

## determinación de la superficie específica por medio de un nomograma

A. VIRELLA

Director de la fábrica de cementos blancos «CIBRA» (Portugal)

### 1. EXPRESIONES DE LA FINURA

Las industrias que, como la del cemento, manejan sólidos pulverulentos, han tenido una preocupación constante sobre los procedimientos para determinar la finura de los polvos y la forma de expresarla numéricamente.

La expresión más simple, antigua y corriente es la de un *residuo* (tanto por ciento de peso de material) que no atraviesa las mallas de un tamiz de abertura conocida.

Más recientemente se ha introducido el concepto de *superficie específica*, o sea, el área de la fase sólida referida a la unidad de peso, definida por la fórmula:

$$S_e = \frac{S}{P} \text{ (cm}^2 \text{ g}^{-1}\text{)}. \quad (1)$$

La industria del cemento viene utilizando, entre otros, los aparatos denominados «Turbidímetro de Wagner» y «Permeabilímetro de Blaine» para la determinación de la superficie específica. Se ha visto que ambos aparatos dan, para un mismo cemento, resultados absolutamente dispares, por lo que el concepto de superficie específica, después de las determinaciones ordinarias, pierde totalmente su valor absoluto y no pasa de ser un simple *índice relativo de finura*, y así decimos «Superficie específica Wagner» o

«Superficie específica Blaine», según el aparato que se haya empleado para su determinación.

Se utilizan, también, aparatos levigadores en corriente de aire, denominados *elutriadores* o *flourómetros*, y los residuos de levigación de cada aparato, en particular, constituyen otra forma de expresión de la finura que cabe referir a un cierto tamaño límite de partícula.

No podemos dejar de mencionar los aparatos de sedimentación en medio líquido, el prototipo de los cuales es la pipeta de Andreasen, y, además, otros métodos propuestos, de indudable valor científico, fundados en la adsorción de gases o de materias colorantes, todos y cada uno de los cuales presentan nuevas formas de expresión de la finura.

De esta variedad de expresiones surge una posible confusión de ideas que desde hace tiempo muchos autores van procurando aclarar.

### 2. RELACIÓN ENTRE LOS RESIDUOS

La primera cuestión que se presenta es averiguar si existe relación valedera entre los residuos de un material determinado por diversos tamices de diferente abertura de malla  $e$ , incluso, con los residuos obtenidos por levigación aérea o por sedimentación en medio líquido.

Como es sabido, para Rosin, Rammler, Sperling, y otros, la mayor parte de los materiales pulverizados poseen una distribución de las partículas por pesos y tamaños que se ajusta con bastante aproximación a la que resulta de la fórmula exponencial:

$$R = 100 e^{-\left(\frac{x}{d'}\right)^n}$$

donde:

- R = Residuo sobre un tamiz de abertura  $x$ .
- $e$  = Base de los logaritmos naturales = 2,71828.
- $x$  = Tamaño de partícula mínimo, en micras, para el residuo R.
- $d'$  = Constante de posición, o grado de finura.
- $n$  = Constante de dispersión.

Siendo esta fórmula de difícil manejo, se acostumbra a poner bajo una forma logarítmica, con la cual es posible efectuar operaciones aritméticas.

Las transformaciones que deben efectuarse son:

$$\log R = \log 100 - \left(\frac{x}{d'}\right)^n \log e$$

$$\log(\log 100 - \log R) = n(\log x - \log d') + \log \log e$$

Pero:

$$e = 2,71828; \log e = 0,43429; \log \log e = -0,36222$$

Luego:

$$\log(2 - \log R) = n \log x - n \log d' - 0,36222 \quad [3]$$

Si advertimos que:

$$n \log d' + 0,36222 = \text{Constante},$$

podemos escribir:

$$\log(2 - \log R) = n \log x - \text{Constante}$$

De donde, el valor de la constante de dispersión:

$$n = \frac{\Delta \log(2 - \log R)}{\Delta \log x} \quad [4]$$

Representando la distribución granulométrica en un gráfico, donde las abscisas correspondan a los tamaños de partícula en escala logarítmica y las ordenadas a los residuos en escala doble logarítmica, la expresión [3] se convierte en la ecuación de una línea recta, cuya inclinación viene precisamente definida por la derivada:

$$\text{tg } \alpha = \frac{d y}{d x} = n$$

Según Tyudyo, en el cemento Portland:

$$0,921 < n < 1,089$$

y, para Anselm:

$$0,890 < n < 1,110$$

Cuanto mayor sea el ángulo  $\alpha$ , menor será la dispersión de las partículas. Un cemento monogranular tendría  $\alpha = 90^\circ$  y  $n = \infty$ . Luego, la constante  $n$  es inversa de la dispersión del material (fig. 1).

Para la aplicación de la fórmula [3] nos hace falta conocer, además de  $n$ , el valor de  $d'$ .

Evidentemente que:

$$\left. \begin{aligned} n \log d' &= n \log x - \log(2 - \log R) - 0,36222 \\ \log d' &= \log x - \frac{\log(2 - \log R) + 0,36222}{n} \end{aligned} \right\} [5]$$

En cuanto al significado de la constante  $d'$  lo comprenderemos inmediatamente haciendo en [2],  $x = d'$

$$R' = 100 e^{-1^n}$$

$$\log R' = 2 - \log e = 0,6571$$

$$R' = 36,788$$

La constante de posición  $d'$  corresponde, pues, al tamaño de partícula que tiene un residuo igual a 36,788 por 100.

