicho que es:

$$S_2 = P_2 \cdot (H_1 - A_1).$$

Como el volumen real total de elementos primarios mojados es $P_2 \cdot \sigma'_1$, y el de los secundarios $S_2 \cdot \sigma'_2$, el volumen de pasta de cemento necesaria por metro cúbico de hormigón será:

$$1\,000 - P_2 \cdot \sigma'_1 - S_2 \cdot \sigma'_2 = \sigma'_c \cdot C_1,$$

llamando C_2 al peso de cemento correspondiente a aquella pasta.

Por tanto:

$$C_1 = \frac{1\,000 - P_2 \cdot \sigma'_1 - S_2 \cdot \sigma'_2}{\sigma'_c},$$

donde S_2 tiene como máximo valor el indicado de los huecos mojados de P_2 .

Si la dosificación C es tal que:

$$C_1 > C > C_2,$$

no será preciso incluir todo el elemento secundario hasta llenar todos los huecos del primario, sino una cantidad S inferior a la S_2 anterior, y que se deduce de la expresión $1\,000 - P_2 \cdot \sigma'_1 - S_2 \cdot \sigma'_2 = \sigma'_c \cdot C$, análoga a la anterior, en la cual C es la cantidad conocida.

En este caso:

$$S = \frac{1\,000 - P_2 \cdot \sigma'_1 - \sigma'_c \cdot C}{\sigma'_2}.$$

La pasta preparada con C (C_2 como mínimo) rellena los huecos que dejan los granos del árido secundario entre sí y los que quedan entre los del secundario y el primario.

d) *Hormigones ternarios.* — Si la dosificación en cemento que se desea emplear es inferior a C_2 , no puede prepararse con él el volumen de pasta suficiente para rellenar todos los huecos que deja el conjunto de granos primarios y secundarios. Al ir suprimiendo parte de la pasta preparada con C_2 , en su lugar deberán irse introduciendo nuevos granos de otro árido, de tamaño inferior, que llamaremos *elemento terciario*.

Lo que se ha dicho para los elementos anteriores, puede repetirse para éste. Si los tamaños límites son D_3 y d_3 , d_3 debe ser lo más próximo posible a D_3 y puede admitirse:

$$d_3 = 0,5 \cdot D_3 \text{ y } D_3 = 0,2 \text{ a } 0,3 \cdot d_2.$$

Llamamos H_3 , A_3 , σ_3 y σ'_3 a los conceptos análogos a los de los párrafos anteriores.

Operemos, en este caso, con un volumen aparente, P_3 , de árido D_1/d_1 primario.

Añadimos un volumen aparente, S_3 , de granos secundarios, igual al de los huecos mojados de P_3 , es decir:

$$S_3 = P_3 \cdot (H_1 - A_1).$$

Los huecos de este conjunto serán:

$$M_3 = 1\,000 - P_3 \cdot \sigma'_1 - S_3 \cdot \sigma'_2.$$

Añadamos un volumen aparente, T'_3 , de granos terciarios D_3/d_3 , igual a M_3 .

Y, finalmente, el volumen necesario de pasta de cemento para llegar a obtener el relluido; cuando éste se inicie, se alcanzará un volumen total un poco superior a P_3 y que será:

$$P'_3 = \frac{P_3}{1 - \alpha_3}.$$

Resulta, en este caso, $\alpha_3 = \alpha_2$ y, por consiguiente:

$$P_3 = P_2 \text{ y } S_3 = S_2,$$

y el volumen de pasta de cemento necesaria por m.³ de hormigón sería estrictamente:

$$\sigma'_c \cdot C'_3 = 1\,000 - P_2 \cdot \sigma'_1 - S_2 \cdot \sigma'_2 - T_3 \cdot \sigma'_3;$$

donde, como se ha dicho,

$$T'_3 = M_3 = 1\,000 - P_2 \cdot \sigma'_1 - S_2 \cdot \sigma'_2 = \sigma'_c \cdot C_2.$$

