

Consideraciones sobre granulometrías discontinuas de máxima compactación

M. OLAYA, Ldo. en Ciencias Físicas
I.E.T.e.e.

1. INTRODUCCION

Los materiales conglomerados que se presentan en la naturaleza deben su génesis estructural a la acomodación geométrica de unos y otros componentes. Tras un proceso de "cementación", este acomodo, según sea la disposición particular, conlleva por parte del material una respuesta resistente frente a las acciones exteriores impuestas. Sobre esta idea cabe suponer que los conglomerados más resistentes serán aquellos que tengan su estructura fundamentada en los interapoyos de los granos más duros y resistentes, ya que de por sí el material cementante proviene en la mayoría de los casos de otros previamente meteorizados a los que la evolución geológica ha colocado entre los primeros.

Como la naturaleza ha obrado de forma no deliberada se explica que dentro de un mismo tipo de conglomerado haya diferencias, sustanciales a veces, en las características resistentes antes aludidas.

En la construcción, el hormigón se presenta como un conglomerado en el que el material cementante (cemento portland), preparado artificialmente, responde como ligamento, a la vez que como elemento de aportación de resistencias. Ahora bien: es conocido, por parte de todos los que se dedican a la práctica del hormigón, que utilizando áridos adecuados (dureza, estabilidad química, etc) así como dispuestos en una determinada forma (dosificación de áridos), el que se puedan alcanzar resistencias a compresión que superen incluso a las resistencias alcanzadas por el propio material conglomerante.

Sobre esta última idea se hacen en este artículo algunas consideraciones teóricas con el propósito de que contribuyan a ser un elemento más del conjunto de visiones con que prolíficamente se ha tratado el tema. Se comparan los parámetros con los extraídos de la experiencia.

Se exponen, por otra parte, un conjunto de curvas referentes a combinaciones de distintas porciones monogranulares en un margen de tamaños medios de grano de 1,5; 1,2; 0,75; 0,5; 0,15 mm pertenecientes a un trabajo llevado a cabo en el marco de un plan general de investigación sobre áridos en el Departamento de Materiales del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, una parte del cual (correspondiente a la arena normalizada RILEM) le fue encomendada al autor.

2. EL MODELO ESFERICO. ESFERA DE ADMISION, ESFERAS PRINCIPAL Y SECUNDARIA DE OBTURACION

La idea clásica de manejar un modelo esférico es la base de muchos de los defensores del empleo de granulometrías discontinuas en la confección de hormigón, ya que se trata de una hipótesis cómoda de máxima compactación. Es por ello por lo que a continua-

ción se delibera sobre el cálculo de los parámetros más significativos del citado modelo. Los tres parámetros principales serán en esta deliberación:

- a) El diámetro de la esfera de admisión.
- b) El diámetro de la esfera principal de obturación.
- c) El diámetro de la esfera secundaria de obturación.

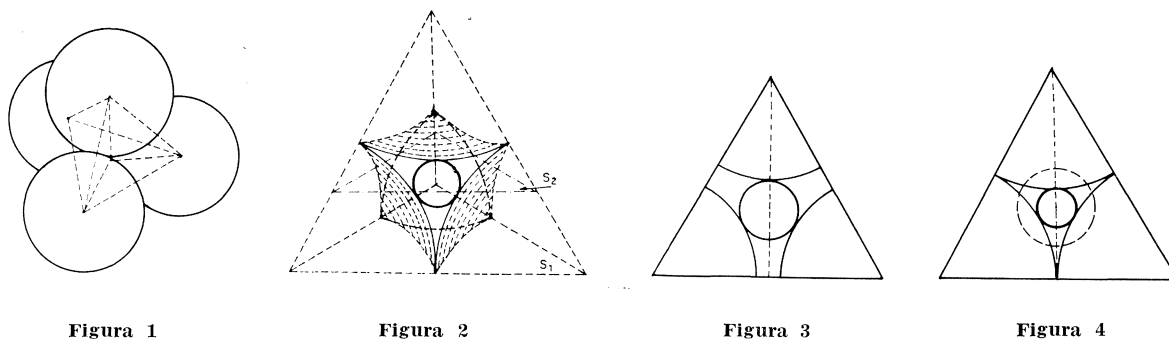
2.1. Definiciones y desarrollo del cálculo de los parámetros

2.1.1. Sean cuatro esferas colocadas como indica la figura 1. En esta misma figura se pretende representar el tetraedro constituido por las líneas que unen los centros de las esferas. En la figura 2 se representa el volumen definido por las zonas de tangencia de las cuatro esferas.

Se llama esfera de admisión a la mayor esfera que en el hueco de las cuatro queda tangente a ellas.

Cortando el tetraedro por un plano que pase por el centro de la esfera de admisión y que sea paralelo a una cara del mismo queda definida la sección s_2 (figuras 1, 2 y 3).

Se llama esfera principal de obturación a la mayor esfera que podría atravesar, si no existieran rozamientos, la abertura señalada en la figura 4, que no es sino el hueco definido por la tangencia de las tres esferas soportes en la sección s_1 . Esta esfera es tangente a las tres esferas soportes quedando uno de sus hemisferios por encima de la sección s_1 .



Se demuestra más adelante por cálculo numérico que cuando la esfera de admisión está situada entre las 4 restantes no existe posibilidad geométrica de acoplamiento de la esfera principal de obturación.

Esfera secundaria de obturación es la mayor esfera que puede atravesar la abertura en s_1 , una vez situada la esfera de admisión en su hueco y que será por tanto tangente a la esfera de admisión.

Cabe suponer otra vertiente del problema que se basa en considerar las 4 esferas principales de obturación colocadas en sus correspondientes huecos y admitir la existencia de una esfera secundaria de admisión tangente a ellas, y ocupando el lugar de la esfera de admisión, pero este modelo evidentemente no cubre la hipótesis de máxima compactación.

2.1.2. *Cálculo del diámetro de la esfera de admisión en función del diámetro de las esferas "soportes"*

Se realiza la siguiente secuencia:

- Determinación de la distancia de un vértice hasta el punto donde se cortan las alturas (centro de la esfera de admisión); l (figura 5).
- Determinación de la diferencia entre la distancia l y el radio de la esfera soporte $D/2$. El resultado será el radio de la esfera de admisión: $r = D/2$.
- Por triángulos esféricos rectángulos se determina el ángulo que forma una arista cualquiera del triedro con la base adyacente. Este ángulo resulta ser aproximadamente $54^\circ 44'$.

