

INDICE DE FORMA DE LOS ARIDOS

METODO DEL NUMERO DE PIEZAS EN VOLUMEN NORMALIZADO

Por JOSE M.^a MUÑOZ CEBRIAN
Químico.

La forma de los áridos tiene gran importancia en el resultado de los firmes bituminosos, por dos razones:

a) *Porque la resistencia del esqueleto que los áridos constituyen y que es básica para la del firme, depende en gran parte de su forma, y*

b) *Porque en todo firme bituminoso la proporción de betún debe ser la que exactamente corresponda a la superficie específica del árido, que depende de su forma; por tanto, ésta debe permanecer inalterable bajo la acción del tráfico; los elementos pétreos deben desgastarse, pero no partirse.*

Las piedras en forma de lajas y de agujas han sido siempre una preocupación del ingeniero de firmes. Por ello, en los laboratorios hay, desde hace años, la preocupación de buscar un método que permita definir la "forma" y establecer un sistema para medirla. De esta preocupación no estaba ausente el Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo; y la Dirección encargó al Licenciado en Ciencias D. José M.^a Muñoz Cebrián, de la Sección de Pavimentos, del estudio del problema, con las directrices de relacionar volúmenes o superficies del árido con un número que pudiese expresar su forma; en un método rápido y práctico, pues no hay que olvidar es preciso comprobar en el campo la calidad en este aspecto de muchos miles de metros cúbicos en cada obra; el tiempo invertido en el ensayo es, en la práctica, fundamental.

El método desarrollado cumple, en principio, con las condiciones impuestas; pero, naturalmente, no queremos calificarlo más que como una "tentativa de ensayo", esperando para darle carácter definitivo a un mayor tiempo de experimentación, y más que nada a las críticas o sugerencias que nos lleguen sobre el mismo, que la Dirección del Laboratorio solicita, como la colaboración más eficaz ().*

I. Introducción.

La experiencia ha demostrado que en los áridos empleados en las mezclas asfálticas y en los tratamientos superficiales más especialmente, juega un papel muy importante la forma de sus partículas [1].

El efecto de la forma de los áridos en los tratamientos superficiales ha sido poco estudiado. Se han

realizado algunos trabajos referentes a la orientación de las partículas planas durante el apisonado y al efecto de "puente" de las mismas, pero se sabe poco del efecto que éstas producen en las propiedades resistentes y de rodadura de las mezclas. Si se quiere que la relación gravilla-ligante sea la correcta al construir y se mantenga posteriormente evitando así una de las causas mayores de fracaso en los tratamientos superficiales, es necesario que las dimensiones de las partículas se hallen dentro de ciertos límites.

El desgaste de los áridos se ve influido también por la forma de sus partículas. Se han realizado ensayos de desgaste en seco [2] sobre partículas planas alargadas, cúbicas y redondas, obteniendo resultados que demuestran que el desgaste es mayor en las piedras de forma plana y alargada que en las cúbicas, y en éstas mayor que en las redondeadas.

En el caso de mezclas asfálticas, Herrin y Goetz [3] llegaron a la conclusión de que la forma de los áridos tiene menos influencia en la resistencia que su granulometría, pero a pesar de que el trabajo está limitado respecto a los materiales y métodos, se observa en las tres granulometrías estudiadas un aumento en la resistencia de las mezclas variando el tipo del árido grueso desde la grava a la piedra machucada.

Además de esto y aparte de otras consideraciones, la forma de las partículas influye en la cantidad de ligante necesario y, por consiguiente, en la cohesión de la mezcla, ya que la superficie de aquéllas depende de la forma. A este efecto se añade el hecho que durante el apisonado puede producirse una modificación de la granulometría al presentar mayor fragilidad a la rotura las partículas de forma de placa y aguja.

También el rozamiento interno depende de la forma de las partículas a causa de las diferencias de encajamiento de los áridos.

Es, pues, importante el disponer de un método que sirva para clasificar los áridos con arreglo a su forma. Este método ha de ser a su vez sencillo y que permita la comprobación rápida en obra.

II. Métodos en uso.

Todos los métodos actualmente en uso para representar mediante un coeficiente numérico la forma de las gravillas se basan en la medida directa de sus di-

(*) El Director del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, José Luis Escario.

mensiones por diferentes procedimientos, lo cual, además de ser poco preciso es largo y pesado de realizar. Las fórmulas que definen la forma para cada método varían según un criterio estimativo particular, por lo que no existe una verdadera relación entre ellos.

De todas estas fórmulas y métodos, los que parece que interpretan y resuelven mejor el problema son el belga, el inglés y el francés; el primero ha sido aceptado como el mejor y más sencillo por el C.T.M.P. de Bruselas [4], después de un estudio detenido de los métodos existentes.

Para la comparación del método del cubo se han tenido en cuenta estos tres procedimientos, que son en resumen los siguientes:

Método belga. — Fórmula: "Índice de forma" = $\frac{\sum e}{\sum l}$, donde e es la separación mínima de dos planos

paralelos insertando la piedra (espesor) y l la dimensión máxima (longitud). Se determina sobre 100 piedras midiendo con un calibre su espesor y longitud; requiere, por tanto, 200 medidas, dos sumas de 100 sumandos y una división. El tiempo requerido para realizar el ensayo es, para un operador ya práctico, de unos 40-50 minutos y de unos 15 minutos para realizar, con máquina sumadora, las operaciones necesarias; total, una hora aproximadamente. Resulta incómodo de hacer por la atención y cuidado que requiere, se hace casi imprescindible el empleo de la máquina sumadora y no es cómodo para realizarlo en obra.

El espesor medido entre los dos planos del calibre no representa bien la medida real en la piedra, fundamentalmente si se trata de placas, pues en el caso, no muy frecuente desde luego, de placas con forma concoidal, el calibre mide su curvatura y no su espesor real, pudiendo dar como buena una piedra que en realidad no lo es. En el caso más general no se obtiene una medida del espesor medio en cada piedra, pues al ser por definición la separación mínima entre dos planos paralelos, todas las irregularidades de su superficie, las cuales son muy frecuentes y a veces de gran magnitud, dan como resultado un valor para el espesor mayor de su valor medio, obteniéndose coeficientes más altos. Las medidas se hacen sin distinción del tamaño de la fracción ensayada con una precisión de 0.1 mm. redondeando a 0.5 mm., con lo cual la precisión de la medida es menor cuanto menor sea el tamaño de la fracción estudiada. Por último, por este procedimiento no se puede determinar prácticamente la forma de áridos de dimensión $D \leq 8$ milímetros, empleándose, sin embargo, estos calibres en algunos tratamientos superficiales, donde es tan importante conocer su forma.