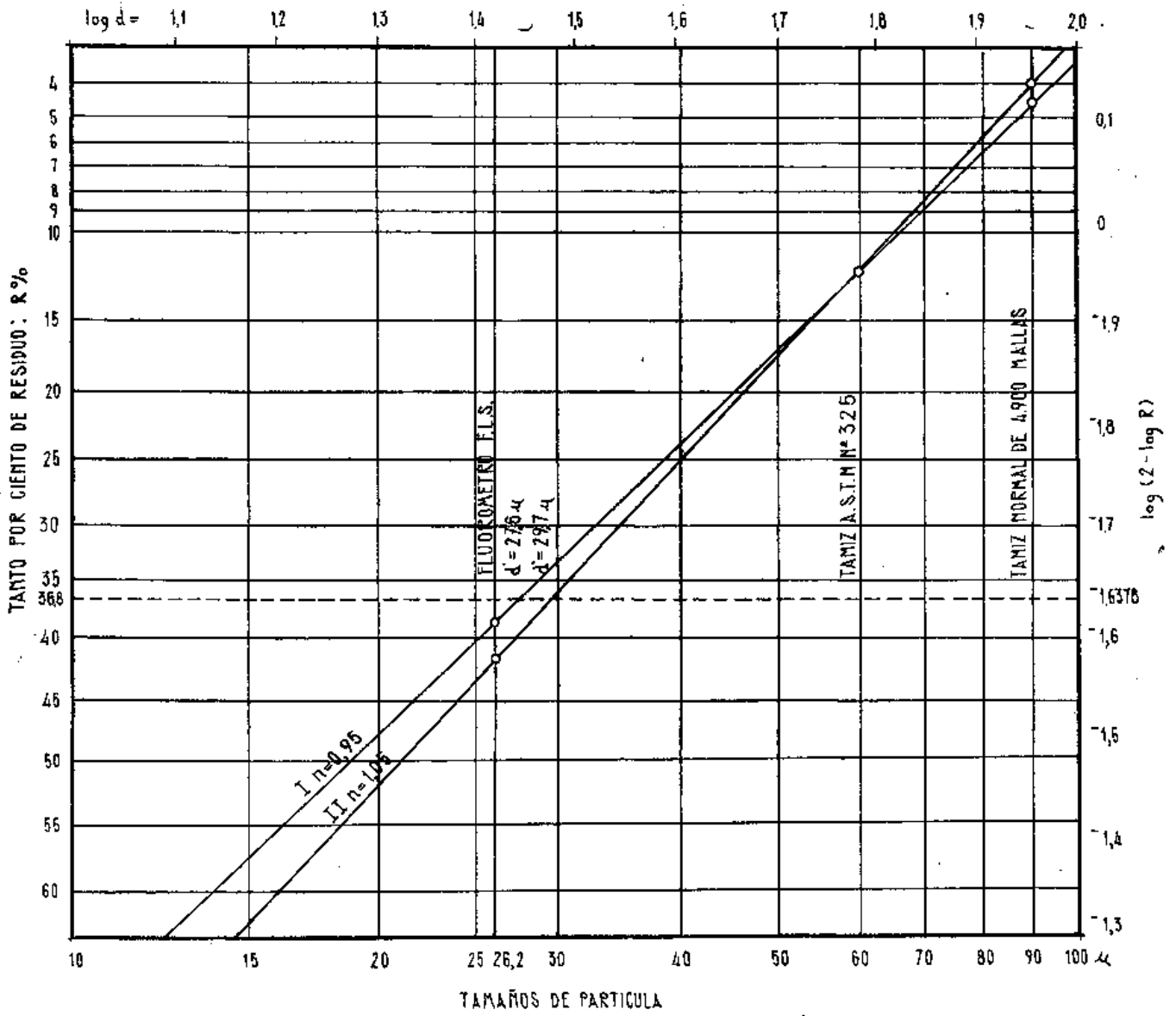


Fig. 1.

Si derivamos dos veces la ecuación [2] vemos que la segunda derivada se anula para  $x = d'$ ; esto significa que  $d'$  corresponde al punto de inflexión de la curva granulométrica, o bien al máximo de la curva

En la *figura 2* hemos representado dos sistemas de finura equivalente por ser de un mismo orden los productos  $n \times d'$ .

