

falto a 12 pesetas y el kilogramo de varillas de hierro a 0,80, los citados aumentos valen 195 878 pesetas.

Como el valor que tendría el tramo de 33 metros de presa de gravedad sería

$$46\,530 \times 60 = 2\,791\,800 \text{ pesetas}$$

la cantidad antes indicada representa el 0,07.

De modo que el precio de la estructura que proponemos tiene un presupuesto de $0,39 + 0,07 = 0,46$ de la de gravedad.

Muchas consecuencias podríamos sacar de los resultados que hemos apuntado; pero el agradecimiento que debemos a nuestros compañeros de esta REVISTA, por la amable acogida del presente artículo, nos impide alargarle más, a pesar de la importancia del asunto.

Alfonso PEÑA BÉLUF

Profesor de la Escuela de C., C. y P.

La dosificación de los hormigones¹

II

La composición del árido

La ley de Abrams pone de manifiesto la conveniencia de reducir cuanto sea posible la cantidad de agua de amasado, lo que permitiría, bien aumentar la resistencia del hormigón, bien reducir su riqueza de cemento. La primera consecuencia de este principio es una disminución de la fluidez de los hormigones que se emplean en las obras, e indudablemente este es un criterio moderno, como confirman el cuadro de recomendaciones de fluidez del "Joint Committee", que hemos copiado anteriormente, el empleo muy extendido de las cintas transportadoras y otros medios análogos para la distribución del hormigón en sustitución de las canaletas que necesita el "hormigón colado", y, finalmente, el uso reciente en la construcción de grandes macizos de máquinas rápidas y pesadas para apisonar², lo que permite emplear hormigones extraordinariamente secos.

Sin embargo, la disminución de la fluidez ha de tener un límite, porque no siempre es económico el apisonado intensivo ni permite la ejecución de las obras en plazos breves, ni siquiera se puede aplicar en muchas partes de las obras, por lo que es preciso establecer prudencialmente un tope, que suele expresarse por medio del *asiento* o "slump" y pasa a figurar en el pliego de condiciones, con lo que se consigue que una propiedad que llega a desempeñar un papel muy importante en el juego de la dosificación no sea apreciada de un modo subjetivo.

Pero no es la reducción de la fluidez el único medio de que disponemos para disminuir la dosis de agua —y aquí es donde empieza a tener interés el estudio

de la composición del árido—, porque manteniendo constante la cantidad de agua, la fluidez aumenta indefinidamente al crecer el tamaño máximo del árido, y también al disminuir la relación arena-grava, o, dicho de otro modo, un exceso de arena exige mayor cantidad de agua para obtener una cierta fluidez, y es, por tanto, perjudicial a la resistencia.

Estos principios quedan demostrados con el examen del gráfico 3, formado por Abrams al resumir los resultados de sus ensayos.

