

601-10. ESTUDIO ECONOMICO COMPARATIVO DE LAS RESISTENCIAS DE LOS CEMENTOS EN RELACION CON LA MOLIENDA DE LOS MISMOS.

(Wirtschaftlicher Wertvergleich der Festigkeiten bei Vermahlung von Zementen)

Wilhelm Anselm.

Al considerar los conocimientos que hoy día se poseen acerca de la finura del cemento, expresada en términos de superficie específica, resulta necesario hacer un estudio económico - comparativo en cuanto a las resistencias mecánicas logradas, las superficies específicas creadas por el proceso de molienda y el trabajo invertido en dicho proceso. Una comparación de esta índole solamente puede realizarse en una fábrica, y el resultado que se obtiene pone de manifiesto el rendimiento económico conseguido para una determinada clase de cemento, respecto de su finura, resistencia, trabajo consumido o superficie específica creada en diferentes tipos de molinos tales como molinos combinados, molinos de cámaras en circuito cerrado, o molinos con separador de aire.

El conjunto de tales conocimientos y su aplicación de acuerdo con los distintos métodos de producción ayuda en la elección del sistema de molienda a adoptar, así como a fijar la finura óptima en los aspectos económico y técnico.

En lo que sigue se tratará de poner de manifiesto, con ayuda de un ejemplo, el modo de efectuar una comparación entre los valores económicos conseguidos por los distintos métodos, -

llegándose así a determinar un "factor o coeficiente de valoración", de carácter económico.

En otra ocasión (1) indicamos que solamente puede verificarse una estimación comparativa de la energía consumida por un molino teniendo en cuenta la superficie específica creada en el cemento. Únicamente con este resultado a la vista puede hablarse de la economía de un molino e incluso de la economía correspondiente a cada cámara de un molino. Ya sugeríamos entonces hacer extensivo el estudio comparativo a las resistencias obtenidas por medio de una serie de ensayos. Recientemente se publicó en la revista ZEMENT-KALK-GIPS un interesante trabajo de Gründer y Tabbah (2), que permite dicha comparación, pues incluye los valores de la resistencia mecánica y de la superficie específica creada para distintas finuras de molido; se indica también el rendimiento obtenido a partir de estos datos. En particular, se tratarán detalladamente a continuación los siguientes puntos:

1 - Factor económico

En la introducción del trabajo antes mencionado se indican datos bibliográficos sobre el aspecto económico de la molienda, pero sin tener en cuenta el trabajo invertido en la misma. Como demostré en otro lugar (1), desde el punto de vista del trabajo consumido, así como desde el punto de vista teórico, el rendimiento de la molienda, referido a la superficie específica creada, es óptimo para un residuo del 7,5% sobre el tamiz DIN 0,09, tanto para el cemento como para el crudo. Para el carbón, el valor óptimo corresponde al 20% de residuo. Se ha comprobado también que, aumentando la fracción de 5 a 30 micras, mejora la resistencia, y en este hecho se manifiesta ya la diferencia entre

la granulometría obtenida en un molino con separador de aire y la obtenida en un molino compuesto. Hay que considerar además que, a partir de 0,2% de residuo en el tamiz DIN 0,09, ya no existen prácticamente partículas inferiores a 1 micra, las cuales no poseen una capacidad esencial de endurecimiento.

Si se llegarán a producir en forma económica, habida cuenta de la resistencia obtenida y del trabajo invertido en la molienda, cementos con fracciones finas escalonadas desde 5 hasta 50 micras, lo cual es tal vez posible técnicamente, es cosa que habrán de demostrar ensayos futuros.

No hay que olvidar, sin embargo, que ya se fabrican cementos con el 0,2% de residuo sobre el tamiz DIN 0,09, que contienen un 75% de partículas comprendidas entre 5 y 50 micras. Del mismo modo que el consumo específico de energía expresado en Kwh por Tm. es ya muy grande hoy en día, y casi análogo al gasto de energía de una fábrica completa de cemento (77 Kwh/Tm), la separación por aire consumirá asimismo cantidades enormes de energía. Se trata, por tanto, únicamente de cementos especiales, de alta resistencia inicial, que habrán de venderse al precio correspondiente. Como estos problemas han de ser puestos en claro todavía desde el punto de vista técnico, en el artículo de que hablamos se han recogido solamente los resultados de la primera serie de ensayos llevados a cabo por Gründer y Tabbah.