Después de calculados  $n$  y  $d'$ , substituyendo sus valores en la fórmula [3] podre-

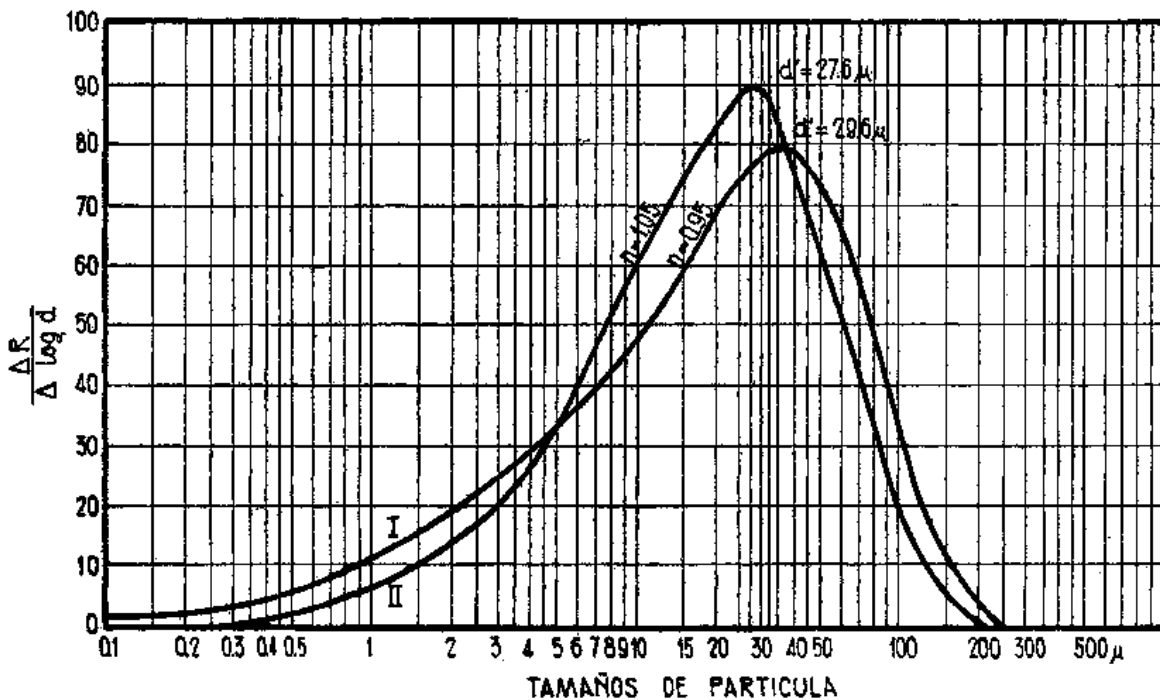


Fig. 2.

de la función derivada, lo cual se pone de manifiesto en la *figura 2*.

En dicha figura se dan las curvas de dos sistemas pulverulentos que siguen la fórmula exponencial [2] y que presentan diferentes valores de  $n$  y  $d'$ .

La curva I tiene menor dispersión o, si se quiere, mayor densidad. La curva II presenta una menor densidad y una mayor dispersión y su grado de finura aparece desviado para un tamaño de partícula mayor. Como sea que ni  $n$  ni  $d'$  caracterizan por sí solos la finura del sistema, entenderemos que ésta se caracterizará mejor por el producto de ambas magnitudes, o sea, por  $n \times d'$ , y un material será tanto más fino cuanto menor sea el producto de sus constantes  $n \times d'$ .

mos calcular el valor del residuo R correspondiente a cualquier valor del tamaño de partícula  $x$ .

### 3. CÁLCULO DE LA SUPERFICIE ESPECÍFICA

El cálculo teórico de la superficie específica correspondiente a una sustancia pulverulenta de distribución granulométrica conocida, es posible derivando la ecuación exponencial e integrando después entre los tamaños límites que, por ejemplo, pueden ser 100 y 0,1 micras. Este cálculo conduce a un desarrollo en serie bastante complejo y costoso de resolver. Los resultados que se obtienen, por otra parte, no se asemejan en

nada a los proporcionados por el permeabilímetro o por el turbidímetro, por lo que obviaremos este punto, fácil de encontrar, por supuesto, en la bibliografía que damos al final del presente artículo.

La imprecisión del método integral reside en el desconocimiento de los límites reales de la extensión granulométrica. Wagner, al calcular la superficie específica por medio del turbidímetro, obvia estos inconvenientes admitiendo que la totalidad del cemento comprendido entre 7,5 micras y 0 micras tiene un tamaño medio de partícula igual a 3,75 micras. Tampoco es correcta la adopción de la media aritmética para expresar el tamaño medio de la fracción de peso comprendido entre dos lecturas sucesivas del turbidímetro, pero, como lo que pretendemos es referir la granulometría de un material que sigue la ley exponencial a la superficie específica calculada por el turbidímetro, aceptaremos como valederas las hipótesis de Wagner, aun sabiendo que, en ciertos puntos, son erróneas o, por lo menos, discutibles. También, por el mismo motivo, aceptaremos que el residuo por vía húmeda sobre el tamiz americano número 325 corresponde a un tamaño mínimo de partícula igual a 60 micras.

Aceptadas estas premisas, las superficies parciales se calculan por la siguiente ecuación:

$$\Delta S = \frac{6 \times 10^4}{\rho} \frac{\Delta R}{x_m}, \quad [6]$$

donde:

$\rho$  = Peso específico del material ensayado (Valor medio de  $\rho$  para los cementos ensayados:  $\rho = 3,1 \text{ g cm}^{-3}$ ).

$\Delta R$  = Aumento del tanto por ciento de peso del residuo retenido entre los tamaños de partícula  $x_1$  y  $x_2$ .

$x_m$  = Tamaño medio de partícula (Media aritmética entre  $x_1$  y  $x_2$ ).