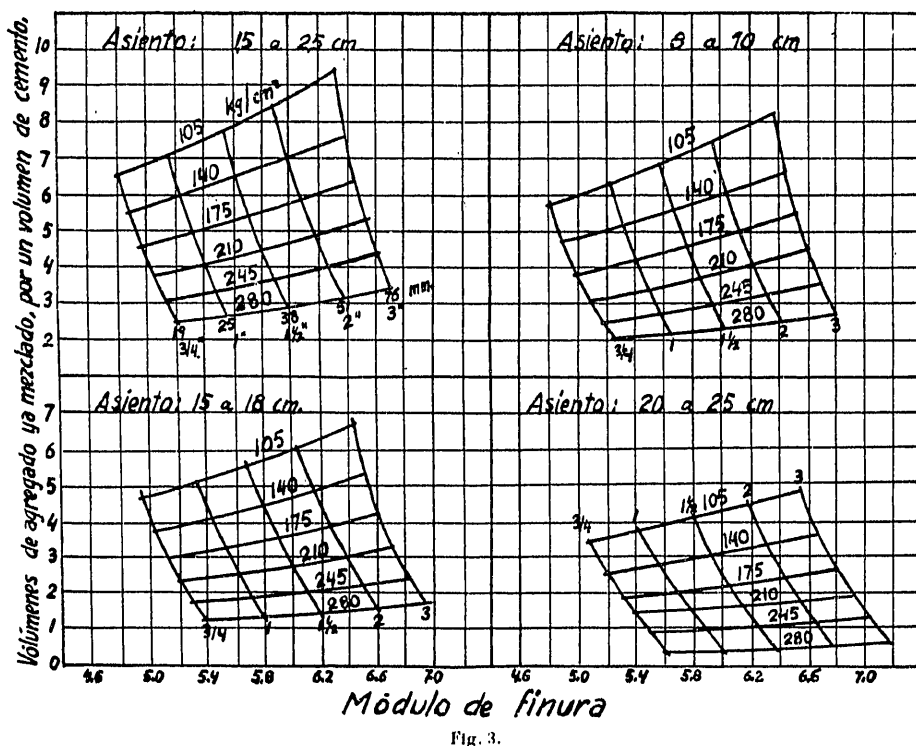


Fig. 3.

No es posible, de todos modos, ir muy lejos por este camino, porque si la arena llega a ser escasa la mezcla se hace de manejo difícil y tiende a disgregarse; esto es, llega a faltarle la trabazón o consistencia precisa. Y si continuásemos reduciendo la cantidad de arena aumentaría rápidamente el número de poros, y la ley de Abrams (que sirve de base a nuestro razonamiento) dejaría de ser aplicable.¹

¹ Véase el número anterior, página 129.

² Véase *Engineering News-Record*, 24 de octubre de 1929.

En la práctica resulta muy difícil decidir hasta qué punto puede ser reducida la proporción de arena sin peligro para las buenas condiciones de la obra

lo que resulta engorroso y poco eficaz. Veamos cómo puede practicarse este estudio.

Curvas de composición granulométrica.—Para la

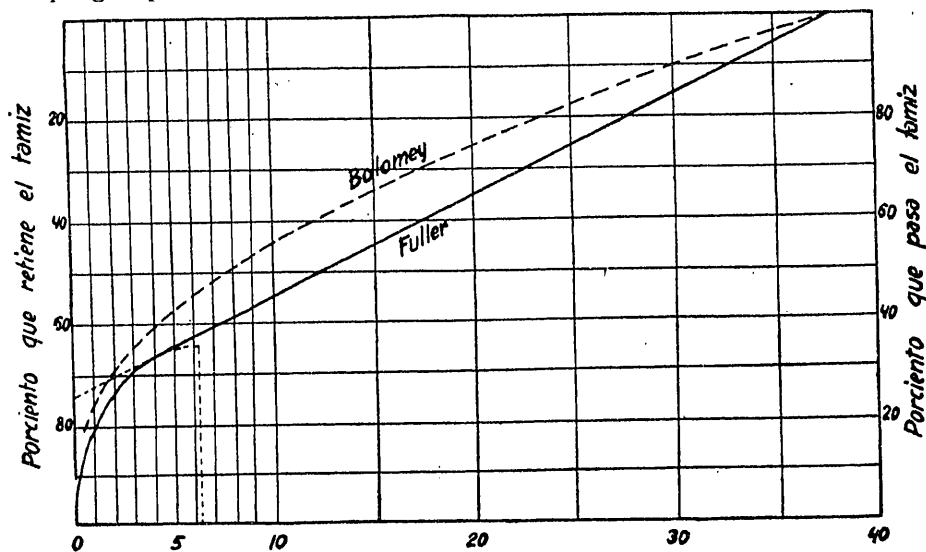


Fig. 4.

si bien, teniendo en cuenta que variaciones importantes en la proporción arena-grava se traducen en otras mucho más pequeñas de la fluidez, debemos colocarnos al lado seguro, no bajando de las proporciones que hoy se usan ordinariamente sin un análisis detallado. Pero aun cuando no tuviera consecuencias cuantitativamente importantes, conviene llamar la atención sobre este hecho, no sólo para hacer notar uno de los inconvenientes de los hormigones excesivamente ricos en arena, sino porque cuando se emplean pliegos de condiciones que dejan en libertad al contratista en materia de proporciones, ésta es la puerta que el ingeniero de la administración debe guardar con más cuidado, y esto a consecuencia de la falta de un sencillo procedimiento de medida de la consistencia, que desempeñe un papel análogo al "slump test" respecto de la fluidez, permitiendo una vigilancia fácil y eficaz.