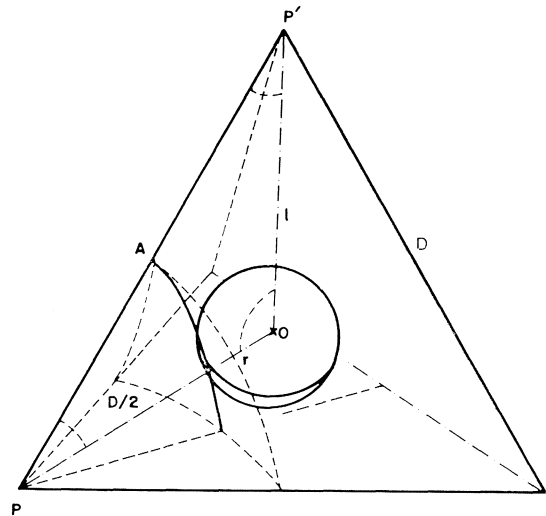


Figura 5

Con lo cual según la figura 5:

$$D^2 = l^2 + l^2 - 2 l \cos [180^\circ - 4/3 (54^\circ 44')] \quad [1]$$

de donde:

$$l = \sqrt{\frac{D^2}{2 \{1 - \cos [180^\circ - 4/3 (54^\circ 44')]\}}} = 0,62 D \quad [2]$$

$$d) \quad r = l - D/2 \quad ; \quad r = 0,62 D - 0,5 D = 0,12 D \quad [3]$$

luego:

$$d \text{ (diámetro de la esfera de admisión)} = 0,24 D \quad [4]$$

2.1.3. *Cálculo del diámetro de la esfera principal de obturación*

Según se puede observar en la figura 4

$$d_{1ob} = 2 \left(\frac{\sqrt{3}}{3} D - \frac{D}{2} \right) = 0,15 D \quad [5]$$

2.1.4. *Cálculo del diámetro de la esfera secundaria de obturación*

$$d_{2ob} = h - (l + r); \quad [6]$$

h = altura del tetraedro;

$$h = 0,81 D \quad [7]$$

luego :

$$d_{2ob} = 0,14 D \quad [8]$$

2.2. Discusión de los resultados obtenidos

Comparando [5] y [8] se observa claramente lo expuesto en el párrafo cuarto del apartado 2.1.1.

Los parámetros obtenidos, expuestos como fracciones del diámetro de las esferas soportes, D , serán:

$$d \simeq D/4,1; \quad d_{10\ b} = D/6,6; \quad d_{20\ b} = D/7,1 \quad [9]$$

En base a estas cifras se pueden calcular los porcentajes del volumen total del tetraedro que ocupan los volúmenes respectivos de las tres esferas consideradas. Estos son:

Volumen de la esfera de admisión: 6 % volumen del tetraedro. [10]

Volumen de la esfera principal de obturación: 1,2 % volumen del tetraedro. [11]

Volumen de la esfera secundaria de obturación: 1 % volumen del tetraedro. [12]

De estas cifras cabe sacar en consecuencia que en el caso de que estuviese la esfera de admisión en su localización sólo cabría la posibilidad de que pudieran existir en los respectivos huecos cuatro esferas secundarias de obturación entonces, sumando a [10] el volumen de los 4 hemisferios correspondientes, se obtendría el 8 % del volumen total del tetraedro interesferoidal, que sumado al volumen total ocupado por los trozos de esfera intersectados representaría entre el 55 % y el 57 % del volumen total a rellenar en la región.

3. CRITICA AL MODELO ESFERICO

Los resultados del cálculo expuestos en el apartado anterior no son optimistas en cuanto a pretender establecer a partir de ellos una compactación máxima, considerando una granulometría discontinua aunque sí sirvan de punto de partida; en algunos aspectos al confrontar con la experiencia cabe destacar en este orden el trabajo de R. VALETTE (1) que mediante experiencias propias con árido seco puso en evidencia el hecho de que se podría optimar hasta un 94 % el llenado de huecos entre un determinado tamaño de árido, con una granulometría discontinua tal que $D_2 = d_1/5$, siendo D_2 el tamaño de árido mayor que pasaba por el primer tamiz del 2.º grupo granulométrico empleado en una serie y, d_1 , el tamaño del árido menor en el 1.º grupo.

Ahora bien, hay que destacar que las experiencias aludidas estaban realizadas compactando árido seco. En opinión del autor no tienen más valor que el ser un argumento para criticar la relación $d = D/4$ como relación de tamaños teóricamente más idónea y esto por otra parte resulta evidente en el orden práctico puesto que no existe ningún “geniecillo ordenador” que coloque cada pieza en su sitio. No puede inferirse tampoco que un árido compactado en seco suponga, a la hora de la realización del hormigón, un mismo comportamiento a efectos de la compactación de éste. Esto último se ha puesto de manifiesto en las experiencias propias, realizadas con un recipiente de vidrio graduado, evitando la segregación del árido fino; se vio que las resistencias mayores aunque correspondían a mezclas de determinados grupos granulométricos no lo eran a proporciones en peso en que intervenían los citados grupos, comparándolas con las proporciones utilizadas en la compactación.

Hechas las puntualizaciones anteriores, lo que sí merece la pena es considerar la relación $D_2 = d_1/5$ puesto que es en base a ella, y no a las proporciones en que deben entrar los tamaños relacionados, en lo que se puede referir lo que sigue.

4. LA BUSQUEDA DE LA GRANULOMETRIA DISCONTINUA OPTIMA

Según R. VALETTE (1), el criterio que se debe seguir como punto de partida para confeccionar una granulometría discontinua óptima sería el de emplear en caso de áridos rodados una relación $D_1/D_2 = 1/8$; que corresponde a la relación $D_2 = d_1/5$ expuesta en el apartado anterior y teniendo en cuenta para ello $D_1/d_1 = 1/6$ (caso ideal en cuan-

to al empleo de arenas). Pues bien, según esto, habría que seleccionar, en el caso de confección del hormigón, las distintas proporciones en que dos o tres grupos de árido, que verificasen las relaciones, tendrían que entrar y no por ensayos de compactación en seco sino por experiencias reales de amasado y posterior compactación, lo cual resultaría en muchos casos lo suficientemente engorroso para ser descartado.

En la norma DIN (1 045) se expone la curva granulométrica discontinua óptima (4,6), para los grupos de tamaños 16/8, 2/1, 1/0,65. Recientemente se han realizado (2) en el centro de investigaciones RWTH de Aachen (RFA) comparaciones entre hormigones (normales y ligeros entre sí) confeccionados con curva granulométrica continua B_{16} y con la discontinua U_{16} ; en todos los casos se obtuvieron valores de resistencias a compresión, estadísticamente menores cuando se empleó la granulometría discontinua.

