NUEVAS APLICACIONES DE LA TEORIA DE LAS SUPERFICIES

Por FEDERICO GODED ECHEVARRIA,
Ingeniero de Caminos.

Continúa en el presente artículo el importante trabajo iniciado en nuestro número anterior sobre aplicación de la teoría de las superficies al estudio teórico de la dosificación de hormigones. El trabajo concluirá en otro próximo artículo.

(*Continuación.*)

Condiciones de trabazón.

Así como en el campo de las granulometrías continuas más usuales (Bolomey, Fuller, Ros) no hay ambigüedad alguna, es decir, que la granulometría, una vez escogido el tamaño máximo, queda completamente definida, y tenemos la certeza de que el hormigón que obtendremos será un hormigón trabado; en cambio, en el ámbito de las granulometrías discontinuas reina una total libertad, cuyo precio es la inseguridad en lo que se refiere a todas las propiedades del hormigón y, concretamente, a la trabazón, obligando esta inseguridad a ensayos previos en todos los casos en que se quiera tener una garantía de las características del hormigón que va a fabricarse.

Consideramos, pues, de suma importancia fijar de una manera clara las condiciones teóricas que debe cumplir una granulometría cualquiera, sea continua o discontinua, para que el hormigón que se fabrique a base de la misma sea trabado.

Evidentemente, estas condiciones serán suficientes pero no necesarias; es decir, que todo hormigón que las cumpla será trabado, pero no excluirán la posibilidad de existencia de hormigones trabados sin cumplirlas.

Así, pues, una vez estas condiciones formuladas, sin ningún ensayo previo, podrá anticiparse de un hormigón que cumpla estas condiciones, que será tra-

