

Notas sobre molienda (1)

1.—Me propongo señalar la importancia de los “finos”, fijar un criterio interpretativo de su distribución e indicar un procedimiento rápido para su análisis granulométrico o “diametría”.

2.—A medida que se perfecciona la técnica de molienda se imponen métodos de control más precisos. Los tamices de cedazo metálico empleados comúnmente para establecer la composición en tamaño de las partículas de mineral en los puntos principales del circuito de molienda y clasificación, no permiten clasificar sino partículas, supuestas esféricas, de diámetro superior a 74 micrones, que es la luz de un tamiz Fyler de 200 mallas por pulgada lineal.

Con cedazos de seda es posible llegar a 325 mallas; pero su delicadeza no permite que su empleo se generalice como instrumento de control corriente y el uso de tamices tan finos quedará restringido a experimentos de laboratorio a cargo de personal muy especializado. Por lo demás, lo que se gana es poco, si se considera la fineza de molienda a que debe llegarse en algunos casos, que exige una reducción a menos de 50 micrones, y en circunstancias excepcionales, a 10 micrones.

De todas maneras, que se eche mano de tamices de 200 mallas o aún de 325 mallas, no se logrará abarcar sino un campo de dimensiones muy limitado. No podría someterse a un análisis granulométrico el producto bajo 200 ó 325 mallas, y éste es decisivo para apreciar el valor de una molienda determinada y comparar la eficiencia respectiva de diversos períodos de molienda o de diversas instalaciones.

3.—En la práctica de la flotación de minerales auríferos se ha llegado ya en nuestro país a moliendas del orden de 180 a 200 mallas, de manera que el tamiz más fino de uso generalizado en las plantas, el Tyler de 200 mallas, sólo nos indica si se ha alcanzado un *límite superior*, fijado por la investigación de laboratorio o por la experiencia; pero nada nos dice acerca de la distribución según tamaño del fino bajo 200 mallas. Y este es un dato indispensable para determinar si hay *sobremolienda*, ya que el exceso de fino con respecto a un *límite inferior*, fijado también por la investigación de laboratorio, es perjudicial, porque reduce la capacidad del circuito de molienda y provoca dificultades en la flotación, siendo la principal de ellas la baja ley de los concentrados. La recuperación también deja que desear. En cianuración se presenta el problema de las lamas, que reducen la capacidad de los espesadores continuos, entorpecen el lavado en contra corriente y dificultan el trabajo de los filtros.

Examinaremos en detalle algunos de los inconvenientes que presenta la sobremolienda.

(1) Véanse los Boletines Mineros de la Sociedad Nacional de Minería, N.º 442—Febrero de 1937, pág. 1009; 452—Diciembre 1937, pág. 1937; 447—Enero 1940, pág. 56.

4.—Wark, basado en sus propias investigaciones y en las de Gaudin y Malozemoff, señala diversos factores contrarios a una buena flotación, derivados de la presencia de lamas (2).

“1.º—El área superficial relativamente grande con respecto al peso del mineral finamente molido exige una dosis muy alta de colector para formar una película unimolecular de adsorción.

2.º—A causa de su pequeña masa y consiguiente alta resistencia al movimiento respecto del agua, es casi imposible un choque directo entre una partícula y una burbuja de aire. Se establece con más dificultad el contacto necesario aire-mineral para la flotación.

3.º—En general, cuanto más pequeña una partícula, tanto más antigua será su superficie y tanto más habrán progresado las alteraciones superficiales responsables de la mala flotación. Las superficies de las partículas grandes se rejuvenecen continuamente por el proceso de molienda, mientras que las pequeñas partículas son protegidas contra este proceso por las más grandes, de manera que sus superficies en promedio son más antiguas. En apoyo de este aserto, los autores (W. se refiere a Gaudin y Malozemoff) demuestran que la recuperación de la galena fina mejora mucho si el colector se agrega durante la molienda, de lo que se deduce que una película de xantato una vez formada, protege al mineral contra cambios ulteriores.

