

HORMIGONES PERMEABLES: APLICACIONES

Por FEDERICO GODED ECHEVERRÍA, Ingeniero de Caminos.

Se presenta en este trabajo un metódico estudio de la permeabilidad de los hormigones, consecuencia de los ensayos que el autor ha realizado, que se describen en este primer artículo, condensando en cuadros y curvas las conclusiones que se alcanzan para hormigones de dosificación continua. En el próximo número se publicará el final del trabajo, que da cuenta de dos series de ensayos con hormigones de dosificación discontinua, y presenta algunas aplicaciones de esta clase de hormigones.

Es bastante frecuente, aunque en volúmenes reducidos, el empleo de hormigones de gran permeabilidad, conseguidos únicamente a base de una granulometría apropiada. Generalmente se ejecutan suprimiendo total o parcialmente los áridos finos, desconociéndose tanto la resistencia como la permeabilidad conseguidas.

Es muy conveniente conocer de antemano las características del hormigón que vamos a fabricar, aunque éste sea del tipo que estamos tratando, utilizable casi siempre en pequeña escala.

Con este fin, y en el pequeño Laboratorio que tenemos a nuestra disposición para las obras, emprendimos una serie de ensayos, cuyos resultados exponemos en este artículo.

Con el fin de poder valorar estos ensayos describiremos brevemente el material utilizado en los mismos, así como la forma de realizarlos.

Este modesto Laboratorio, y entre otros elementos secundarios, consta de una prensa hidráulica ICON de 250 Tn., de un docilímetro Iribarren, un cono de Abrahams, una estufa de desecación, una hormigonera, una serie de tamices Tyler y el aparato para ensayos de permeabilidad cuyo esquema se ve en la figura 1.^a.

El manejo de este aparato es tan sencillo que no requiere explicación alguna. Todos los hormigones permeables se han ensayado sometidos a la presión de 0,2 Kg./cm.², conseguida poniendo en comunicación la parte superior del aparato con el depósito. Para ensayar hormigones menos permeables se disponía de un émbolo, de pequeña sección, al cual se podían añadir pesos hasta conseguir la presión deseada, pero para todos los hormigones aquí estudiados no ha sido empleado este dispositivo.

Las probetas cilíndricas a ensayar en este aparato

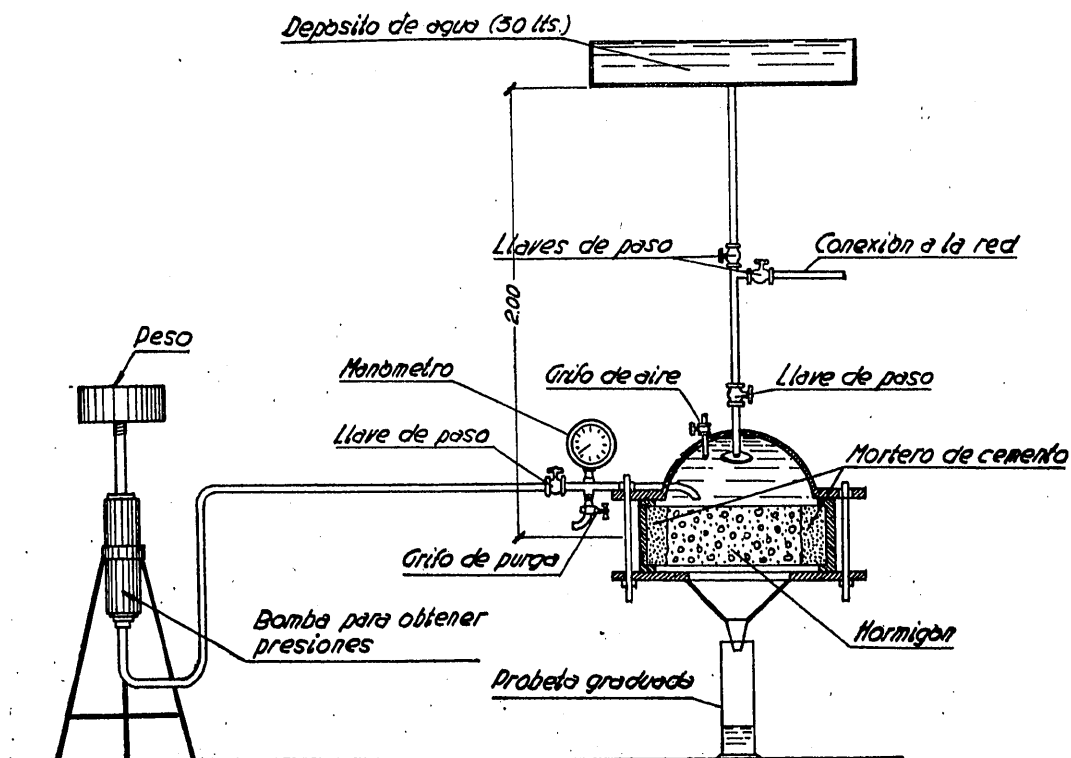
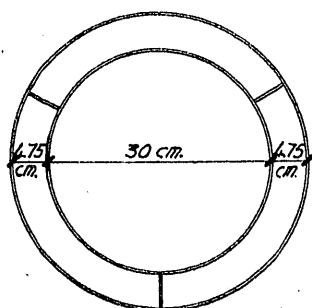
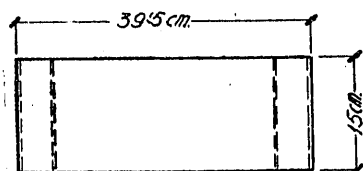


Figura 1.^a

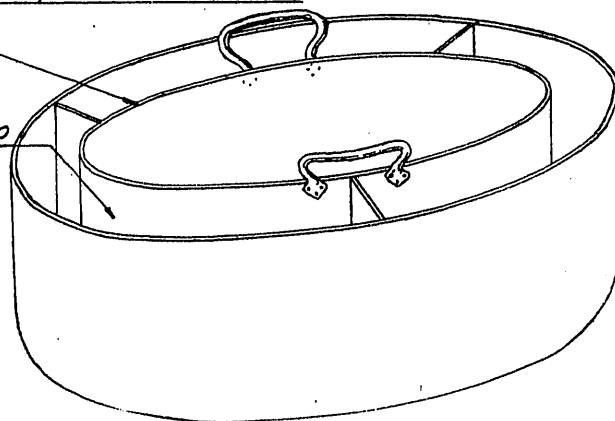
se fabricaban en los moldes de la figura 2.^a, llenándose el espacio anular de la corona con mortero fino, con el fin de lograr una impermeabilización lateral absoluta, logrando una unión perfecta entre las superficies lateral de la probeta y la metálica del aparato.

La superficie filtrante es $A = \pi r^2 = 706,8 \text{ cm}^2$ y el espesor de la probeta es $L = 15 \text{ cm}$.



Encofrado que se retira inmediatamente después de hormigonado
Parte a rellenar con mortero

Figura 2.^a



Para análisis de los cementos se disponía de una balanza de Michaelis, de una aguja de Vicat, de una amasadora Steinbrück, de un martinete Bohme-Martens, de un juego de tamices de bronce de 900 y 4 900 mallas por centímetro cuadrado, y de probetas, volumenómetros y pequeño material.