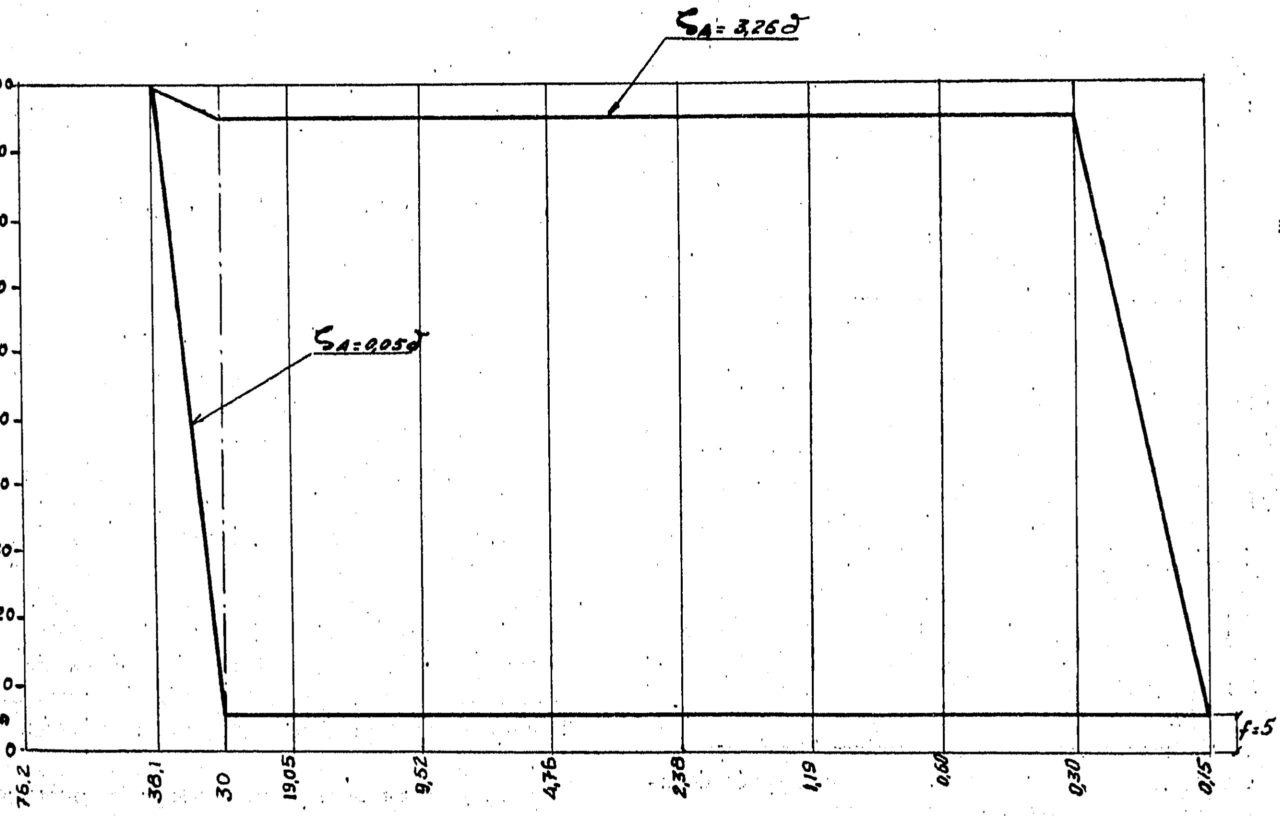

Figura 4.ª

bado. Si después, en algún caso particular, se quieren agotar las posibilidades del hormigón en determinado sentido, se podrá, mediante ensayos, ver en qué medida es posible rebasar las condiciones mencionadas, sin dejar de obtener hormigones trabados.

Relaciones entre ζ y la trabazón.

Vamos a estudiar primeramente las granulometrías extremas entre todas las posibles, para un determinado valor de D. Así, extrapolando, resultarán mejor las relaciones que ligan la trabazón y ζ.

Consideramos primeramente la granulometría A (fig. 4.ª), en la cual el 95 por 100 del árido está constituído por grava de tamaño comprendido entre 38,1 milímetros y 30 mm., y el 5 por 100 restante, por finos.

Es evidente que un hormigón fabricado con esta granulometría no será trabado. El valor de ζ correspondiente es $\zeta_A = 0{,}05\ \delta$.

Consideremos ahora la granulometría opuesta, la B, en la cual sólo exista de grava entre 38,1 y 30 milímetros el 5 por 100, estando el 95 por 100 restante constituído por arena de tamaño inferior a 4,8 mm.

Podremos ahora, por el contrario, asegurar que todo hormigón (casi diríamos mejor mortero, por la ausencia casi total de grava), fabricado con la granulometría B, será trabado. El valor de ζ en este caso, que llamaremos ζ_B, será calculado por la fórmula de siempre: $\zeta_B = 3{,}26\ \delta$.

Entre estas dos granulometrías extremas caben un número infinito de granulometrías intermedias, con valores decrecientes de ζ, al ir pasando desde la B hacia la A.

Habrá, por lo tanto, para cada valor de D, un valor mínimo de ζ, que llamaremos $\zeta_{mín}$, tal que todas las granulometrías que tengan un valor superior a $\zeta_{mín}$ poseerán un porcentaje suficiente de elementos de pequeño tamaño con una granulometría conveniente, de tal manera, que si la granulometría tiene además los finos suficientes y reúne unas condiciones mínimas de continuidad, que después se delimitarán, se podrá asegurar que todo hormigón fabricado con una granulometría cuya superficie relativa ζ sea tal que $\zeta \geq \zeta_{mín}$ será un hormigón trabado.

Las condiciones de trabazón serán, pues, tres: la del mínimo de ζ, la de la mínima continuidad y la del mínimo de finos. Un hormigón cuyos componentes rebasen estos tres mínimos será necesariamente trabado.

Vamos primeramente a determinar la primera condición, buscando el valor de $\zeta_{mín}$, y después determinaremos las otras dos.

Primera condición de trabazón. Determinación.