2 - Composición granulométrica

La curva granulométrica característica considerada corresponde a un cemento con un residuo de aproximadamente el 5% sobre el tamiz DIN 0,09 y ángulo de 50° y a un valor $d' = 35$ micras

(pueden encontrarse más detalles en (1) y (2)). El ángulo de 50° parece demasiado elevado, pero se explica tal valor porque la molienda se realizó en un molino de bolas de laboratorio.

En los cálculos de la superficie específica descritos a continuación, se ha tomado para el ángulo un valor medio de 50°, aunque para un residuo del 15% debería ser próximo quizá a 46° y para un residuo del 0,2% superior a 50°.

3 - Cantidad de agua empleada en la preparación de las probetas

En los cementos molidos muy finamente, quizá se hubiera debido variar algo la cantidad de agua añadida.

4 - Determinación de la superficie específica.

En el trabajo de Gründer y Tabbah se determinan gráficamente las superficies según el método de Rammler. Pero, en mi opinión, resultan valores demasiado altos, aunque estas cifras han de ser consideradas únicamente como valores relativos. Los dos métodos de cálculo de la superficie específica que se discuten son el de Rammler (4) y el propuesto por mí (1) (3).

El primer procedimiento, empleado también por Kiesskalt (5), fija como límite inferior de tamaño de grano el valor de 0,1 micras. Sin embargo, considerando el ángulo de 50°, resultan las superficies que se incluyen en la Tabla 1, columna 4b; dichas superficies tienen valores mucho más bajos que los calculados por Gründer y Tabbah, usando el mismo método.

El segundo método utiliza mi fórmula:

$$O = \frac{36,8 \cdot 10^4}{d' \cdot n \cdot \gamma} \text{ cm}^2/\text{g}$$

donde:

O = superficie

d' = grado de finura (d' aparece sobre la línea de 36,8% de residuo)

n = tangente del ángulo de inclinación = zona de finura

γ = peso específico del material que se muele

Este segundo procedimiento fija el límite inferior de tamaño de grano entre 0,1 y 0,01 micras, de acuerdo con el grado de finura, según que se trate de una molienda gruesa o fina. Es evidente que, según el grado de finura, el límite inferior de tamaño de grano debería desplazarse hacia la izquierda en la red granulométrica. De este modo resultan las superficies indicadas en la Tabla 1, columna 4a. Son superiores a los valores obtenidos por Rammler, pero están en la misma relación. Se dan ambas series de valores para hacer posible una comparación con los encontrados por Grúnder y Tabbah. Cómo pudieron encontrar valores tan altos estos autores es cosa que no he podido averiguar.

Como los datos de Kiesskalt (5) son también de fecha reciente, se pueden sacar de ellos los valores según Rammler. Los valores obtenidos con mi fórmula coinciden ampliamente con otros conocidos (sobre todo con los expuestos en trabajos americanos), encontrados a base del ensayo de Blaine para la determinación de la superficie específica. Por ejemplo, varios valores para un residuo del 0,8% en el tamiz DIN 0,09, dan una superficie específica de 5.200 cm²/g, lo que coincide con los valores que obtuve en mis propios trabajos. Sin embargo, no se trata

aquí de fijar un método de cálculo, sino el valor absoluto de la superficie específica, con objeto de determinar un "coeficiente de valoración".

5 - Coeficiente de valoración

El coeficiente empleado por Gründer y Tabbah, de acuerdo con Kuhl (6), resulta de la adición de las resistencias a la compresión más 10 veces el valor de las de tracción, por ejemplo, a los 3, 7 y 28 días. Sin embargo, este valor, dado por Kuhl por primera vez, es solamente válido para las normas antiguas. Permite una buena comparación, aunque, según los trabajos de Grün y Obenauer (7), el factor de multiplicación de las resistencias a la tracción, determinado en 330 clases de cemento, según la norma antigua, es de:

11, a los 3 días	
13, a los 7 días	promedio 12,5
14, a los 28 días	

Pero desde 1940, rigen las nuevas normas, según las cuales Grün y Obenauer dan los siguientes valores:

Para cemento Portland

4,4 a los 3 días	
5,02 a los 7 días	promedio 5,1
5,83 a los 28 días	

Para cemento de alto horno

3,76 a los 3 días	
4,14 a los 7 días	promedio 4,1
4,67 a los 28 días	

En consecuencia, se propone como nuevo coeficiente de valoración de las resistencias de un cemento Portland:

$$\text{Coeficiente (W)} = \frac{\text{Resistencias a la compresión a los 3, 7 y 28 días} + \text{resistencias a flexión-tracción a los 3, 7 y 28 días} \times 5}{5}$$

En el caso de cementos de alto horno el factor de multiplicación de las resistencias a flexión-tracción es 4 en lugar de 5.