Método inglés. — Fórmulas: "placa" $e \leq 0.6 g$ y "aguja" $l \geq 1.8 g$, donde g es el diámetro mínimo del agujero a través del cual puede pasar la piedra,

y e y l el significado conocido. Se determinan ensayando las piedras de una fracción determinada en unos calibres especiales que cumplen con las fórmulas, clasificándolas en placas y agujas y expresando el resultado en tanto por ciento. También se pueden determinar con un calibre corriente aplicando después las fórmulas. Necesita medir un mínimo de 300 piedras para tamaños de 2" a 1"; de 200, para 1" a 1/2", y de 100, para 1/2" a 1/4" [5]. Este ensayo tiene inconvenientes similares al anterior en cuanto a lentitud, pues si bien la clasificación se simplifica con el empleo de calibres especiales, la cantidad de muestra que hay que ensayar, para que sea representativa, es mayor.

Método francés. — El procedimiento es similar al anterior, sólo que las fórmulas son: "placa" $e \leq 0.5 g$ y "aguja" $l \geq 2 g$.

R. Peltier ha elaborado un nuevo procedimiento, que está normalizando el laboratorio de Ponts et Chaussées. La forma viene definida por $f = 100 \frac{V}{e^3}$; el volumen se obtiene a partir de la densidad, que puede determinarse por tablas para cada tipo de roca. No se ha llegado a una conclusión definitiva, pero en principio parece que salva algunos inconvenientes de los anteriores y tiene una mayor precisión. Por otra parte, Ahu ha introducido una modificación que resulta interesante desde el punto de vista práctico [6].

Debido a la rigidez de las fórmulas, el método inglés y francés no dice en su resultado nada acerca de la magnitud de las placas y agujas, es decir, si todas están alrededor del valor límite de la fórmula, como ocurre en la gran mayoría de los casos con las placas, o si se apartan más o menos de él obteniéndose como consecuencia un resultado que indica tan sólo que una piedra es mala porque el tanto por ciento resultante se salga de las tolerancias establecidas, dándose el caso de que dos áridos sean malos teniendo el mismo tanto por ciento de placas, por ejemplo, pero que en realidad uno sea mucho peor que el otro.

III. Método del número de piezas en volumen normalizado.

I.º GENERALIDADES.

El coeficiente de forma, según este procedimiento, es el número de piezas del tamaño considerado que caben en un recipiente cúbico de dimensiones determinadas, cuando se realiza según las instrucciones del método.

Cuanto mayor es el número de piezas, la calidad de la piedra respecto a su forma es peor, pudiéndose obtener una escala de valores crecientes que va desde la forma cúbica teórica hasta su mayor o menor descomposición en placas, pasando por las formas intermedias y sus combinaciones.

2.º FUNDAMENTO.

Si se separa de *manera eficiente*, entre dos tamices consecutivos *muy próximos*, el árido a ensayar y se introduce, siguiendo las instrucciones del método, en un recipiente cúbico, que tenga por aristas *cinco veces* el valor medio de las aberturas de los tamices empleados en su separación, el número de piezas que caben en el cubo está en relación muy íntima con la *forma de las mismas*.

El estudio teórico del método se realizó con esferas, que es la forma o cuerpo límite de los poliedros regulares cuando el número de sus caras aumenta indefinidamente.

La ordenación de las esferas dentro de un cubo de aristas iguales al valor del diámetro por un número entero determinado, varía según sea este número. Cuando este número es ≤ 6 , las esferas (por término medio) se ordenan en línea, es decir, las líneas que unirían todos sus centros para cada capa en sentido horizontal, sería una línea recta formando entre todas cuadros regulares. La primera capa (en el caso de ser 6 el número) estaría formada por seis filas de seis esferas; total, 36 esferas (fig. 1.^a). La segunda capa no estaría superpuesta a ésta, pues las esferas tienden a ocupar la posición de máxima estabilidad y compacidad, y aunque se ordenarían tam-

cuando están perfectamente ordenadas, es algo mayor en el cubo construido con factor igual a 6 que cuando éste es menor; esto indica (aparte la razón de la distribución estadística del fenómeno) que el número 6 está en una posición crítica. En efecto, cuando el cubo está construido con un factor multiplicativo igual a 7

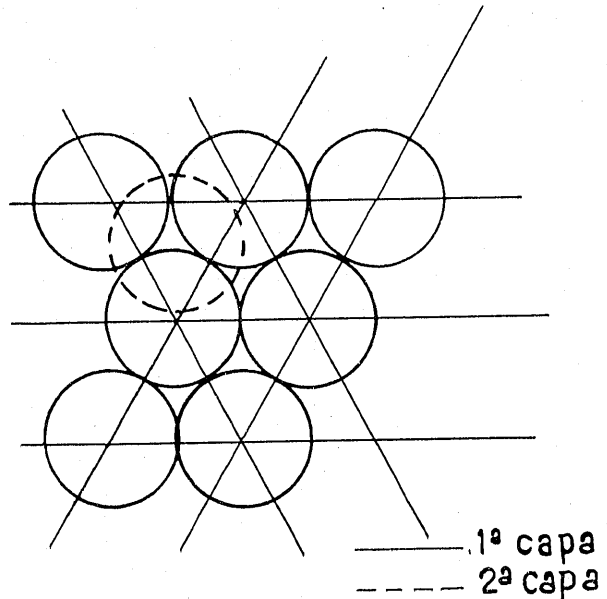


Figura 2.^a

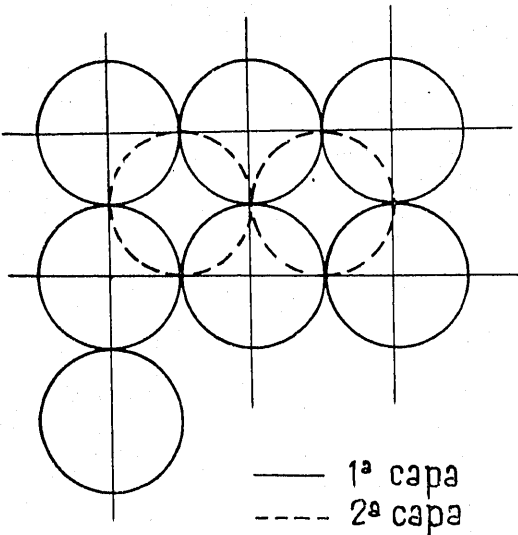


Figura 1.^a

bién en línea cabrían 25 esferas, cinco filas de cinco esferas. La tercera capa tendría 36, la cuarta 25, y así sucesivamente hasta completar nueve capas con un total de 280 esferas. La práctica ha demostrado que cuando se echan al azar las esferas y se golpea el cubo con la mano (lo mismo que cuando se hace el ensayo real con los áridos) el tanto por ciento de esferas que caben en el cubo respecto al valor ideal,