En el trabajo que aquí resumimos y partiendo de la ley fundamental:

$$R = \frac{b}{\zeta^m}, \qquad [7]$$

que liga la resistencia, y la superficie relativa, y que después estudiaremos más detenidamente, se llega, por medio de un proceso de cálculo elemental que aquí omitimos, a la ecuación siguiente:

$$P = 100 - K\left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^m\right], \qquad [8]$$

para la curva granulométrica más conveniente para un hormigón en lo que se refiere a la resistencia, siendo:

$$K = \frac{100 - f}{1 - \varepsilon_f^m}. \qquad [9]$$

Esta ecuación es la de una familia de curvas con dos parámetros, K y m. Para un valor de K, la curva varía en función de m, como se indica en la figura 5.ª, y, por lo tanto, los valores de ζ respectivos crecerán al disminuir m. El valor de m más conveniente, en lo que respecta a la resistencia, oscila entre 0,65 y 0,6, como después comprobaremos. Pero necesitaremos llegar hasta $m = 0{,}5$ para tener un valor de ζ que nos ofrezca absoluta garantía en lo que respecta a la trabazón. En efecto: para $m = 0{,}5$, la ecuación [8] toma la forma siguiente:

$$P = 100 - K\left[1 - \sqrt{\frac{d}{D}}\right], \qquad [10]$$

que, según vimos (*), es la de una familia de curvas a la cual pertenecen las de los profesores Fuller y Bolomey, las cuales, por la inmensa experimentación de que han sido objeto, ofrecen una total garantía en lo que a la trabazón se refiere.

Ahora bien: el valor de ζ correspondiente a esta ecuación [10] es independiente de K y es, por consiguiente, el mismo para todas las curvas de la familia, y es, por lo tanto, también el correspondiente a las ecuaciones de los profesores Bolomey y Fuller.

Así, pues, podemos concluir que el valor de ζ que corresponde a la ecuación [10] ofrecerá ya absoluta garantía en lo que respecta a la trabazón y nos fijará el límite mínimo de ζ que asegura la trabazón.

(*) *El problema de la granulometría en las presas*, páginas 34, 35 y 36.