Nuestros ensayos han estado enfocados hacia un único objetivo: estudiar la influencia de la granulometría en la permeabilidad y la resistencia de los hormigones que estamos tratando.

Sabemos que ambas cualidades del hormigón son función de un gran número de variables: dosificación y calidad del cemento, relación agua-cemento, forma y duración del amasado, curado, calidad y granulometría del árido y edad del hormigón.

Para estudiar el efecto de una de ellas es preciso aislarla, manteniendo constantes las demás.

Ello es relativamente fácil para algunas de ellas; requiere algo más de trabajo en nuestro caso el mantener constantes ω y la dosificación de cemento.

Para explicar los artificios empleados en el logro de la constancia de ambas variables, es necesario entrar ya en la descripción de los ensayos efectuados.

Se hicieron dos series distintas de ensayos con dosificaciones de áridos continua y discontinua.

Ensayos con dosificación continua.

Se hizo primeramente una larga labor de tanteo, mezclando áridos finos de tamaño $d_{\min} < d < d_2$ y gruesos de tamaño $d_2 < d < D_{\max}$ en distintas proporciones, variando los valores de $d_{\min}$ = tamaño mínimo, de $D_{\max}$ = tamaño máximo, y el valor de

d_2 = tamaño intermedio, que señalaba la frontera común a ambos tamaños de áridos.

Las mezclas obtenidas se pasaban por la Serie Tyler, se pesaban las cantidades retenidas y se dibujaba a continuación la curva de composición granulométrica resultante.

Posteriormente tratamos de encontrar si las curvas así halladas seguían alguna ley expresable por una ecuación, con uno o dos parámetros, encontrando que todas las curvas obtenidas podían englobarse muy aproximadamente en la siguiente ley general:

$$P = \frac{\lg \frac{d}{d_{\min}}}{m \lg \frac{D_{\max}}{d} + \frac{1}{100} \lg \frac{D_{\max}}{d_{\min}}}; \quad [1]$$

en la cual:

P = es el tanto por ciento en peso del total del árido que pasa por el tamiz de lado d .

$D_{\max}$ = tamaño máximo del árido.

$d_{\min}$ = tamaño mínimo del árido que también se limita.

d = lado del tamiz.

m = coeficiente granulométrico.

Esta ecuación, una vez fijados $D_{\text{máx}}$ y $d_{\text{mín}}$, nos representa una familia de curvas con un parámetro. El campo de variación de m , estudiado, es el

$$\left(-\frac{1}{140}; +\frac{1}{10}\right).$$

Dando valores a m en este intervalo vamos obteniendo las distintas curvas de composición granulométrica de cada familia, pasando paulatinamente desde la curva $-\frac{1}{150}$ que representa un árido compuesto casi exclusivamente de elementos finos, a la $+\frac{1}{10}$, en la que éstos apenas entran.

Hemos estudiado las familias de curvas correspondientes a los siguientes pares de valores de $D_{\text{máx}}$ y $d_{\text{mín}}$:

CUADRO I

Familia	$D_{\text{máx}}$	$d_{\text{mín}}$
a	30,00 mm.	0,30 mm.
b	30,00 "	0,59 "
c	19,05 "	0,59 "
d	19,05 "	1,19 "
e	19,05 "	2,38 "
f	9,50 "	0,59 "
g	9,50 "	1,19 "
h	9,50 "	2,38 "

Para dibujarlas y calcularlas es cómodo efectuar el siguiente cambio de la variable independiente:

$$d = \frac{76,2}{2x}; \quad [2]$$

$$D_{\text{máx.}} = 30 \text{ m/m}$$

$$d_{\text{mín.}} = 0.30 \text{ m/m.}$$

ECUACIÓN GENERAL:

$$P = \frac{8-x}{m(x-1.3448)+0.005553}$$

siendo m , el coeficiente granulométrico

Valores de α

m	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7
$1/10$	54.97	23.88	9.5	5.11	3.18	2.18	1.58
$1/20$	39.2	26.93	13.42	8.04	3.35	3.82	2.86
$1/40$	21.65	26.03	16.23	11.10	8.08	6.12	4.81
$1/80$	12.86	22.83	17.21	13.37	10.70	8.74	7.29
$1/100$	11.29	19.28	16.76	14.70	13.01	11.58	10.38
0	9.85	15.02	15.03	15.02	15.03	15.03	15.02
$-1/310$	6.89	11.43	12.70	14.20	15.97	18.11	20.70
$-1/180$	4.54	8.29	9.95	12.35	15.72	20.69	28.46
$-1/140$	3.03	5.61	7.30	9.88	14.12	21.83	38.23

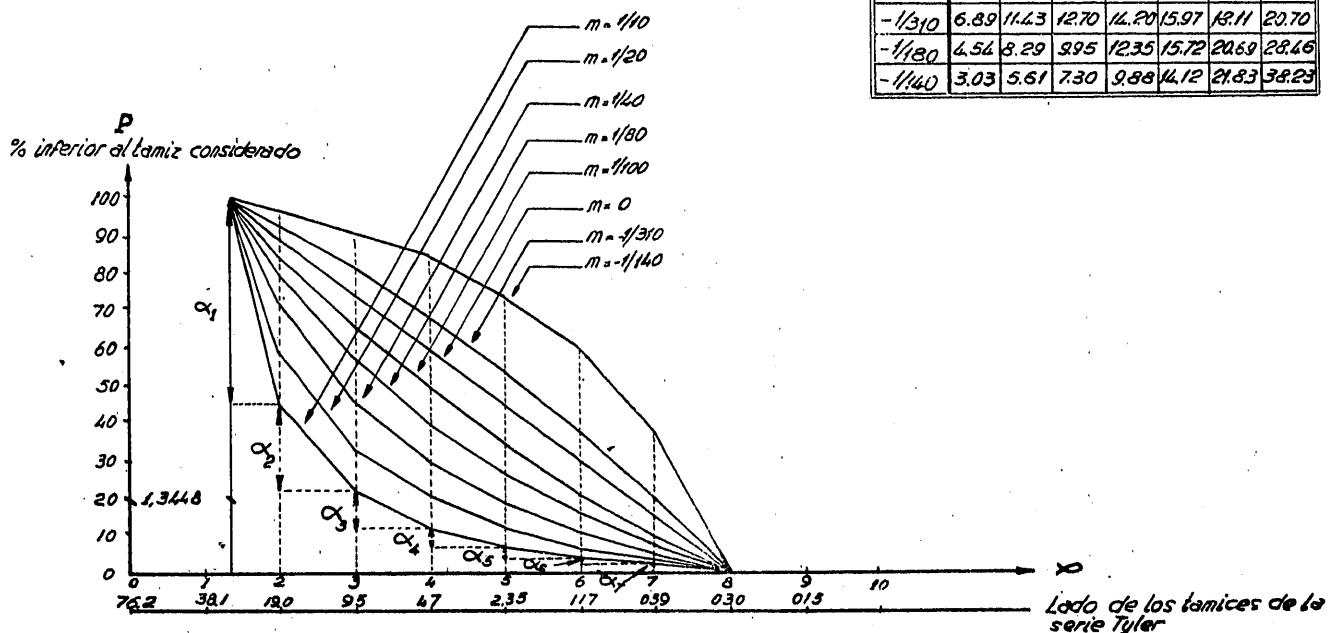


Figura 3.ª

en el cual corresponden a x valores enteros para los lados de los tamices de la Serie Tyler.