la ordenación de las esferas es distinta (fig. 2.^a); ya no se agrupan en línea, sino al "tresbolillo", es decir, las líneas que unirían todos los centros de las esferas en contacto tangencial y en sentido horizontal formarían entre ellas triángulos equiláteros y, como consecuencia, en vez de caber siete filas cabrían ocho, colocándose las otras capas sucesivas en la forma de más estabilidad y compacidad. El cubo construido con factor multiplicativo igual a 7 tendría la ventaja de que la ordenación sería la más real y natural, pero el serio inconveniente, además del excesivo número de piezas que habría que contar, de que en el ensayo real con la fracción del árido correspondiente, como todas las piezas no son del mismo tamaño, puede darse el caso de ser éstas mayores del valor medio tomado para la construcción del cubo. Como consecuencia, la ordenación sería más del tipo en línea que al tresbolillo y el número de piezas que cabrían sería menor que si se ordenaran en la forma prevista, dando un resultado erróneo. Con el cubo construido con factor multiplicativo igual a 6 se tendría la ventaja de ser menor el número de piezas a contar, pero también el inconveniente del anterior, sólo que en sentido inverso, de que pueden ser más pequeñas las piezas de la fracción y ordenarse al tresbolillo en vez de en línea, dando un número mayor de piezas que el previsto, con lo que se falsearía también el resultado. De todo lo anterior se deduce que tanto los cubos construidos

con factor multiplicativo 6 ó 7 están en una posición crítica que es preciso evitar. Tomando como factor un número mayor de 7 se evitaría el error cometido por defecto, pero el número de piezas a contar sería excesivo e innecesario. Como por otro lado conviene que dicho número de piezas no sea demasiado pequeño, se ha elegido como factor multiplicativo el 5, con el que se puede considerar soslayado el error por exceso y proporciona además un número de piezas a contar cómodo y con suficiente precisión.

En un cubo construido según el criterio establecido anteriormente, el número de piezas que se alo-

mero de piedras era menor que en el caso del cubo. b) La ordenación de las esferas varía mucho con una pequeña variación del tamaño. c) No se podría suponer el número de cubos ideales. d) La corrección de las agujas sería más incómoda y menos racional que en el caso del cubo.

3.º OBSERVACIONES.

a) La preparación de la muestra de ensayo por tamizado ha de ser lo más perfecta posible, de manera que el árido así clasificado sea íntegramente del ta-

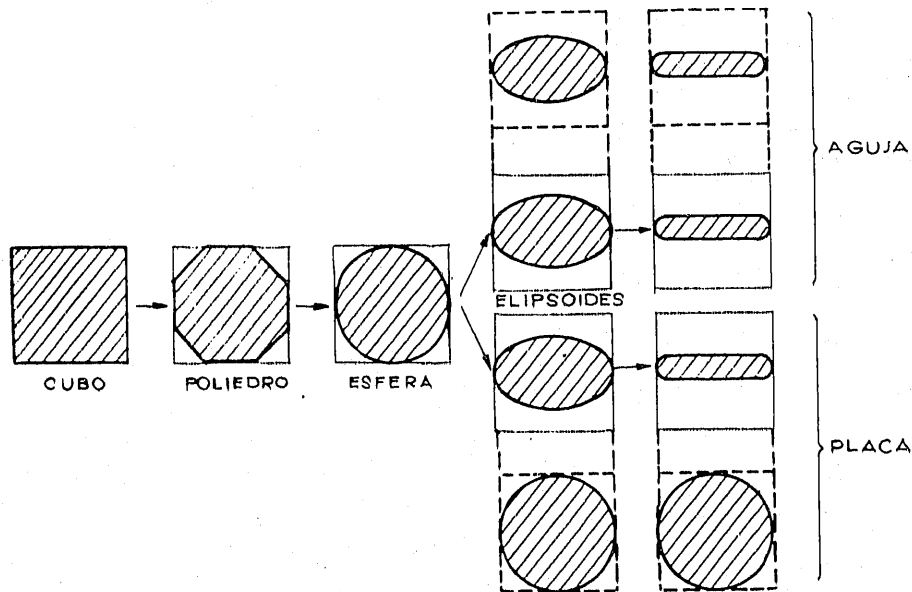


Fig. 3.ª — Evolución de la forma. Número de piezas por unidad de volumen.

jan en él, siguiendo las instrucciones del método, está en íntima relación con su forma. Teóricamente, si las piezas fueran cubos perfectos cabrían 125, si fueran esferas perfectas 148; por tanto, el número de piezas que cabrían dentro del cubo formarían una serie continua, que iría desde el cubo hasta la placa pasando por la esfera, según que el número de piezas fuera aumentado (fig. 3.ª).

Con el fin de evitar una causa de posible error debido a que en las aristas del cubo las piedras no se colocasen como en el interior dejando más huecos, se pensó en emplear recipientes cilindricos. El cilindro, para una fracción determinada, tenía como base una área igual a la del cubo correspondiente, y por altura la necesaria para que tuviera el mismo volumen. El empleo del cilindro no aventaja al cubo ni justifica su empleo, teniendo como inconvenientes: a) Las caras planas no se adaptan a las curvas, siendo mayor el error por superficie curva que por ángulos, como lo demuestra el que en todas las determinaciones el nú-

maño comprendido entre los dos tamices empleados, ya que piezas de un tamaño inferior a la abertura menor daría un error por exceso en el recuento. El tamizado debe hacerse también de manera que todo el árido grueso en la muestra tomada, capaz de pasar por el tamiz de abertura mayor, pase totalmente con objeto de que la fracción sea representativa del material.

b) Los tamices a emplear en la separación de cada fracción deben tener unas aberturas lo más próximas posibles, dentro de la relación de la $\sqrt{2}$, ya que cuanto menos diferencia exista, el tanto por ciento de desviación de la media respecto a las aberturas de los tamices será menor y las piezas clasificadas de un tamaño más uniforme, disminuyendo notablemente el error debido a los diferentes tamaños dentro de cada fracción, que traería como consecuencia, en el recuento, un número diferente de piezas para una misma fracción y forma de los áridos al ensayarlos en su cubo correspondiente.

