

Nueva estructura de presa para grandes valles

Según la estadística moderna, el 80 por 100 de las presas que se construyen en varias naciones corresponde al tipo de gravedad.

Esta predilección es, sin duda, inspirada por la sugestión de tranquilidad que produce la enorme masa del perfil triangular formando una cordillera artificial, que armoniza con las montañas del valle, y la gran responsabilidad que entraña la posible rotura de una presa, que almacena millones de metros cúbicos de agua, encuentra en el macizo de una presa de este tipo la sensación de algo colosal que tranquiliza el espíritu.

Todas las autoridades técnicas del mundo en materia de hidráulica han puesto sus mayores afanes en el estudio de estas presas, y tanto se ha investigado y publicado, que no existe seguramente ningún elemento de construcción tan prolijamente tratado.

El gran progreso conseguido modernamente en el estudio de los hormigones, la atención a la composición granulométrica, a la relación agua-cemento, a

Todo el mundo sabe que el estudio de las presas de gravedad se hace destacando un trozo formado por los dos paramentos y dos planos normales a éstos a distancia-unidad, y aplicando al trozo así formado las ecuaciones del estado elástico plano.

Pero para que eso sea lícito es indispensable que no haya ninguna causa que actúe en el sentido longitudinal de la presa, y en el momento en que se tengan en cuenta las reacciones con las laderas y la de las variaciones de volumen por fraguado y temperatura (causas todas de gran efecto), todo eso cae por tierra, y dejan de tener realidad física los trazados de isostáticas, las líneas de igual resistencia y todas las consecuencias del cálculo citado.

Aunque, como se ha hecho a veces—a costa de no pocas complicaciones constructivas—, se establezcan planos verticales transversales de junta, la ambigüedad existe, por muchas causas, cuyo alcance es imposible de estimar numéricamente.

No puede argüirse como razón la de la experien-

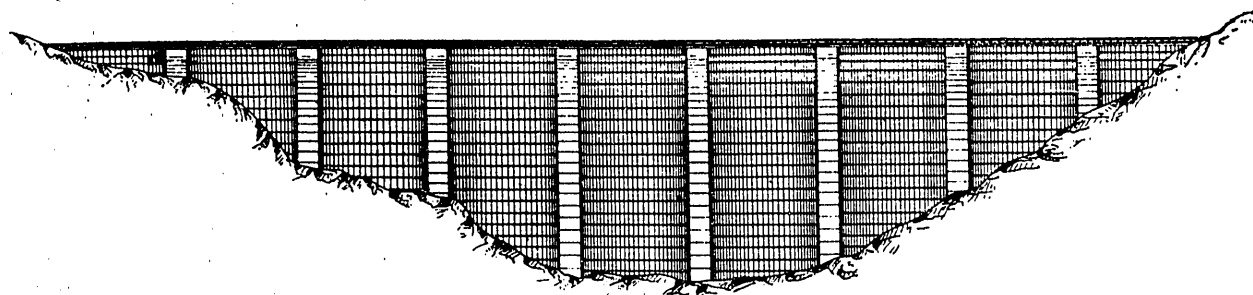


Fig. 1.

las variaciones de volumen, a la compacidad y al tamaño del árido, a las presas se debe, aunque tenga otras muchas aplicaciones, pero en ellas tuvo su origen.

Pues, a pesar del meticuloso conocimiento del material hormigón, debido a los interesantísimos esfuerzos de Abrams, Feret, Füller, Bolomey, Rös y muchos sabios más; a pesar del gran adelanto del cálculo elástico en su aplicación a las estructuras y de los progresos de la construcción, las presas de gravedad *no se calculan satisfactoriamente*.

Tanto es así, que si a cualquier ingeniero se le preguntara, después de muy copiosos cálculos hechos sobre una presa de gravedad, a cuánto va a trabajar el material, no sabría decir, en conciencia, si trabaja a 20 kg/cm² o a 60 (¡...!).

Y es muy curioso que esto ocurra a estas presas, tratadas por cálculos prolijos, y, sin embargo, para las vigas o para los arcos basta hacer cuatro números para tener una idea bien aproximada de la realidad.

La razón es bien clara: en el campo de la elasticidad aplicada a la construcción, los únicos sólidos que se saben calcular son las piezas dotadas de directriz, en la que se supone concentrada la materia; las superficies se calculan sólo en algunos casos y, a veces, con muchas restricciones; pero los sólidos de tres dimensiones en rigor no se pueden calcular actualmente.