Así resultaría:

$$\sigma'_c \cdot C'_3 = M_3 \cdot (1 - \alpha_3).$$

Sin embargo, es aconsejable mezclar un poco menos de granos sólidos, y en cambio un poco más de pasta de cemento, a fin de poder asegurar un relleno mejor por el cemento de los granos inferiores y, por consiguiente, del hormigón. No debe pasarse de un límite superior:

$$T_3 = M_3 \cdot (1 - \alpha_3) = C' \cdot C_2 \cdot (1 - \alpha_3).$$

Entonces:

$$C'_3 = \frac{M_3 - T_3 \cdot \sigma'_3}{\sigma'_c};$$

donde:

$$M_3 = \sigma'_c \cdot C_2 \text{ y } T_3 = \sigma'_c \cdot C_2 \cdot (1 - \alpha_3).$$

Si la dosificación C es tal que:

$$C_2 > C > C_3,$$

no será preciso incluir todo el elemento terciario hasta llenar todos los huecos del conjunto primario + secundario, sino una cantidad, T , inferior a T_3 anterior, y que se deduce de la expresión:

$$\sigma'_3 \cdot T = M_3 - \sigma'_c \cdot C = \sigma'_c \cdot (C_2 - C),$$

en la cual C es la cantidad, en peso, de cemento fijada.

e) *Hormigones cuaternarios.* — Con iguales razonamientos se establece que si C es inferior a C_3

deberá introducirse una cuarta clase de granos de tamaño D_4/d_4 , admitiéndose $d_4 = 0,5 D_4$ y $D_4 = 0,2$ a $0,3 \cdot d_3$, o algo mayor, para que d_4 no llegue a ser menor que 0,16 ó 0,15 mm., que es el diámetro por debajo del cual está, al menos, el 75 por 100 de los granos de los cementos portland, según el Pliego Español para esta clase de cementos.

De análogo modo a como se ha dicho para los hormigones terciarios, si al volumen de pasta $\sigma'_c \cdot C_3$ se llama M_4 , podrá sustituirse ahora este volumen M_4 por igual volumen de granos cuaternarios, pero es conveniente que éste no sea superior a $Q_4 = M_4 \cdot (1 - \alpha'_4)$, con lo cual la dosificación máxima de cemento será C_4 tal que:

$$\sigma'_c \cdot C_4 = M_4 - Q_4 \cdot \sigma'_4 = \sigma'_c \cdot C_3 - Q_4 \cdot \sigma'_4;$$

de donde:

$$C_4 = \frac{\sigma'_c \cdot C_3 - Q_4 \cdot \sigma'_4}{\sigma'_4}$$

Si la dosificación C es tal que $C_3 > C > C_4$, no será precisa tanta cantidad de elemento cuaternario, y ésta se deducirá de la expresión $\sigma'_4 \cdot Q = \sigma'_c \cdot (C_3 - C)$, donde C es conocido.

No tiene ningún interés proseguir en la consideración de la posibilidad de fabricación de hormigones con mayor número de clases de elementos, cuyos hormigones corresponderían a dosificaciones fuera de toda práctica.

De acuerdo con lo que se ha expuesto, la gradación de áridos a que se llega es la siguiente (cuadro copiado del comentado artículo de Vallette):

ELEMENTOS	Hormigones ciclópeos		Hormigones de grava		Hormigones de gravilla	Morteros	
Primario.	400/250	200/120	100/63	63/40	25/16	10/6,3	3,2/1,6
Secundario.	63/32	32/16	16/8	10/5	3,2/1,6	1,6/0,8	0,3/0,16
Terciario.	10/5	5/2,5	2,5/1,2	1,6/0,8	0,6/0,3	—	—
Cuaternario.	1,6/0,8	0,8/0,3	0,32/0,16	0,32/0,16	—	—	—

Y aplicando las indicadas reglas para composición de hormigones a un *hormigón de grava de tamaño máximo* $D_1/d_1 = 63/40$ para ser vibrado, apropiado, por ejemplo, para pavimentaciones de carreteras (flui-

dez medida con el cono de Abrams o mesa de sacudidas = 1,7), se llega a los resultados resumidos en el siguiente cuadro, copiado también del artículo de Vallette:

	VOLUMEN APARENTE DE LOS ELEMENTOS DEL HORMIGÓN (SIN APISONAR)				Dosificaciones límite
	Primario	Secundario	Terciario	Cuaternario	
Hormigones	$D_1/d_1 = 63/40$ $H_1 = 0,45$ (1) $A_1 = 0,010$ $\sigma'_1 = 0,56$ $\alpha_1 = 0,020$	$D_2/d_2 = 10/5$ $H_2 = 0,45$ (1) $A_2 = 0,035$ $\sigma'_2 = 0,68$ $\alpha_2 = 0,030$	$D_3/d_3 = 1,6/0,8$ $H_3 = 0,44$ (1) $A_3 = 0,120$ $\sigma'_3 = 0,68$ $\alpha_3 = 0,020$	$D_4/d_4 = 0,32/0,16$ $H_4 = 0,44$ (2) $A_4 = 0,280$ $\sigma'_4 = 0,84$ —	
Primario.	980 l.	—	—	—	$C_1 = 800$ Kg.
Binarios.	970 l.	$S = 0,96 \cdot (820 - C)$	—	—	$C_2 = 375$ Kg.
Ternarios.	970 l.	$S = 425$	$T = 0,82 \cdot (375 - C)$	—	$C_3 = 126$ Kg.
Cuaternarios.	970 l.	$S = 425$	$T = 206$ l.	$Q = 0,67 \cdot (126 - C)$	$C_4 = 20$ Kg.

(1) $\frac{0,09 \cdot P}{\sqrt[3]{d_1 \cdot d_2}}$

(2) 80 % de $\frac{0,09 \cdot P}{\sqrt[3]{d_1 \cdot d_2}}$

Para 800 Kg. $> C > 375$ Kg., el hormigón sólo contendrá grava y una cantidad de gravilla variable.

A partir de 375 Kg., empezará a contener, además, una cantidad de arena entrefina, que irá creciendo a medida que disminuye la dosificación en cemento.

Cuando la dosificación en cemento empiece a ser

menor de 126 Kg./m.³, deberá el hormigón empezar a contener elementos finos.

Para hormigones del mismo tamaño máximo $D_1/d_1 = 63/40$, para ser empleados por simple apisonado, se estima necesario próximamente un 15 por 100 más de agua en los áridos y se obtienen los resultados siguientes:

	VOLUMEN APARENTE DE LOS ELEMENTOS DEL HORMIGÓN (SIN APISONAR)				
	Primario	Secundario	Terciario	Cuaternario	
Hormigones	$D_1/d_1 = 63/40$ $H_1 = 0,45$ $A_1 = 0,012$ $\sigma'_1 = 0,56$ $\alpha_1 = 0,100$	$D_2/d_2 = 10/5$ $H_2 = 0,45$ $A_2 = 0,040$ $\sigma'_2 = 0,59$ $\alpha_2 = 0,120$	$D_3/d_3 = 1,6/0,8$ $H_3 = 0,44$ $A_3 = 0,135$ $\sigma'_3 = 0,695$ $\alpha_3 = 0,080$	$D_4/d_4 = 0,32/0,16$ $H_4 = 0,44$ $A_4 = 0,300$ $\sigma'_4 = 0,86$ —	Dosificaciones límite
Primario	900 l.	—	—	—	$C_1 = 880$ Kg.
Binarios	880 l.	$S = 0,95 \cdot (900 - C)$	—	—	$C_2 = 467$ Kg.
Ternarios	880 l.	$S = 385,5$	$T = 0,80 \cdot (500 - C)$	—	$C_3 = 166$ Kg.
Cuaternarios	880 l.	$S = 385,5$ l.	$T = 240$ l.	$Q = 0,65 \cdot (178 - C)$	$C_4 = 32$ Kg.