c) La desviación de la media empleada para la construcción del cubo, respecto a los dos tamices de la fracción correspondiente, influye en la precisión del método, pues cuanto mayor sea hay más probabilidades de que la ordenación se aproxime a la crítica y varíe el número de piezas contenidas en el cubo. Esto se puede corregir en un 50 por 100 intercalando otros tamices que ya no seguirían la relación de la $\sqrt[4]{2}$,

sino la $\sqrt[4]{2}$, y construyendo cubos con arreglo a estas fracciones. Aunque no parece necesario introducir esta modificación, conviene tener en cuenta que este posible error se pueda corregir notablemente. La diferencia entre las desviaciones, al pasar de unas fracciones a otras, es aproximadamente un 6 por 100 y no afecta gran cosa a la correlación entre ellas.

d) Cuando en una muestra abundan las agujas, el número real de piedras obtenidas en el recuento es menor que el que le correspondería dada su mala calidad de forma. Esto es debido a que una aguja pesa en el recuento como una sola piedra cuando en realidad se puede considerar que es la agrupación de dos o más del tamaño de la fracción ensayada, necesiándose una corrección que dé el número de piedras a que equivale una aguja determinada para sumárselas al número obtenido en el recuento y corregir este defecto. El modo de hacer esta corrección se describe en el procedimiento de ensayo del apéndice. Para el cálculo de los resultados recogidos en las tablas se había establecido como definición de aguja para hacer la corrección que $l \cong 1,9g$, siendo g la abertura mínima del agujero a través del cual puede pasar la piedra; pero visto el error por defecto que se cometía se ha eliminado prácticamente modificando la anterior definición por $l \cong 2g$, donde g es ahora la abertura media entre los dos tamices de la fracción ensayada, con la cual, además, la raya de corrección de agujas marcada en el cubo coincide con una de las cinco divisiones del mismo.

IV. Comprobación experimental y comparación con otros métodos.

1.º RESULTADOS.

El trabajo de laboratorio se ha realizado sobre muestras de áridos de machaqueo procedentes de distintas obras, estando ya clasificadas por su estación de cribado; por tanto, para prepararlas para el ensayo de forma, tan sólo se han tamizado entre los tamices correspondientes para obtener las fracciones de ensayo, estando por ello el tamaño de éstas supeditado a la clasificación primitiva, factor muy importante, ya que las aberturas de las cribas de obra son, por lo general, diferentes a las de los tamices *standard*, pudiendo ocurrir, como puede verse en alguna de las muestras analizadas, que el tamaño de una fracción determinada no corresponde enteramente a

la que se obtendría de tamizar el árido tal como sale de la estación de machaqueo por los tamices de ensayo.

De momento se han analizado diferentes muestras de las fracciones: $3/8''-1/4''$; $1/2''-3/8''$; $3/4''-1/2''$ y $1''-3/4''$, pensando continuar con los tamaños de $1\ 1/2''-1''$; $2''-1\ 1/2''$ e incluso llegar hasta las $4''$ con objeto de comprobar con más amplitud la correlación entre distintas fracciones y ver las modificaciones que habría que dar al procedimiento operativo al ensayar fracciones de gran tamaño.

La comparación del método del cubo se ha hecho principalmente con el método belga. Aprovechando las medidas efectuadas sobre las 100 piedras, se han calculado las placas y agujas siguiendo las fórmulas francesas e inglesas, datos que también se han tenido en cuenta para la comparación, sólo que en vez de considerar aisladamente el tanto por ciento de placas y agujas se han agrupado dándoles el calificativo de defectuosas inglesas y francesas; esto es, la suma del tanto por ciento de placas y agujas descontando una vez la que es al mismo tiempo placa y aguja. Cuando se trate de comparar las placas y agujas inglesas con las especificaciones correspondientes, hay que tener en cuenta: 1.º, que en las fórmulas inglesas g se ha tomado como el diámetro o abertura mínima del agujero a través del cual puede pasar la piedra [4], y, sin embargo, en la especificación B.S. g es el diámetro medio de los tamices empleados en separar la fracción; esto tiene como consecuencia que el número de agujas es menor que el que se obtendría siguiendo la B. S. y el número de placas mayor; 2.º, la B.S. especifica los tantos por ciento en peso, y aquí se dan en número, por lo que los resultados obtenidos parece lógico que sean generalmente mayores numéricamente en el caso de placas y menores tratándose de agujas.

Todas las medidas se han hecho con un calibre redondeando a 0,5 mm. Las mismas muestras se han ensayado por el método del cubo, obteniendo el coeficiente correspondiente hecha la corrección de las agujas como se indica en el procedimiento de ensayo.

Los resultados se resumen en las tablas I a IV. En ellas las muestras se han ordenado con arreglo al "índice de forma belga" del menor al mayor coeficiente; a continuación van los resultados obtenidos por el método del cubo y por el inglés y francés. De los dos números que se dan el primero es el número de piedras, hecha la corrección de las agujas (verdadero coeficiente), y el segundo el número real de piedras contenidas en el cubo correspondiente. Cada fracción lleva las dimensiones del cubo con que han sido ensayadas, así como la desviación de la media empleada en la fabricación del cubo respecto a los dos tamices de la fracción. También se indican las observaciones respecto al tamaño de la fracción, es decir, si es pequeña, grande o uniforme respecto a lo que sobre este particular se ha dicho anteriormente.

TABLA I

Tamaño de la fracción	3/8" - 1/4" (9,52 - 6,35 mm.)															
Medidas del cubo	ARISTA : 5 × 7,93 mm. = 39,65 mm.															
Desviación media	20,2 %															
Muestra número	10	14	11	7	12	15	2	5	1	6	8	4	3	9	13	
Tipo de roca	Caliza	Caliza	Caliza	Caliza	Caliza	Caliza	Caliza Sedi-mentaria	Caliza	Pórfido Dia-básico	Caliza	Caliza	Micro-granito	Caliza Sedi-mentaria	Basalto oliví-nico	Silíceo Cálceico rodado	
BÉLGICA: $\Sigma e/\Sigma l$	0,290	0,292	0,312	0,313	0,320	0,340	0,404	0,406	0,410	0,411	0,420	0,430	0,438	0,439	0,442	
Método {	Coeficiente corregido	186	194	189	192	173	174	147	162	154	147	154	142	137	147	145
	Número real	134	172	164	180	139	150	138	156	146	134	145	134	133	143	143
INGLATERRA: Aguja $l \geq 1,8 g, \%$	25	14	12	4	20	18	12	3	12	10	6	7	5	3	2	
FRANCIA: Aguja $l \geq 2 g, \%$. .	13	9	5	1	10	7	3	1	5	2	1	1	1	1	0	
INGLATERRA: Placa $e \leq 0,6 g, \%$	80	85	79	79	78	75	62	60	57	58	61	53	51	55	68	
FRANCIA: Placa $e \leq 0,5 g, \%$. .	67	63	61	65	50	55	34	39	29	33	39	26	26	32	38	
INGLATERRA: Defectuosas, % . . .	86	89	80	80	87	81	64	61	60	62	65	58	54	58	68	
FRANCIA: Defectuosas, %	72	69	63	66	56	59	35	39	32	34	40	27	26	33	38	
Observaciones al tamaño.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Otras Observaciones.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