5. EXPERIENCIAS EN EL INSTITUTO EDUARDO TORROJA

Se estableció un plan de trabajo sobre los tamaños de arena cuarzosa que se establecen en la figura 6 según prescripciones RILEM. El plan se enfocó al estudio de morteros (probetas $4 \times 4 \times 16$ cm).

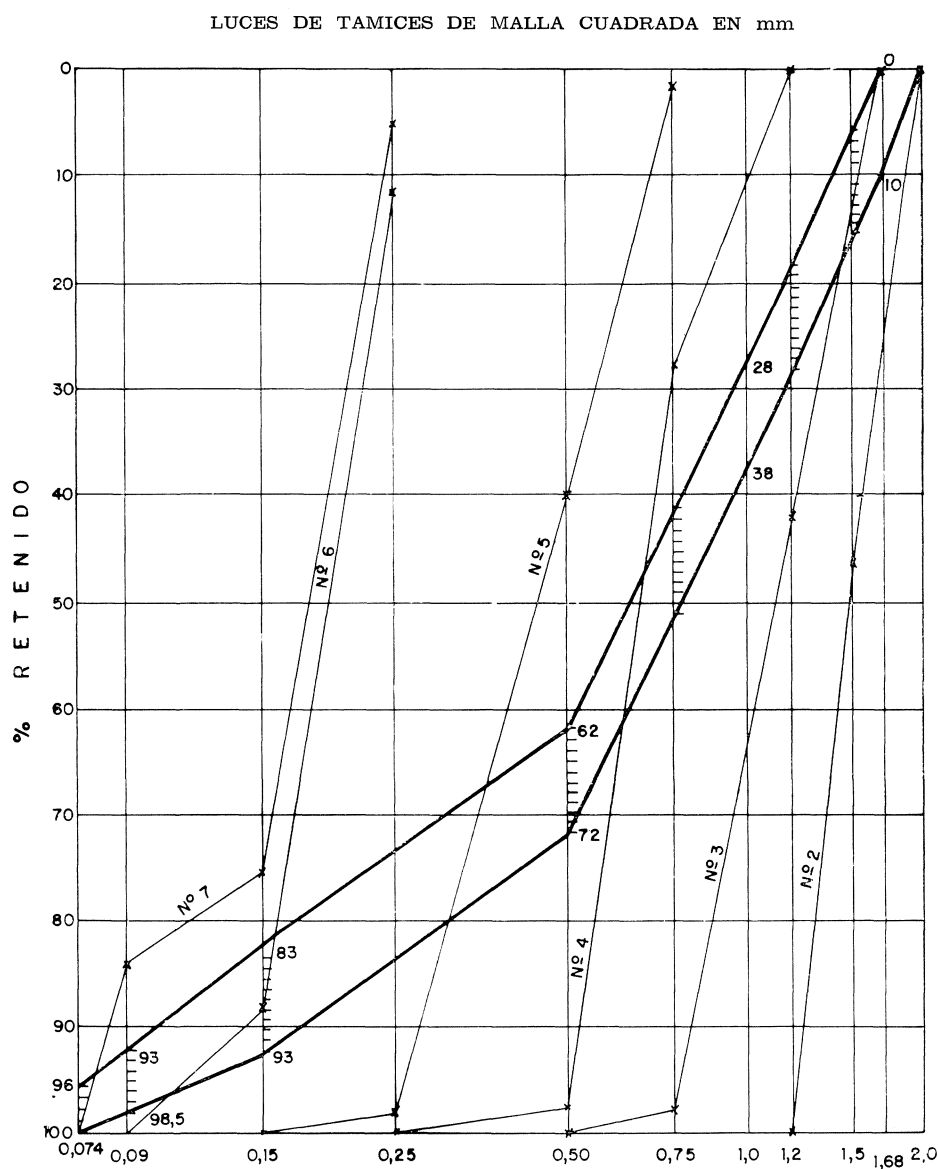


Fig. 6.—Zona granulométrica admisible para las arenas normalizadas.

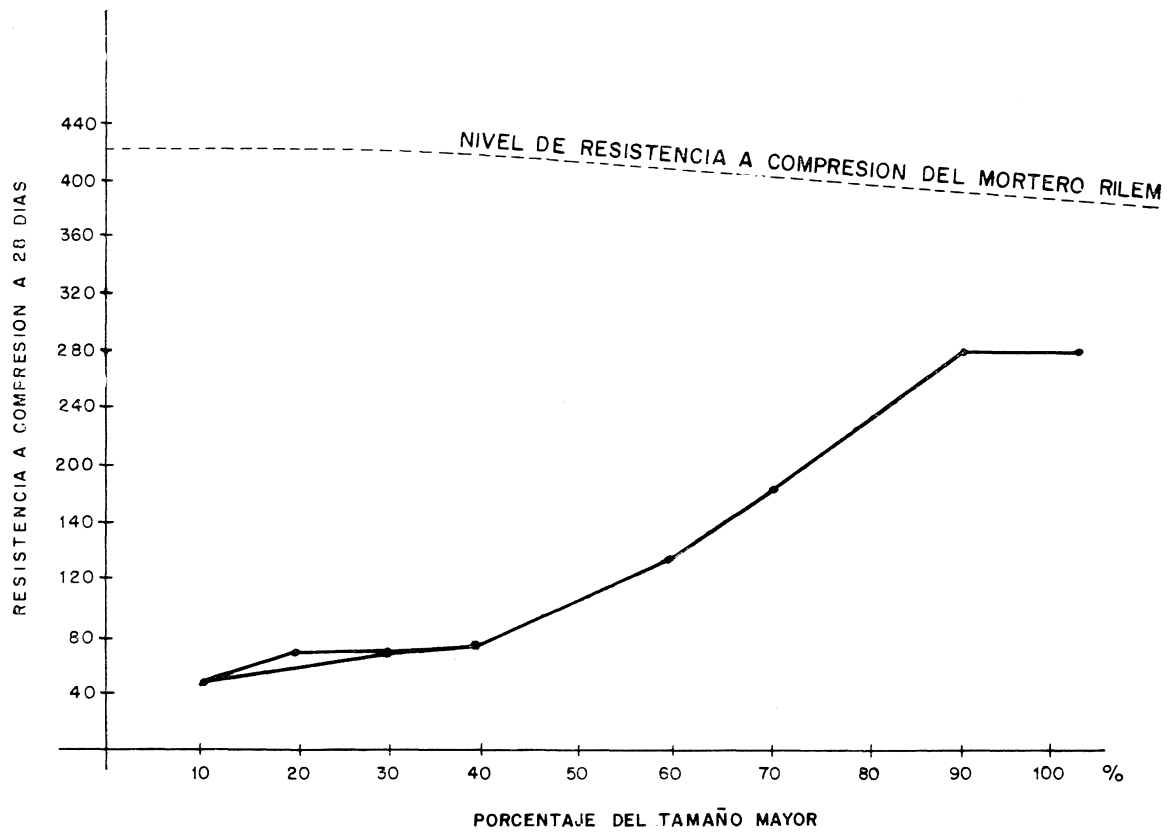


Fig. 7.—Curva de resistencias a compresión de las diferentes mezclas (%) del tamaño 5 con (6) (impalpable) de la arena normalizada.