Para hormigones de tamaño máximo, de árido $D_1/d_1 = 25/16$, para ser vibrados (fluidez = 1,7), los resultados son los siguientes:

	VOLUMEN APARENTE DE LOS ELEMENTOS DEL HORMIGÓN (SIN APISONAR)			
	Primario	Secundario	Terciario	
Hormigones	$D_1/d_1 = 25/16$ $H_1 = 0,45$ (1) $A_1 = 0,018$ $\sigma'_1 = 0,568$ $f_1 = 0,020$	$D_2/d_2 = 3,2/1,6$ $H_2 = 0,44$ (1) $A_2 = 0,070$ $\sigma'_2 = 0,63$ $f_2 = 0,020$	$D_3/d_3 = 0,6/0,3$ $H_3 = 0,44$ (2) $A_3 = 0,180$ $\sigma'_3 = 0,74$ —	Dosificaciones límite
Primarios	980 l.	—	—	$C_1 = 785$ Kg.
Binarios	980 l.	$S = 0,89 \cdot (785 - C)$	—	$C_2 = 309$ Kg.
Ternarios	980 l.	$S = 424$ l.	$T = 0,76 \cdot (309 - C)$	$C_3 = 80$ Kg.

$$(1) \frac{0,09 \cdot P}{\sqrt[3]{d_1 \cdot d_2}}$$

$$(2) 80\% \text{ de } \frac{0,09 \cdot P}{\sqrt[3]{d_1 \cdot d_2}}$$

Para morteros de máximo $D_1/d_1 = 10/6,3$, y para dosificaciones corrientes (inferiores a 770 Kg./m.³ y superiores a 270 Kg./m.³), corresponde:

Árido primario:

$$D_1/d_1 = 10/6,3, \text{ con } H_1 = 0,45, A_1 = 0,035, \sigma'_1 = 0,585, \\ P = 980 \text{ litros.}$$

Árido secundario:

$$D_2/d_2 = 1,6/0,8, \text{ con } H_2 = 0,44, A_2 = 0,120, \sigma'_2 = 0,68, \\ S = 0,82 \cdot (770 - C).$$

Para morteros de tamaño máximo $D_1/d_1 = 3,2/1,6$ para moldeados y para C entre 180 y 700 Kg./m.³:

Árido primario:

$$D_1/d_1 = 3,2/1,6, \text{ con } H_1 = 0,44, A_1 = 0,070, \sigma'_1 = 0,63,$$

$$P = 970 \text{ litros.}$$

Árido secundario:

$$D_2/d_2 = 0,3/0,16, \text{ con } H_2 = 0,44, A_2 = 0,280, \sigma'_2 = 0,84,$$

$$S = 0,67 \cdot (700 - C).$$

Para morteros con igual máximo $D_1/d_1 = 3,2/1,6$ para enlucidos, conviene que la pasta de cemento esté en exceso con respecto al volumen total de huecos que deja el conjunto de granos primarios y los secundarios intercalados entre los huecos de los primarios. Para C entre 400 y 800 Kg./m.³:

Árido primario:

$$D_1/d_1 = 3,2/1,6, \text{ con } H_1 = 0,44, A_1 = 0,070, \sigma'_1 = 0,63,$$

$$P = 880 \text{ litros.}$$

Árido secundario:

$$D_2/d_2 = 0,3/1,6, \text{ con } H_2 = 0,44, A_2 = 0,280, \sigma'_2 = 0,84,$$

$$S = 0,67 \cdot (800 - C).$$

Comparación con otros diversos métodos de dosificación.

Procederemos a comparar los resultados que, teóricamente, se deducen del expuesto procedimiento de Vallette para dosificar los áridos en los hormigones, con los que deben esperarse de los hasta ahora más o menos corrientes métodos.

Hemos limitado el establecimiento de esta comparación al caso de hormigones destinados a ser puestos en obra por vibración (fluidez = 1,7) y con tamaño máximo, de árido $D_1/d_1 = 63/40$ mm.

Dosificando al agua de acuerdo con la fórmula de Bolomey $\frac{0,09 \cdot P}{\sqrt[3]{d_1 \cdot d_2}}$, aplicada a los sucesivos tamaños

del árido con una operación cuidadosa, el % de huecos que pueden quedar en la mezcla es insignificante y sin valor práctico alguno para nuestra comparación, la cual podrá, por consiguiente, limitarse a la de las diferentes cantidades de agua que para el amasado con aquella fluidez deben emplearse según uno u otro procedimiento seguido.

