

LOS ARIDOS EN EL HORMIGON

Por FAUSTO GOMEZ SIMON, Ingeniero de Caminos.

Termina en este artículo el trabajo que sobre el tema del epígrafe iniciamos en el número anterior, y en el que el autor aporta los resultados de su propia experiencia en varias obras ejecutadas.

(Conclusión.)

Una serie de curvas de graduación de áridos.

En el artículo anterior se ha puesto patente el interés de emplear el módulo más alto posible o, lo que es igual, el árido más grueso, dentro de un tamaño máximo de éste en relación con la riqueza de mezcla empleada. El tomar un módulo excesivo, para una mezcla dada, da lugar a un mortero u hormigón que prácticamente no puede emplearse, por no ser trabajable; por el contrario, emplear un árido de módulo bajo implica el gastar más agua y, consecuentemente, más cemento; si, por tanto, en la serie de 35 por 100 de cemento hubiéramos llegado a emplear la arena de coeficiente 1,10, que seguramente es excesivo aun para la mezcla más pobre, hubiéramos visto que era precisa una cantidad muy grande de agua, con notable pérdida en la resistencia y hasta en la densidad.

Los ensayos efectuados con árido de tamaño máximo 6,68 (1/4) podían haberse, igualmente, efectuado aumentando el tamaño máximo del árido a 3/8", 3/4", 1 1/2", 3" y 6", y extendidos a diferentes dosificaciones podrían, dentro de áridos de igual tamaño máximo, obtenerse los coeficientes más apropiados para las distintas proporciones de cemento, comprobando de esta forma, de una manera ordenada y a base de áridos de la práctica, la tabla de Abrams.

Ninguna novedad se presentaría en los ensayos, con respecto a los ejecutados; únicamente que, en virtud de crecer el máximo tamaño del árido, habría de operarse con volúmenes cada vez mayores, tanto por la prueba de fluidez como por la relación, obligada, de las dimensiones de los cubos, en relación con el tamaño máximo del árido en cada caso; más expeditivamente podría tomarse la fluidez cribando, del hormigón, hasta un cierto tamaño, con el que se operaría para la fluidez, y de esta mezcla podrían hacerse los cubos para los ensayos de resistencia, que serían una confirmación de que la mayor resistencia habría de encontrarse en la mezcla que menos agua

hubiera admitido y de módulo concordante con el correspondiente de la tabla de Abrams.

Mediante muchísimos ensayos llegó Abrams a fundamentar sus estudios sobre hormigones, fijando su famosa tabla de módulos de finura, que, por su gran interés, no es ocioso que aquí se repita, omitiendo los valores en ella consignados para 4 1/2", 2,1", 1", 1/2", 3, que pueden obtenerse fácilmente por interpolación.

Tabla de módulos de finura, de Abrams.

Mezclas en volumen	Tamaño máximo del árido									
	0,58 28	1,17 14	2,36 8	4,7 4	9,4 3/8"	18,8 3/4"	37,7 1 1/2"	75,4 3"	150,8 6"	
1 : 12	1,20	1,80	2,40	2,95	3,80	4,60	5,35	6,20	7,00	
1 : 9	1,30	1,85	2,45	3,05	3,85	4,65	5,40	6,25	7,05	
1 : 7	1,40	1,95	2,55	3,20	3,95	4,75	5,55	6,40	7,20	
1 : 6	1,50	2,05	2,65	3,30	4,05	4,85	5,65	6,50	7,30	
1 : 5	1,60	2,15	2,75	3,45	4,20	5,00	5,80	6,60	7,45	
1 : 4	1,70	2,30	2,90	3,60	4,40	5,20	6,00	6,85	7,65	
1 : 3	1,85	2,50	3,10	3,90	4,70	5,50	6,30	7,15	8,00	
1 : 2	2,00	2,70	3,40	4,20	5,05	5,90	6,70	7,55	8,40	
1 : 1	2,25	3,00	3,80	4,75	5,60	6,50	7,35	8,20	9,10	

Dicha tabla responde al empleo de áridos naturales de forma esferoidal, pues si se emplea piedra machacada, escoria o grava naturales de tipo aplanado, hay que reducir el valor en 0,25; si la grava triturada es en forma de lascas, la rebaja es de 0,40, y cuando la arena es de trituración, hay que hacer una nueva rebaja al módulo a emplear de 0,25.