TABLA II

Tamaño de la fracción	1/2" - 3/8" (12,7 - 9,52 mm.)											
Medidas del cubo	ARISTA : 5 × 11,11 mm. = 55,55 mm.											
Desviación media	14,4 %											
Muestra número	3	7	5	9	4	6	10	2	8	11	1	
Tipo de roca	Pórfido diabásico	Basáltica	Poligénica Cuarcitosa	Cuarcita	Poligénica Cuarcitosa	Silíceo Cuarzosa	Caliza	Caliza	Caliza	Caliza	Granítica	
BÉLGICA: $\Sigma e/\Sigma l$	0,331	0,376	0,379	0,389	0,391	0,395	0,397	0,402	0,425	0,430	0,440	
Método {	Coeficiente corregido	180	156	152	163	150	150	142	151	136	137	135
	Número real	169	132	146	148	141	132	121	135	126	125	123
INGLATERRA: Aguja $l \geq 1,8 g, \%$	18	21	12	12	8	13	21	19	9	14	8	
FRANCIA: Aguja $l \geq 2 g, \%$. . .	7	8	4	8	5	7	11	7	7	7	3	
INGLATERRA: Placa $e \leq 0,6 g, \%$	69	58	55	49	54	62	44	52	38	42	40	
FRANCIA: Placa $e \leq 0,5 g, \%$. .	54	42	38	39	37	32	26	30	27	23	20	
INGLATERRA: Defectuosas, % . . .	71	64	59	53	58	63	56	60	41	50	44	
FRANCIA: Defectuosas, %	56	46	41	42	41	36	35	36	31	29	21	
Observaciones al tamaño.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Otras observaciones.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

TABLA III

Tamaño de la fracción	3/4" - 1/2" (19,1 - 12,7 mm.)							
Medidas del cubo	ARISTA : 5 × 15,9 mm. = 79,5 mm.							
Desviación media	20,2 %							
Muestra número	7	1	4	3	2	5	8	6
Tipo de roca	Caliza	Caliza	Basalto	Cuarcita	Caliza dolomítica	Granito gneis	Cuarcita	Caliza dolomítica
BÉLGICA: $\Sigma e/\Sigma l$	0,341	0,365	0,401	0,404	0,420	0,424	0,425	0,426
Método del cubo {								
Coeficiente corregido	165	184	189	154	141	150	157	140
Número real	131	179	184	142	133	147	148	134
INGLATERRA: Aguja $l \geq 1,8 g, \%$	23	6	3	5	8	5	4	10
FRANCIA: Aguja $l \geq 2 g, \%$	15	2	1	3	2	3	2	2
INGLATERRA: Placa $e \leq 0,6 g, \%$	68	80	80	60	52	53	56	54
FRANCIA: Placa $e \leq 0,5 g, \%$	35	55	39	32	28	28	30	25
INGLATERRA: Defectuosas, %	77	80	81	63	57	56	58	58
FRANCIA: Defectuosas, %	48	55	40	35	30	31	31	27
Observaciones al tamaño	Lig. grande	Pequeña	Pequeña	—	—	Lig. peq.	Pequeña	—
Otras observaciones	—	—	—	—	—	—	—	—

TABLA IV

Tamaño de la fracción	1" - 3/4" (25,4 - 19,1 mm)						
Medidas del cubo	ARISTA : 5 × 22,25 mm. = 111,25 mm.						
Desviación media	13,8 %						
Muestra número	2	2'	5	5'	3	1	1'
Tipo de roca	Cuarcita	Cuarcita	Microgranito	Microgranito	Granito, grano grueso	Cuarcita	Cuarcita
BÉLGICA: $\Sigma e/\Sigma l$	0,383	0,394	0,394	0,405	0,405	0,412	0,462
Método del cubo {							
Coeficiente corregido	166	152	158	157	155	159	145
Número real	140	134	143	153	146	154	143
INGLATERRA: Aguja $l \geq 1,8 g, \%$	12	17	14	5	7	7	6
FRANCIA: Aguja $l \geq 2 g, \%$	6	7	5	0	5	2	1
INGLATERRA: Placa $e \leq 0,6 g, \%$	60	49	52	59	59	54	35
FRANCIA: Placa $e \leq 0,5 g, \%$	29	29	33	33	24	30	17
INGLATERRA: Defectuosas, %	66	60	58	60	64	58	39
FRANCIA: Defectuosas, %	34	33	37	33	28	32	18
Observaciones al tamaño	—	—	—	Lig. peq.	Lig. peq.	Lig. peq.	Muy peq.
Otras observaciones	—	Remachada	—	Remachada	—	—	Remachada

te. Asimismo figura para cada muestra el tipo de roca a la que pertenece.

2.º OBSERVACIONES.

En los resultados indicados en las tablas I a IV se puede observar:

Hay muestras que por el resultado con el método del cubo les correspondería otra posición en la ordenación de la tabla al compararlas con el método belga, pero coincidiendo, sin embargo, con los métodos inglés y francés. Por ejemplo, en la tabla I la muestra número 13 da el mejor coeficiente belga, obteniéndose con el cubo un número mayor que algunas de las muestras anteriores, por lo que resulta peor que éstas; observando el tanto por ciento de piedras defectuosas inglesas y francesas se ve que le correspondería estar, en efecto, delante de ellas en la ordenación. En este caso concreto se debe a que la muestra número 13 es una grava rodada con muchas placas de forma lenticular, por lo que su dimensión mayor es pequeña relativamente, dando por tanto un coeficiente belga mayor que el que le corresponde realmente. El caso inverso lo tenemos en la muestra número 3, que da un coeficiente belga peor que los números 9 y 13, y con el método del cubo mejor que éstas, y la mejor de la serie, siendo a su vez también la mejor por el método inglés y francés. Un resultado anormal corresponde a la muestra número 2, en la que parecen estar bastante de acuerdo los métodos belga, inglés y francés, pero no el del cubo; esta muestra tiene más abundancia de agujas y este método da valores algo más bajos en estos casos. Este error se ha reducido satisfactoriamente cambiando la definición de aguja empleada en las determinaciones de los resultados recogidos en las tablas. Algunas pequeñas variaciones se encontrarán también debido a que las muestras ensayadas estaban clasificadas en obra, no siendo íntegramente del tamaño en que se las clasificó para hacer el ensayo. En la casilla de observaciones al tamaño se han indicado los casos más claros, y el que no figure en todos la observación es por la dificultad de hacerlo exactamente, no queriendo decir que su tamaño sea uniforme.