Para los sucesivos tamaños del árido, las cantida-

des de agua requeridas para aquella fluidez, son las siguientes:

Tamiz, número	Milímetros	Litros de agua por un litro real de árido
3/2	37,70	0,021
3/4	18,85	0,034
3/8	9,42	0,053
4	4,70	0,085
8	2,36	0,120
14	1,17	0,220
28	0,59	0,303
48	0,295	0,425
< 48	< 0,295	0,610

a) *Procedimiento de Vallette.* — Los valores del cuadro anterior para los volúmenes reales (o los que ya se expusieron más arriba para los volúmenes aparentes), dan:

Para $800 > C > 375$ (hormigones binarios):

$$A = 37,2 + 0,196 \cdot C \cdot \frac{A}{C} = \frac{37,2}{C} + 0,196.$$

Para $375 > C > 126$ (hormigones ternarios):

$$A = 61,5 + 0,132 \cdot C \cdot \frac{A}{C} = \frac{61,5}{C} + 0,132.$$

Para $126 > C > 20$ (hormigones cuaternarios):

$$A = 72,9 + 0,04 \cdot C \cdot \frac{A}{C} = \frac{72,9}{C} + 0,04.$$

C , en Kg./m.³; A , en litros/m.³.

b) *Ley de Bolomey:*

$$p = 10 + 90 \cdot \sqrt{\frac{d}{D}},$$

correspondiente a la fluidez 1,7 y áridos redondeados.

Esta ley engloba, como es sabido, en la misma fórmula, el volumen real de árido y el volumen real de cemento.

Sea, por ejemplo, el caso particular en que el % de volumen real de cemento es 16,21 por 100 (que es el % correspondiente, según aquella ley, a lo que pasa por el tamiz número 48 = 0,295 mm. Recuérdese que, según el Pliego Oficial Español, el cemento portland no debe dejar en el tamiz núm. 48, de 900 mallas por cm.², más de un 3 por 100 retenido, o sea que puede considerarse que el diámetro máximo de los cementos portland españoles es 0,295 mm.).

El % de árido en volumen real es, pues, = 83,79 por 100.

En este caso, por cada litro real de cemento, es decir, por cada 3,1 Kg. de cemento, hay $\frac{83,79}{16,21} = 5,15$

litros reales de árido:

Volumen real de cemento.....	1,00	litros.
Idem íd. de árido.....	5,15	"
Agua... { Para el cemento = $3,1 \cdot 0,23$	0,71	"
{ Para el árido (aplicadas las cifras del cuadro anterior) = $5,15 \times 0,0689$	0,355	"

Suma de volúmenes reales... 7,215 litros.

$$\text{Relación } \frac{A}{C} = \frac{1,065}{3,1} = 0,345.$$

Dosificación en cemento muy aproximada = $3,1 \cdot \frac{1000}{7,215} = 430$ Kg./m.³. Falta tener en cuenta, de este modo, el % de huecos que resulte, pero teniendo que ser éste muy pequeño si la manipulación se hace cuidadosamente, los resultados no varían apreciablemente.

De una manera análoga se han buscado los demás valores de la relación $\frac{A}{C}$ que corresponden a las demás dosificaciones de cemento por m.³, determinando siempre, a partir de la curva de Bolomey indicada, y para cada dosificación, los sucesivos % de árido correspondiente a cada uno de los distintos tamices de la serie de Tyler, indicados en el cuadro anterior, y el agua que a ellos corresponde, según la fórmula de Bolomey y con la densidad 2,6.

c) *Ley de Röss, modificada por Becerril:*

$$p = 10 + 45 \cdot \left[\sqrt{\frac{d}{D}} + \frac{d}{D} \right].$$

Se ha operado de una manera análoga a como se ha dicho para la de Bolomey, y naturalmente, se han obtenido relaciones menores de $\frac{A}{C}$, puesto que son menores las cantidades de finos (mayores los módulos de finura) que da esta expresión.

d) *Ley teórica de Iribarren* (REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, 1.º de abril de 1941).

Sea, por ejemplo, el caso

$$\frac{\text{volumen aparente de cemento}}{\text{volumen aparente de árido}} = \frac{1}{3},$$

correspondiente a una de las dosificaciones así definidas por Abrams.