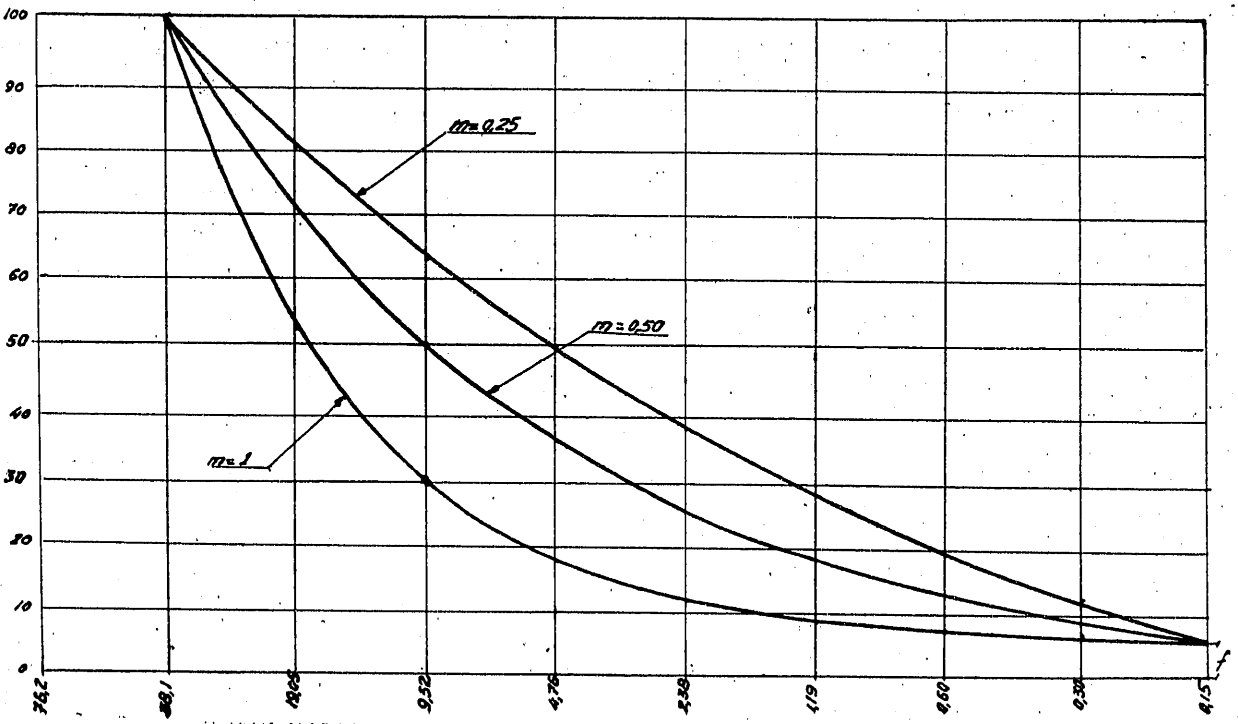

Figura 5.ª

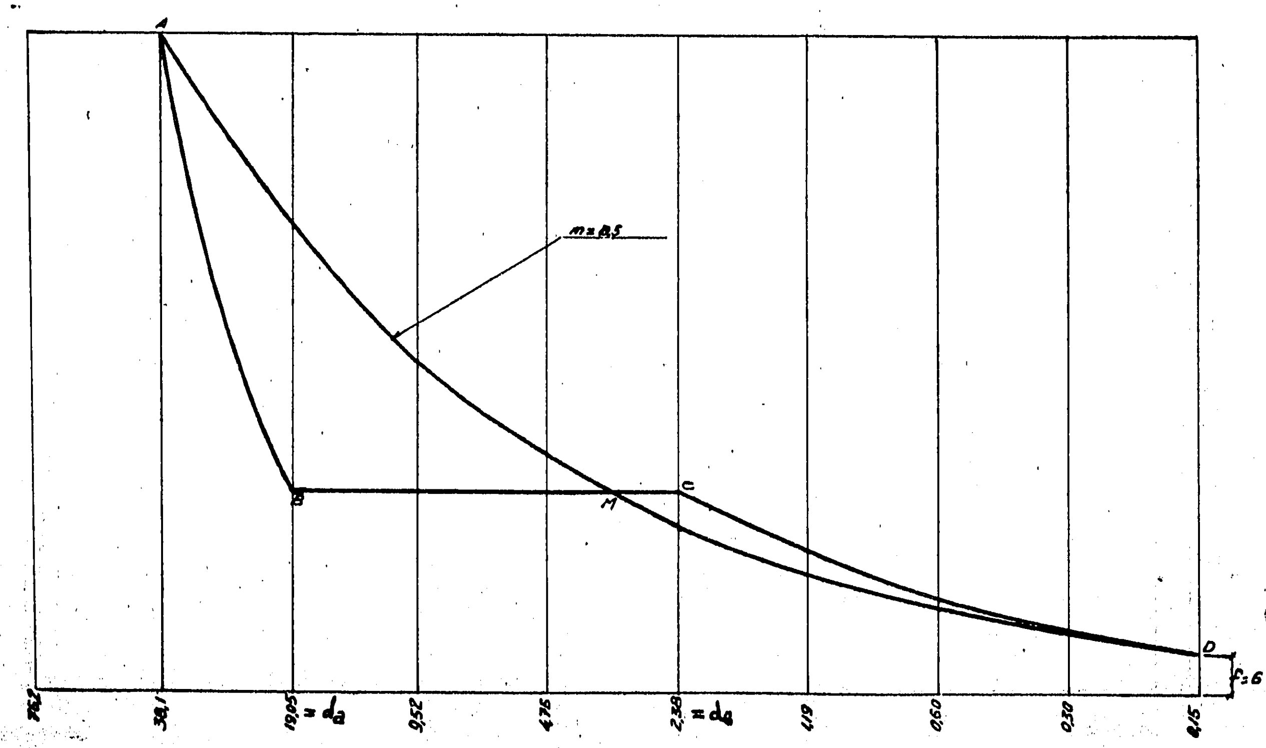

Figura 6.ª

El valor de ζ correspondiente a $m = 0{,}5$ será, pues, el valor de $\zeta_{\text{mín}}$ buscado.