Los valores indicados en la Tabla 1, columna 5, se han calculado también de acuerdo con la fórmula anteriormente propuesta, aunque el cemento estudiado por Grúnder y Tabbah daba una resistencia a flexión-tracción inferior en 1/3 al promedio normal. Se han valorado únicamente las resistencias a los 3, 7 y 28 días. Los resultados no son diferentes, puesto que ambos cálculos son proporcionales. Las restantes series de ensayos dadas por ambos autores no han podido ser comparadas, pues en ellas se habían utilizado otros métodos de cálculo.

A base de estos cálculos se ha construido la fig. 1 en comparación con los valores de Grúnder y Tabbah. Se ve en seguida que las curvas correspondientes a los valores según Rammler y según Anselm, aunque algo distintas, presentan una cierta uniformidad en su hábito; la curva según Anselm se encuentra entre la de Rammler y la de Grúnder y Tabbah. Puede apreciarse igualmente que el cálculo de la superficie específica según Grúnder y Tabbah no es uniforme, por lo que no se pueden hacer ulteriores deducciones basadas en el mismo.

6 - Rendimiento

El rendimiento, indicado por ambos investigadores en

función del coeficiente de valoración de las resistencias y de la superficie específica creada, alcanza su valor máximo relativo en la serie de ensayos E. Pero esto sólo fué posible a consecuencia de los valores que tomaba la superficie, que, en mi opinión, no fueron calculados correctamente; ahora la fig. 2 dá el mejor rendimiento:

$$\eta = \frac{W}{O}$$

para la molienda más grosera, según las superficies de Rammler y Anselm, lo que no debe sorprender, por lo que se refiere a las resistencias obtenidas o a los coeficientes de valoración de éstas.

La única diferencia entre las distintas concepciones reside precisamente en el cálculo de la superficie específica, para la cual se han utilizado también en la fig. 2 los valores de Gründer y Tabbah. El rendimiento (teórico) de la molienda en relación con la superficie creada y la energía consumida es ciertamente óptimo para un residuo del 7,5% sobre el tamiz DIN 0,09, pero no para el 2,1% de residuo, como establecían Gründer y Tabbah.

El rendimiento para un residuo del 20% es siempre mejor que para moliendas más finas, incluso en lo que se refiere a resistencias, como pone de manifiesto la fig. 2. No se puede hablar de economía, si no se toma también en consideración la energía gastada en la molienda. Esto es lo que se ha hecho en la Tabla 1, en la que se pretende dar los valores medios del consumo específico de energía en Kwh/tm y la producción específica en Kg/Kwh (columnas 7 y 8), medidos en el acoplamiento del molino.

De aquí resulta el consumo específico de energía en $\text{Kwh} \cdot 10^{-9} / \text{cm}^2$ de superficie. También aquí se vé claramente que, en relación con la superficie específica creada, el consumo específico de energía es mínimo para un residuo del 7%, y que por encima y por debajo de este valor el consumo de energía vuelve a crecer, y esto se observa igualmente en los dos cálculos dados de la superficie (columnas 9a y 9b).

A partir de aquí puede calcularse ahora el "coeficiente de valoración" propuesto por mí, que tiene en cuenta la superficie creada, el consumo de energía preciso para ello y el coeficiente de valoración de las resistencias, procediendo como sigue:

$$\text{factor de valoración } f = \frac{W \cdot 1000}{O \cdot E}$$

siendo:

W = coeficiente de valoración de las resistencias (columna 5)

O = superficie específica en cm^2 / g , según ambos cálculos (columnas 4a y 4b)

E = consumo específico de energía en $\text{Kwh} \cdot 10^{-9} / \text{cm}^2$ de superficie (columnas 9a y 9b).