A estos tres factores podría agregarse un cuarto, un quinto, y, posiblemente, un sexto. Un simple cálculo demostrará que si la dimensión lineal de un cubo de galena se reduce a la décima parte durante la molienda se producen mil cubos nuevos, cada uno con una superficie cien veces ^{menor} mayor que la del cubo primitivo. Por consiguiente, para la flotación se necesitará una intersuperficie aire-agua diez veces mayor que la exigida por el cubo original. Si el mineral se reduce a dimensiones coloidales se necesitaría un área relativamente enorme aún cuando el mineral se encontrase en condiciones favorables para la flotación.

El quinto factor se refiere a la gran solubilidad de pequeñísimas burbujas de aire en agua. Se demuestra en física que, a causa de la curvatura, existe una sobrepresión interior en la burbuja igual a $2Twa/r$ (3), en que r es el radio de la burbuja. Esto trae por consecuencia: 1) que las burbujas grandes tienden a crecer a costa de las burbujas pequeñas y 2) que una solución debe estar muy supersaturada de aire si se desea que se separen burbujas pequeñas. La curvatura relativamente grande de las pequeñas partículas es, por consiguiente, un obstáculo para que se deposite sobre ellas el aire de la solución, aún cuando la superficie esté acondicionada en forma conveniente, y una pequeña burbuja de aire cualquiera sobre la superficie tenderá a disolverse más bien que a crecer.

El sexto factor posible es que la adsorción de iones puede impartir a cada partícula una carga superficial relativamente alta. . . Taylor y Ball atribuyen la acción depresora de cationes multivalentes a las repulsiones electrostáticas entre las partículas consiguientes a la adsorción de los cationes”.

Más adelante, el mismo autor informa sobre las investigaciones de la escuela de Columbia (Taggart y sus colaboradores, en especial del Guidice) referentes a la influencia de las partículas finísimas sobre la flotación de las grandes. Las partí-

(2) Yan W. Wark: Principles of Flotation, Melbourne, 1938, pág. 295.

(3) Twa es la tensión superficial en la intercara agua/aire. L. D.

culas de lama se *cementan* sobre las partículas de mineral, y una partícula cubierta de lama no puede flotar porque las partículas de lama adheridas impiden que el aire de las burbujas haga contacto con el mineral recubierto. Así, aunque el mineral haya absorbido una película de colector, la flotación es imposible. El fenómeno en globo es designado en inglés por "coating", que puede traducirse por "recubrimiento" o simplemente "contaminación", aunque en este caso hay que distinguir el fenómeno especial que analizamos de la contaminación química estudiada también por del Guidice y elevada a teoría general.

El efecto pernicioso de la cementación se produce también durante la molienda seca. Bond y Agthe informan sobre sus investigaciones al respecto en una memoria presentada al A.I.M.M.E. (T. P. N.º 1160, Marzo 1940). En la amalgamación a presión en seco, los finos son tan perjudiciales que, para obtener recuperaciones aceptables, es necesario eliminar un 3 a 5% mediante un clasificador tipo Raymond.

5.—Fuera de los factores considerados por Wark, cabe mencionar dos más. El primero se refiere a la flotación selectiva de las partículas según su tamaño y, como caso particular, la propensión a flotar de las lamas ricas en alúmina y la consiguiente impurificación de los concentrados. Esta circunstancia resta valor a los concentrados con destino a fundición, tanto por los inconvenientes que presente un exceso de finos en el horno como por el mayor consumo de combustible y de fundente que origina una mayor proporción de alúmina en la carga. Se comprende así la práctica, introducida no hace mucho en algunas fundiciones de los Estados Unidos, de aplicar castigos a los concentrados que contienen un exceso de finos.