La generalización de un ensayo de esta clase simplificaría mucho el problema, pues hoy, para imponer la trabazón necesaria—si se quiere prescindir de la apreciación personal del vigilante de la obra—, es preciso recurrir a estudiar la granulometría de la mezcla.

pero estos hormigones necesitan más agua para el amasado, y, como la cantidad de cemento se mantiene invariable, ofrecen menor resistencia a la compresión. También los albañiles madrileños utilizan para sus morteros mezclas de arena de río y arena de miga (rica en arcilla), con lo que consiguen "dar coherencia" o trabazón al mortero, aun reduciendo mucho la proporción de cemento; estos morteros son más cómodos de emplear que los formados exclusivamente con arena de río; pero tienen menor resistencia que éstos, por la influencia perjudicial de la arcilla, porque no se emplea en ellos tanto cemento, y por necesitar mayor cantidad de agua para el amasado.

representación de una materia inerte o de una mezcla de áridos suele emplearse su *curva de composición granulométrica*, que se obtiene llevando como abscisas los lados de los agujeros de una serie cualquiera de tamices (o bien, sus logaritmos) y como ordenadas los tantos por ciento retenidos (figuras 4 y 5). Cuando se emplea la representación logarítmica, se llama *módulo de finura* al área rayada *S*, medida en una cierta escala¹; el módulo de finura aumenta al crecer el tamaño medio del árido.

Para hallar la ordenada *y* de la curva granulométrica de la mezcla de las cantidades *c*, *a*, *g*, ..., de varios áridos, si llama-

mos *y_c*, *y_a*, *y_g*, ..., a las ordenadas respectivas que corresponden a la misma abscisa, bastaría aplicar la fórmula

$$y = \frac{cy_c + ay_a + gy_g + \dots}{c + a + g + \dots}$$

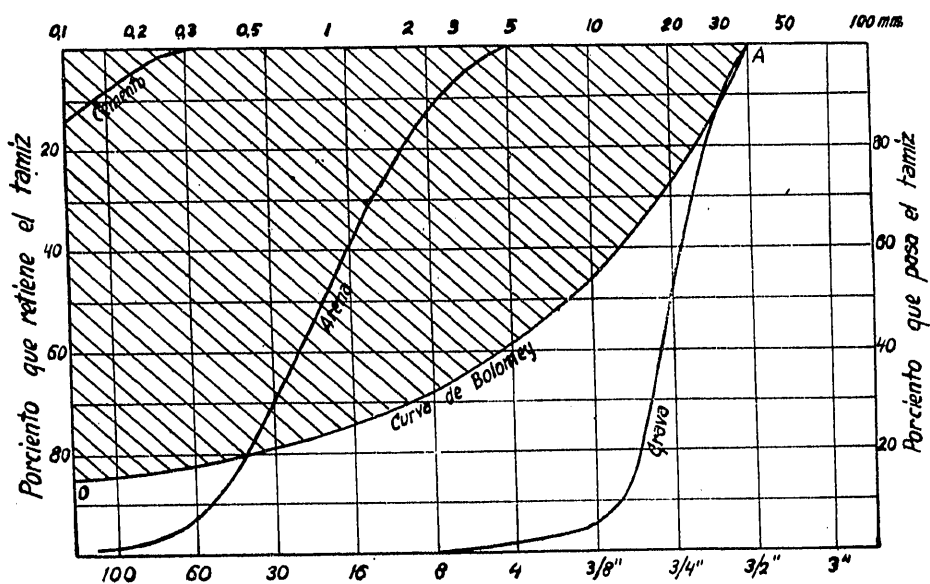


Fig. 5.

Esta misma fórmula puede aplicarse para hallar el módulo de finura de una mezcla en función de los de sus componentes.

La serie de tamices puede ser cualquiera: la curva de composición granulométrica es única para cada árido; por el contrario, es imposible determinar la curva granulométrica que corresponda a un módulo dado, ya que son infinitas; basta que se conserve constante el área *S*.

* * *

¹ Puede definirse exactamente el *módulo de finura* como la suma de las partes (expresadas en fracción decimal del total) retenidas en una serie de diez tamices, cuyas mallas se designan en el comercio con los números 100, 60, 30, 16, 8, 4, 3/8, 3/4, 3/2 y 3; los lados de sus agujeros aumentan en progresión geométrica de razón 2 desde 0,15 mm a 76,2 mm (3 pulgadas).