Sustituyendo en [6] el peso específico  $\rho$  por su valor 3,1:

$$\Delta S = 193,55 \frac{\Delta R}{x_m}. \quad [7]$$

Hemos calculado, por este procedimiento, las superficies específicas correspondientes a siete granulometrías teóricas, con los resultados siguientes:

Ejemplos	n	d'	n d'	SUPERFICIE ESPECÍFICA	
				Integrada	Calculada
1	1,00	27,08	27,08	1.931	1.932
2	1,00	28,59	28,59	1.869	1.867
3	1,05	28,07	29,47	1.838	1.833
4	0,95	31,02	29,47	1.827	1.833
5	1,00	30,20	30,20	1.805	1.806
6	1,08	28,48	30,76	1.792	1.786
7	1,00	40,00	40,00	1.534	1.538
Media	1,01	30,49	30,79	1.795	1.799

Ya con estos ejemplos podemos comprobar que, de conformidad con las conclusiones a que llegaron anteriormente Anselm y otros autores, *la superficie específica integrada es inversamente proporcional al producto  $n \times d'$* . Esta relación, en su aceptación más generalizada, se puede expresar por la ecuación:

$$S_e = \frac{A}{n d'} + B (\text{cm}^2 \text{g}^{-1}), \quad [8]$$

siendo A y B dos constantes que no dependen de la constitución granulométrica.

Como sea que interesa menos obtener el valor absoluto de la superficie específica de un polvo, valor absoluto que, por otra parte, exigiría una discusión extensa y totalmente inadecuada a nuestro propósito, daremos a A y B valores en concordancia con los resultados que en la práctica acostumbramos a encontrar cuando ensayamos ce-

mentos normales por medio del turbidímetro de Wagner. Para los ejemplos teóricos que se han expuesto en la tabla anterior, hemos obtenido:

$$S_e = \frac{33.000}{n \times d'} + 713 \text{ (cm}^2 \text{ g}^{-1}\text{)}. \quad [9]$$

Repitamos, sin embargo, que estos ejemplos se basaban sobre granulometrías teóricas, que seguían rigurosamente la fórmula exponencial entre los tamaños de 90 y 7,5 micras.

#### 1. SUPERFICIE ESPECÍFICA DE LOS CEMENTOS PORTLAND NORMALES

Ya expusimos en un anterior estudio nuestro, que la granulometría de los cementos Portland normales no se ajustaba perfectamente a la fórmula exponencial, principalmente para los pequeños tamaños de partícula. Como consecuencia de esta falta de ajuste, no se puede esperar que la aplicación de la fórmula [9] dé resultados absolutamente coincidentes con los proporcionados por la práctica.

Para determinar la superficie específica de los cementos normales, hemos seguido los conocidos métodos del turbidímetro de Wagner y del permeabilímetro de Blaine. La ventaja del primero reside en que nos permite determinar la curva de distribución granulométrica entre 60 y 7,5 micras. De esta curva deduciremos los valores numéricos de  $n$  y de  $d'$  que entran en la ecuación [8]. El permeabilímetro de Blaine, por el contrario, sólo nos proporciona un valor de conjunto, bastante más elevado que la superficie específica calculada por el turbidímetro, pero no da ninguna indicación acerca de las constantes  $n$  y  $d'$ . La relación media entre ambas superficies específicas fué establecida por una simple fórmula aditiva:

$$S_{Bl} = S_w + 1.890 \text{ (cm}^2 \text{ g}^{-1}\text{)}. \quad [10]$$

Hemos tomado al azar los resultados de 150 determinaciones de finura cubriendo una extensa gama de superficies específicas Wagner comprendidas entre 2.700 y 1.200  $\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$ . El ajuste de los coeficientes A y B de la fórmula [8] se ha efectuado procurando los mínimos errores. Los resultados obtenidos, convenientemente redondeados, nos condujeron a la fórmula:

$$S_w = \frac{65.000}{n \times d'} - 400 \text{ (cm}^2 \text{ g}^{-1}\text{)}. \quad [11]$$

Combinando [10] y [11]:

$$S_{Bl} = \frac{65.000}{n \times d'} + 1.490 \text{ (cm}^2 \text{ g}^{-1}\text{)}. \quad [12]$$

Comparando las fórmulas [9] y [11] se observa un punto de coincidencia, que viene determinado por:

$$\begin{aligned} \frac{65.000}{n \times d'} - 400 &= \frac{33.000}{n \times d'} + 713 \\ n \times d' &= 28,75 \\ S_w &= 1.861 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}. \end{aligned}$$

Para superficies específicas superiores a 1.861  $\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$ , obtenemos, con la fórmula [11], resultados mayores que los calculados por medio de la fórmula [9]. Si la superficie específica es menor que 1.861  $\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$ , los resultados calculados por aplicación de la fórmula [11] son menores que cuando son obtenidos por la fórmula [9].

Sin embargo, tanto una fórmula como otra, y en general, todas las fórmulas análogas a la ecuación [8], presentan el inconveniente de exigir el conocimiento de  $n$  y  $d'$ , constantes que no se pueden obtener por medio de determinaciones directas, sino que obligan a cálculos que exigen un cierto tiempo para su ejecución.

El problema de la correlación de los residuos con las superficies específicas sólo ad-

quiere interés si conseguimos proponer un método que nos conduzca a la solución fácilmente, con una simplicidad que haga innecesarios todos los cálculos.