Por el contrario, cuando la más pequeña dimensión en obra es mayor que 10 veces el tamaño máximo del árido, puede aumentarse el módulo: para 3/4" — 0,10; 1 1/2" — 0,20; 3" — 0,30, y 6" + 0,60.

Con objeto de facilitar el empleo de esta tabla y suplir lo que indudablemente constituye una dificultad, al no darse por Abrams una ley de graduación de tamaños del árido, como hace Bolomey, nos hemos tomado el trabajo de traducir esta tabla a áridos del tipo indicado, en nuestro artículo anterior.

Sin embargo, en vez de contar con todos los tamices, que aparecían en la figura 1.^a, se consideran solamente los que fijan el módulo de finura, con lo que el número de tamices a emplear se reduce a la mitad, lo que es muy suficiente, aun operando con detalle.

De esta forma, lo retenido en cuatro tamices sucesivos de la serie total, que serían, para un coeficiente de árido, n cantidades proporcionales a n^p , n^{p+1} , n^{p+2} , n^{p+3} , agrupando en uno lo retenido en dos tamices, lo retenido en dos tamices sucesivos será $n^p + n^{p+1}$ y $n^{p+2} + n^{p+3}$; por tanto, la relación de lo retenido entre dos tamices, que antes era $\frac{1}{n}$,

ahora $\frac{1}{n^2}$, o sea que al coeficiente de 0,90, de antes, le corresponde 0,81, y al que representaba la ley parabólica 0,84 le corresponde ahora 0,707; a esta serie de tamices nos referiremos, pues, en lo sucesivo, al hablar de los coeficientes de las curvas de áridos.

Referidos los módulos de finura de la tabla de Abrams, para cada tamaño máximo de árido y sus mezclas, a los coeficientes de formación de las curvas indicadas para sus respectivos tamaños de áridos, la tabla de Abrams se transforma en la siguiente. en la que, por lo tanto, los valores indicados son los valores de n para formar la serie de cantidades 1, n , n^2 , n^3 , ..., y poder dibujar la curva de graduación de tamaños del árido, de tal modo que su módulo de finura es el de la tabla de Abrams correspondiente.

Coefficientes de formación de curvas de graduación de áridos, correspondientes a los valores de la tabla de Abrams.

Mezclas en volumen	Tamaño máximo del árido					
	4,7 4	9,4 3/8"	18,8 3/4"	37,7 1 1/2"	75,4 3"	150,8 6"
12	0,851	0,810	0,801	0,805	0,800	0,802
9	0,823	0,800	0,793	0,798	0,793	0,798
7	0,779	0,778	0,775	0,777	0,774	0,781
6	0,750	0,756	0,757	0,762	0,761	0,770
5	0,704	0,721	0,730	0,738	0,748	0,754
4	0,658	0,674	0,691	0,707	0,714	0,729
3	0,568	0,601	0,631	0,656	0,671	0,684
2	0,460	0,500	0,536	0,576	0,604	0,625

Las correcciones que hemos indicado para la tabla de Abrams para áridos de forma no esférica y triturados son aquí, igualmente, aplicables aumentando el coeficiente; para mayor facilidad, acompañamos el siguiente cuadro de coeficientes y sus respectivos módulos:

Módulos de finura para distintos coeficientes y tamaños máximos del árido.

Coefficientes	4,7 4	9,42 3/8"	18,85 3/4"	37,7 1 1/2"	75,4 3"	150,8 6"
0,84	2,999	3,681	4,386	5,117	5,869	6,644
0,80	3,132	3,858	4,613	5,395	6,203	7,033
0,76	3,265	4,034	4,835	5,665	6,521	7,398
0,72	3,400	4,209	5,051	5,922	6,817	7,734
0,707	3,443	4,265	5,119	6,002	6,909	7,835
0,68	3,533	4,380	5,258	6,164	7,091	8,035
0,64	3,665	4,544	5,453	6,387	7,339	8,304
0,60	3,794	4,701	5,634	6,590	7,559	8,548
0,56	3,918	4,850	5,805	6,756	"	"
0,52	4,038	4,989	5,959	"	"	"
0,48	4,151	5,118	"	"	"	"

Conocido el tamaño máximo del árido, y a base de la densidad aparente del cemento de 1,5, se determina la proporción de mezcla en volúmenes, para la dosificación en Kg./m.³ a emplear, y a continuación se halla el coeficiente que define la curva de graduación correspondiente.