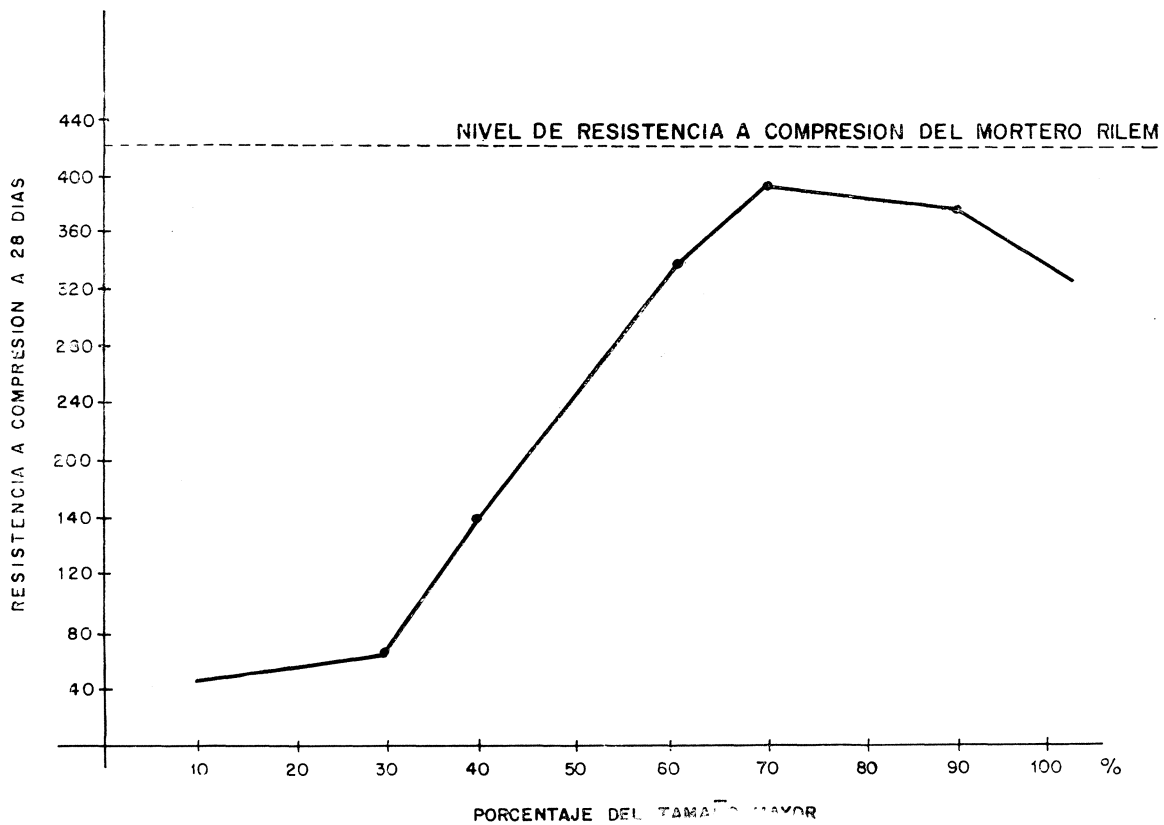


Fig. 8.—Curva de resistencias a compresión de las diferentes mezclas (%) del tamaño 4 con (6) (impalpable) de la arena normalizada.

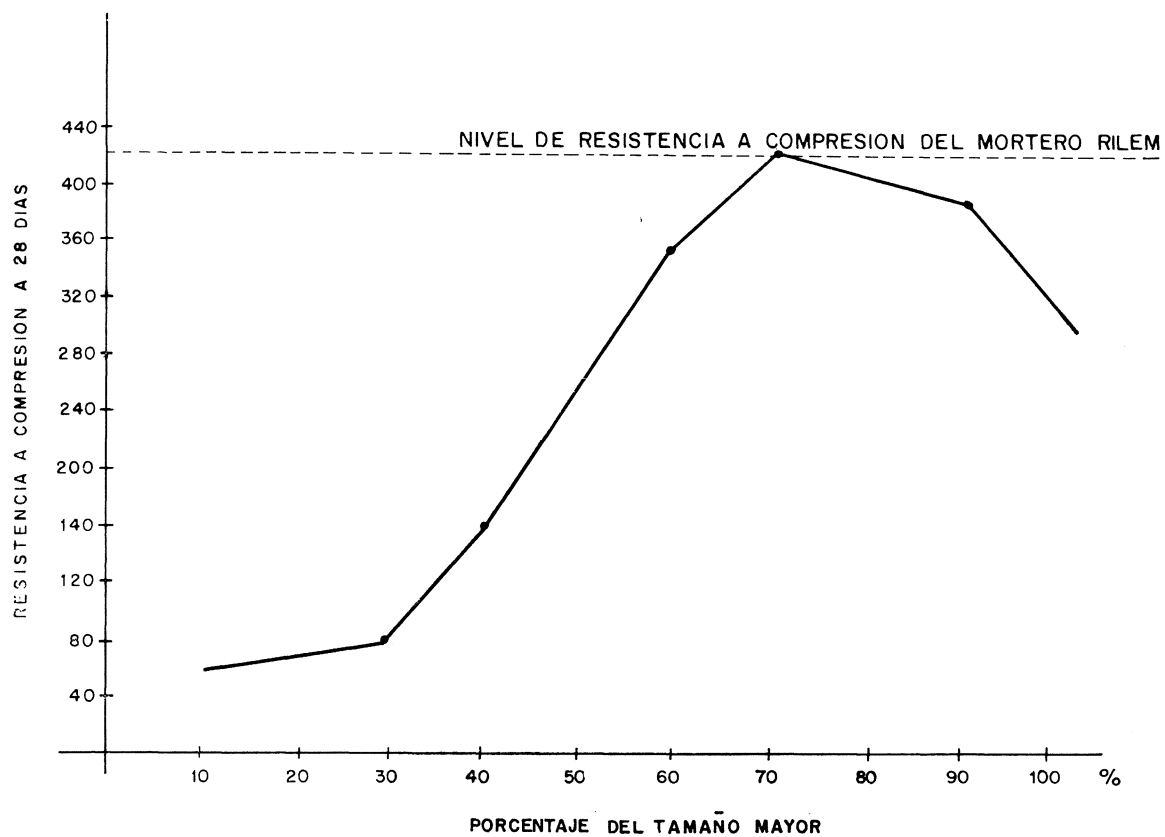


Fig. 9.—Curva de resistencias a compresión de las diferentes mezclas (%) del tamaño 3 con (6) (impalpable) de la arena normalizada.