Pero este factor de valoración calculado es igual al dado por la fórmula:

$$f = \frac{W}{\text{Kwh/Tm.}}$$

porque, para unas condiciones normales de molienda, la superficie aumenta con la energía consumida, y al mismo tiempo se considera el consumo específico de energía óptimo en la molienda fina media. Ambos valores son fáciles de obtener en las fábricas y permiten

una comparación correcta de los resultados en el aspecto económico.

Se observa asimismo que, con este procedimiento de cálculo, el "factor de valoración" es el mismo, ya se calcule la superficie específica según Rammner o según Anselm, y con ello desaparece cualquier duda respecto de un cálculo realmente correcto de la superficie.

Las columnas 11, 12 y 13 de la Tabla 1 representan la relación entre los valores de la molienda y los de las resistencias, referidos a la serie de ensayos A = 100, del modo siguiente:

Columna 11, superficie según Anselm	Calculado de nuevo según Gründer y Tabbah -
Columna 12, superficie según Rammner	$\eta = W/O$
Columna 13, superficie según Rammner y Anselm, de acuerdo con la fórmula propuesta: $f = \frac{W}{Kwh/Tm.}$	

Del cálculo de la anterior relación se desprende que hasta un residuo del 6,6% (serie de ensayos D) el descenso según el cálculo propuesto por mí no es tan marcado como el que se obtiene con el cálculo modificado de Gründer y Tabbah, porque interviene en él el consumo específico de energía para las finuras medias.

Por consiguiente, el "factor de valoración" y la relación que acabamos de citar ponen claramente de manifiesto que, incluso considerando la superficie específica creada calculada por cualquier método, las moliendas gruesas son las más favorables en lo que respecta a las resistencias, y no existe un valor óptimo para un residuo del 2,1%, como se indicaba en el citado trabajo.

En mi opinión, el límite admisible de la molienda fina de los supercementos, en relación con los precios actuales de los mismos, es de un 1% de residuo sobre el tamiz 0,09, y aquí surge ya la cuestión de si la economía de la construcción sabe aprovechar adecuadamente estas resistencias, o si únicamente en la industria de piezas prefabricadas de hormigón se saca partido de las resistencias iniciales elevadas.

De acuerdo con las anteriores consideraciones, ya no son ciertas las conclusiones sacadas por los autores de que los cementos de granulometría mixta por debajo de 40 micras y los cementos de granulometría unitaria de 30 a 40 micras posean las propiedades óptimas en lo que se refiere al aspecto económico de la fabricación del cemento. También debe considerarse en principio problemático lo que se afirma sobre la molienda en molinos separadores, pues en ellos ciertamente se obtiene un tamaño de grano entre 5 y 30 micras, pero la composición granulométrica es distinta, esto es, la porción de finos es menor y, con ello, la superficie específica, lo cual coincide con los valores medidos para las resistencias. Además, el consumo de energía es elevado, aunque por desgracia no se conocen datos sobre el funcionamiento en gran escala.

Resumen

Es preciso encontrar un "coeficiente de valoración", referido a las resistencias, superficie específica y energía consumida, que permita realizar en las fábricas un estudio comparativo económico de la molienda en lo que respecta a la finura obtenida y al sistema de molinos empleado.

Se ha comprobado por medio de un ejemplo que no existe un "factor de valoración" óptimo para los cementos finamente molidos, sino que los cementos sometidos a una molienda gruesa presentan los valores máximos, en oposición a lo que se afirma en el trabajo publicado por Gründer y Tabbah.

Fijando un nuevo "coeficiente de valoración" para las resistencias, se propone como nuevo "factor de valoración" el dado por la fórmula:

$$f = \frac{W}{Kwh/Tm.}$$

el cual evita tener que calcular la superficie específica y debiera tomarse como base para los estudios comparativos.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Anselm, W., Zerkleinerungstechnik und Staub, DIV-Verlag, - Düsseldorf 1950.
- (2) Gründer, W., Tabbah, S., Der Einfluss der Feinheit auf die - Anfangs- und Endfestigkeiten von Portlandzement, Zement-Kalk-Gips, 3 (1950), 67/71.
- (3) Anselm, W., Verbundmühle oder Sichtertermühle bei Zementvermahlung, Tonind.- Ztg. 74 (1950), 11/15.
- (4) Rammler, E., Zur Ermittlung der spezifischen Oberfläche des Mahlgutes, VDI Beiheft Verfahrenstechnik, 1940, 150/160.
- (5) Kiesskalt, S., Zur Theorie und Praxis der Siebtechnik, Bauwirtschaft 1949, 1.
- (6) Kühl, H., Protokoll VDPZF, 2. 9. 1929, S.23 ff. Zement 19 - (1930), 604.
- (7) Grün, R., Obenauer, K., Über die Eigenschaften von Decken-zementen und Beziehungen zwischen alten und neuen Normen, Zement 32 (1943), 11/12, 101/108.