Con este cambio de variable la ecuación general se transforma en la siguiente:

$$P = \frac{\lg \frac{76,2}{d_{\min}} - x}{\lg 2} + \frac{1}{100} \times \frac{\lg \frac{D_{\max}}{d_{\min}}}{\lg 2}; \quad [3]$$

la cual, para cada par de valores de $D_{\max}$ y $d_{\min}$, nos da una familia de hipérbolas.

Así, por ejemplo, a las curvas de la familia α del Cuadro I, les corresponde la siguiente:

$$P = \frac{8 - x}{m(x - 1,3448) + 0,06655}$$

Las curvas estudiadas están representadas en la figura 3.^a.

Se ponen debajo, para mayor claridad, los valo-

res de los lados de los tamices de la Serie Tyler que corresponden a los valores enteros de x .

Cada curva se estudiaba fabricando cuatro probetas cúbicas de 20×20 , y dos probetas cilíndricas, según la técnica ya descrita.

Sólo nos falta añadir, en cuanto a las cúbicas, que las caras superior e inferior de las probetas, bastante irregulares por la ausencia de elementos finos, y con el fin de lograr un asiento uniforme de las mismas a las superficies de la prensa (rótula superior y pistón), se igualaban con una capa de mortero de 0,5 centímetros de espesor como máximo.

De las cuatro probetas cúbicas se deducían la densidad y la carga de rotura a los siete días. Las dos cilíndricas se ensayaban también a los siete días en el aparato de permeabilidad, y se deducía el caudal que filtraban en litros por minuto, limitándose la duración del ensayo a un tiempo medio de quince minutos.

El amasado, tanto de unas como de otras, se efectuaba siempre en la hormigonera y con una duración constante de dos minutos.

El curado de todas las probetas se efectuaba al aire, durante los siete días que transcurrían desde la

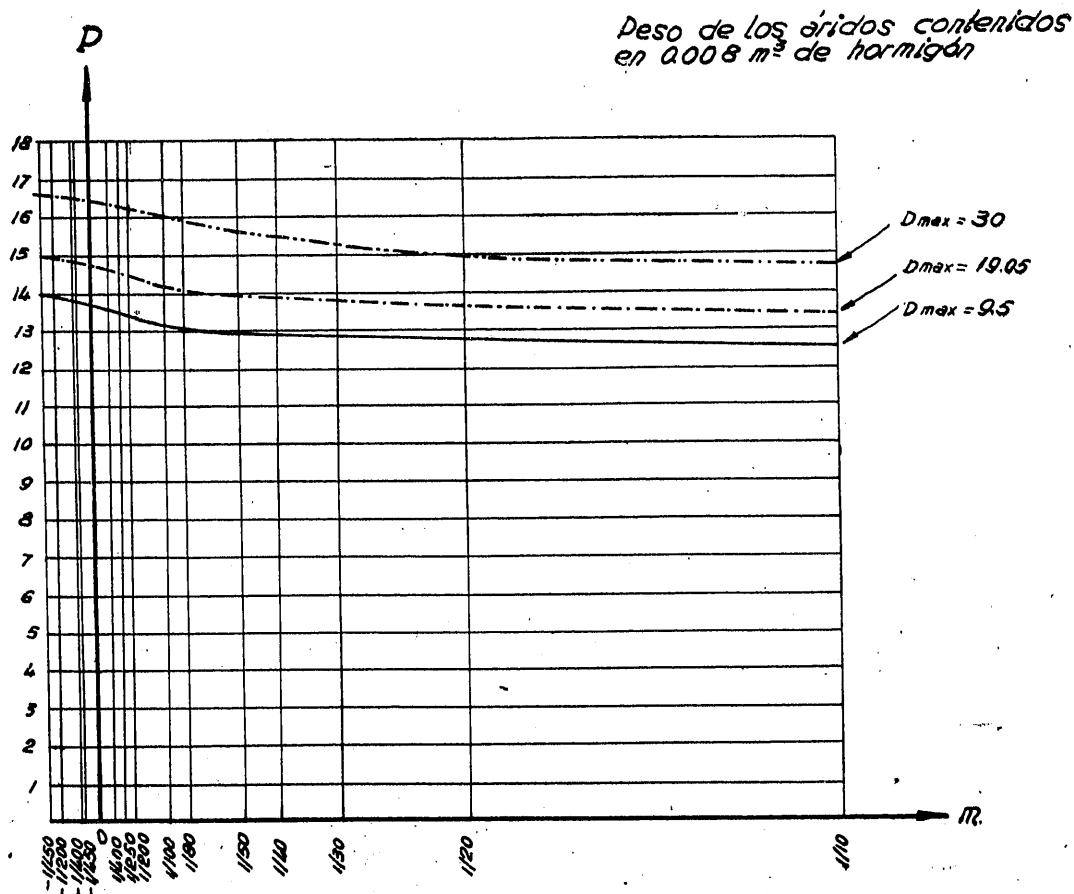


Figura 4.^a

fabricación hasta la rotura, procurando mantener tanto la temperatura como la humedad ambiente, entre los siguientes límites: 14° y 20° C.; 40 % y 60 % de humedad relativa.

Se empleó siempre cemento Portland de la marca Asland, y su estado se comprobaba por análisis frecuentes, manteniéndose siempre el empleado en los ensayos dentro de las condiciones que marca el vigente Pliego de "Recepción de Materiales Hidráulicos", en cuanto a las siguientes características: finura de molido, densidad real, fraguado, estabilidad de volumen y resistencias a tracción y compresión.

La primera la hemos supuesto constante e igual al 30 % del peso del cemento. La segunda la hemos supuesto proporcional a la superficie desarrollada del árido. Es decir, que se ha fijado la cantidad de agua de acuerdo con la fórmula:

$$A = 0,3 C + K \times S; \quad [4]$$

en la cual:

A = agua en litros.

C = cemento en kilogramos.

S = superficie del árido en m².

K = un coeficiente con las dimensiones M T⁻² L⁻¹.

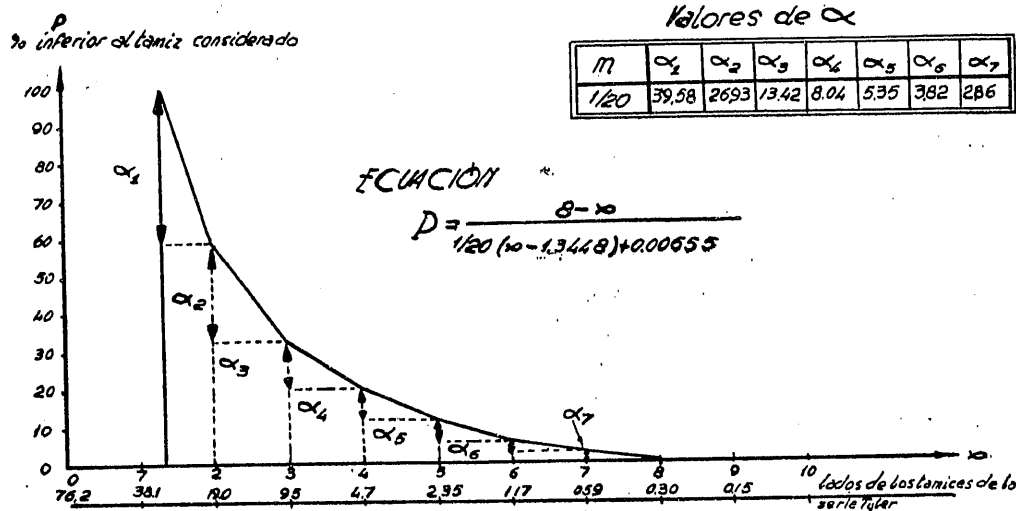


Figura 5.ª

De todo lo anterior se deduce que de las variables que hemos enumerado como más influyentes en la resistencia y permeabilidad de un hormigón, llevando los ensayos como se ha relatado, se mantienen constantes todas, menos la dosificación del cemento y ω .