Esta solución ideal solamente puede proporcionarla un ábaco de puntos alineados o nomograma (figura 3).

### 5. TRAZADO DEL NOMOGRAMA: ESCALAS DE LOS RESIDUOS

El nomograma que vamos a presentar expresa los residuos en escalas logarítmicas sobre líneas verticales y paralelas,  $x_1, x_2, x_3$ , correspondiendo cada línea a un tamaño de partícula determinado. Hemos escogido los tamaños de partícula siguientes:

- $x_1 = 90 \mu$ . (Tamiz normal de 4.900 mallas/cm<sup>2</sup>).
- $x_2 = 60 \mu$ . (Tamiz A. S. T. M. núm. 325, usado de conformidad con la Norma C 115 - 42, «Método normalizado para el ensayo de la finura del cemento por medio del turbidímetro»).
- $x_3 = 26,2 \mu$ . (Flourómetro F. L. S., calibrado por medio del turbidímetro de Wagner).

En el nomograma se pretende que, cuando la constante granulométrica de dispersión  $n$  sea igual a la unidad, los residuos  $R_1, R_2$  y  $R_3$  queden alineados sobre una recta horizontal, en los puntos donde corta a las verticales  $x_1, x_2$  y  $x_3$ . Para ello es necesario que las escalas logarítmicas correspondientes a cada tamaño de partícula guarden entre sí una relación inversa a los dichos tamaños, ya que, para  $n = 1$ , la fórmula [2] se reduce a:

$$R = 100 e^{-\frac{x}{d'}}$$

$$\frac{R}{100} = r = e^{-\frac{x}{d'}}$$

Pasando a los logaritmos neperianos:

$$\left. \begin{aligned} \log r &= -\frac{x}{d'} \\ \frac{\log r}{x} &= -\frac{1}{d'} = \text{Constante.} \end{aligned} \right\} [18]$$

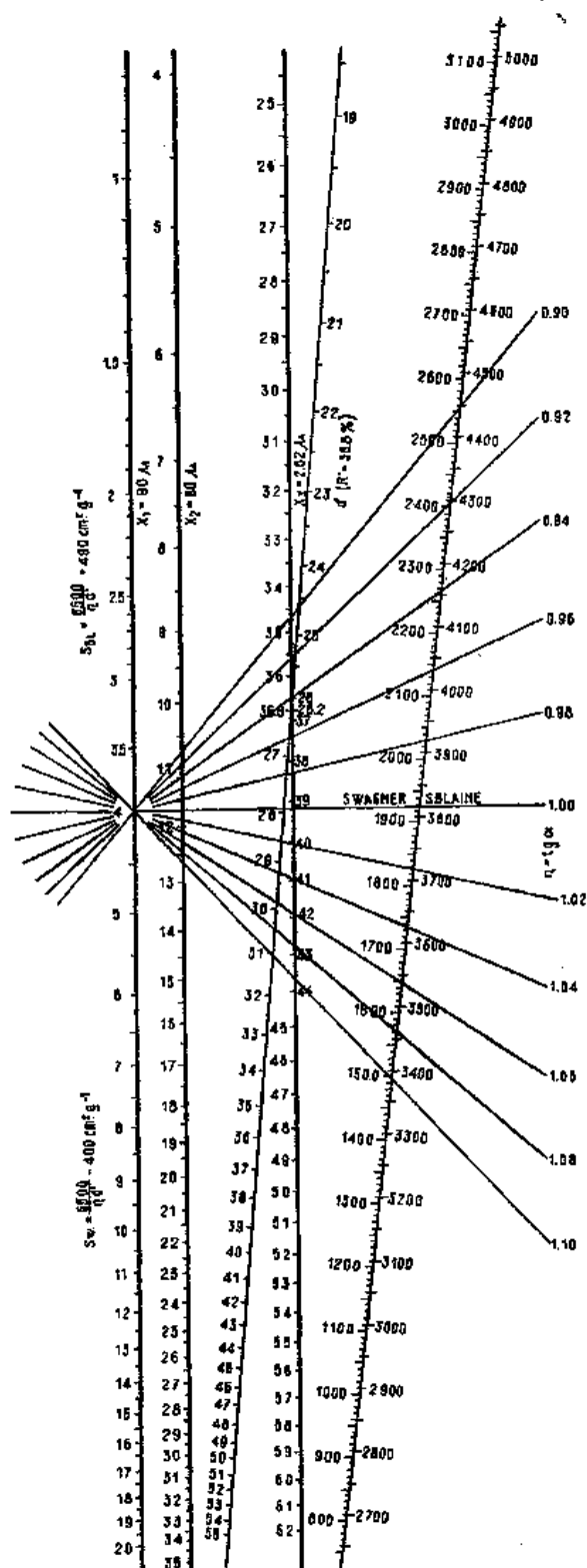


Fig. 3.