Así, pues, y para cada valor de f, las curvas $m = 0{,}5$ (fig. 5.ª) en el ámbito de las granulometrías continuas, nos servirán de frontera límite y separarán el plano en dos regiones, correspondiendo la superior a las granulometrías cuya trabazón está asegurada. Así, pues, la condición de estar la curva situada en dicha región del plano será, en el caso de granulometrías continuas, la primera condición de trabazón. En el caso de granulometría discontinua, este valor de ζ nos servirá igualmente como límite, pudiendo, en este caso, no obstante, como después veremos, la curva granulométrica estar en parte situada fuera de la región del plano correspondiente a granulometrías continuas trabadas.

Para hallar el valor de $\zeta_{\text{mín}}$ correspondiente, como acabamos de ver, a la ecuación [10], será preciso antes obtener la superficie total correspondiente a la misma.

Esta ya se obtuvo ([1]) y vimos valía:

$$S = \frac{\Delta\,\delta\,(100 - f)}{50\,D\,\lambda\,\varepsilon_f^{1/2}}. \qquad [11]$$

El volumen total también se ha calculado ya ([3]).

El valor buscado de $\zeta_{\text{mín}}$ será, por lo tanto, el siguiente:

$$\zeta_{\text{mín}} = \frac{S}{V} = \frac{\Delta\,\delta\,(100 - f)}{50\,.\,D\,.\,\lambda\,\varepsilon_f^{1/2}} : \frac{\Delta\,(100 - f)}{100\,\lambda} = \frac{2\,\delta}{D\,\varepsilon_f^{1/2}}. \qquad [12]$$

Así, pues, dada una granulometría discontinua cualquiera (fig. 6.ª), tal como la $ABCD$, cuya ζ vendrá dada por la fórmula [4], la condición $\zeta \geqq \zeta_{\text{mín}}$ se escribirá así, tomando un coeficiente de seguridad de q:

$$\frac{4\,\delta}{D\,(100 - f)} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{a_i}{\varepsilon_{i-1} + \varepsilon_i} \geqq q\,\frac{2\,\delta}{D\,.\,\varepsilon_f^{1/2}}, \qquad [13]$$

o bien:

$$\sum_{i=1}^{i=n} \frac{a_i}{\varepsilon_{i-1} + \varepsilon_i} \geqq q\,\frac{100 - f}{2} \times \frac{1}{\varepsilon_f^{1/2}}, \qquad [14]$$

o también:

$$\sum_{i=1}^{i=n} \frac{a_i}{\varepsilon_{i-1} + \varepsilon_i} \geqq q\,\frac{100 - f}{2} \sqrt{\frac{D}{0{,}15}}, \qquad [15]$$

siendo ésta la primera condición de trabazón en el caso de granulometrías discontinuas.

Es conveniente señalar que en la inecuación anterior no interviene la constante δ, y sí solo cantidades exactamente determinables en cada caso, desapareciendo así la incertidumbre que pudiera haber en determinados casos, en lo que respecta al valor a dar a la referida constante, por tratarse de un árido muy irregular, es decir, constituído por componentes de muy distintas formas.