L. Logue (4) ha investigado un caso interesante de flotación selectiva dimensional comparada en la flotación de un mineral de cobre. De sus investigaciones se desprende que el carácter de dos concentrados provenientes del mismo mineral, tratado con los mismos reactivos, alimentados desde un distribuidor común a dos circuitos separados, con relaves de igual ley, era determinado principalmente por el porcentaje y distribución de los finos bajo 200 mallas. El análisis granulométrico dividió al producto inferior a 200 mallas en 5 fracciones de + 50, + 30, + 20, + 10 y — 10 micrones, cuya ley en cobre se determinó. Los resultados se dispusieron en cuadros y gráficos ilustrativos para facilitar su interpretación. Se hizo lo mismo con los relaves. Las conclusiones a que llegó de esta manera Logue demostraron lo siguiente:

En una de las máquinas de flotación, llamémosla A, la selectividad era más pronunciada en todas las fracciones que en la otra, B. El concentrado de la A era más favorable para espesar, filtrar y fundir, porque la eficiencia de concentración era superior en las fracciones granulares y mayor proporción de lama semicoloidal de la ganga iba a parar al relave, con la consiguiente menor ley de alúmina y magnesia en el concentrado. Se obtenía de esta manera un fundente de mejor clase.

La máquina B obtenía mayor recuperación de las fracciones finas. Estas eran arrastradas mecánicamente por la espuma y con baja eficiencia de concentración. El mineral fino recuperado no tenía valor porque el mayor porcentaje de ganga semicoloidal en el concentrado anulaba en exceso el valor del mineral recuperado.

(4) "Los factores invisibles en la flotación", Deco Trefoil, septiembre 1940, pág. 5.

El análisis comparativo de los relaves dió el resultado que se consigna en el cuadro I.

CUADRO I

Tamiz malla	Máquina "A"		Máquina "B"	
	Residuo %	Cobre %	Residuo %	Cobre %
+ 65	6.50	0.16	6.50	0.21
+ 100	12.30	0.14	12.40	0.18
+ 150	10.70	0.11	10.80	0.16
+ 200	12.20	0.11	12.40	0.12
MICRONES				
+ 50	20.50	0.09	20.70	0.09
+ 30	14.30	0.07	14.70	0.06
+ 20	8.90	0.09	8.60	0.06
+ 10	4.50	0.10	4.30	0.08
— 10	10.10	0.26	9.60	0.16
	100.00	0.12	100.00	0.12

Si se hubiera considerado únicamente los resultados de la máquina B, con miras de mejorar la recuperación, se habría concluído erróneamente que se imponía una molienda más fina para reducir la pérdida en los relaves, puesto que la referida máquina no favorece la recuperación en las fracciones gruesas. Sin embargo, una molienda más fina debía producir una mayor proporción de finos bajo 10 micrones, y el análisis del concentrado B había demostrado que no había ventaja alguna en recuperar mejor esta fracción. Además, el examen microscópico del relave de la máquina A demostró que en el producto bajo 10 micrones prácticamente todo el mineral útil, un sulfuro de cobre, estaba libre y no adherido. En consecuencia, el mejoramiento de las condiciones debía consistir, a la inversa, en una molienda más gruesa, aunque tratando parejamente de conseguir una clasificación más perfecta. Se procedió en la forma indicada: se logró aumentar en 12% el tonelaje beneficiado y reducir a 0.09% la ley media del relave.

Este no es un caso extraordinario. Según Logue, casi en cada ocasión en que ha sido posible efectuar estos estudios comparativos, se ha encontrado que, dentro de ciertos límites, el carácter del concentrado producido era controlable por el operador mediante la combinación adecuada de la máquina de flotación, los reactivos la molienda, etc., y agrega que el ejemplo analizado no constituye ningún caso extremo.

6.—El otro factor que conviene analizar, es la energía consumida en el proceso de la molienda. El trabajo realizado es directamente proporcional a la nueva superficie producida. Esta ley, enunciada por Rittinger en 1867, puede considerarse definitivamente comprobada por los experimentos de Gross y Zimmerley (5), Coghill y De Waney (6) y Bond y Maxson (7).

(5) Transactions A. I. M. M. E., Milling Methods 1930, pág., 41.