Cuando  $n \neq 1$ , para que los puntos representativos de los residuos continúen con alineación recta es necesario que la separación entre las líneas paralelas verticales sea proporcional a la diferencia de logaritmos de los tamaños de partícula  $\Delta \log x$ , de acuerdo con el denominador de la expresión [4]. Así, para los tamaños de partícula que hemos escogido, tendremos:

ESCALAS

	I	II	III
Tamaños de partícula.....	90 $\mu$	60 $\mu$	36,2 $\mu$
Relación de escalas.....	1,000	1,500	3,462
Log $x$ .....	1,95424	1,77815	1,41830
$\Delta \log x$ .....	0,00000	0,17609	0,53594
Intervalo, en mm.....	0,00	30,44	100,00
<i>Algunos residuos básicos (<math>n = 1</math>)</i>			
$d' = 27,96 \mu$ .....	4,00	11,70	39,18
$d' = 30 \mu$ .....	4,97	15,53	41,76
$d' = 35,68 \mu$ .....	8,00	18,57	47,94
$d' = 40 \mu$ .....	10,54	22,31	51,94

Como sea que el nomograma se aproxima suficientemente a los resultados del cálculo numérico, creemos innecesario dar más ejemplos de la correlación de los residuos y remitimos al lector a la observación del nomograma para todos los casos de correspondencia.

Cualesquiera otros tamices o flourómetros, con separación de partículas en tamaños no representados en nuestro nomograma, pueden ser muy fácilmente introducidos trazando las correspondientes rectas paralelas, sujetando las escalas logarítmicas de residuos y los intervalos de separación a las Normas anteriormente expuestas.

#### 6. REPRESENTACIÓN DE $n$ Y $d'$ EN EL NOMOGRAMA

En nuestro nomograma la constante de dispersión  $n$  se representa por la inclinación

de la recta granulométrica. Por construcción, cuando  $n = 1$  la recta es horizontal.

Cuando  $n < 1$ , la recta aparece con inclinación positiva, aumentando la pendiente con la diferencia  $n - 1$ . Con la pendiente aumenta la dispersión de los tamaños de partícula y la superficie específica del cemento.

Cuando  $n > 1$ , la recta granulométrica presenta inclinación negativa, que aumenta con el valor de  $n$ . Los valores crecientes de  $n$  indican una mayor concentración de tamaños de partícula y una menor superficie específica.

En el nomograma aparecen representadas 11 granulometrías, con un punto común: el residuo sobre el tamiz de 4.900 mallas/cm<sup>2</sup>, que para todos los once casos se supone igual a 4 por 100. La constante  $n$  varía de 0,9 a 1,1, y de esta variación resulta:

$n$	$R_1$	$R_2$	$R_3$
0,90	4,0	10,70	34,64
0,92	4,0	10,90	35,55
0,94	4,0	11,10	36,46
0,96	4,0	12,30	37,37
0,98	4,0	11,50	38,27
1,00	4,0	11,70	39,18
1,02	4,0	12,11	40,98
1,04	4,0	12,11	40,98
1,06	4,0	12,32	41,89
1,08	4,0	12,52	42,79
1,10	4,0	12,74	43,69

La constante de posición, o grado de finura  $d'$ , es decir, el tamaño de partícula correspondiente a un residuo  $R' = 36,8$  por 100, se puede obtener sobre el propio nomograma. Por la fórmula [13] se advierte que los valores del grado de finura  $d'$  se deben representar sobre una línea recta, graduada con una escala de números recíprocos.

La recta sobre la cual leeremos los valores de  $d'$  no será una paralela a las escalas lo-



garítmicas de los residuos, sino una línea inclinada, la cual, para  $d' = 26,2 \mu$ , cortará a los residuos del tamaño  $x_3$  sobre el porcentaje de 36,8, lo que nos dice: cuando el flourómetro F. L. S., con separación de partículas a  $26,2 \mu$  proporcionan un residuo de 36,8 por 100, el grado de finura del cemento ensayado será precisamente  $d' = 26,2 \mu$ . Para residuos  $R_3 > 36,8$ ,  $d'$  queda interpolado entre  $x_2$  y  $x_3$ . Para residuos  $R_3 < 36,8$ ,  $d'$  se extrapola para tamaños inferiores a  $x_3$ .

Para el trazado de la recta  $d'$  en el nomograma nos hemos servido de los puntos siguientes:

$n$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$d'$
1,00	1,11	4,97	26,98	20
0,63	7,55	13,53	30,55	20
1,00	4,97	13,53	41,78	30
1,71	1,83	13,53	61,56	40
1,00	10,54	22,31	51,94	40

#### 7. REPRESENTACIÓN DE LA SUPERFICIE ESPECÍFICA

Las superficies específicas que se determinan con nuestro nomograma corresponden a las fórmulas [11] y [12]. Se representan sobre una recta inclinada a escala natural. A la izquierda de la recta aparece la escala de superficies específicas Wagner y a la derecha la escala de superficies específicas Blaine. Habiendo adoptado para estas últimas una simple fórmula de adición, todos los cálculos que nos han conducido al trazado del nomograma los hemos efectuado en función de la superficie específica Wagner, que designamos por  $S_w$ . La posición de la escala de superficies específicas en el nomograma se ha fijado con el auxilio de los puntos siguientes:

$n$	$d'$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$S_w$
1,000	27,083	3,60	10,91	38,01	2.000
0,951	28,479	5,05	13,12	39,70	2.000
1,000	29,546	4,75	13,12	41,20	1.800
1,058	30,718	4,43	13,12	42,96	1.600
1,000	32,500	6,27	15,78	44,66	1.600

#### 8. APLICACIÓN E INTERPRETACIÓN DEL NOMOGRAMA

El nomograma presentado tiene especial aplicación para determinar la *superficie específica aproximada* de un cemento conociendo dos de sus residuos. Al mismo tiempo se lee en el nomograma el grado de finura  $d'$  y, por la inclinación de la recta, se puede estimar el valor de la constante de dispersión  $n$ .