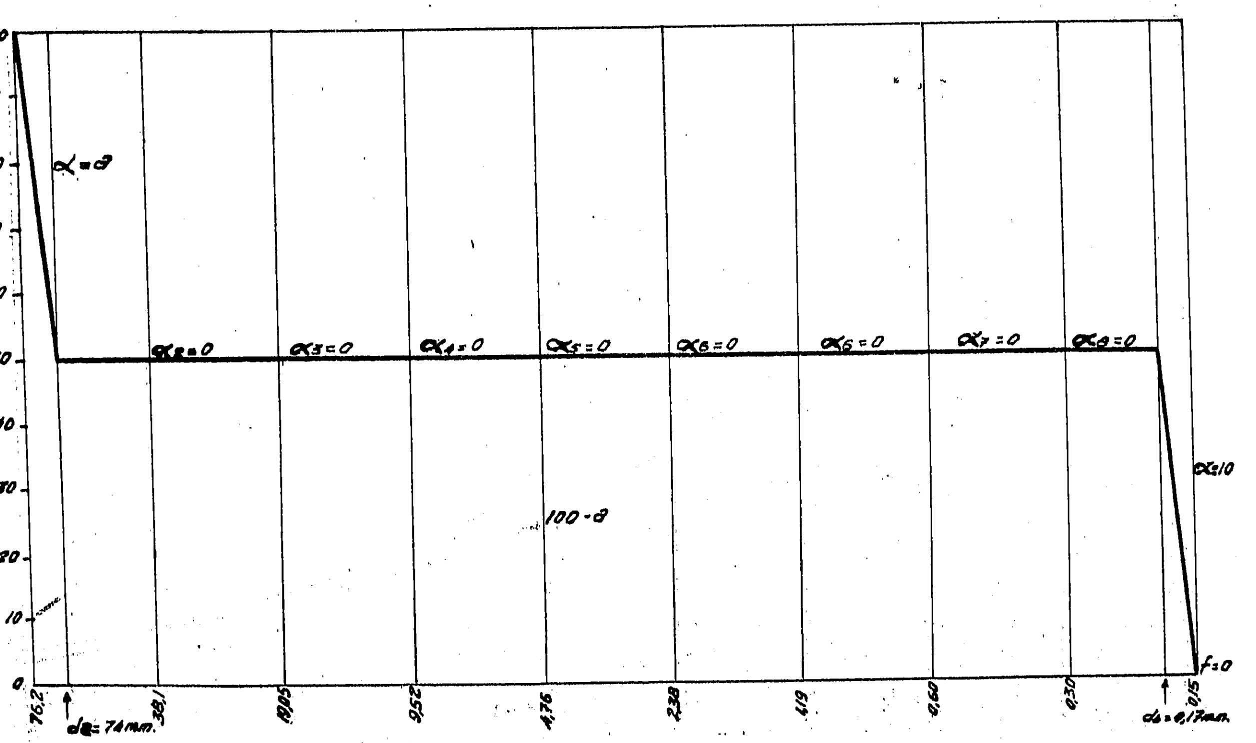

Figura 7.ª

El coeficiente de seguridad q es preciso introducirlo para tener en cuenta el aumento que puede sufrir la superficie relativa de un árido al romperse la continuidad, como en el párrafo siguiente vamos a ver. Cumpliéndose todas las condiciones de trabazón, un estudio teórico del aumento máximo que puede sufrir la superficie relativa del árido por esta causa, demuestra que siempre este aumento es inferior al 20 %. Por tanto, cumpliéndose todas las condiciones de trabazón, podremos escribir:

$$q \leqq 1,2. \qquad [16]$$

Segunda y tercera condiciones de trabazón.

La condición anterior por sí sola no puede garantizar que un hormigón será trabado, y ello por la razón ya indicada de que, al romper la continuidad, puede aumentar excesivamente el porcentaje de elementos de pequeño tamaño, aumentar paralelamente la superficie relativa del árido, ya que en el valor de la mencionada superficie relativa son determinantes los elementos de inferior tamaño.

En efecto: supongamos un hormigón que tuviera la granulometría indicada en la figura siguiente (figura 7.ª), en la cual no existen ni finos, ni elementos comprendidos entre $d_a = 74$ mm. y $d_b = 0,17$ mm.