(6) Bol. de la Escuela de Minas y Metalurgia de Missouri, vol. 13 N.º 1, Septiembre 1938.

(7) T. P. 888, Marzo 1938, A. I. M. M. E.

Por lo tanto, es conveniente reducir a un mínimo la formación de superficies nuevas más allá del límite compatible con una buena recuperación. Al reducir los kilowatt-horas por tonelada molida, se puede ya sea aumentar el tonelaje o aprovechar la energía disponible parcialmente en mejorar el rendimiento de las máquinas de flotación. E. H. Rose ha demostrado en una memoria presentada al A. I. M. M. E. ("Flotation as a power process"), que existe una marcada correlación entre el aumento de la intensidad de la energía, expresada en KWH por tonelada de carga fresca, y el mejoramiento de la recuperación (8). Ya hemos visto que la sobremolienda produce lamas contaminantes. Su efecto es también función de la superficie, de tal manera que el requisito de superficie mínima satisface tanto la exigencia de una máxima recuperación como de un consumo mínimo de energía motriz. El resultado es siempre un mayor precio del producto obtenido y un menor costo de producción.

7.—Dada la importancia de la superficie generada en el proceso de molienda, es interesante apreciar cuantitativamente el fenómeno, si no con el rigor científico de los experimentos realizados por los investigadores referidos y otros, con una aproximación suficiente para los fines de la práctica. En lo que sigue trataremos de fijar mediante el análisis granulométrico un criterio interpretativo de la molienda como proceso generador de superficie, que condensaremos en una fórmula.

Supongamos sometidos al análisis granulométrico 100 gr. de un material homogéneo de peso específico γ que expresaremos en gr./cm³. Sea P el peso de cada fracción y d el diámetro uniforme respectivo. Se demuestra que la superficie total, siempre que las partículas sean esferas o cubos, es

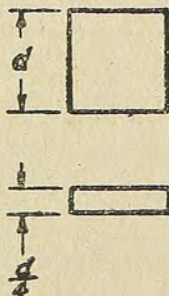
$$1) \quad \Sigma S = \frac{6 \cdot 10^4}{\gamma} \frac{P}{d} \text{ cm}^2$$

Los diámetros deben expresarse en micrones o milésimos de milímetros.

Si las partículas tienen forma laminar como se indica en la fig. 1, la superficie total es

$$2) \quad = \frac{12 \cdot 10^4}{\gamma} \frac{P}{d} \text{ cm}^2$$

FIG. No. 1



(8) T. P. 1702, Marzo 1944.

Consideremos dos muestras, A y B, cuya distribución granulométrica se da cuenta en el cuadro II.

CUADRO II

A			B			
d	P gr	$\frac{P}{d}$	d	P gr	$\frac{P}{d}$	$\frac{P}{d}$
100	5	0,05	120	5	0,0416	
90	10	0,111	110	8	0,0727	
80	15	0,1875	100	12	0,12	
70	20	0,286	90	15	0,1667	
60	15	0,25	80	18	0,225	
50	10	0,2	70	15	0,2145	
40	5	0,125	60	12	0,2	
			50	5	0,1	
			40	4	0,1	1,2405
			20	3	0,15	
			5	2	0,4	
			1	1	1	1,55
	100	1.2095			2,7905	2,7905

Se observa que el material B, a pesar de que un 13% de su peso se compone de partículas con diámetros superiores a 100 μ , que es el diámetro máximo de las partículas del conjunto A, presenta sin embargo una superficie 2,3 veces mayor que este último. Hasta un diámetro de 40 μ inclusive que es el diámetro mínimo del conjunto A, los dos materiales son casi equivalentes; pero las partículas inferiores de B que constituyen sólo el 6% en peso, por sí solas más que duplican la superficie contenida en el 94% en peso restante del conjunto B, y representan el 55,6% de la superficie total.