Si son necesarias las correcciones indicadas en el cuadro que acabamos de señalar, puede determinarse el coeficiente a emplear redondeándolo en dos cifras decimales.

Si, pues, se trata de un hormigón de tamaño máximo del árido de 75,4 mm., se forman diez cantidades con el coeficiente correspondiente a la proporción de mezcla; a continuación, sus proporcionales de suma cien, lo que con regla de cálculo se hace rapidísimamente, y luego se obtienen sucesivamente, por suma, los tantos por ciento retenidos en la serie de tamices para dibujar la curva.

Si se trata de un árido de tamaño máximo intermedio entre los indicados, se forma la serie de cantidades como antes, siendo 1 la primera, que será el segundo término de la serie y, por tanto, lo retenido por el segundo tamiz, y si b es lo retenido, entre el tamaño máximo y el primer tamiz se tiene:

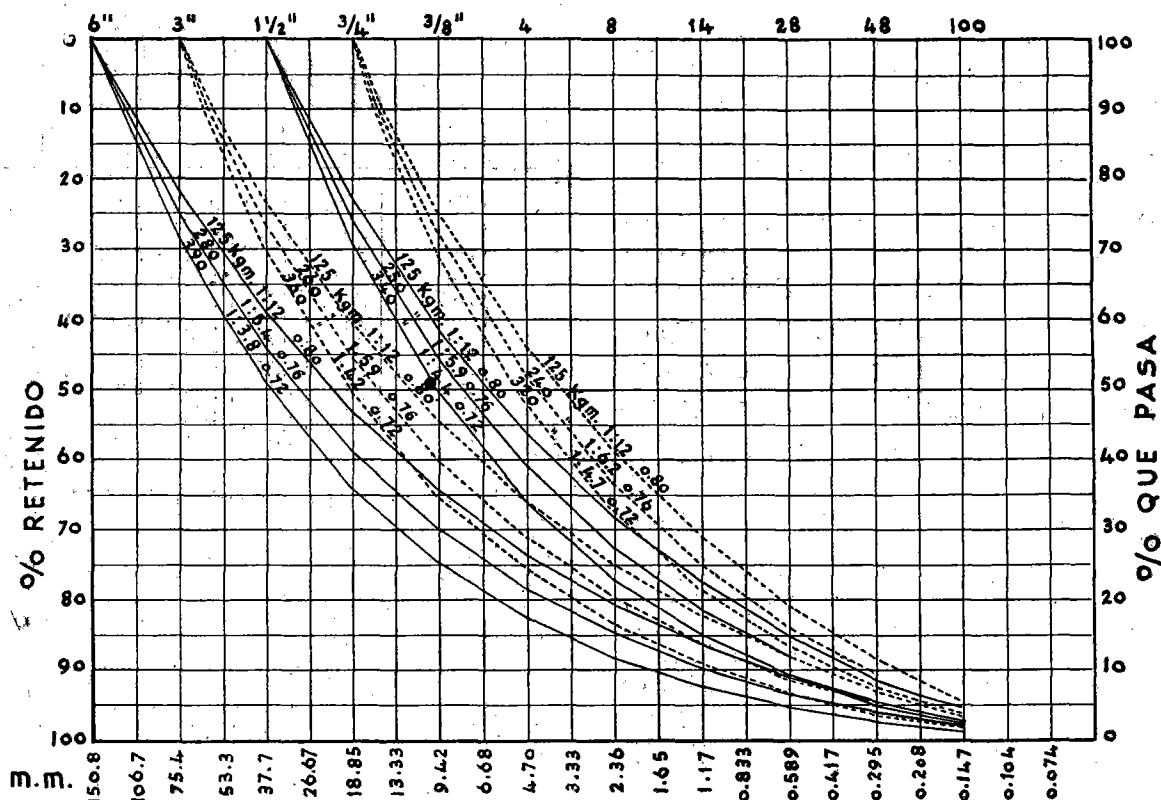
$$1 = b \sqrt{n} + b n; \quad \text{luego } b = \frac{1}{n + \sqrt{n}}$$

con lo que se tiene el primer término, y se procede luego como se ha indicado.