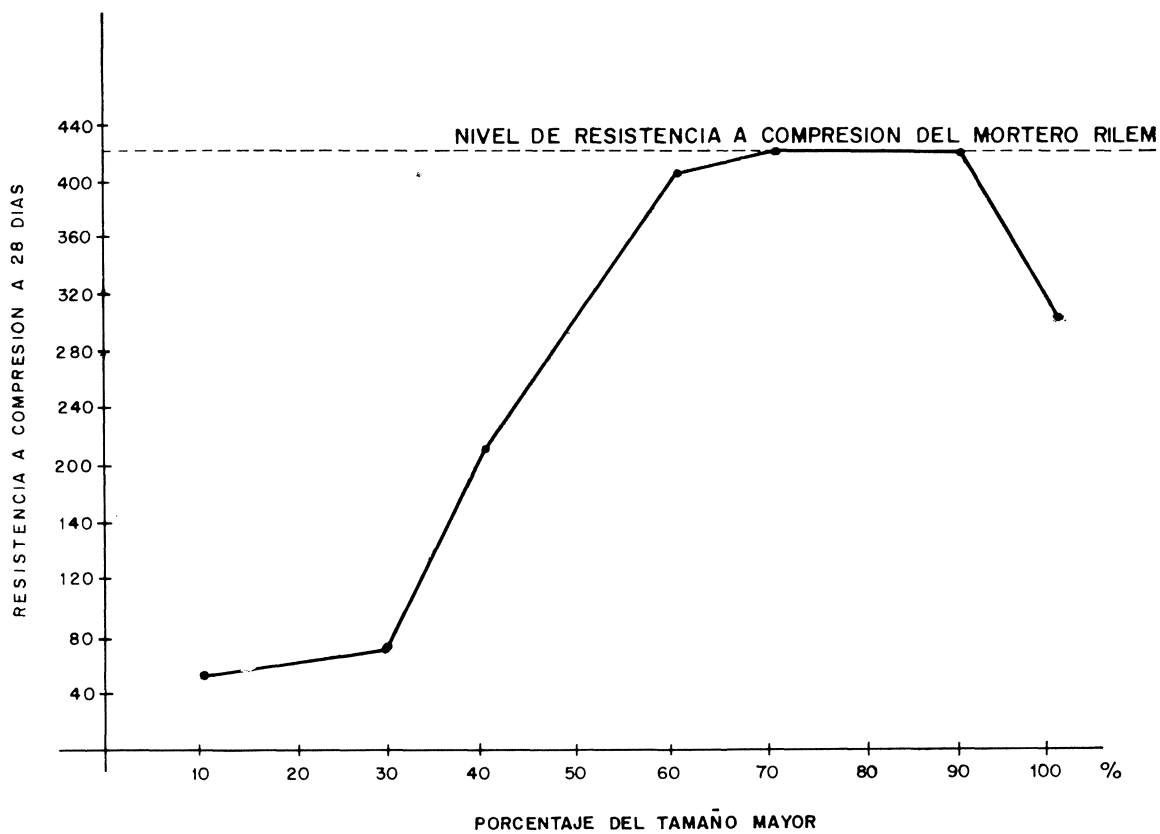


Fig. 10.—Curva de resistencias a compresión de las diferentes mezclas (%) del tamaño 2 con (6) (impalpable) de la arena normalizada.

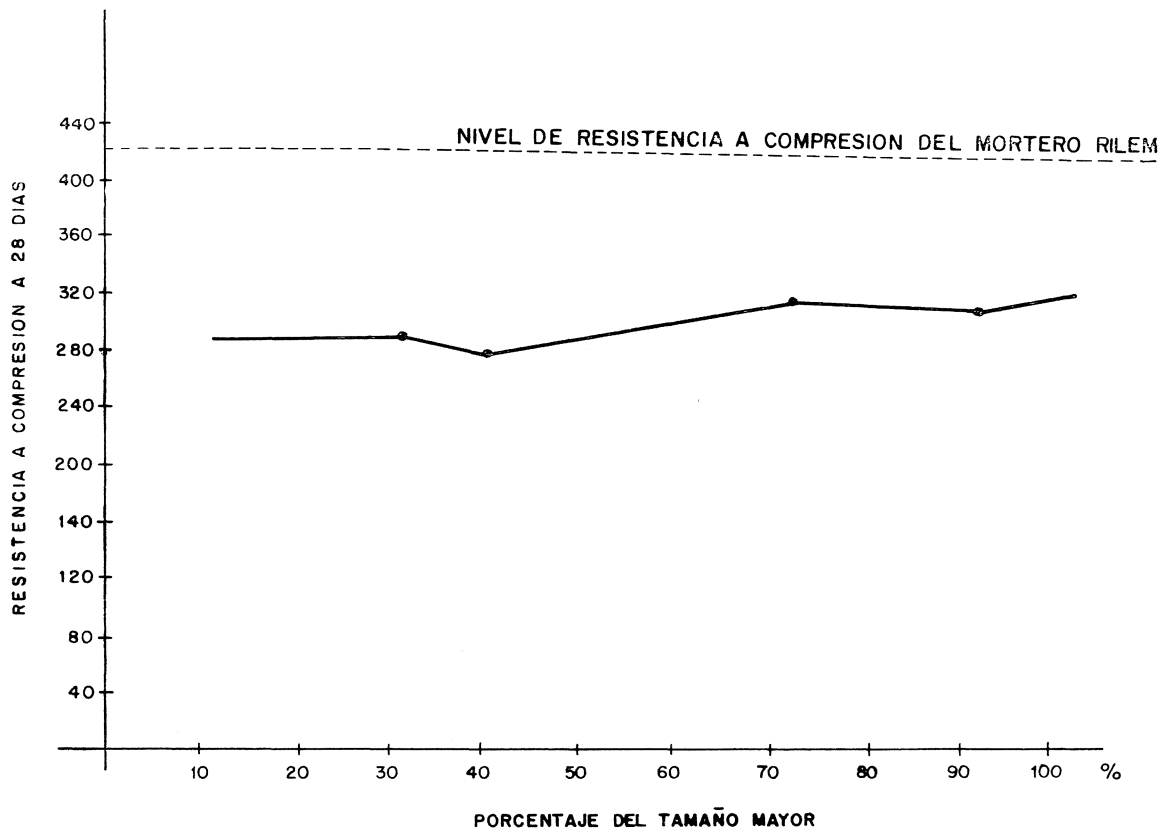


Fig. 11.—Curva de resistencias a compresión de las diferentes mezclas (%) del tamaño 4 con el tamaño 5 de la arena normalizada.