8.—Es interesante formarse una idea del orden de magnitud de la superficie expuesta por un peso fijo de material clasificado. Tomando, por ejemplo, el caso B del cuadro II, y suponiendo un peso específico igual a 3, la fórmula 1) nos da una superficie de 5,58 m² para los 100 grs. de material. Si aceptamos una forma laminar de las partículas bajo 20 μ , conforme a la fig. 1, que representan 3% en peso y 50,2% de la superficie total, la fracción considerada puede recubrir un 20% de la superficie restante, expuesta por el 97% en peso del conjunto, en el supuesto de que las láminas se peguen por una sola de sus caras. Si hay aglomeración en la pulpa, el recubrimiento es mayor. Naturalmente, la agitación mecánica despega muchas partículas; pero un número considerable permanece adherido.

9.—Consideremos ahora el cuadro III.

CUADRO III

A			B		
d.	P gr	$\frac{P}{d}$	d	P gr	$\frac{P}{d}$
100	1	0,01	140	12	0,0856
90	2	0,0222	120	18	0,1500
80	6	0,075	100	19	0,1900
70	15	0,2143	80	15	0,1875
60	28	0,467	60	14	0,2335
50	26	0,52	40	9	0,2250
40	22	0,55	30	7	0,2335
			20	3	0,15
			10	2	0,2
			5	1	0,2
		1,8585			1,8551

Las superficies expuestas por ambos conjuntos son prácticamente iguales, a pesar de que un 30% en peso del conjunto B está constituido por partículas de diámetros superiores a 100 μ , que es diámetro máximo de las partículas del conjunto A. Este 30% representa sólo el 12,7% de la superficie total expuesta. En cambio, las partículas de diámetros inferiores a 30 μ , que es inferior en 10 μ al diámetro mínimo del conjunto A, y que constituyen sólo un 6% en peso del conjunto B, presentan una superficie igual a 29,6% del total.

10.—Estos dos ejemplos demuestran que el criterio de la superficie total engendradora en la molienda no es un criterio decisivo, pues no toma en cuenta el factor metalúrgico y sus componentes, a saber, recuperación, ley del concentrado, su composición química, ni otros caracteres como la velocidad de sedimentación y de filtración que determinen en mayor grado los resultados económicos de una empresa. Este factor y, en menor grado, los caracteres señalados, guardan estrecha dependencia con la sobremolienda, o sea, con el exceso de finos producidos más allá de un límite inferior que la experimentación de laboratorio o la experiencia hubieran señalado en cada caso como suficiente para alcanzar resultados metalúrgicos óptimos.

Pero el criterio de superficie total no satisface tampoco la exigencia de economía dinámica, puesto que Gross y Zimmerley, en experimentos clásicos, han demostrado que al moler cuarzo de 20 mallas a 28 mallas, los finos bajo 200 mallas producidos, que representan 4,5% en peso de la cantidad original sometida a la molienda, han absorbido el 73,7% de la energía consumida. En otro experimento, al reducir de 65 mallas a 100 mallas los finos bajo 200 mallas producidos, que representan el 18,2% en peso del material primitivo, han absorbido el 95,3% de la energía consumida (9).

(9) Transactions, Milling Methods, 1930, pág. 44.

11.—Precisaremos con algunas cifras las ventajas económicas, de orden dinámico y metalúrgico, resultantes de una reducción de la sobremolienda.

Examinemos el cuadro IV, que da la distribución del concentrado B del ejemplo aducido por Logue en su artículo precitado, pero que suponemos corresponde al rebalse del clasificador. Además, hemos fijado arbitrariamente en 5μ el diámetro medio de las partículas bajo 10μ diámetro mínimo considerado en el análisis experimental.