Entre varias mezclas formadas con los mismos materiales, a medida que disminuye su proporción de arena, la curva representativa se acerca al ángulo inferior de la derecha, aumenta el módulo de finura y,

módulo de finura; además, la forma de los granos, el modo y distancia de transporte del hormigón, etc., han de influir decisivamente.

Otros autores, bien acreditados, por cierto, proponen que la curva granulométrica de la mezcla, o la del árido solamente en otros casos, se aproxime todo lo posible a una curva-tipo, que llaman *curva de composición ideal* (fig. 8), determinada al principio con el fin de alcanzar la densidad máxima para la mezcla en seco. Aparte la dificultad de comparar dos curvas que con frecuencia tienen un aspecto completamente distinto, es bien fácil ver, atendiendo a las consideraciones anteriores, que estas curvas distan mucho de ser ideales, pues siempre sería deseable disminuir aún más la proporción de partes finas. Si acaso, pueden considerarse como los tipos a que se llega en la práctica al buscar una trabazón su-

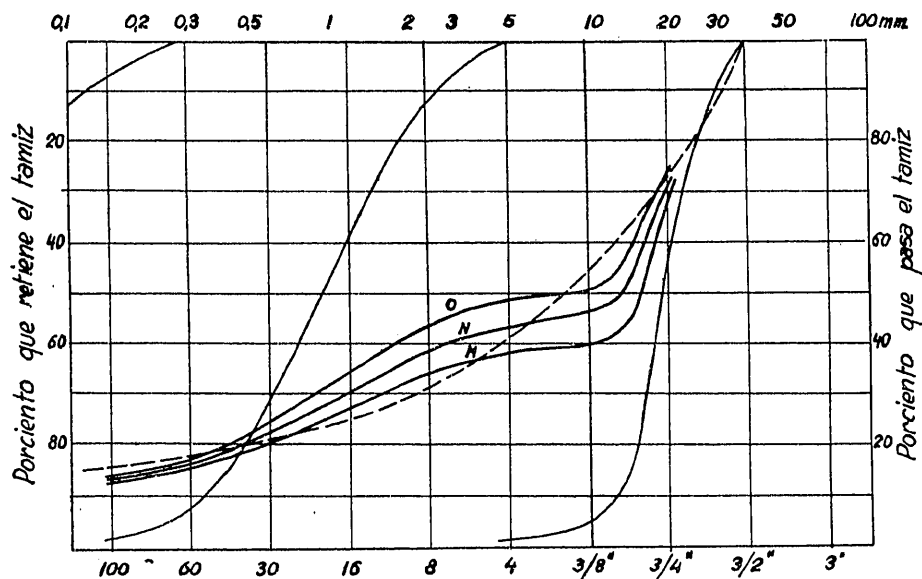


Fig. 6.

a la vez, decrece la cantidad de agua necesaria para obtener una cierta fluidez; esto es, necesita menos cemento para alcanzar la misma resistencia y es, por tanto, más económica.

Consideremos, por ejemplo, la arena y la grava representadas en la figura 6, cuyos módulos de finura respectivos son 3,2 y 7,5, y formemos con ellas las tres mezclas siguientes:

Mezcla M: 276 Kg de cemento, 875 L de grava, 325 L de arena
Mezcla N: 300 Kg de cemento, 800 L de grava, 400 L de arena
Mezcla O: 318 Kg de cemento, 725 L de grava, 475 L de arena

cuyas curvas granulométricas se indican en la misma figura.

Estas mezclas, según los resultados de los ensayos de Abrams, consignados en el gráfico 3, ofrecen la misma resistencia para igual fluidez, pero la segunda y la tercera tienen un 9 por 100 y un 15 por 100 de cemento más que la primera; por el contrario, presentan evidentemente una menor tendencia a disgregarse en sus elementos. ¿Cuándo será posible emplear aquella y cuándo hará falta recurrir a alguna de estas dos?