Así, pues, si el tamaño máximo del árido es 4 1/2" 106,7 mm., formaremos primeramente una serie de diez cantidades 1, n , n^2 , ..., n^9 , de las cuales, la primera es lo retenido por el tamiz 1 1/2"; la primera será, por tanto:

$$b = \frac{1}{n + \sqrt{n}}$$

Estos áridos responden a una ley de continuidad de tamaños y son susceptibles de obtenerse con las trituradoras empleadas en la preparación de áridos, disponiendo las máquinas apropiadas, sin necesidad



de llegar a instalaciones que por su costo sean prohibitivas; es relativamente fácil obtener áridos obedeciendo a esta ley de coeficientes con la suficiente aproximación práctica, lo que hemos podido comprobar en varios casos.

En la figura que se acompaña aparecen las curvas 0,80, 0,76 y 0,72, con sus correspondientes mezclas, en volumen y en kilogramos por metro cúbico de árido, para 6, 3, 1 1/2, 3/4; para las dosificaciones más frecuentes, se ve que las curvas oscilan de 0,80 a 0,70.

La conocida fórmula de Bolomey:

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

en donde se obtiene el tanto por ciento, P , en peso, de la mezcla árido/cemento, menor que un tamaño d ; en la que A es un coeficiente variable, y D , el máximo tamaño del árido empleado, es una muy ingeniosa divulgación de los conocimientos de su época, en la que ya eran bien conocidos los trabajos de Abrams. Es, pues, de un verdadero acierto encerrar en una fórmula de tanta sencillez una ley de variación del tipo del árido, en relación con el tamaño máximo del mismo, la proporción de mezcla y hasta teniendo en cuenta la naturaleza del árido, con sólo hacer variar el valor de A .

Si se mira en la tabla de Abrams, para 1 1/2" y mezclas de 1:5,5 y 1:12, correspondientes a 270 kilogramos (12 por 100 de cemento) y 125 kilogramos

de cemento por metro cúbico, se ve que para la primera el módulo es 5,73, y para la segunda, 5,35.

Con la fórmula de Bolomey y $A = 12$ para la primera mezcla, el módulo es el correspondiente a la ley parabólica, que resulta ser: para 6—7,663, 3—6,694, 1/2—5,738, 3/4—4,800, 3/8—3,888 y 4—3,012, se ve que la diferencia de módulo es insignificante.

Para la mezcla 1:12, correspondiente, aproximadamente, a 125 Kg. de cemento por metro cúbico, y si los componentes secos pesan 2.250 Kg., entra de cemento el 5,56 por 100, y el fino adicional y árido, según la ley parabólica, son 6,44 y 88, respectivamente, y, por tanto, el árido obedece a la ley $P =$

$$= 6,8 + 93,2 \sqrt{\frac{d}{D}}, \text{ y su módulo de finura es, por}$$

tanto, $0,932 \times 5,738 = 5,35$, o sea igual que en la tabla de Abrams, y para las dosificaciones intermedias, los módulos obtenidos por la tabla de Abrams y los resultantes, para el árido total, de la fórmula de Bolomey tienen que ser naturalmente muy concordantes.

Las diferencias son mayores a medida que nos apartamos del tamaño citado; nótese, en la tabla de Abrams, que el doblar el tamaño máximo del árido, para igual proporción de mezcla, implica un aumento de módulo del orden 0,80, siendo así que el aumento de módulo al emplear árido de tamaño doble pro-

duce en la fórmula de Bolomey un aumento en las mezclas interesante, del orden de 0,95; lo que se traduce en que a medida que se emplean áridos cada vez más gruesos, a partir de 37,7 mm., el módulo del árido resultante derivado de la fórmula de Bolomey discrepa cada vez más, y por exceso, del correspondiente a la tabla de Abrams, y en cambio, al disminuir el tamaño máximo del árido, cada vez discrepan más, y por exceso, los valores de la tabla de Abrams respecto a los de Bolomey.

Es lógico, para áridos de trituración, y más aún si ésta da preponderancia de elementos de forma muy irregular y aristas vivas, aumentar el valor de A ; con ello, para igual proporción de mezcla se aumenta el fino menor de 100 en el árido, y con ello no se hace sino rebajar el módulo de finura; no vemos, en cambio, la necesidad de variar A con la fluidez, pues un árido óptimo para una fluidez, lo es igualmente dentro de cierta variación en la misma.