En la tabla IV se observa principalmente que los coeficientes que se obtienen con el método del cubo son más altos generalmente que los que les correspondería por el método belga, inglés y francés; este es un caso claro en el que los áridos no eran íntegramente del tamaño de la fracción ensayada. Estas muestras fueron preparadas por machaqueo en machacadora de mandíbulas, pero con una abertura de 1", por lo que el árido obtenido para conseguir la fracción de ensayo de 1" a 3/4" estaba más cerca de 3/4" que de 1". Obsérvese de todas formas cómo se acusa el remachaqueo de las muestras números 1, 2 y 5.

V. Conclusiones.

1.º Comparando el método del cubo con los otros tres por medio de los resultados de las tablas I a IV, se observa que existe bastante correlación entre ellos, si bien más en unos que en otros. Coeficientes al parecer erróneos al compararlos con el método belga son aplicables y perfectamente válidos con arreglo al método inglés y francés. Si se representan los resultados obtenidos en los gráficos "método del cubo — % Defectuosas inglesas", "método del cubo — % Defectuosas francesas" y "método del cubo — Índice de forma belga", se ve que tienden a seguir una línea recta, más acusada en el caso del método belga y francés. A la vista de estos gráficos se pueden estudiar mejor las variaciones de los métodos empleados y sus derivaciones (figs. 4.º, 5.º y 6.º).

2.º Cuanto mayor va siendo el coeficiente indica una forma cada vez peor con una mayor proporción de placas. La diferencia entre los dos números del coeficiente da una idea suficiente de la proporción de agujas.

3.º El tiempo invertido para hacer dos determinaciones es de unos cuatro minutos; es, pues, rápido, sencillo, no requiere operaciones ni medidas complicadas y se puede hacer en obra sin dificultad. Se puede determinar la forma hasta de calibres < 5 mm.

4.º Las especificaciones del empleo del método y su exigencia para la clasificación en apto o no apto de un material se está estudiando actualmente y dependerá del empleo que se le vaya a dar en cada caso. Como orientación se puede tener en cuenta la comparación de este procedimiento con los métodos citados y sus respectivas especificaciones. Puede servir también de base para ello el número de cubos y esferas que caben en el recipiente cúbico: cubos ideales, 125; reales (cuando se realiza siguiendo las instrucciones del método), 105 aproximadamente. Esferas ideales, 148; reales, 140 aproximadamente.

5.º El que las partículas no sean íntegramente del tamaño de la fracción preparada para el ensayo, dentro de unos límites normales, no altera gran cosa los resultados. De todas formas, es mejor que se cumpla este requisito.

6.º La influencia del número de capas en que se llena el cubo carece de importancia aun en los casos extremos de llenarlo en una o varias veces, pues las diferencias obtenidas en el recuento no han sido mayores de un 5 por 100. En el procedimiento de ensayo se ha establecido que se llene en tres veces para facilitar la distribución y normalizar la operación. Una atención más especial merece el enrase por la dificultad de definirlo y realizarlo con exactitud. Puede servir como criterio el comprobar que se compensan los huecos con los salientes, quitando además las piedras que estén "seltas". A pesar de los inconvenientes, el enrase no tiene gran influencia en los resulta-