CUADRO IV

d	P Gr.	$\frac{P \cdot 100}{d}$
251,5	0,38	0,015
177,5	1,94	1,090
125,5	4,32	3,44
89	8,4	9,44
62	13,14	21,2
40	16,72	41,8
25	18,76	75
15	16,84	112,2
5	19,50	390
	100,00	654,185

Supongamos que se trate de un mineral homogéneo de peso específico 2,65 y calculemos la superficie expuesta por 100 gr. en forma de cubos con aristas de 1 cm. Cada cubo pesa 2,65 gr y habrá $\frac{100}{2,65} = 27,7$ cubos cuya superficie total será igual a $27,7 \cdot 6 = 166,2 \text{ cm}^2$. (o 27 cubos de 1 cm y un cubo equivalente a $0,7 \text{ cm}^3$). Si molemos el material hasta obtener la distribución indicada en el cuadro IV, habremos creado $\frac{6 \cdot 10^4}{2,65} \cdot 6,54 = 148.000 \text{ cm}^2$ de nueva superficie, despreciando la superficie original. A 1 Kg. corresponderá una superficie teórica igual a $0,148 \cdot 10^7 \text{ cm}^2$.

Según Gross y Zimmerley (10), un trabajo de 1 Kg/cm produce $17,56 \text{ cm}^2$ de superficie, o bien, es necesario gastar $55,8 \cdot 10^3 \text{ erg}$. por cm^2 . En nuestro caso resulta una energía de $55,8 \cdot 10^3 \cdot 0,148 \cdot 10^7 \text{ erg}$ por Kg, igual a $8,26 \cdot 10^3 \cdot 10^7 \text{ erg}$ por Kg, o bien, $8.260 \cdot 10^3 \text{ erg}$ por ton. Cambiando unidades, se obtiene 2,29 KWH por tonelada. Para 100 toneladas al día el consumo teórico de energía será de 229 KWH. Suponiendo que se reduzca en 50% la superficie bajo 200 mallas y que esto signifique una reducción en 25% de la energía necesaria, la economía resultante será de 57,2 KWH que, a 50 ctvs. el KWH, equivale a \$ 28,60 por día. Pero esto, es en el caso teórico, pues en la práctica un molino al que se imponga la tarea de reducir 100 toneladas de material cuarzo de 1 cm a dimensiones de acuerdo con la distribución del cuadro IV, consume una energía 15 a 20 veces mayor. Las máquinas de molienda, así como las de flotación, figuran entre las de más bajo rendimiento mecánico útil, si le asignamos el papel de generadores de superficies, en el

(10) Milling Methods 1930, pág. 43.

primer caso de partículas sólidas y en el segundo de burbujas de aire. Algunos autores hablan de rendimientos de sólo 3%, otros de 1% y aún de fracciones de 1%.

Se comprende que una disposición acertada de todo el sistema de molienda puede significar economías considerables. En el supuesto de un rendimiento de 5% en una disposición determinada y que se lograse modificarla en forma tal de realizar una economía de 20%, la economía en moneda corriente resultante para el ejemplo anterior será $45,8 \cdot 0,2 \cdot 0,5 = \$ 4,29$ por tonelada. En 100 toneladas será de \$ 429.

12.—Si el material del ejemplo anterior tiene una ley de 3% en cobre y si lo grásemos modificar la molienda, reduciendo así el porcentaje de lamas contaminantes, en forma de mejorar la recuperación en sólo 5%, caso de ninguna manera excepcional (11), la mayor entrada será de 150 Kg. de fino diario que, a razón de \$ 5. el Kg. equivale a \$ 750.

Las cifras anteriores, que podrán variar de un caso a otro, demuestran de todas maneras que no se ha sobrestimado la importancia de la sobremolienda.

13.—Los conceptos anteriores nos dicen también y esto es lo que interesa recalcar ahora, que un criterio interpretativo del proceso de molienda, partiendo de un análisis granulométrico y capaz de condensarse en una fórmula, debe amplificar el efecto de las partículas más pequeñas y acusar la irregularidad de la distribución o dispersión.

Circunscribiendo el problema y puestos ya en un terreno analítico, definiré una función que permite englobar en una fórmula sencilla los dos caracteres esenciales que importa considerar. Con este fin, formaré primero las razones q entre los diversos diámetros y el diámetro mínimo de referencia, que conviene sea 1μ . De fino entonces la "discrasia granulométrica" mediante la fórmula:

$$3) \quad \Delta = \frac{100 \cdot \sum Pq^2}{(\sum Pq)^2} - 1$$

P tiene el significado conocido y asignamos el número 100 al peso del conjunto analizado.