- - -

TABLA I

Factor de Valoración f de las resistencias y de la molienda

1	2	3	4		5			6	7	8	9		10	11 12 13		
Serie de experiencias	Residuo %	d' en micras	Superficie espe- 0 en cm ² /g		Coeficiente W de las re- sistencias			$\frac{W}{O} \times 100$	Consumo espe- cífico de tra- bajo Kwh/Tm ³	Producción específica Kg/Kwh ³	Consumo específico de energía E.Kwh.10 ⁻⁹ /cm ² 0		Factor de valoración f, # $\frac{W \cdot 1000}{O \cdot E}$	Relación (A=100) según la columna		
	0,09		a	b		a	b				a	b	$f = \frac{W}{Kwh/Tm}$	6a	6b	10
A	20.2	59	1690	1330	1375	81	103	20.8	48	12.3	15.6	63	100	100	100	
B	16.4	51	1960	1550	1508	77	97	22.7	44	11.6	14.6	63	95	94	100	
C	8.6	41	2430	1860	1595	66	86	27.4	36.5	11.3	14.7	58	81	83	92	
D	6.6	36	2770	2110	1630	59	77	30.3	33	10.9	14.3	54	73	75	86	
E	2.1	27.5	3620	2670	1771	49	66	44.4	22.5	12.3	16.6	40	60	64	63	
F	0.2	17.5	5690	3770	1982	35	53	77	13	13.5	20.4	26	43	51	41	
G	60	16.0	6220	4180	2111	34	50	87	11.5	14.0	20.8	24	42	49	38	
H	50	13.5	7360	5430	--	-	-									
I	40	11	9050	5730	--	-	-									
K	30	8	12450	7130	--	-	-									
L	20	5.3	18000	10550	--	-	-									
		para x-50°	según la fór- mula de Amselm	según la fór- mula de Rammier	Resistencia a compresión +5x resisten- cia a la flexión a 3, 7 y 28 días	según la fór- mula de Amselm	según la fór- mula de Rammier	*) Valores medios según Amselm medidos en el acoplamiento								

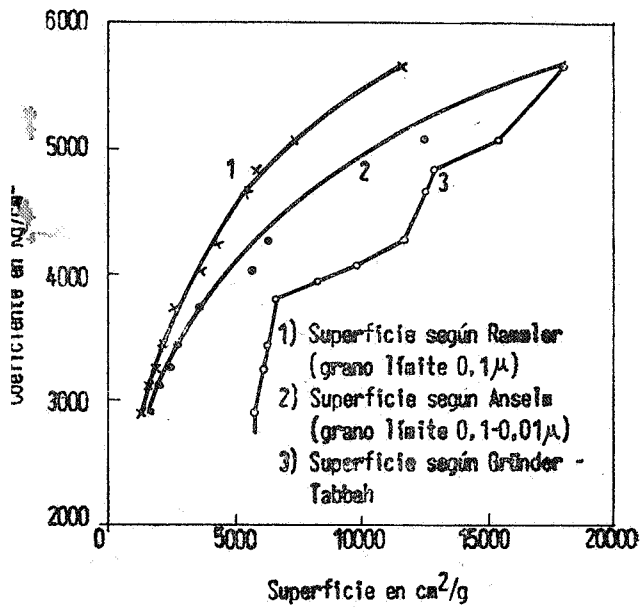


Fig. 1: Coeficiente de valoración de las resistencias en relación con la superficie.