Para responder a esta difícil pregunta Abrams ha propuesto una tabla, traducida en el gráfico 7, que indica el máximo módulo de finura de la mezcla que puede ser aceptado para cada dosificación sin dejar de tener una trabazón suficiente; pero esta tabla, aunque es muy útil como una indicación general, no es aplicable en cada caso; un árido no está suficientemente definido por sólo su

ficiente; pero si en alguna ocasión, bien por los medios auxiliares empleados, bien por una forma muy adecuada (lubricante) de los granos del árido, se pudiera reducir la proporción de arena sin sacrificar la trabazón exigible, no hay inconveniente en hacerlo así, al menos bajo el exclusivo aspecto de la resistencia a la compresión.

En general, y todo esto mientras no se haga el ensayo de la trabazón directamente, convendrá hacer con los mismos materiales que hayan de ser empleados en la obra varias mezclas con distinta riqueza de

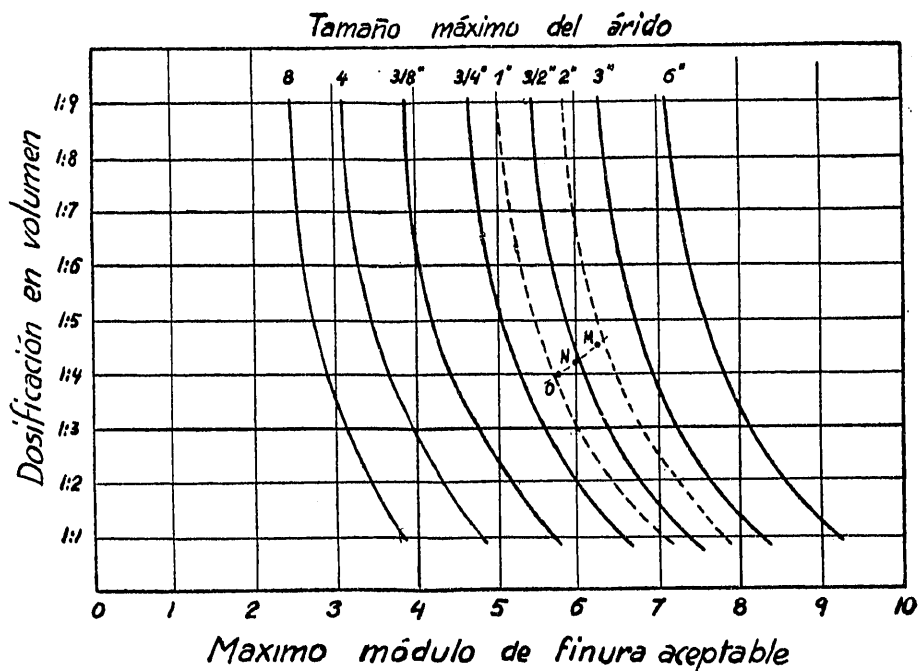


Fig. 7.

arena, y la Inspección determinará de una vez para todas, la mezcla que tiene el mínimo de trabazón necesario, cuidando de que no se emplee en la obra

una proporción de arena menor. Cuando no se haga una clasificación previa de los materiales en grava, gravilla y arena—limitándose la dosificación a efectuar compensaciones entre dos mezclas naturales de distinta finura—, bastará que las curvas granulométricas de la mezcla empleada tengan sus ordenadas constantemente superiores a la de la mezcla aceptada como límite; o, más sencillamente—teniendo en cuenta

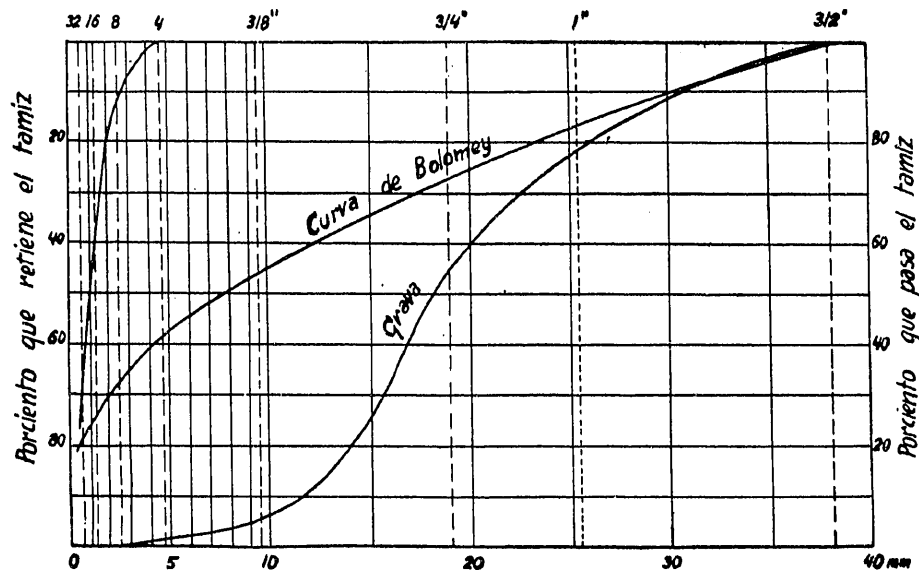


Fig. 8.