El volumen real de cemento = $\frac{1,5/3,1}{3/0,7} = 0,23$ del volumen real del árido, supuesto para éste un coeficiente de huecos en seco y sin apisonar de 30 por 100, poco más o menos el supuesto por Iribarren en aquel artículo citado. Los resultados que perseguimos varían muy poco, aunque el % de huecos sea distinto a este supuesto.

El volumen real de cemento aun es igual al $\frac{23}{1,23} \equiv 18,6$ por 100 del volumen real del total árido + cemento.

Así, para cada litro real de cemento:

Volumen real de cemento.....	1,00	litros.
Idem íd. de árido.....	4,35	"
Agua... { Para el cemento = $3,1 \times 0,23$	0,71	"
{ Para el árido (cifras cuadro anterior) = $4,35 \times 0,0435$	0,19	"

Suma de volúmenes reales... 6,25 litros.

$$\text{Relación } \frac{A}{C} = \frac{0,90}{3,10} = 0,29.$$

Dosificación en cemento muy aproximada =

$$= 3,1 \times \frac{1000}{6,25} = 496 \text{ Kg./m.}^3.$$

Si bien no se ha tenido en cuenta, así, el % de huecos, como éste es muy pequeño, no varían con ello de modo apreciable los resultados.

Y de un modo análogo se han buscado nuevos valores de la relación $\frac{A}{C}$ para otras dosificaciones.

e) *Ley de Abrams*. — Como se sabe, Abrams se limitó a indicar cuáles debían ser los módulos de finura adecuados para el árido a emplear para cada determinada dosificación en cemento, que él determinó en volúmenes aparentes, pero no concretó ley alguna de gradación para estos áridos.

Gómez Simón, en la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS de febrero y marzo últimos, puntualizó unas curvas de dosificación, cuyos módulos de finura están de acuerdo con los propuestos por Abrams, y que él ha encontrado ser las mejores, según experiencias que ha realizado sobre morteros con diámetro máximo de árido = 6,68 mm. (intermedio entre los tamices 3/8 y 4), y que ha generalizado para diámetros mayores.

Así, por ejemplo, para la misma dosificación de Abrams antes considerada:

$$\frac{\text{volumen aparente de cemento}}{\text{volumen aparente de árido}} = \frac{1}{3};$$

el valor de n correspondiente en el cuadro intercalado por Gómez Simón en el número de la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS de marzo último es algo inferior

Dosificación en cemento muy aproximada =

$$= 3,1 \cdot \frac{1000}{6,38} = 485 \text{ Kg./m.}^3.$$

Y las mismas operaciones se han llevado a cabo para distintas dosificaciones.

En el gráfico (fig. 2.^a) se han reunido todos los valores así encontrados: en las curvas de trazo dis-