Para mantener constante la dosificación elegida de 200 Kg./m.³, se determinó previamente y por sucesivos tanteos, para todas las curvas estudiadas de cada familia, el peso total de áridos necesarios para obtener con 1,6 Kg. de cemento que es la cantidad que corresponde a la dosificación fijada, los 8 litros de hormigón que componen el molde de 20 X 20.

Se vió que, aproximadamente, este peso era función solamente de m y $D_{\text{máx}}$. En la figura 4.ª están dibujadas las leyes medias obtenidas que ligan estos valores con errores relativos menores del 5 %.

Nos queda solamente mantener constante la relación agua-cemento. Para ello, el agua necesaria se ha desdoblado en la que absorba el cemento en las reacciones químicas de fraguado y obtención de una cierta plasticidad, y la que necesitan los áridos.

Para determinar el valor de S es necesario admitir unas hipótesis aproximadas. En efecto, suponemos, para fijar ideas, que tratamos de determinar la superficie desarrollada del árido que entra en 0,008 m.³ del hormigón obtenido con la composición granulométrica cuya curva representativa es la correspondiente a $m = \frac{1}{20}$ de la familia a, dibujada en la figura 5.ª.

Si llamamos P al peso total del árido necesario, que obtenemos de la figura 4.ª, los pesos de los diversos tamaños de áridos que componen ese total serán:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \frac{\alpha_1}{100} P \\ P_2 &= \frac{\alpha_2}{100} P \\ &\vdots \\ P_7 &= \frac{\alpha_7}{100} P \end{aligned} \right\} \quad [5]$$

siendo:

$$\sum_{i=1}^{i=7} \alpha_i = 100,$$

y:

$$\sum_{i=1}^{i=7} P_i = \frac{P}{100} \quad \sum_{i=1}^{i=7} \alpha_i = P;$$

llamando p_1 al peso del árido comprendido entre 19 y 30 mm.; p_2 al peso del árido comprendido entre 19,05 y 9,5, etc., etc.

Como son conocidos P y los valores de α_i , nos bastaría sustituir valores en [5] para obtener los pesos parciales P_i .

Nos basta ahora relacionar pesos con superficies. Es necesario advertir que todos los ensayos se hicieron con canto rodado de río. Con este tipo de árido parece bastante admisible admitir la hipótesis de que p_1 sea la suma de los pesos de n_1 esferas iguales de diámetro igual a la semisuma de los lados de los tamices que lo limitan, es decir, de diámetro:

$$d_1 = \frac{30 + 19,05}{2} \text{ mm.}$$

Análogamente, p_2 sería la suma de los pesos de n_2 esferas de diámetro:

$$d_2 = \frac{19,05 + 9,5}{2} \text{ mm.,}$$

y así sucesivamente.

En el caso en que el árido fuera de machaqueo, sería menos aproximada todavía a la realidad esta hipótesis y habría que afectar los valores deducidos con ella de coeficientes de corrección, aunque los valores relativos, que son los que interesan, seguirían siendo válidos.

Para poner todos los radios en función de $D_{\text{máx}} = 30 \text{ mm.}$, si llamamos $\beta = \frac{19,05}{30}$, tenemos:

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{d_1}{2} = \frac{D_{\text{máx}} + \beta D_{\text{máx}}}{2^2} = \frac{1 + \beta}{2^2} D_{\text{máx}}; \\ r_2 &= \frac{d_2}{2} = \frac{D_{\text{máx}} + \frac{\beta}{2} D_{\text{máx}}}{2^2} = \frac{3\beta}{2^2} D_{\text{máx}}; \\ &\dots \dots \dots \\ r_7 &= \frac{d_7}{2} = \frac{3\beta}{2^8} D_{\text{máx}} = \frac{3\beta}{2^8} D_{\text{máx}}. \end{aligned} \right\} \quad [6]$$

Si λ_1 es el peso específico medio de las esferas de radio r_1 , tendremos que el peso parcial p_1 valdrá:

$$P_1 = \frac{4}{3} \pi \times r_1^3 \times \lambda_1 \times n_1; \quad [7]$$

pudiendo establecer igualdades análogas para los restantes pesos parciales.

Ahora bien: la superficie S_1 de las n_1 esferas, será:

$$S_1 = 4 \pi r_1^2 \times n_1; \quad [8]$$

o bien, sacando de [7] el valor de n_1 :

$$S_1 = \frac{3 P_1}{r_1 \lambda_1}, \quad [9]$$

La superficie total del árido será:

$$S = \sum_{i=1}^{i=7} S_i = 3 \left[\frac{P_1}{r_1 \lambda_1} + \frac{P_2}{r_2 \lambda_2} + \dots + \frac{P_7}{r_7 \lambda_7} \right];$$

y substituyendo los valores [6] se obtiene finalmente:

$$S = \frac{6}{D_{\text{máx}}} \left[\frac{2 P_1}{(1 + \beta) \lambda_1} + \frac{2^2 P_2}{3 \beta \lambda_2} + \frac{2^3 P_3}{3 \beta \lambda_3} + \dots + \frac{2^7 P_7}{3 \beta \lambda_7} \right]. \quad [10]$$

Los valores medios de las densidades reales $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_7$, y de las densidades aparentes $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_7$, se han determinado aproximadamente, obteniéndose como resultado de catorce ensayos los valores medios siguientes:

CUADRO II

Tamaño del árido en mm.	Peso de los 10 litros de áridos	Volumen de huecos de los 10 litros	Volumen real de los 10 litros	Aparente Δ	Real λ
30-19,05	13,971	4,571	5,429	1,397	$\lambda_1 = 2,57$
19- 9,5	13,533	4,666	5,334	1,35	$\lambda_2 = 2,53$
9,5 - 4,7	13,814	4,428	5,572	1,38	$\lambda_3 = 2,47$
4,7 - 2,38	13,416	4,25	5,75	1,34	$\lambda_4 = 2,33$
2,38- 1,19	13,705	4,333	5,667	1,37	$\lambda_5 = 2,41$
1,19- 0,59	12,891	4,167	5,833	1,28	$\lambda_6 = 2,21$
0,59- 0,30	11,766	4,167	5,833	1,17	$\lambda_7 = 2,017$

Substituyendo en [10] los valores de λ que figuran en el cuadro anterior, $D_{\text{máx}} = 30$, $\beta = 0,635$, tenemos el valor de S buscado en m.^2 , en función de los pesos p :

$$S = (0,094 P_1 + 0,166 P_2 + 0,34 P_3 + 0,72 P_4 + 1,38 P_5 + 3 P_6 + 6,6 P_7) \text{ m.}^2. \quad [11]$$

Esta ecuación nos sirve para todas las curvas de las familias a y b , teniendo en cuenta que para todas las curvas de la familia b es $p_7 = 0$.