ta que el módulo de finura es suficiente para definir una mezcla entre las formadas con los mismos materiales (fig. 6)—, bastará exigir que el módulo de finura de la mezcla empleada sea igual o menor que el de la curva límite.

* * *

Como síntesis de estas consideraciones, pueden expresarse las siguientes reglas para la redacción de pliegos de condiciones:

1.^a El principio de que la resistencia del hormigón es función exclusiva de la relación agua-cemento, para unos materiales dados, puede ser perfectamente aceptado para todos los hormigones empleados corrientemente en las obras. Una vez que en una obra hayan sido escogidos los materiales (cemento, arena y grava), se puede determinar esta función, y en atención a la resistencia necesaria, fijar la relación agua-cemento; se puede entonces autorizar al contratista para que varíe libremente la composición, siempre que dicha relación no exceda del valor fijado y fabrique mezclas que puedan trabajar fácilmente.

2.^a Es preciso imponer esta segunda condición, porque el contratista, para reducir la cantidad de agua, procura fabricar mezclas demasiado secas para ser empleadas. Para limitar tal tendencia se prescribe una fluidez mínima en cada parte de la obra; esto se puede hacer por medio del ensayo del *asiento* o "slump test", u otro método semejante.

3.^a Con el fin de emplear una dosis pequeña de

agua, alcanzando, sin embargo, el asiento mínimo prescrito, se tiende a emplear hormigones en los que la proporción de arena sea pequeña; estos hormigones son difíciles de manejar y se disgregan en sus componentes fácilmente, porque tienen poca consistencia. Convendría exigir también una cierta consistencia por medio de un ensayo sencillo, del mismo modo que se hace con la fluidez.

Mientras no se generalice un método para efectuar este ensayo, conviene hacer en cada obra, con los materiales que vayan a ser empleados en ella, muestras de hormigones pobres en arena, para determinar el que tiene el mínimo de consistencia necesario; determinados la curva granulométrica o el módulo de finura correspondiente a esta mezcla, se considerarán como el límite inferior o el máximo, respectivamente, para estas mismas características de las mezclas que vayan a ser empleadas.

4.^a En los pliegos de condiciones redactados de acuerdo con estos métodos no se hará ninguna indicación sobre la proporción de los materiales;

únicamente se prescribirá, para cada parte de la obra, la fluidez, la consistencia y la resistencia específica que sean necesarias.

La fluidez y la consistencia serían fácilmente comprobables por ensayos sencillos.

No pasa lo mismo con la resistencia al cabo de un cierto tiempo; por ello, al empezar cada obra se determinará, por medio de algunos ensayos, la sencilla ley que liga aquella resistencia con la relación agua-cemento, y esta relación es la que se vigilará constantemente en la obra. Cuando éstas no tengan importancia suficiente para justificar los ensayos previos, se emplearán otras leyes obtenidas con carácter general, que naturalmente darán valores prudentemente bajos para la carga de trabajo que puede ser admitida.

5.^a Los hormigones fabricados de este modo serán, en general, más baratos que los que se emplean actualmente, porque se evitará el desperdicio de cemento que origina el agua en exceso, bien por alcanzar una fluidez innecesaria, bien por emplear excesiva proporción de arena.

Como, además, al construirlos se vigilará en obra su resistencia a través de la relación agua-cemento, esto es, mucho más aproximadamente que como se hace ahora (basándose sólo en la dosis de cemento), podrá disminuirse el coeficiente de seguridad.

La importancia de estas reducciones es muy variable según los casos, pero indudablemente merece ser tenida en cuenta al proyectar cierta clase de obras.

Ramón RÍOS
Ingeniero de Caminos