El parámetro a puede determinarse fácilmente, de modo que la granulometría cumpla la primera condición de trabazón. En efecto, la inecuación [15], en este caso, será:

$$\frac{\alpha_1}{1+\frac{74}{76,2}} + \frac{\alpha_{10}}{\frac{0,17}{76,2}+\frac{0,15}{76,2}} \geqq 1,2 \times \frac{100}{2}\sqrt{\frac{76,2}{0,15}},$$

o bien reemplazando α_1 y α_{10} por sus valores en función de a:

$$\frac{a}{1,97} + \frac{76,2\,(100-a)}{0,32} \geqq 60 \times 22,6;$$

de donde:

$$a \leqq 94,5,$$

y es evidente que un hormigón que tenga la granulometría anterior y una dosificación de cemento baja, por ejemplo, $\beta = 0,5$, no será trabado.

Queda así patente que una discontinuidad excesiva, además de aumentar la tendencia a la disgregación, aumenta paralelamente la superficie relativa.

Para ser, por lo tanto, enteramente válida la condición anterior, debería ser el coeficiente de seguridad q función creciente de la relación d_a/d_b de los tamaños que limitan superior e inferiormente los tamaños suprimidos.

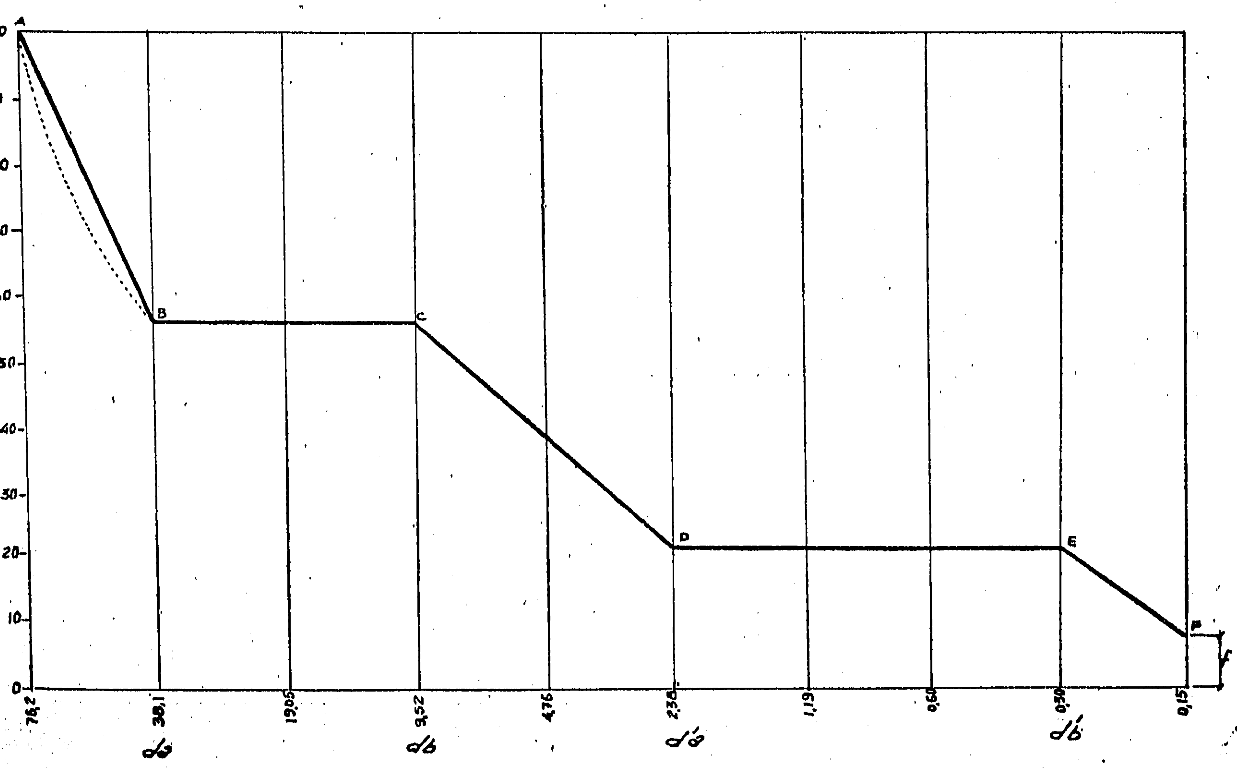

Figura 8.ª

El encontrar esta función exigiría una labor de experimentación larga, y por otra parte, un detenido estudio teórico muestra que se consigue idéntico resultado, evitando simultáneamente la tendencia a la disgregación que produce la discontinuidad, limitando esta última, haciendo que d_a y d_b verifiquen las condiciones siguientes:

$$\frac{D}{2} \geqq d_a > d_b \geqq \frac{D}{2^4}, \qquad [17]$$

que llamaremos de mínima continuidad.

Si además de suprimirse los elementos de tamaño comprendido entre d_a y d_b se quisieran suprimir los elementos de tamaño comprendidos entre d'_a y d'_b (fig. 8.ª), deberán, en este caso, verificarse las condiciones:

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{D}{2} \geqq d_a > d_b \geqq \dfrac{D}{2^4}; \\ \dfrac{d_b}{2} \geqq d'_a > d'_b \geqq \dfrac{d_b}{2^4} \geqq 0{,}30 \text{ mm.}; \end{array}\right\} \qquad [18]$$

e igualmente podrían escribirse las condiciones de mínima continuidad que deberá cumplir una granulometría en la que se suprimieran más de dos intervalos.