En muchas presas construidas, pues si bien es exacto que con el perfil triangular, cuya tangente es 0,80, parece que hay garantía absoluta de estabilidad, lo cierto es que nadie puede indicar el coeficiente de trabajo ni el de seguridad cuando de un modo natural dejan de cumplirse las premisas que sirvieron de base al cálculo.

Pero es más desconsolador todavía pensar que, después de no tener una solución satisfactoria del problema, el gasto producido es enorme, pues cuando, en la época actual, para tener grandes embalses es necesario hacer presas de mucha altura, el perfil de gravedad para alturas de 90 ó 100 m arroja volúmenes colosales, que se traducen en muchos millones de gasto empleados en la presa solamente.

No tendría objeto la publicación de este artículo si solamente hiciéramos la crítica anterior, pues, a nuestro juicio, a nada conduce el considerar como defectuoso un sistema si no hay otro mejor que pueda sustituirle, y solamente es provechoso el análisis cuando de él nace otra solución más favorable.

No es la primera vez que hemos tratado estas dificultades de cálculo y de coste en las presas, y ya, con motivo del estudio de las presas-bóvedas, indicamos, en un artículo de esta REVISTA (de 1 de mayo de 1927) y en las notas presentadas a los Congresos de Lieja y de Barcelona, la solución racional del problema de las presas-bóvedas, por un

medio original, cuyo ensayo hemos realizado en la práctica (REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS de 1 de marzo de 1932).

Pues, precisamente inspirados en esa solución, resolvemos ahora el problema para los valles anchos,

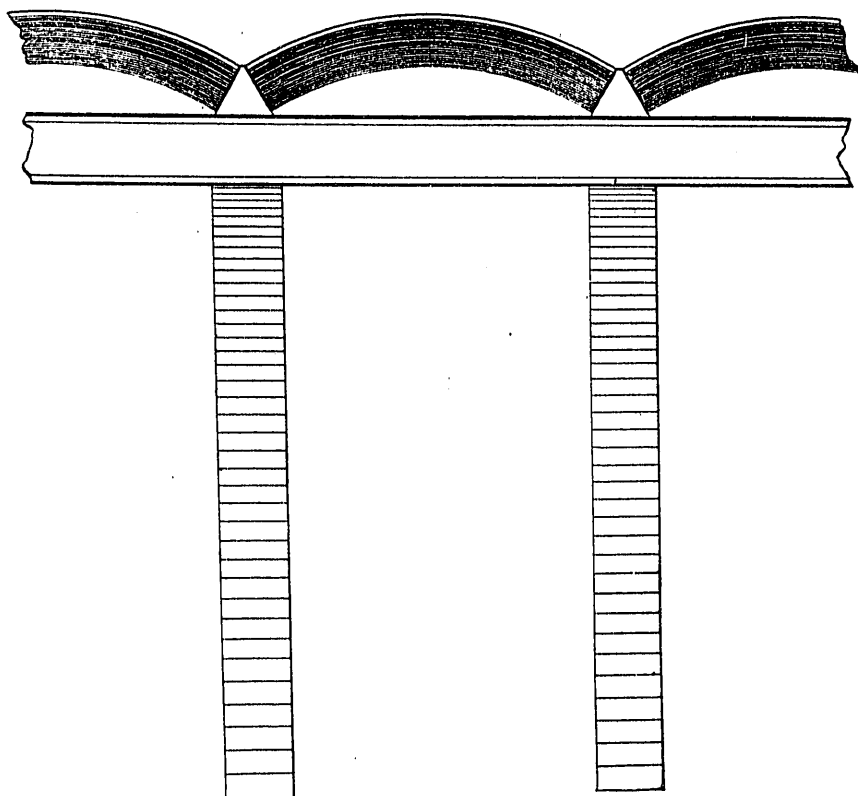


Fig. 2.

en que está especialmente indicado hasta ahora el perfil de gravedad, presentando un sistema de estructura que, *además de dar completa seguridad en el cálculo, proporciona una economía de masa de más del 50 por 100, con igual facilidad de ejecución y de hormigón en masa.*

Sea un valle de gran anchura, en el que pudiera tener aplicación un perfil de gravedad. Dividamos su ancho en partes por medio de contrafuertes, como se indica en el alzado de la figura 1, cuyos contrafuertes tengan forma triangular con el paramento agua arriba vertical y el otro inclinado. De uno a otro contrafuerte volteamos bóvedas, formadas por anillos horizontales, independientes elásticamente, para lo cual colocamos entre ellos una chapa de asfalto que no se aplaste por la presión moderada del peso, y que sea, sin embargo, deformable, condiciones ambas que hemos conseguido en la práctica con gran sencillez.