De la simple inspección de las escalas se deduce que un error de 1 por 100 en el residuo sobre el tamiz de 4.900 mallas puede dar lugar a considerables variaciones de  $n$  y, por consecuencia, de la superficie específica.

En general, la determinación del residuo sobre el tamiz de 4.900 mallas da lugar a errores groseros que lo hacen totalmente inadecuado para la determinación de la superficie específica. Es muy preferible utilizar para la determinación de la superficie específica y del grado de finura tan solamente los residuos proporcionados por el tamiz A. S. T. M. núm. 325 y por el flourómetro. En este caso, el nomograma puede servir para detectar errores en la determinación de los residuos sobre el tamiz de 4.900 mallas/cm<sup>2</sup>, siempre que éste presente un valor que lo aleje notablemente de la línea recta que une los otros residuos.

El nomograma nos indica claramente cómo, para materiales con igual residuo sobre el tamiz de 4.900 mallas/cm<sup>2</sup>, podemos tener muy diversos grados de finura y muy variadas superficies específicas. Todo depen-

de de la constante de dispersión  $n$ . Así, para un residuo común de 4 por 100 sobre el antedicho tamiz, para  $n = 0,9$  la superficie específica Wagner es del orden de  $2.550 \text{ cm}^2/\text{g}$ .  $n = 1,1$ ,  $S_w = 1.500 \text{ cm}^2/\text{g}$ . En otras palabras, la finura de un cemento queda absolutamente indeterminada si tan solamente conocemos el residuo que no atraviesa una red de abertura de malla conocida.

Cada molino de cemento tiene su fisonomía que se refleja en la granulometría del cemento obtenido. Los molinos con separación de aire presentan bajas dispersiones de los tamaños de partícula, o sea, la constante de dispersión  $n$  es mayor que la unidad. Los cementos obtenidos serán de baja superficie específica a no ser que se obtengan muy bajos residuos sobre el tamiz de 4.900 mallas. En los molinos compuestos, sin separación de aire y con cámaras con cuerpos molidores de tamaño escalonado, se obtienen constantes de dispersión más próximas a la unidad y, por lo tanto, para los mismos residuos que en un molino con separación de aire se tienen mayores superficies específicas.

El nomograma, todavía, esclarece aparentes anomalías de la granulometría de los cementos. Así, por ejemplo, dos cementos con igual residuo flouométrico pueden tener diferente superficie específica y, contra lo que a simple vista parece que debiera ser, la mayor superficie específica corresponde

precisamente al cemento que tiene mayor residuo sobre el tamiz de 4.900 mallas/cm<sup>2</sup>. En efecto, la simple inspección del nomograma nos dice que, al aumentar  $R_1$ , permaneciendo  $R_2$  constante, tienden a disminuir las constantes granulométricas  $n$  y  $d'$ , y al disminuir su producto, aumenta la superficie específica.

Las escalas de superficies específicas son convencionales. Ya dijimos que no correspondían a los valores que se obtienen según la ecuación teórica [9]. Las ecuaciones [11] y [12] de que nos hemos servido presentan constantes arbitrarias, ajustadas con bastante aproximación a los valores medios que hemos obtenido en nuestro laboratorio. Otros laboratorios, manejando diferentes tipos y calidades de cemento, puede que observen errores sistemáticos en la escala de superficies específicas que, en el caso de tener interés en la aplicación de este fácil nomograma, les obliguen a reajustes de escalas. No hay inconveniente en ello, ya que, para nosotros, lo fundamental del nomograma, es la facilidad con que podemos relacionar residuos y superficies específicas sin necesidad de cálculos logarítmicos ni de simples operaciones numéricas. Los porcentajes en peso de los residuos determinados por los procedimientos más vulgares son los datos que entran directamente en el mecanismo de este nomograma.

#### 9. BIBLIOGRAFÍA REFERENTE A LA DETERMINACIÓN DE LA FINURA DE LOS CEMENTOS

- (1) ANSELM (W.): *Zerkleinerungstechnik und Staub*. (Técnica de la trituración y del polvo). «Deutscher Ingenieur Verlag G. m. b. H.», Düsseldorf, 1950, 50 págs., 29 figs., 10 tabl., 75 ref. bibl., 1 apéndice.
- (2) *Estudio económico comparativo de las resistencias de los cementos en relación con la molienda de los mismos*. «Últimos avances». Madrid, núm. 37, págs. 1-13, 2 figs., 1 tabl., 7 ref. bibliog.
- (3) *BIBLIOGRAPHIE concernant la mesure de la finesse des matières pulvérulentes*. (Bibliografía relativa a la medición de la finura de los materiales pulverulentos.) «Revue des Matériaux», París, nov. 1964, núm. 470, págs. 223-26, 104 referencias bibliográficas de trabajos publicados entre 1928 y 1953.
- (4) BLAINE (R. L.): *A simplified air permeability fineness apparatus*. (Aparato simplificado para determinación de la finura por la medida de la permeabilidad al aire). «Boletín A. S. T. M.», 1916, Race St. Philadelphia 6, Pa.
- (5) BORNER (H.): *Broyage du ciment en circuit ouvert et en circuit fermé*. (Molienda del cemento en circuito abierto y en circuito cerrado). «Revue des Matériaux», París, núm. 446, págs. 303-310.