Esta condición y la anterior fijan exactamente las condiciones de trabazón, en lo que respecta a los áridos.

Ahora bien: el cemento debe entrar también en un determinado porcentaje mínimo para que el hormigón sea trabado. Este porcentaje es evidente que estará en relación con la cantidad de finos que existan en los áridos. Sobre este tema existe abundante experimentación, y de ella se deduce que esta condición se cumplirá ampliamente siempre que los finos y el cemento verifiquen la condición siguiente:

$$f + \beta \geqq 18, \qquad [19]$$

que llamaremos del mínimo de finos y de cemento.

Esta última condición está relacionada asimismo con la impermeabilidad, como se sabe, y de tal forma, que podremos asegurar que un hormigón que verifique las tres condiciones anteriores será no solamente trabado, sino que reunirá inmejorables condiciones en lo que se refiere a la impermeabilidad.

Así, pues, las condiciones de trabazón, en lo que respecta a la granulometría y la dosificación de cemento, serán las que se resumen en el cuadro siguiente:

CUADRO I

Granulometría discontinua.

$$\sum_{i=1}^{i=n} \frac{a_i}{\varepsilon_{i-1} + \varepsilon_i} \geqq 1{,}2 \times \frac{100 - f}{2} \sqrt{\frac{D}{0{,}15}};$$

$$\frac{D}{2} \geqq d_a > d_b \geqq \frac{D}{2^4};$$

$$f + \beta \geqq 18.$$

Las granulometrías de los áridos no suprimidos tendrán, como máximo, representaciones lineales en la escala logarítmica adoptada. Las dos condiciones primeras no son independientes la una de la otra, y podría, por consiguiente, aumentarse la discontinuidad aumentando simultáneamente el coeficiente de seguridad de la primera.

Granulometría continua.

$$P = 100 - K \left[1 - \sqrt{\frac{d}{D}} \right];$$

$$f + \beta \geqq 18.$$

En el caso en que la granulometría no fuera la definida por la ecuación anterior y estuviera definida por otra ecuación distinta, la curva continua representativa de la misma deberá estar situada enteramente en la región del plano limitada inferiormente por la ecuación anterior.

(Continuará.)