Los anillos tienen forma circular y se apoyan simplemente sobre los contrafuertes, en la forma que indica la planta de la figura 2, cuyo detalle se representa en la figura 3. El apoyo se hace por intermedio de una chapa de plomo de 20 mm, y para ta se dispone otra chapa de plomo de 2 mm como cubrejunta, lo mismo que entre los anillos.

Desde luego, anillos y contrafuertes son de hormigón en masa, y ese sencillo conjunto, cuya sección vertical está indicada en la figura 4, forma el siste-

ma, cuyas principales ventajas pasamos a enumerar.

Los anillos son arcos isostáticos independientes, y por su forma circular trabajan, por el empuje del agua, a compresión simple, siendo su cálculo (por las fórmulas conocidas de los tubos gruesos) absolutamente tranquilizador y seguro. Para nada influye ni el fraguado ni la temperatura, y, por lo tanto, la forma de trabajo es perfectamente calculable por las citadas fórmulas.

Los contrafuertes son unos prismas que reciben en su plano medio las resultantes de empuje de los anillos, y que están sencillamente apoyados en su base. A estos elementos sí que pueden aplicarse con todo rigor las ecuaciones del estado elástico plano y hasta con igual sencillez y seguridad el método de las resultantes en los distintos planos horizontales, aunque baste sólo comprobar así la base.

Sobre los contrafuertes puede disponerse el camino de coronación por una sencilla estructura de vigas de hormigón armado y forjado; pero, con el objeto de no introducir reacciones elásticas por ningún elemento, esta estructura se dispone descansando simplemente sobre aquéllos, en la forma indicada en la fig. 5.

No es preciso que los contrafuertes lleven entre sí más arriostramiento que el producido por los anillos y por la estructura de coronación, porque las únicas acciones longitudinales que pueden producirse es en las laderas, por diferencia de altura de dos tramos consecutivos; pero es preciso tener en cuenta que si una ladera es muy inclinada, debe entonces ponerse en la base de ella un contrafuerte calculado a ese efecto, y si no lo es, la diferencia de empujes es tan pequeña, que en nada modifica las dimensiones calculadas para la estabilidad del contrafuerte.

No obstante, ninguna dificultad hay de establecer

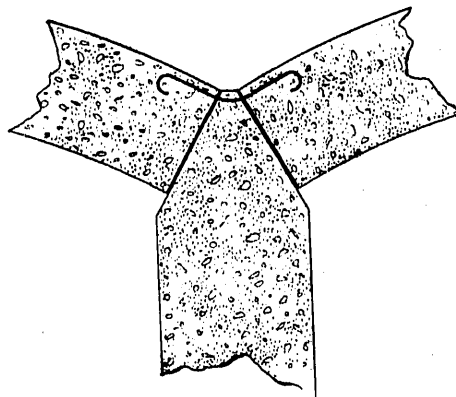


Fig. 3.

una línea horizontal de riostras a la altura media, entre contrafuertes; pero, siguiendo el mismo criterio, esas riostras pueden hacerse con articulación (como las de Mesnager, Freysinot u otra cualquiera), para evitar flexiones por variación de volumen.

Otra de las ventajas de este sistema consiste en que, por ser su resistencia en sentido horizontal, para nada importa el temido efecto de las subpresiones, de modo que las cimentaciones pueden quedar reducidas a una sencilla placa de hormigón en masa, como base de los contrafuertes, si fuera necesario ensanchar su planta para repartir las presiones sobre el terreno, y un rastrillo debajo del último anillo de cada tramo, para evitar que filtrara el agua.