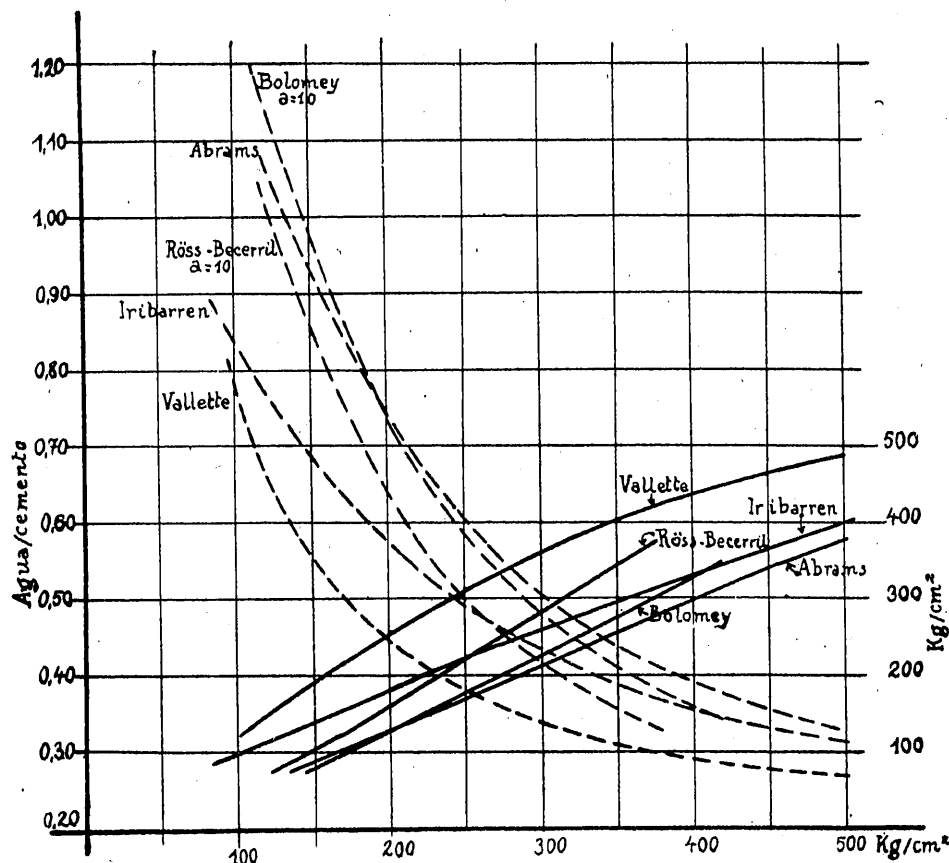


Fig. 2.^a — Relación A/C y resistencias de diferentes hormigones de consistencia igual a 1,7.

a 0,671. Hemos trazado así la curva correspondiente para el diámetro máximo 63 mm., y para ésta hemos aplicado los valores del cuadro antes escrito. Y así se obtiene, para un litro real de cemento y los 4,35 litros reales de árido que corresponden:

Volumen real de cemento.....	1,00	litros.
Idem íd. de árido.....	4,35	"
Agua... { Para el cemento = $3,1 \times 0,23...$	0,71	"
{ Para el árido = $4,35 \times 0,0742...$	0,32	"

Suma de volúmenes reales... 6,38 litros.

$$\text{Relación } \frac{A}{C} = \frac{1,03}{3,1} = 0,33.$$

continuo aparecen los sucesivos valores de la relación $\frac{A}{C}$, y en las de línea llena, los correspondientes de la resistencia del hormigón resultante, a compresión, a los veintiocho días, según la expresión:

$$R = \frac{400}{2,7} \cdot \left(\frac{C}{A} - 0,5 \right) = \frac{400}{0,27} \cdot \left(\frac{1}{1 + 3,1 \cdot \frac{A}{C}} \right)^2.$$

Como se ve, es notable la ventaja obtenida por la nueva manera de dosificar los áridos que propone Vallette; en muchas ocasiones no ha de suponer una condición difícil de cumplir la de exigir que los áridos