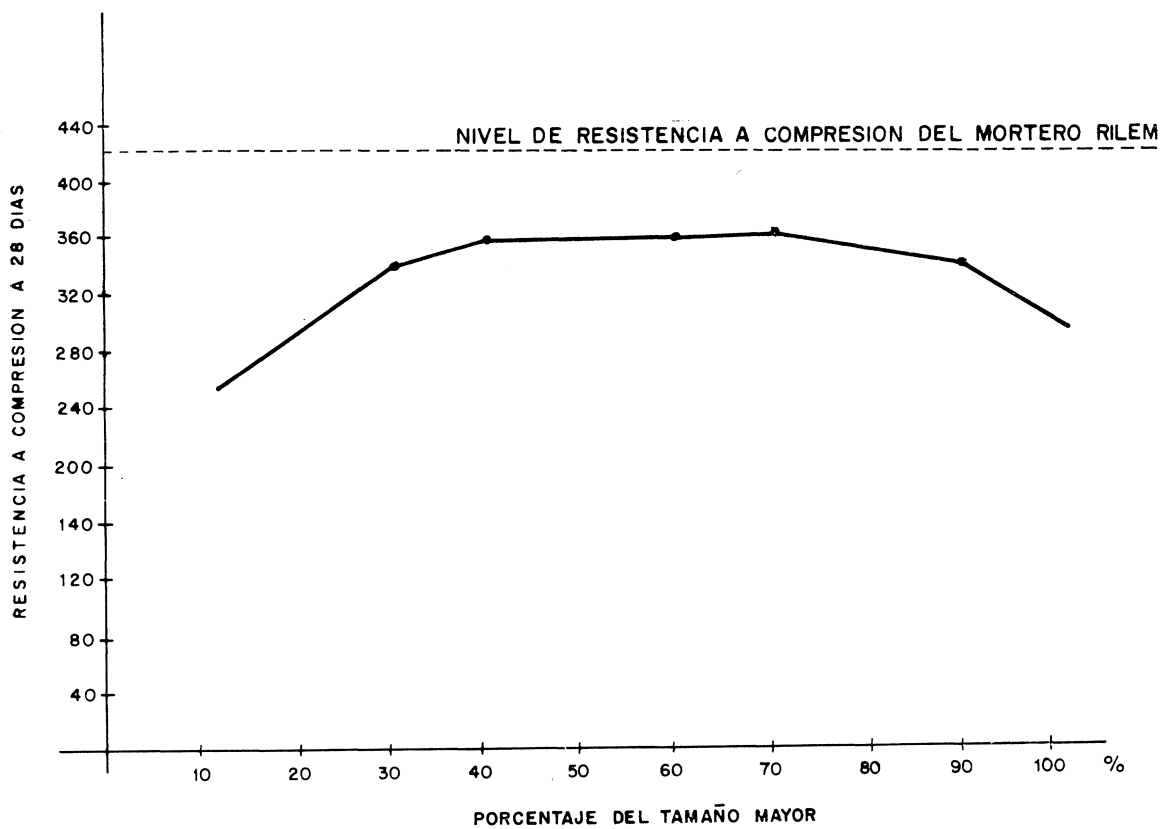


Fig. 12.—Curva de resistencias a compresión de las diferentes mezclas (%) del tamaño 3 con el tamaño 5 de la arena normalizada.

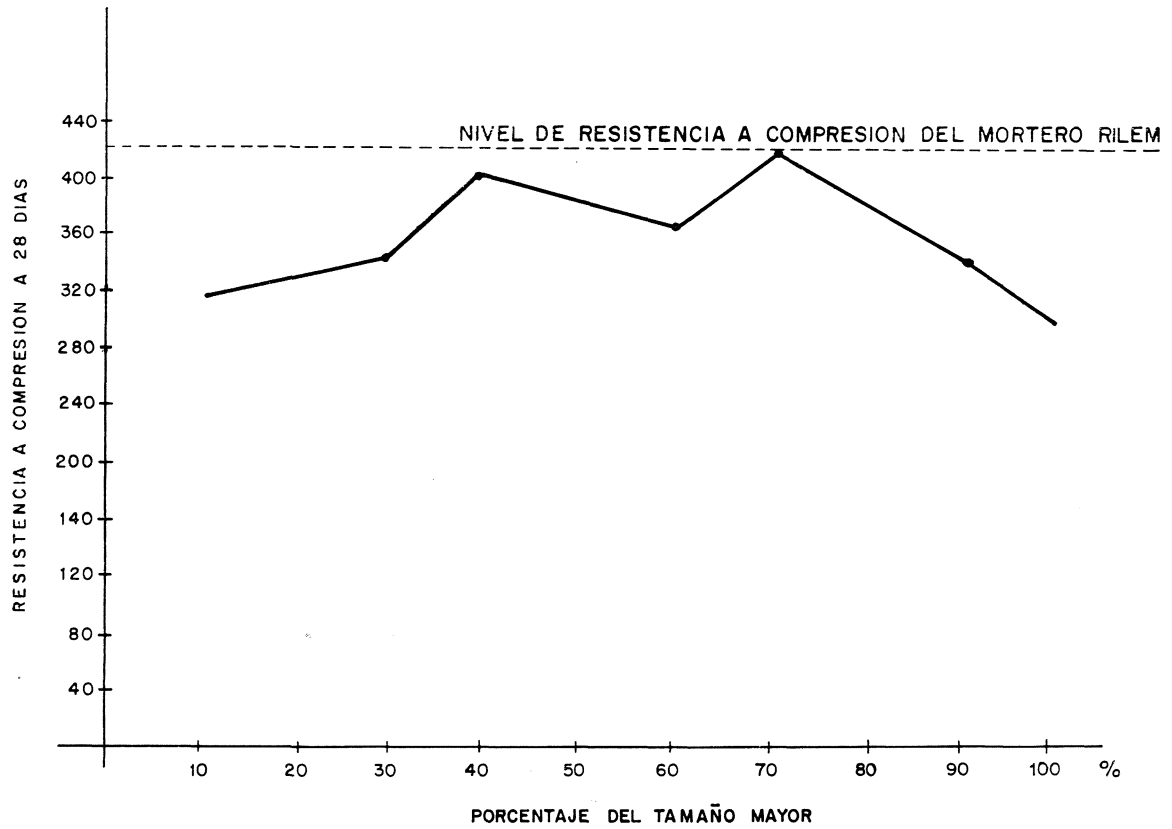


Fig. 13.—Curva de resistencias a compresión de las diferentes mezclas (%) del tamaño 2 con el tamaño 5 de la arena normalizada.