Igualmente, substituyendo en [10]:

$$\beta = \frac{1}{2}, \quad D_{\text{máx}} = 19,00,$$

tenemos el siguiente valor de S :

$$S = (0,166 P_2 + 0,34 P_3 + 0,72 P_4 + 1,38 P_5 + 3 P_6) m^2 [12]$$

válido para todas las curvas de las familias c , d y e . Para la familia d es siempre $p_6 = 0$, y para la familia c son nulos siempre p_6 y p_5 .

Finalmente, sustituyendo en [10]:

$$\beta = \frac{1}{2}, D_{\max} = 9,5 \text{ mm.},$$

tenemos los valores de S correspondientes a las curvas de composición granulométrica de las familias f , g y h , siendo $p_6 = 0$, para la g , y $p_5 = p_6 = 0$, para la h :

$$S = 0,34 P_3 + 0,72 P_4 + 1,38 P_5 + 3 P_6. [13]$$

Poniendo en las fórmulas [11], [12] y [13] los valores de p_i , deducidos de las curvas de la figura 4.^a y de las ecuaciones [5], como antes se dijo, se obtienen los valores de S resumidos en el cuadro siguiente:

CUADRO III

S

m	a	b	c	d	e	f	g	h
1/10	5,49	»	»	3,41	»	6,58	5,36	4,66
1/20	8,62	»	»	4,26	3,25	8,27	6,22	5,05
1/30	»	6,58	7,22	»	3,59	9,44	6,79	5,28
1/40	12,61	»	»	5,39	»	»	»	»
1/50	»	8,38	8,94	»	4,03	11,13	7,62	5,65
1/80	17,52	»	»	»	»	»	»	»
1/100	»	10,91	11,21	6,98	4,67	13,45	8,74	6,16
1/190	22,99	»	»	»	»	»	»	»
1/200	»	13,03	13,30	8,03	5,23	15,53	9,68	6,59
1/400	»	14,54	»	»	»	»	»	»
0	»	16,43	16,59	9,64	6,05	18,70	11,18	7,28
- 1/450	»	18,74	18,72	10,56	6,54	»	12,03	7,64
- 1/250	»	21,29	»	»	»	»	»	»
- 1/200	»	»	»	»	7,40	»	»	8,28
- 1/150	»	»	»	»	»	»	»	8,75

Con estos valores se pueden dibujar las curvas de la figura 6.^a, que nos relacionan S , $D_{\max}$, $d_{\min}$ y m , ya que S es una función de estas tres variables.

Una vez fijas $D_{\max}$ y $d_{\min}$, resulta:

$$S = f(m); [14]$$

es decir, que para cada familia tenemos una curva que liga S y m .

Por tanto, podemos ya fijar el valor de ω , como deseábamos. Para ello nos basta fijar el valor de K de la ecuación [4].

Se ha determinado un valor de K para cada familia. Así, por ejemplo, y para la familia h , se eligió para determinar K la curva $m = 0$.

Así, y con la granulometría correspondiente a dicha curva, se fabricaron hornigones con cantidades variables de agua.

Para esta curva, vemos en el Cuadro III que $S = 7,28 \text{ m}^2$. Como la cantidad C de cemento es constante e igual a 1,6 Kg., tenemos, sustituyendo en [4]:

$$A = 0,3 \times 1,6 + 7,28 K. [15]$$

Así se ve que la cantidad de agua, es decir, la docilidad, varía al variar K . Se vio que para $A = 0,858$ litros