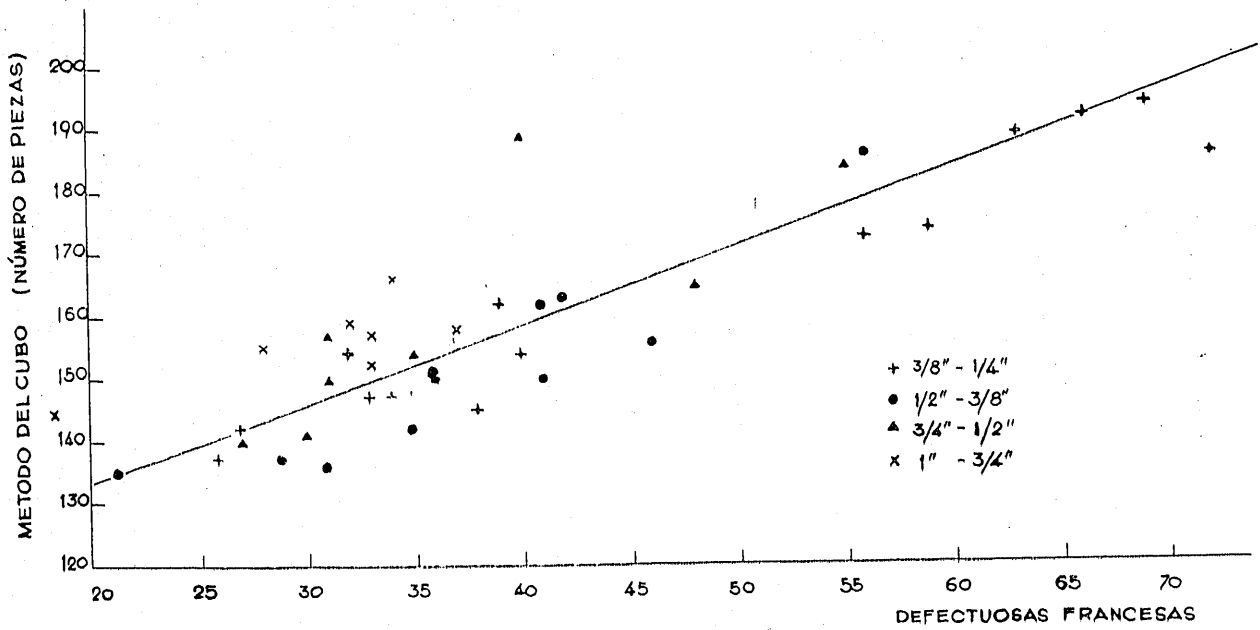


Figura 4.^a

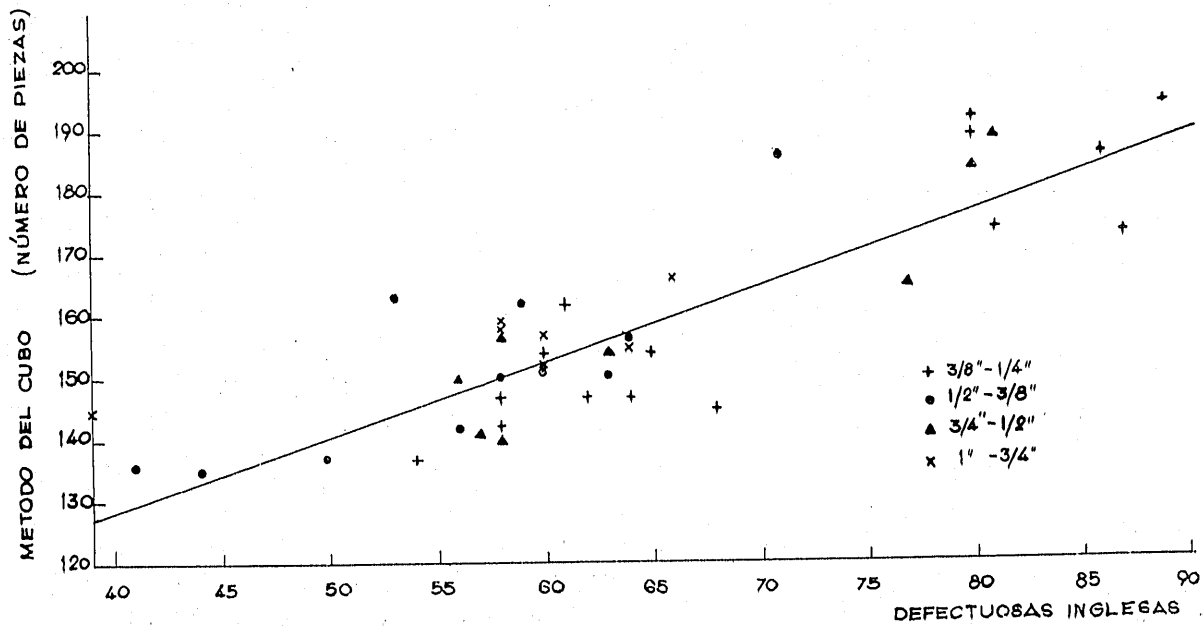


Figura 5.^a

dos, como lo demuestra la repetición que se obtiene por otros operadores.

7.^a La corrección de agujas es sumamente sencilla, y puesto que hay establecida una definición para ellas, son despreciables los errores personales.

9.^a A la vista de los resultados obtenidos en las diez determinaciones que se hicieron de cada una de las muestras aquí estudiadas, se puede deducir que el número de determinaciones necesarias para obtener un resultado correcto es dos. En el procedimiento de

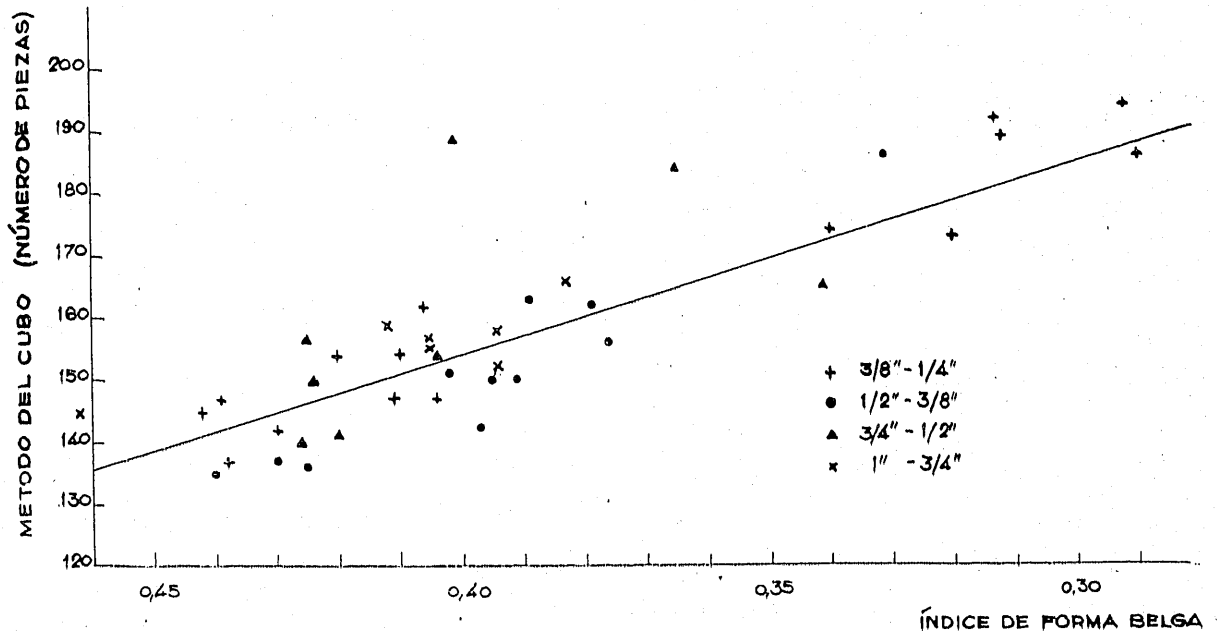


Figura 6.^a

8.^a La reproducción por otros operadores es muy satisfactoria. Un operador al que se le explicó brevemente el método obtuvo los siguientes resultados (media de dos determinaciones) sobre las muestras que se indican, y que figuran en las tablas I a IV:

ensayo se indica que sean tres, con objeto de eliminar, si es preciso, algún resultado anormal, si bien en la mayoría de los casos bastará con dos determinaciones. Está pendiente, de todas formas, fijar el error probable admisible.

Fracción	3/8" - 1/4"			1/2" - 3/8"		3/4" - 1/2"			1" - 3/4"
Muestra	1	2	3	2	3	2	3	4	3
2. ^o operador	151	142	141	155	185	135	151	184	160
1. ^{er} operador	154	147	137	151	186	141	154	189	155
Diferencia	- 3	- 5	+ 4	+ 4	- 1	- 6	- 3	- 5	+ 5

Bibliografía

1. J. L. ESCARDO: *Caminos*, 1956, *II*, 554.
2. G. CIMATO: *Strade*, 1937, *19*, 273.
3. M. HERRIN and W. H. GORFZ: *Highway Research Board*, 1954, *33*, 293.
4. Centre Rech. Rout. Bruxelles: *Critères de qualité des gros granulats*, 1956, 8.
5. *British Standard*, núm. 812, 1951.
6. PEYTER: *Manual du Laboratoire Routier*, 1955, 163.

A P É N D I C E

Tentativa de ensayo.

La *standardización* del método se está estudiando; por tanto, el procedimiento que se describe a continuación es provisional.

Material necesario. — Para tamaños de 4,76 mm. (núm. 4) a 50,8 mm. (2").