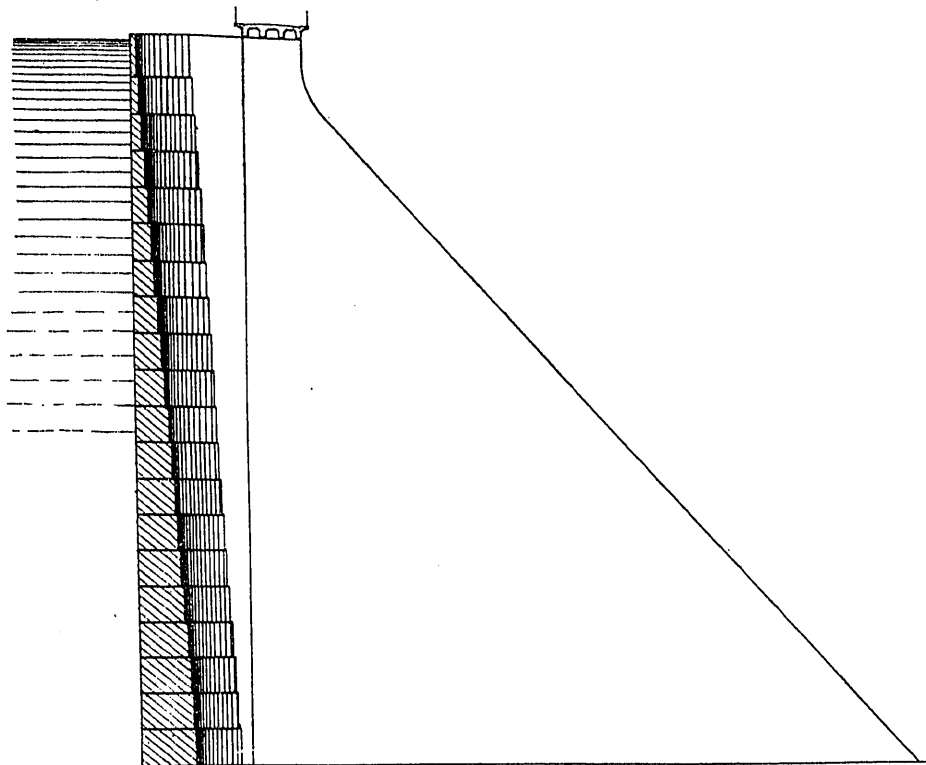


Fig. 4.

Con ser tan interesantes las ventajas antes indicadas, hemos dejado para el final la más importante, que es la económica.

Quedaría en el aire si hiciéramos la afirmación gratuita de que la ventaja económica de este sistema excedía del 50 por 100; las afirmaciones hay que probarlas, y aunque en un artículo no podemos desarrollar el proyecto, la cuestión es tan sencilla, que bastará hacer cuatro números para demostrar nuestra afirmación.

Vamos a tomar un caso corriente cualquiera: una presa de 60 m de altura.

Dividamos el valle en tramos de 30 m, para los arcos, y con el espesor de los contrafuertes (fijado por un tanteo) da 33 m de eje a eje de contrafuertes.

Adoptamos para los anillos la forma circular, con un ángulo en el centro de 60°.

La conocida expresión que da la compresión principal en un anillo grueso elástico (véanse los tratados de estructuras de Föppl, de Zafra o *Mecánica elástica*, del autor de estas líneas) es:

$$N_2 = \frac{p' r'^2 + p'' r''^2}{r'^2 - r''^2} + \frac{p' + p''}{r'^2} \cdot \frac{r'^2 r''^2}{r'^2 - r''^2}$$

cuyo máximo en $r = r'$ es:

$$N_2 = \frac{p' r'^2 + p'' r''^2}{r'^2 - r''^2} + \frac{(p' + p'') r''^2}{r'^2 - r''^2}$$

y llamando e el grueso, $e = r'' - r'$, y R el radio medio $R = \frac{1}{2}(r'' + r')$, cuando sólo existe la presión exterior esa fórmula se convierte en la sencillísima expresión

$$N_2 = \frac{(e + 2R)^2}{4eR} p''$$

En los anillos inferiores la presión máxima en este caso es $p'' = 60\,000 \text{ kg/m}^2$, y como el radio medio elegido es $R = 30 \text{ m}$, aceptando una carga máxima de compresión para el hormigón, $N_2 = 46 \text{ kg/cm}^2$, que es bien moderada para ser un máximo de todas las causas, el espesor de esos anillos inferiores deberá ser el sacado de la ecuación

$$460\,000 = \frac{(e + 60)^2}{120e} \cdot 60\,000$$

de donde $e = 4,5 \text{ m}$.

En el anillo superior, cuya carga máxima en su base es $3\,000 \text{ kg/m}^2$, se puede dar por exceso el grueso de 50 cm, trabajando a menos compresión que el inferior.