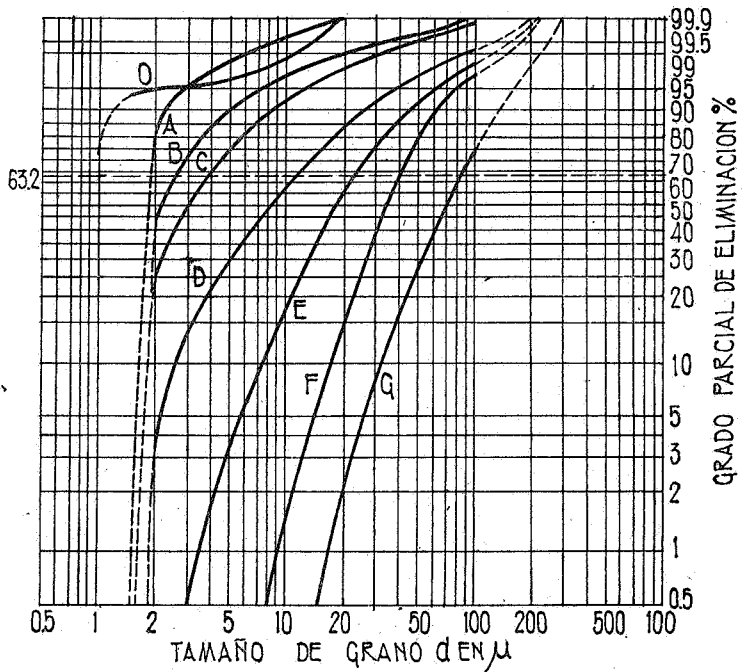


FIG-4: GRADOS PARCIALES ELIMINACION DE POLVO

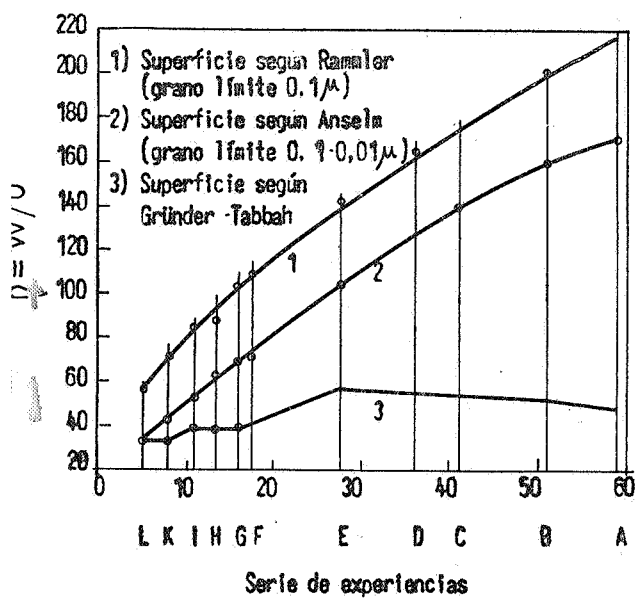


Fig. 2: Rendimiento en relación con la finura de molido

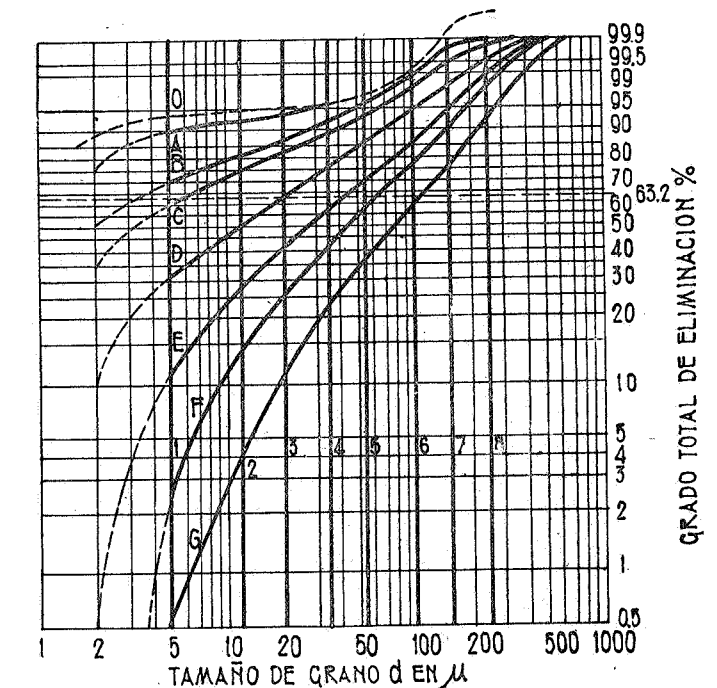


FIG-20: GRADOS TOTALES ELIMINACION DE POLVO