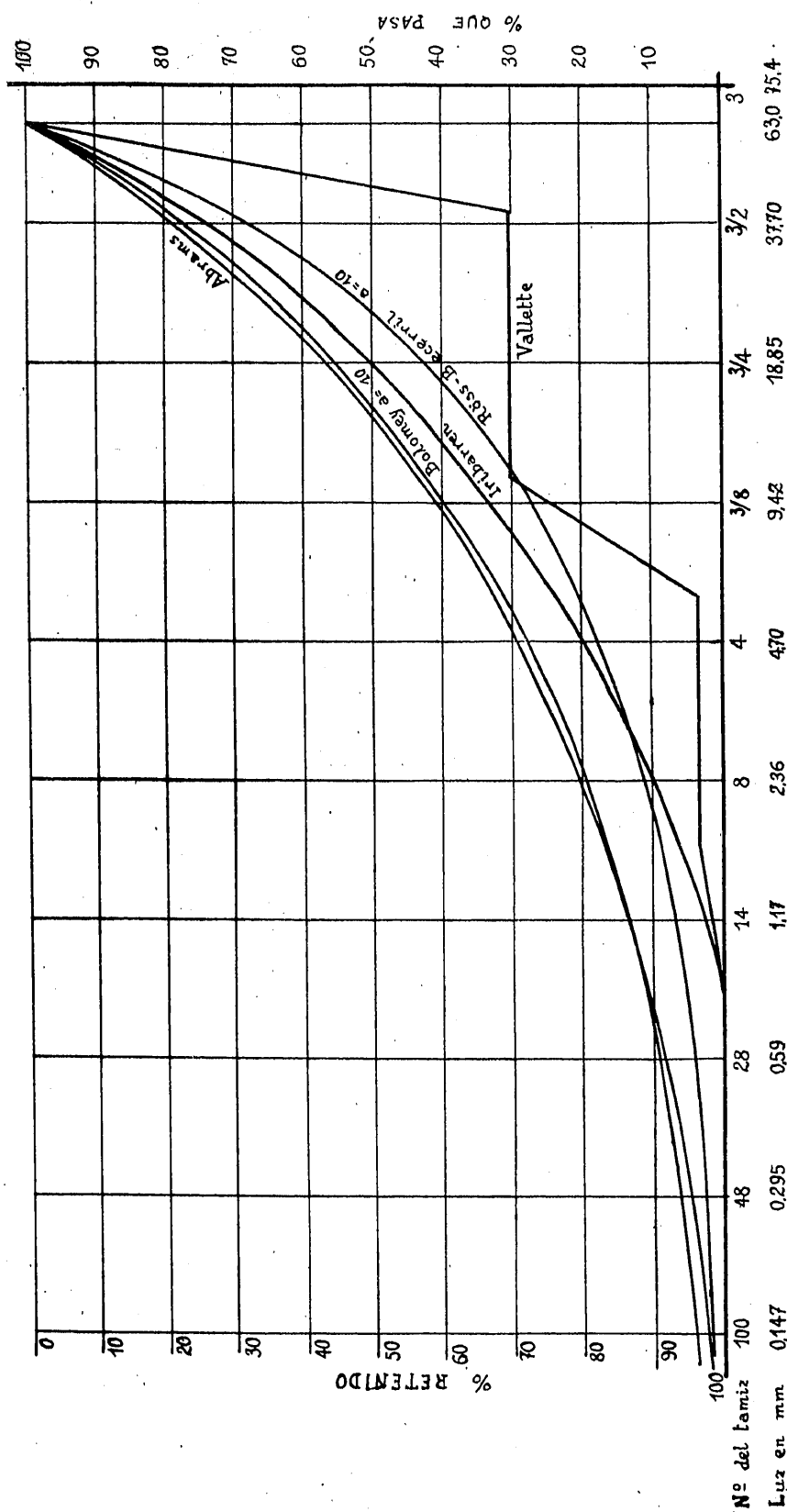


Fig. 3.ª — Granulometrías del árido para hormigones de 300 Kg./m.³ y fluidez igual a 1,7.

suministrados se ajusten a la gradación discontinua de este método. Y aunque ello redunde, otras veces, en un encarecimiento de los áridos, no debe olvidarse que el precio de éstos, en muchas ocasiones, es solamente un tanto por ciento muy pequeño del coste total del metro cúbico de hormigón y, por consiguiente, aquel aumento en el precio de su suministro no ha de ser apenas sensible en el total del presupuesto, por lo que merece la pena la mejora del hormigón a costa de este pequeño aumento. Además, a cualquier mejora puede corresponder, y lógicamente corresponde, la posibilidad de disminuir la dosificación en cemento de manera que, en general, creemos que ésta no sólo ha de contrarrestar, sino que superará el exceso de coste de los áridos. Y si la dosificación, una

vez fijada, no quiere variarse, habremos aumentado el coeficiente de seguridad a costa de muy poco.

Repetimos que nosotros no hemos tenido ocasión más que de comprobar que algunos de los hormigones así definidos son bien trabajables, pero que creemos de notable interés que otros compañeros que crean igualmente interesante el método, vayan más allá en las experiencias.

En la figura 3.^a hemos dibujado las diferentes granulometrías que, siguiendo los diversos métodos, corresponden para el árido de un hormigón de 300 kilogramos de cemento por m.³ y de fluidez = 1,7. El módulo de finura para el procedimiento de Vallette, como se ve, es sensiblemente superior al de todos los demás.