- (6) BROCARD (J.): *Mesure de la granulométrie et de la surface spécifique des ciments*. C. E. R. I. L. H., Paris. «Pub. téc. n.º 20», enero 1950, 28 págs., 26 figs., 30 ref. bibliog.
- (7) GESSNER (H.): *L'analyse mécanique* (El análisis mecánico). «Dunod», París, 1936, 270 págs., 106 figs. 23 tablas.
- (8) GUYE (F.): *Nuevos métodos para la determinación de la finura de los cementos*. «Cemento», Barcelona, números 163 y 164, octubre y noviembre 1947, págs. 306 y 322, 3 figs., 7 ref. bibliog.
- (9) JASPERS (M. J. M.): *Les lois régissant les liaisons entre la surface spécifique et les propriétés technologiques du ciment* (Las leyes que rigen las relaciones entre la superficie específica y las propiedades tecnológicas del cemento). «Revue des Matériaux», París, 1951, junio a septiembre, núms. 429, 430 y 431-32, páginas 169-74, 207-15, 254-7, 10 tablas. 23 diagramas, 9 ref. bibliog.
- (10) LHOPITALIER (F.) y MOMOT (CH.): *Détermination de la granulométrie des ciments* (Determinación de la granulometría de los cementos). «C. E. R. I. L. H.», París, julio 1948, publ. técnica núm. 8.
- (11) MARGARIT (A.): *Determinación de la granulometría de los cementos mediante la pipeta de Andreasen modificada*. «Revista de Ciencia aplicada», Madrid, núm. 33, año VII, 4, julio-agosto 1953, págs. 315-20.
- (12) MATOUSCHEK (F.): *La granulométrie des ciments*. (La granulometría de los cementos). «Revue des Matériaux», París, mayo y junio de 1950, núms. 416 y 417, págs. 163-9, 197-201, 12 figs. 9 tablas.
- (13) ROSIN (P.), RAMMLER (E.) y SPERLING (K.): *Berichtsfolge des Reichskohlenrates C 52* (Memoria C 52 del Comité Técnico Económico del Carbón de Alemania). Berlín, 1933.
- (14) STEINHERZ (A. R.): *La finesse de mouture du ciment portland artificiel* (La finura de molienda del cemento portland). «Revue des Matériaux», París, marzo y abril de 1952, núm. 438-9, págs. 75-80 y 102-4.
- (15) VIERI SEVIERI (F.): *Observaciones relativas a la determinación de la composición granulométrica de los cementos*. «Cemento», Barcelona, febrero y marzo de 1936, núms. 81 y 82, págs. 35 y 67.
- (16) VIRELLA (A.): *Residuos y superficie específica*. «Cemento», Barcelona, marzo 1951, núm. 204, págs. 71-6, 4 tablas, 1 fig.
- (17) VIRELLA (A.): *Determinación de la superficie específica por la medida de la permeabilidad*. «Cemento», Barcelona, núms. 236, 7 y 8, noviembre y diciembre de 1953 y enero de 1954, 3 tablas, 3 figs., 10 referencias bibliog.
- (18) VIRELLA (A.): *Análisis granulométrico del cemento por el empleo conjunto del turbidímetro de Wagner y del flourómetro F. L. S. calibrado a 30  $\mu$* . «Cemento», Barcelona, marzo, abril y mayo de 1955, números 252, 3 y 4, 12 figs., 18 ref. bibliog.
- (19) VIRELLA (A.): *Los ensayos de calidad en los laboratorios de fábricas*. «Segundos coloquios de directores y técnicos de fábricas de cementos», Madrid, marzo 1957.
- (20) WAGNER (L. A.): *A rapid method for the determination of the specific surface of portland cement*. (Método rápido para la determinación de la superficie específica del cemento portland). «Proceedings A. S. T. M.», Philadelphia, 1933, vol. 33, II, págs. 553-70. Versión española publicada en «Cemento», Barcelona, octubre y noviembre 1934, núms. 65-6.
- (21) WALTHER (H.): *Feinheitanalyse und spezifische Oberfläche von Mineralpulvern*. (Análisis de la finura y superficie específica de los polvos minerales). Silikattechnik, diciembre 1953, núm. 12, 21 figs., 6 tablas. 29 ref. bibliog.
- (22) WEIDENHAMMER (F.): *Berechnung der Oberfläche eines kornigen Gutes nach Rosin Rammler*. (Determinación de la superficie de un material granulado, según la ley de Rosin y Rammler). «Tonindustries», núms. 9 y 10 (mayo 1951), págs. 133-5, 3 figs., 5 ref. bibliog.

#### NOTA SOBRE LAS REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Para una bibliografía mucho más completa sobre la finura y la superficie específica de los cementos remitimos al lector a nuestra llamada núm. (3). Nuestras referencias bibliográficas se limitan a aquellos trabajos que nos han servido para la preparación de nuestro estudio, así como a nuestros trabajos anteriormente publicados sobre el mismo tema.