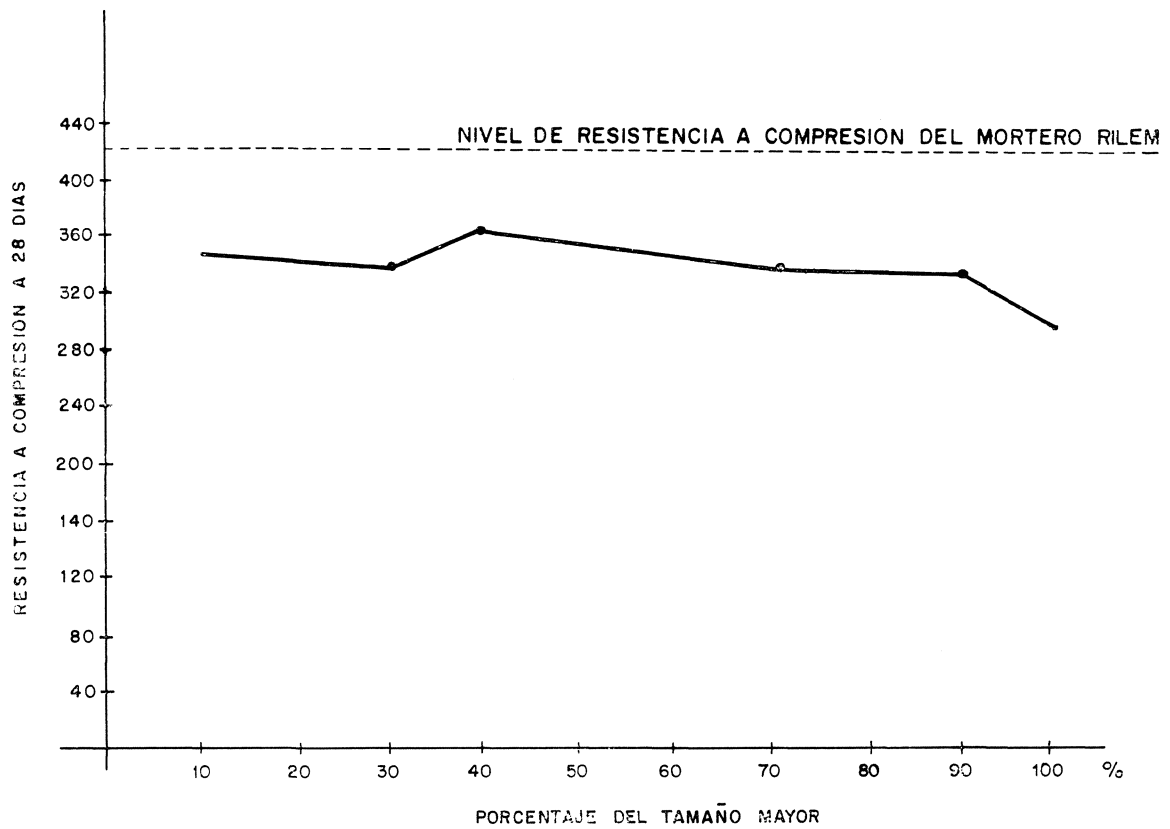


Fig. 14.—Curva de resistencias a compresión de las diferentes mezclas (%) del tamaño 3 con el tamaño 4 de la arena normalizada.

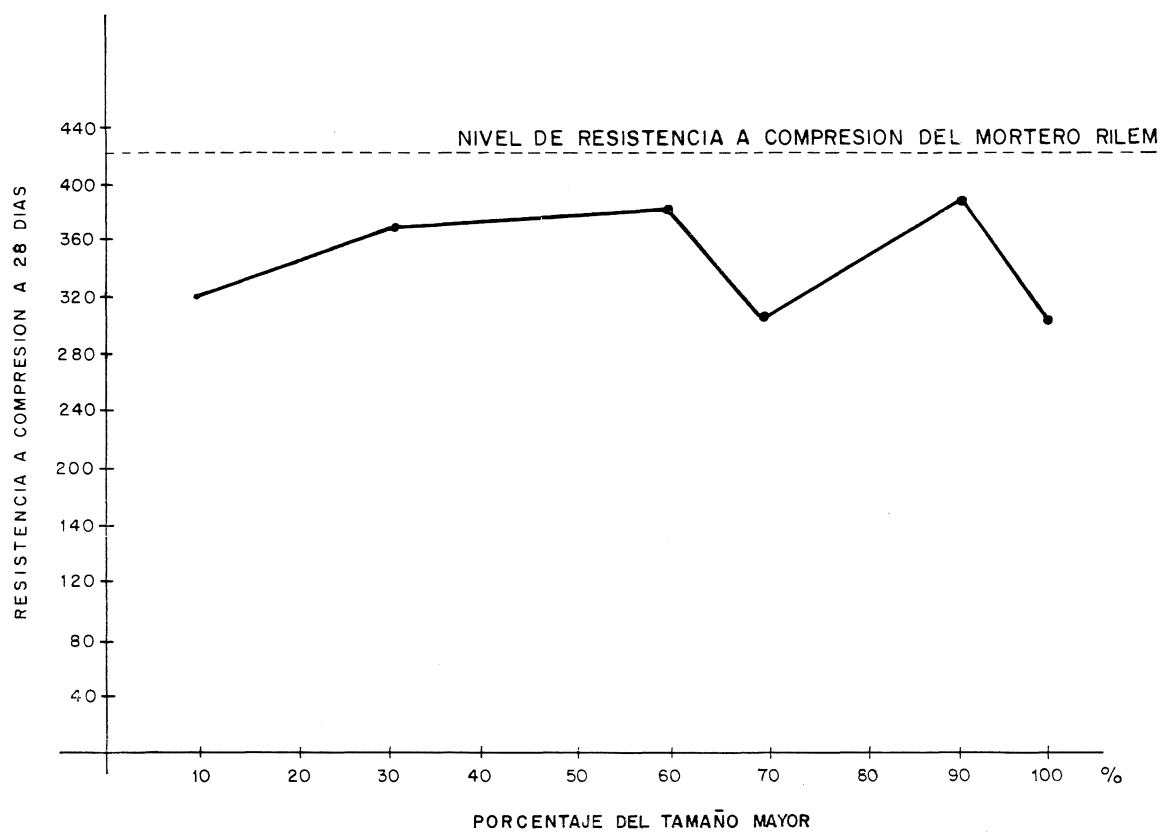


Fig. 15.—Curva de resistencias a compresión de las diferentes mezclas (%) del tamaño 2 con el tamaño 4 de la arena normalizada.