Para el contrafuerte hay que tener en cuenta que, si se considera la resultante del empuje del agua y del peso estabilizador, aunque cayera fuera del núcleo central, dando tracción en el paramento agua arriba, estas tracciones no podrían producirse, porque simultáneamente entraría en juego la fuerza de rozamiento del empuje de los anillos, que daría efecto estabilizador, neutralizando aquéllas; pero como queremos exagerar las condiciones de estabilidad para

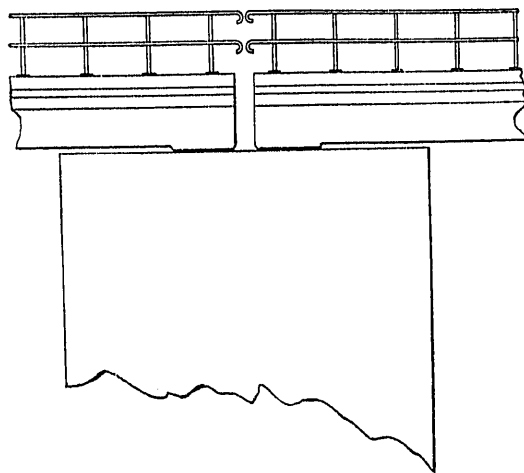


Fig. 5.

que ninguna objeción se pueda hacer, no tendremos en cuenta para nada la estabilización del rozamiento, sino únicamente la del peso. Y, además, calcularemos la presión máxima en la arista inferior de agua aba-

jo por la fórmula $n = \frac{2P}{3aq}$, que se aplica cuando el material no resiste nada a tracción.

Aun en tan previsoras condiciones, dando al contrafuerte la forma indicada con las dimensiones en planta de 75 m por 6 de ancho, la cubicación de todos los elementos para un tramo de 33 m es:

Bóvedas.....	$31,40 \times 2,50 \times 60 =$	4 710 m ³
Contrafuerte....	$\frac{1}{2} 75 \times 60 \times 6 =$	13 500 "
Piso y arriostamiento.....	$=$	200 "
		18 410 m ³

$$\text{Peso } P = 18\,410 \times 2\,400 = 44\,184\,000 \text{ kg.}$$

Momento estabilizador del peso del contrafuerte y piso:

$$M = 13\,500 \times 2\,400 \times 75 \times \frac{2}{3} + 200 \times 2\,400 \times 72 = 1\,654\,560\,000 \text{ mkg}$$

Momento de empuje del agua:

$$m = \frac{1}{6} 1\,000 \times 60^3 \times 33 = 1\,188\,000\,000 \text{ mkg}$$

Momento total:

$$M - m = 466\,560\,000 \text{ mkg}$$

Distancia de la resultante a la arista aguas abajo:

$$q = \frac{M - m}{P} = 10,56 \text{ m}$$

Compresión máxima:

$$m = \frac{2 \times 44\,184\,000}{3 \times 600 \times 1\,056} = 46 \text{ kg/cm}^2$$

De modo que, aun estimando las acciones del modo más desfavorable, para poder apreciar una cifra muy previsoras, llegamos a compresiones perfectamente aceptables, tanto en los anillos como en el contrafuerte.

Y, de este modo, acabamos de ver que la cubicación total para un tramo de 33 metros de longitud es de $v = 18\,410 \text{ m}^3$.

Veamos ahora lo que daría una presa de gravedad de la misma altura.

Bien sabido es que los perfiles de gravedad más modernos alcanzan tangentes en el vértice comprendidas entre 0,77 y 0,82; pero, exagerando, como en todo, desfavorablemente para nuestra tesis, vamos a adoptar el perfil más ligero, de tangente 0,77.

El triángulo para esta tangente tendrá

$$\frac{1}{2} 60 \times 60 \times 0,77 = 1\,386 \text{ m}^2$$

y con un camino de coronación de 6 metros, como hemos supuesto en la otra, habría que aumentar unos 24 m²; de modo que el área será 1 410 m², y el volumen para la longitud de 33 m resulta

$$V = 1\,410 \times 33 = 46\,530 \text{ m}^3$$

Comparado este volumen con el de nuestra estructura, que era $v = 18\,410 \text{ m}^3$, representa para ésta una relación

$$\frac{v}{V} = 0,39$$

De modo que, además de todas las ventajas indicadas, el volumen es menor que el 40 por 100 del de la presa de gravedad.

* * *

Los dos elementos para fijar el presupuesto de una obra son la cubicación y los precios unitarios.

Acabamos de demostrar que la cubicación de esta estructura de presa es el 0,39 de la de gravedad; pero pudiera argüirse que los precios unitarios debían ser muy superiores, y entonces la ventaja económica podría quedar atenuada.

Pero ¿por qué razón deben ser los precios unitarios superiores a los de la de gravedad? Los anillos, lo mismo que los contrafuertes, son todos de hormigón en masa, y, como su coeficiente de trabajo es muy moderado, la dosificación del hormigón puede y debe ser la misma de las presas de gravedad.