El árido, pues, en la fórmula de Bolomey se descompone en dos partes: una, la principal, compuesta de un árido según la ley parabólica, y otra, una pequeña parte de elementos muy finos, tanto mayor cuanto más pobre en cemento es la mezcla; o sea, en total, un árido de ley discontinua, lo que es un inconveniente para la producción total del árido.

Es, pues, más precisa la tabla de Abrams para todos los casos de tamaño máximo del árido y tipo de mezcla, y auxiliada de los coeficientes, las curvas obtenidas son regulares y su empleo sencillo, pues la regularidad facilita la producción de los áridos; el empleo de los valores de A es más impreciso y no se concretan bien sus variaciones, especialmente entre los valores 10 y 0, este último recomendado acertadamente en la Instrucción para el proyecto y ejecución de obras de hormigón, para dosificaciones ricas en cemento y pensando en el hormigón armado, pues a los áridos de solamente ley parabólica entre 6 y 3/4, cuyos módulos ya se han indicado, les corresponden los coeficientes para árido de igual módulo 0,728, 0,736, 0,748, 0,766, respectivamente, y estos coeficientes corresponden, en la tabla de coeficientes, a mezclas entre 1:4 a 1:6, o sea mezclas entre unos 400 Kg. y algo menos de 250 Kg. por metro cúbico.

La fórmula de Bolomey nada concreta cuando el tanto por ciento de cemento de la mezcla es mayor que A ; sin embargo, tiene particular interés para los hormigones que necesitan impermeabilidad, al añadir en las dosificaciones corrientes de los hormigones de presas, al árido general de ley parabólica, una parte de elementos finos que contribuyen a mejorarla; no hay que olvidar que en la época en que Bolomey estableció su fórmula se construían en Suiza importantes presas, a base del hormigón colado, y las ten-

dencias de entonces para los hormigones de presas aparecen reflejadas en la fórmula.

En alguna presa de importancia se ha considerado, hace tiempo, apropiado emplear arenas de coeficiente 1, o sea de tipo fino, para asegurar la impermeabilidad; no es necesario llegar a tanto cuando esta exigencia sea necesaria en el hormigón; los hormigones obtenidos con los áridos de las curvas indicadas son densos y de cierta impermeabilidad, y a lo sumo, con aumentar algo el coeficiente de la arena dentro de la proporción resultante para ésta en la curva general, con lo que se rebaja ligeramente el módulo de finura del árido total, será suficiente en la mayor parte de los casos.

No es apropiada en hormigones de presas, para la graduación del árido, la fórmula:

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

que resulta una mezcla, en partes iguales, de un árido según ley parabólica, o sea de coeficiente 0,707, ya de sí bajo, con otro de coeficiente 0,50, resultando un conjunto de módulo de finura excesivamente alto.

La fórmula

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

mejora, a la manera que hace Bolomey con respecto a la ley parabólica, la fórmula anterior, con circunstancias semejantes a las de dicha ley de graduación.

Por tanto, en la generalidad de los hormigones consideramos preferible emplear la tabla de Abrams, y para sus curvas ideales ésta, traducida a los coeficientes indicados; se obtiene así una amplia visión del mecanismo de la elección de áridos, con las distintas dosificaciones cuando se emplean áridos triturados, y éstos, a su vez, no son difíciles de obtener, en la mayoría de los casos, con la aproximación necesaria.

Por otra parte, cuando disponemos de una grava y arena cuyas composiciones granulométricas no obedezcan a ley alguna de continuidad, y aun cuando los tamaños mínimo de la grava y máximo de la arena sean cualesquiera, en virtud del concepto del módulo de finura, con sólo disponer del juego de tamices se determina rapidísimamente la proporción exacta de los áridos para cualquier riqueza de mezcla, lo que permite resolver con la máxima facilidad muchos problemas de la práctica.

Sin quitar, pues, importancia a la interesante divulgación de Bolomey, consideramos de mayor interés los procedimientos de Abrams, que, continuados y mejorados dentro de las nuevas exigencias en los hormigones, darán nuevos avances en cuestión de tanta trascendencia.