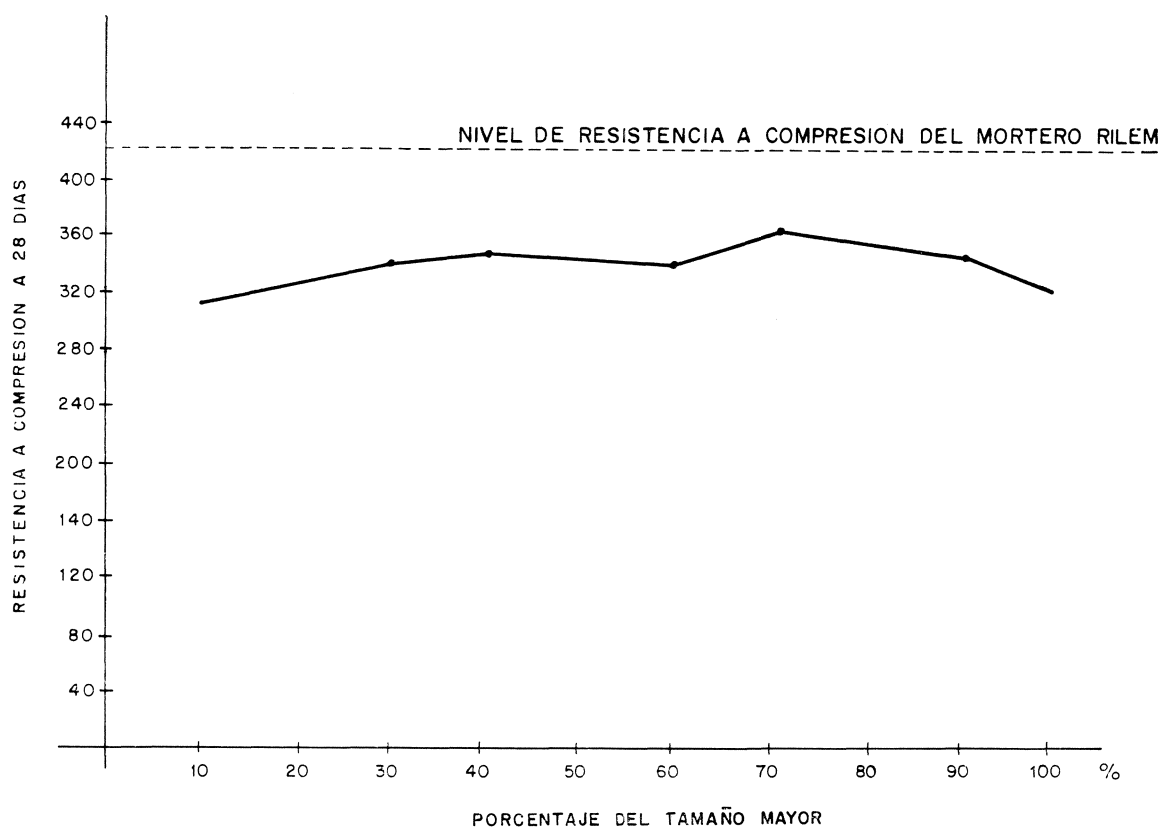


Fig. 16.—Curva de resistencias a compresión de las diferentes mezclas (%) del tamaño 2 con el tamaño 3 de la arena normalizada.

Se efectuaron combinaciones binarias de cada dos tipos de grano en las proporciones de 10, 30, 40, 60, 70, 90 y 100 % (en peso respecto al total) del mayor respecto al menor, que entraban en la mezcla. Las mezclas de árido se realizaron en seco, midiendo la correspondiente compactación, en un recipiente de vidrio graduado. Se utilizó un mismo cemento (PA-350). Se mantuvo la relación agua/cemento constante y se realizó el amasado y posterior compactación según procedimiento RILEM. Se rompieron 6 probetas por cada dato a obtener a la edad de 28 días, tras curado normal. Los resultados se exponen en las figuras 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16.

5.1. Discusión de los resultados obtenidos

Conforme se observa en las figuras indicadas, se pueden destacar solamente tres valores muy próximos a la resistencia a compresión del mortero normal RILEM, que sirvió de referencia. Estos tres valores corresponden a mezclas del 70 % del tamaño 3 (fig. 6) con el 30 % del tamaño 6, así como a las correspondientes del tamaño 2 con el tamaño 6, (70, 30 %) y (90, 10 %). Estos resultados están de acuerdo con lo expuesto por VALETTE pero sólo en lo que se refiere a la relación de tamaños puesto que las proporciones de mezcla no se corresponden a las utilizadas en las experiencias de compactación en seco.

En el orden de valores se puede a su vez observar que aunque son comparables con el valor del mortero normalizado (granulometría continua) no suponen apenas porcentajes de superación significativos respecto a éstos.

6. CONCLUSIONES

— No existe correlación elemental entre el modelo matemático esférico y la realidad de las granulometrías discontinuas, al menos para arenas y ello según nuestra opinión se debe al hecho de que en este modelo hay que admitir que no es el de una compactación óptima ya que para que en la realidad se sitúen los granos más finos por pura sedimentación gravimétrica entre los huecos que quedan entre los mayores tamaños, deben pasar con gran holgura entre éstos.

Desde el mismo punto de vista habría que admitir la relación $d_{2,0b} = D/7,1$ como límite superior de las relaciones entre tamaños de grano, cosa que está de acuerdo con la conclusión de VALETTE, emplear $D_2/D_1 = 1/8$ en caso de emplear tanto árido rodado como machacado.

— Aunque no se puede inferir, en general, de pruebas llevadas a cabo sobre morteros las mismas reglas para hormigones sí se puede asegurar que las granulometrías discontinuas deben ir avaladas por ensayos de resistencia a compresión, cuando éstas se empleen en grandes obras y además el control debe ser escrupuloso, destacando incluso otros parámetros además de la resistencia a compresión.

BIBLIOGRAFIA

- (1) R. VALETTE: Manuel de composition des betons. Método experimental VALETTE. Editions Eyrolles. Paris 1963.
- (2) R. BRODDA und J. W. WEBER: Leicht und normalbetone mit ausfallkörnung und stetiger sieblinie. Beton pp. 340-342. Septiembre 1977.