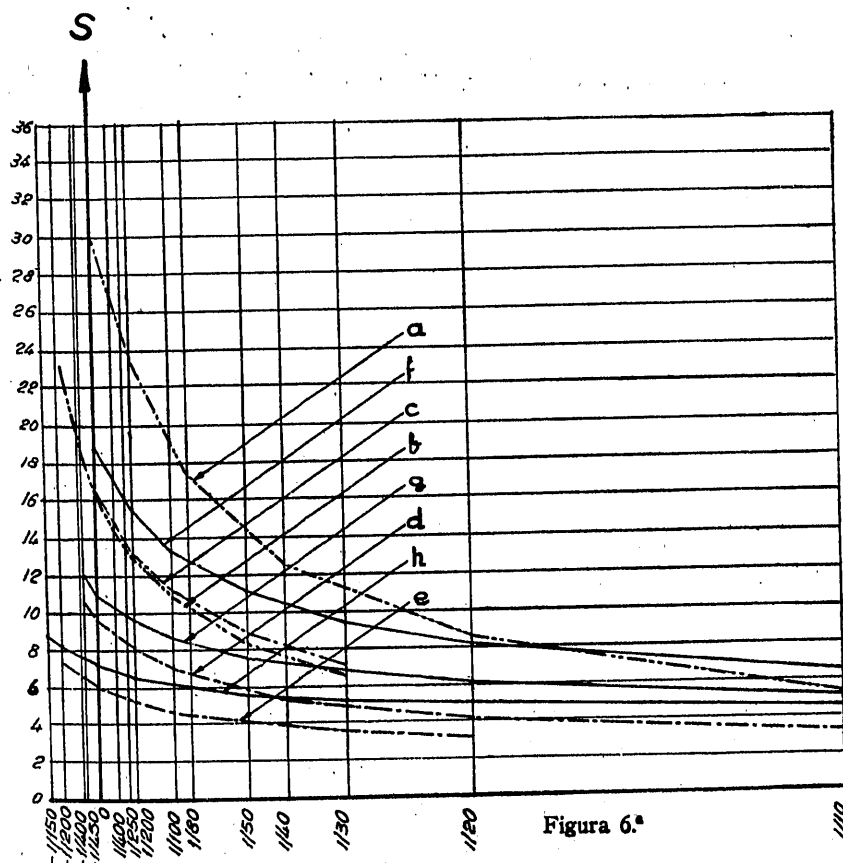


Figura 6.^a

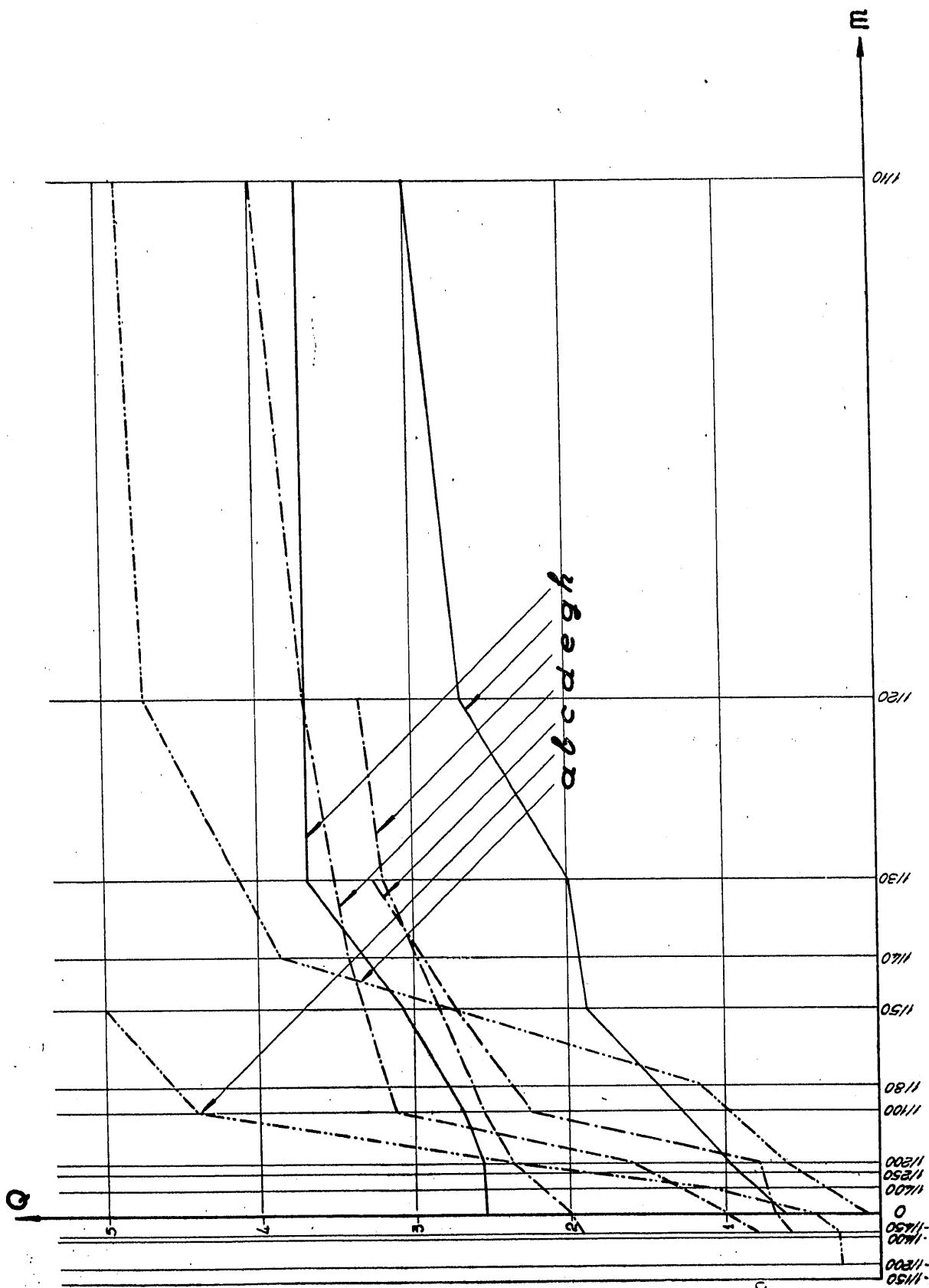
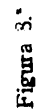


Figura 7.ª



se obtenía un hormigón seco, con la docilidad que se consideraba óptima, y sustituyendo en [15] este valor, resulta:

$$K = \frac{0,858 - 0,48}{7,28} = 0,052.$$

Por tanto, todas las curvas de la familia *h* tenían ya fijada la cantidad de agua de acuerdo con la fórmula:

$$A = 0,3 C + 0,052 S; \quad [16]$$

bastando sustituir en ella los valores correspondientes de *S*, sacados del Cuadro III.

Como comprobación de la hipótesis admitida para fijar el valor de *ω*, se constató que todos los hormigones de cada familia tenían muy aproximadamente la misma docilidad, dosificando el agua de acuerdo con la fórmula [4].

Los valores de *K* con los que se ha dosificado el agua para cada familia, son los siguientes:

CUADRO IV

Familia	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
<i>K</i>	0,035	0,04	0,034	0,0487	0,062	0,032	0,043	0,052

Todas las curvas de cada familia tienen, como ya hemos dicho, muy aproximadamente la misma docilidad, y también todas las familias entre sí, pues se ha procurado obtener siempre hormigones secos, pues con hormigones plásticos se depositan en la parte inferior de las probetas techadas de cemento, impermeabilizándolas.

Quedan así ya totalmente fijas, dentro de los medios de aproximación posibles, todas las variables que intervienen en la resistencia y en la permeabilidad, exceptuando únicamente la composición granulométrica, cuya función en ambas cualidades del hormigón tratamos de estudiar.

Para encontrar la resistencia y la permeabilidad que corresponden a cada granulometría, con una dosificación de 200 Kg. de cemento a los siete días de curado al aire, se fabricaron por curva, como ya dijimos anteriormente, cuatro probetas cúbicas de 20 × 20 y dos cilíndricas.

Se han estudiado 60 curvas de las ocho familias, fabricando todas las probetas con las dosificaciones y las precauciones relatadas.

En la figura 7.^a se resumen los resultados de los ensayos de permeabilidad.

Cada ordenada es la media de los caudales de las dos probetas ensayadas para cada curva.

Del examen de dichas curvas se deducen algunas consideraciones que casi podían preverse.

Siendo como es el caudal filtrante solamente una función de tres variables:

$$Q = F(D_{\text{máx}}, d_{\text{mín}}, m);$$

al haber hecho desaparecer la influencia de las restantes, destaca en primer lugar que el caudal filtrante *Q* aumenta con *D*_{máx}, tamaño máximo del árido, para un mismo valor de *d*_{mín}.

También se puede ver que cuanto más próximos son los valores *D*_{máx} y *d*_{mín}, menor influencia tiene *m* en la permeabilidad, es decir, en menor medida podemos influir en *Q*, variando la composición granulométrica cuanto más próximos entre sí sean el tamaño máximo y el mínimo. En efecto: se ve que la curva correspondiente a la familia *h* es la más horizontal de todas ellas, y que, por el contrario, las curvas correspondientes a las familias *a* y *b*, en las cuales la

relación $\frac{D_{\text{máx}}}{d_{\text{mín}}}$ es mayor, son las que reflejan mayores

variaciones del caudal con la granulometría. Es decir, que cuando los tamaños máximo y mínimo están muy separados entre sí, permiten, con grandes variaciones de la granulometría intermedia, grandes variaciones del caudal.

Para corroborar aún más esto, basta tener en cuenta que en la familia *a* se puede llegar a obtener probetas impermeables a la presión cinco veces la de ensayo, es decir, a 1 Kg./cm.², con valores negativos de *m* lo suficientemente grandes. En cambio se ve claramente que con la familia *h* no se podría bajar de un determinado caudal, aunque al ir tomando *m* valores negativos lo suficientemente grandes, casi la totalidad del árido estuviera constituido por elementos comprendidos entre 4,75 y 2,37 mm.

También, y como era de esperar, la permeabilidad crece, aumentando *d*_{mín}. Esto es, que cuanto mayor sea el tamaño mínimo del árido, mayores serán los caudales filtrantes.

En la figura 8.^a se resumen los resultados de las cargas de rotura obtenidos con las probetas cúbicas de 20 × 20. Cada ordenada es la media de los cuatro valores obtenidos, correspondientes a las cuatro probetas fabricadas por curva.

Para interpretar acertadamente la forma de estas curvas, vamos a calcular el % de huecos del árido que corresponde a cada granulometría.