Serie de tamices: 2" (50,8 mm.), 1 1/2" (38,1 milímetros), 1" (25,4 mm.), 3/4" (19,1 mm.), 1/2" (12,7 mm.), 3/8" (9,52 mm.), 1/4" (6,35 mm.) y número 4 (4,76 mm.). Malla cuadrada.

Bandeja de 60 X 35 X 6 cm.

Serie de cubos: Consistirán en recipientes cúbicos sin tapa ni fondo, contruidos con chapa de hierro del espesor que se indica para cada fracción y con los bordes planos. Las dimensiones de las aristas son las que figuran en el cuadro adjunto. Estarán completamente mecanizadas en su interior y todas las caras serán perfectamente planas. Llevarán grabado en una de sus caras el tamaño de la fracción que se pueda ensayar con cada cubo; el borde superior correspondiente a esta cara llevará grabadas seis rayas (prolongadas 5 mm. sobre la cara exterior, menos la tercera raya empezando por la derecha, que será de 10 mm.) que dividan la longitud interior de la arista en cinco partes iguales que coincidirán, para cada cubo, con el valor de la media que figura en la tabla siguiente:

Fracción	Arista (interior)	Valor de la media	Espesor chapa
2 1/4" - 1 1/2"	222,25 mm.	44,45 mm.	3,0 mm.
1 1/2" - 1"	158,75 "	31,75 "	2,5 "
1" - 3/4"	111,25 "	22,25 "	2,0 "
3/4" - 1/2"	79,50 "	15,90 "	1,5 "
1/2" - 3/8"	55,55 "	11,11 "	1,0 "
3/8" - 1/4"	39,65 "	7,93 "	1,0 "
1/4" - N.º 4	27,75 "	5,55 "	1,0 "

PROCEDIMIENTO.

a) *Preparación de la muestra.* — Directamente de la estación de machaqueo, sin haber pasado por cribas de clasificación, se tomará una cantidad de la mezcla de los áridos fabricados suficiente para obtener, por cuarteo y tamizado posterior, aproximadamente dos medidas como mínimo del cubo o los cubos correspondientes a la fracción o fracciones que se van a ensayar, de acuerdo con las proporciones de machaqueo.

Una vez obtenida la muestra, y cuarteada, se tamizará por los tamices de la fracción o fracciones que se van a ensayar, hasta obtener de cada una can-

tidad al menos equivalente a dos medidas del cubo correspondiente. El tamizado debe ser lo más eficiente posible para que el árido clasificado sea íntegramente del tamaño comprendido entre los dos tamices empleados para cada fracción, de manera que no queden en una fracción partículas más pequeñas que el tamaño marcado por el tamiz de abertura menor. Por el mismo motivo, se tamizará también de manera que todas las partículas gruesas en la muestra tomada, para cada fracción, capaces de pasar por el tamiz de abertura mayor, pasen totalmente, con objeto de que el árido separado sea representativo del material. Si es preciso, se completará el tamizado con las manos, para ayudar a pasar las partículas que no pasen por tamizado.

b) *Ensayo.* — Terminada la preparación de la fracción o fracciones de ensayo, cada una de ellas se ensaya en su cubo correspondiente, que es el que lleva marcado en una cara los tamices empleados en su separación. Deben hacerse tres determinaciones.

Se pone el cubo sobre la bandeja, observando que se adapten perfectamente los bordes inferiores sobre la superficie de la misma. Se llena el recipiente cúbico en tres veces (cada vez que se cojan áridos para echar en el cubo, se revolverá la muestra preparada para el ensayo), golpeándolo en cada una repetidas veces con la mano en las cuatro caras, girándolo con la otra mano y manteniéndolo firmemente contra la bandeja, de manera que no se levante, pero que deje transmitir suavemente a los áridos el movimiento producido al golpearlo. Una vez lleno, se termina de llenar rebosando y golpeándolo como antes. Se quitan las piedras sobrantes y se enrasa de manera que se compensen los huecos de la superficie con los salientes, separando además las piedras que estén "sueltas" y asentando, finalmente, la superficie con la mano. Una vez enrasado el cubo, se quitan de la bandeja las piedras sobrantes, de manera que no se mezclen con las contenidas en el cubo.

Se lleva el recipiente a un extremo de la bandeja y se levanta, con lo cual las piedras por él contenidas quedan sobre la bandeja, y se comienza el recuento. Se van contando las piedras una a una, tomándolas del montón y dejándolas en el extremo opuesto de la bandeja; las piedras de forma alargada, que se presume van a ser clasificadas como agujas según el criterio que a continuación se dirá, se van dejando, una vez contadas, separadas del resto, para luego hacer la corrección. Se anota el número total de piedras y se hace la corrección de las agujas.

Corrección de agujas. — Se considera como aguja toda partícula cuya dimensión mayor sea igual o mayor a dos divisiones de las grabadas en el borde del cubo (división señalada con un trazo más largo). Para hacer la corrección se toman una a una las partículas seleccionadas previamente. Se coge el cubo con la mano izquierda y se coloca de manera que queden

a la vista las divisiones marcadas en el borde superior. Se toma una partícula, se busca su dimensión mayor y se coloca apoyando un extremo sobre la cara inferior del cubo, adaptando la piedra lo más posible a la cara que lleva grabadas las divisiones de manera que, moviendo lo necesario la piedra, se pueda ver si no llega, es igual o sobrepasa más o menos la división señalada con el trazo más largo, que es la magnitud establecida como límite para definir las agujas. A la piedra que sea igual o mayor de dos divisiones, pero menor de tres, le corresponde una corrección de 1; la que sea igual o mayor de tres divisiones, pero menor de cuatro, tiene una corrección de 2, y así sucesivamente con todas las piedras que cumplan con el límite establecido. Todos estos números así obtenidos se van sumando conforme se está haciendo la operación, y al final el total hallado se suma al número de piedras encontrado primeramente al hacer el recuento, y se anota este resultado.

RESULTADOS.

El coeficiente de forma viene dado por dos números, valores medios de las tres determinaciones; el primero es el número real de piedras obtenido en el recuento, y el segundo (que es el verdadero coeficiente), el número de piedras hecha la corrección de agujas. La diferencia entre estos dos resultados da una idea suficiente de la proporción de agujas.

Cuando se determina el coeficiente de forma de un árido que corresponde a una fracción determinada, su coeficiente es el que se obtiene directamente, como se ha indicado en el ensayo.

Cuando se determina el coeficiente de un árido que tiene material de varias fracciones, los coeficientes aislados obtenidos se pueden sumar ponderadamente con arreglo a la granulometría del árido, obteniéndose un coeficiente de forma corregido para todo el árido ensayado.