Y no hay que hablar de aumento por encofrado, porque, en la forma que puede disponerse la construcción, para nada influye. En efecto, en la presa de ensayo que hemos hecho los anillos se han moldeado con unas cerchas metálicas colocadas horizontalmente con la forma del arco en el intradós y en el trasdós, unidas por unos tableros verticales de madera sostenidas sobre el anillo inferior, ya construido, y arriostadas por medio de alambres que pasan de un lado a otro.

De este modo, basta hacer un castillete para la hormigonera y una escalera para subir, sin necesidad ni de andamio siquiera. Como se ve, este método es tan sencillo como el empleado para hacer una presa de gravedad, y el precio de encofrado en nada puede diferir.

En los contrafuertes todavía es más sencillo, pues haciendo los paramentos con bloques de hormigón, en forma de $\square$ para que queden bien anclados en el hormigón que se echa en el interior, no hay ni andamios ni encofrados de ninguna clase.

Lo único que hace elevar el precio corriente son las chapas de plomo, las juntas de asfalto y las vigas de hormigón armado de la pasadera. Veamos numéricamente la importancia de estos aumentos, en la presa de 60 m del ejemplo.

Para un tramo de 33 metros, las chapas de apoyo tienen un peso de

$$2 \times 60 \times 2,50 \times 0,02 \times 11\,400 = 68\,400 \text{ kg}$$

Las cubrejuntas:

$$20 \times 31,40 \times 0,3 \times 0,002 \times 11\,400 = 4\,295 "$$

$$20 \times 2,00 \times 60 \times 0,002 \times 11\,400 = 54\,720 "$$

$$\text{Total de plomo.....} \quad 127\,415 \text{ kg}$$

La chapa de asfalto tiene un grueso de 3 cm y una superficie de $2,50 \times 20 \times 31,40 = 1\,570 \text{ m}^2$.

Las vigas de hormigón armado del camino superior llevan un peso metálico de 30.000 kg.

Estimando, colocado en obra, el kilogramo de plomo a 1,2 pesetas, el metro cuadrado de chapa de as-

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 prudentemente 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.

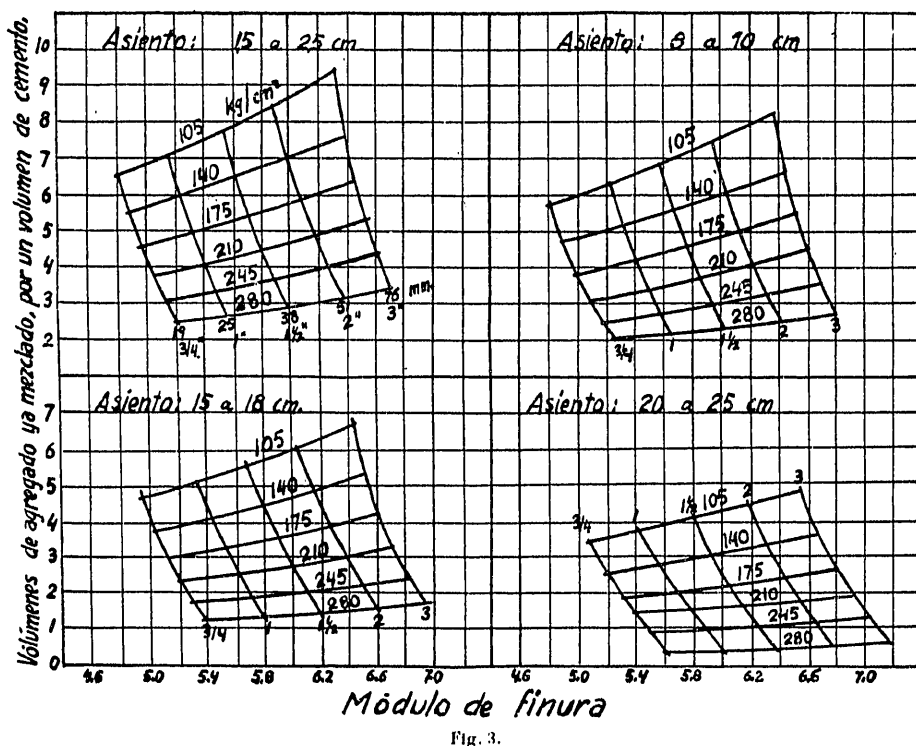


Fig. 3.

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.