Para fijar ideas, supongamos que tratamos de obtener el % de huecos del árido que entra en 0,008 m.³ del hormigón obtenido con la composición granulométrica, cuya curva representativa es la de la figura 5.^a.

Admitimos que el volumen del hormigón es el volumen aparente del árido, lo cual, en estos hormigones en los que el % de huecos del árido es tan elevado, se puede decir que es bastante aproximado.

Ahora bien: los volúmenes reales, obtenidos con los pesos parciales p_i , de las ecuaciones [5], serán, respectivamente:

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= \frac{p_1}{\lambda_1} = \frac{P \alpha_1}{100 \lambda_1} \\ V_2 &= \frac{p_2}{\lambda_2} = \frac{P \alpha_2}{100 \lambda_2} \\ &\dots\dots\dots \\ V_7 &= \frac{p_7}{\lambda_7} = \frac{P \alpha_7}{100 \lambda_7} \end{aligned} \right\} \quad [17]$$

Si llamamos V al volumen aparente de la mezcla de los áridos de diversos tamaños, el volumen de huecos será:

$$V - \sum_{i=1}^{i=7} V_i = V - \frac{P}{100} \sum_{i=1}^{i=7} \frac{\alpha_i}{\lambda_i},$$

teniendo en cuenta las ecuaciones [17].

El tanto por ciento de huecos será:

$$H = 100 \frac{V - \sum_{i=1}^{i=7} V_i}{V};$$

y como hemos supuesto que $V = 8$ litros, tenemos, sustituyendo en la fórmula anterior:

$$H = 100 \left[1 - \frac{P}{800} \sum_{i=1}^{i=7} \frac{\alpha_i}{\lambda_i} \right]. \quad [18]$$

Sustituyendo valores en esta fórmula, hallamos los de H , correspondientes a cada curva, que se indican en el cuadro siguiente:

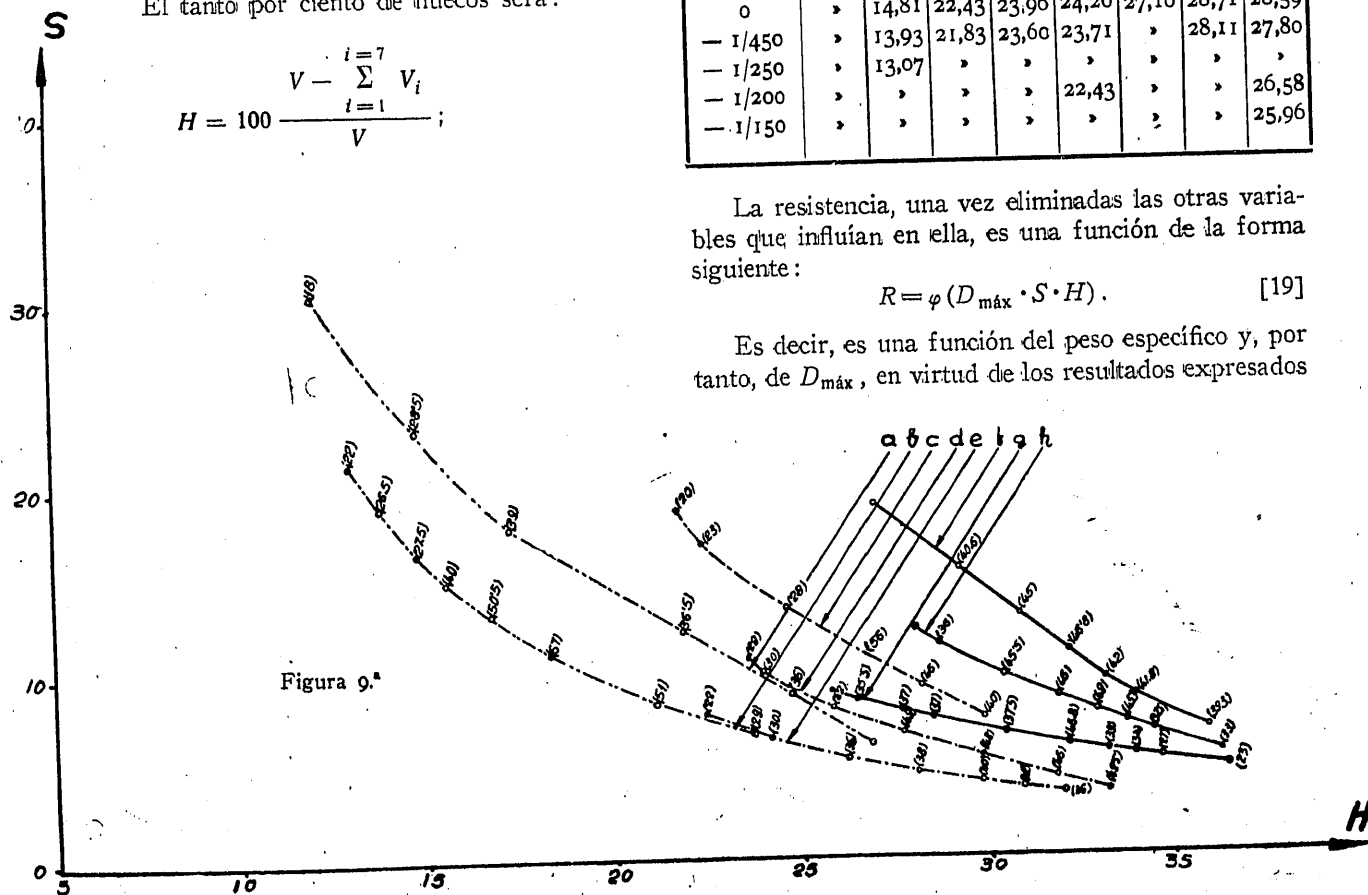
CUADRO V

H								
m	a	b	c	d	e	f	g	h
1/10	26,88	"	"	33,19	"	35,94	36,26	36,43
1/20	24,71	"	"	31,81	32,08	33,94	34,43	34,67
1/30	"	23,64	29,93	"	30,86	33,11	33,72	33,98
1/40	21,92	"	"	29,84	"	"	"	"
1/50	"	21,08	28,22	"	29,81	32,21	32,97	33,22
1/80	17,34	"	"	"	"	"	"	"
1/100	"	18,28	26,75	27,75	28,13	30,96	31,93	32,18
1/190	14,89	"	"	"	"	"	"	"
1/200	"	16,67	24,72	25,91	26,27	29,29	30,46	30,56
1/400	"	15,51	"	"	"	"	"	"
0	"	14,81	22,43	23,96	24,20	27,16	28,71	28,59
- 1/450	"	13,93	21,83	23,60	23,71	"	28,11	27,80
- 1/250	"	13,07	"	"	"	"	"	"
- 1/200	"	"	"	"	22,43	"	"	26,58
- 1/150	"	"	"	"	"	"	"	25,96

La resistencia, una vez eliminadas las otras variables que inflúan en ella, es una función de la forma siguiente:

$$R = \varphi (D_{\max} \cdot S \cdot H). \quad [19]$$

Es decir, es una función del peso específico y, por tanto, de $D_{\max}$, en virtud de los resultados expresados



en la figura 4.^a, de la superficie desarrollada del árido y de la compacidad o de un valor proporcional a ella, es decir, de H .

Para estudiar la forma de esta función es necesario primero relacionar S y H .

Tomando por abscisas los valores de H y por ordenadas los de S correspondientes, obtenemos para cada familia de curvas las leyes que ligán estas dos variables, representadas en la figura 9.^a.

La forma de estas leyes nos explica cuanto habíamos observado en las curvas de la figura 7.^a.

En efecto: vemos, por ejemplo, en las leyes que corresponden a las familias f , g y h , en las cuales la

relación $\frac{D_{\text{máx}}}{d_{\text{mín}}}$ toma los valores mínimos, que entre

los puntos extremos de dichas curvas las variaciones tanto de S como de H son bastante reducidas, o lo que es lo mismo, que jugando únicamente con la granulometría no se pueden introducir grandes variaciones en los caudales al no poder movernos en un campo de variación amplio de H , ni en las resistencias, en virtud de la ecuación [19], como luego veremos.

También se puede ver claramente en la figura 9.^a que para obtener con el mismo valor de S el máximo volumen de huecos conviene disminuir $D_{\text{máx}}$, y recíprocamente, lo cual es más interesante por ser aplicable a cualquier hormigón; esto es, que para aumentar la compacidad, sin aumentar excesivamente la superficie del árido, conviene aumentar el tamaño máximo del mismo y prescindir en el máximo grado compatible con la impermeabilidad y la docilidad buscadas de los elementos finos.

A cada punto de las curvas de la figura 9.^a corresponde una resistencia, cuyo valor ponemos entre paréntesis.

Uniéndolos ahora los puntos de igual resistencia de las curvas correspondientes al mismo tamaño máximo, es decir: los de las a y b , por una parte; los de c , d y e , por otra, y los de f , g y h , por otra, tenemos las curvas dibujadas de lleno en la figura 10.

Para cada valor de $D_{\text{máx}}$ en la ecuación [19] tenemos una superficie, y estas curvas de igual resistencia no son sino las proyecciones sobre el plano HS de las secciones de dichas superficies por planos paralelos al HS .

De la forma general de ellas pueden deducirse algunas consideraciones generales aplicables no sólo a hormigones de los que estamos tratando, sino a todos en general, y que a nuestro juicio aclaran algo el funcionamiento de los medios, a través de los cuales juega la granulometría tan importante papel en la resistencia de los hormigones.

Examinemos la curva c de la figura 9.^a. Vemos que en el extremo de la derecha de la misma, en la cual los valores de la compacidad y de la superficie de los áridos son los mínimos de todos los valores que luego toman estas dos mismas variables en el resto de la curva, la resistencia vale 40 Kg./cm.². Recorriendo la curva hacia la izquierda, va disminuyendo el tanto por ciento de huecos del árido y aumentando, por consiguiente, la compacidad y el peso específico del hormigón resultante.

Al mismo tiempo va aumentando lentamente la superficie del árido. La primera causa de ambas ejerce un papel dominante sobre la segunda, y la resistencia crece en consecuencia, hasta alcanzar en el punto (26,7, 11,2) el máximo de toda la curva, con una carga de rotura de 56 Kg./cm.². Continuando hacia la izquierda, sigue aumentando la compacidad y aumentando la superficie, dominando ahora esta última acción y descendiendo ya en lo sucesivo las resistencias.

En las restantes curvas de la figura 9.^a se puede observar idéntico proceso.

Todas las curvas de igual resistencia, correspondientes a un tamaño máximo determinado, deben estar comprendidas dentro de una cierta área en el plano SH , puesto que lo están las que ligán S y H de las cuales se deducen.

(Concluirá.)

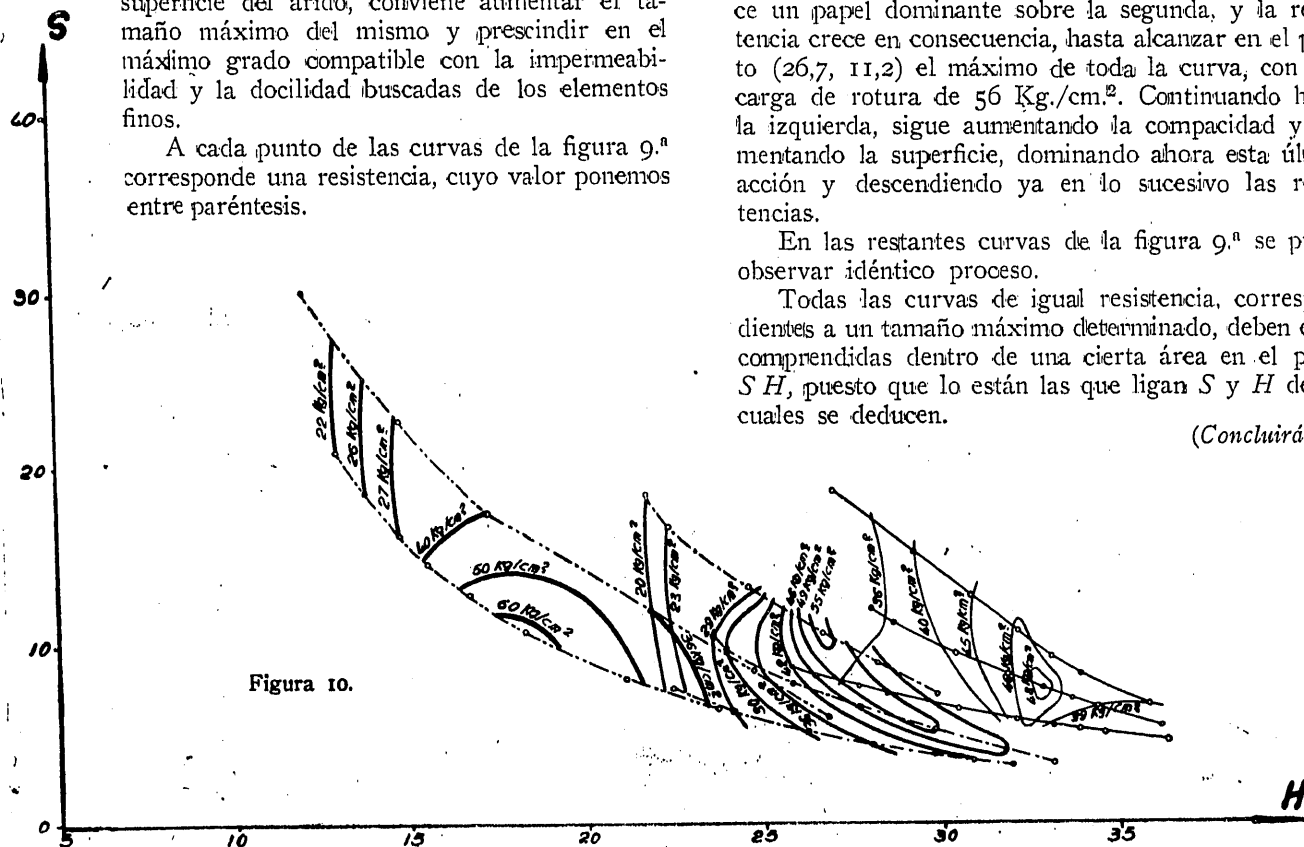


Figura 10.