14.—Apliquemos la fórmula 3) a la distribución de los conjuntos A y B del cuadro V. Formaremos primero los coeficientes q y q^2 , que multiplicaremos por los porcentajes P . Con fines de comparación agregaremos en A y en B sendas columnas con los cocientes $\frac{P}{d}$ para calcular la superficie total.

(11) En amalgamación a presión se obtienen aumentos de 10 a 20% con sólo eliminar 5 a 10% de finos.

CUADRO V

d	A						B					
	P	$\frac{P}{d}$	q	q ²	Pq	Pq ²	P	$\frac{P}{d}$	q	q ²	Pq	Pq ²
	gr.						gr.					
60	30	0,5	6	36	180	1080	8	0,133	6	36	48	288
50	25	0,5	5	25	125	625	10	0,2	5	25	50	250
40	15	0,375	4	16	60	240	12	0,3	4	16	48	192
30	12	0,4	3	9	36	108	15	0,5	3	9	45	135
20	10	0,5	2	4	20	40	25	1,25	2	4	50	100
10	8	0,8	1	1	8	8	30	3	1	1	30	30
		3,075			429	2101		5,383			271	995

Para mayor sencillez, he adoptado como diámetro de referencia 10 μ .

Si aplicamos la fórmula 3) se obtiene

$$A = \frac{210 \ 100}{429^2} - 1 = 1,14 - 1 = 0,14$$

$$A = \frac{99 \ 500}{271^2} - 1 = 1,352 - 1 = 0,352$$

Si formamos las razones entre las discrasias, se obtiene:

$$\frac{\Delta_B}{\Delta_A} = \frac{0,352}{0,14} = 2,51$$

En cambio, la razón entre las superficies totales resulta igual a:

$$\frac{\Sigma S_B}{\Sigma S_A} = \frac{5,383}{3,075} = 1,75$$

Se observa el efecto amplificador de las partículas de pequeños diámetros sobre la discrasia.

15.—Consideremos ahora nuevamente el cuadro III y formemos el cuadro VI para calcular las discrasias.

CUADRO VI

A						B					
d	P	q · 10 ⁻¹	q ² · 10 ⁻²	Pq · 10 ⁻¹	Pq ² · 10 ⁻²	d	P	q · 10 ⁻¹	q ² · 10 ⁻²	Pq · 10 ⁻¹	Pq ² · 10 ⁻²
100	1	10	100	10	100	140	12	14	196	168	2352
90	2	9	81	18	162	120	18	12	144	216	2592
80	6	8	64	48	384	100	19	10	100	190	1900
70	15	7	49	105	735	80	15	8	64	120	960
60	28	6	36	168	1008	60	14	6	36	84	504
50	26	5	25	130	650	40	9	4	16	36	144
40	22	4	16	88	352	30	7	3	9	21	63
						20	3	2	4	6	12
						10	2	1	1	2	2
						5	1	0,5	0,25	0,5	0,25
				567	3 391					843,5	8 529,25

Aplicando la fórmula 3) se obtiene:

$$\Delta_A = \frac{3391 \cdot 10^4}{56,7^2 \cdot 10^4} - 1 = 0,053$$

$$\Delta_B = \frac{8529,25 \cdot 10^4}{84,35^2 \cdot 10^4} - 1 = 0,2$$

La razón entre las discracias es:

$$\frac{\Delta_B}{\Delta_A} = \frac{0,2}{0,053} = 3,78$$

En cambio, la razón entre las superficies, como se desprende del cuadro III, es igual a 1. El efecto amplificador es más notable que en el caso anterior porque no sólo se hace sentir el efecto de las partículas de pequeños diámetros sino también el de la mayor dispersión.

16.—La discrasia tiene las propiedades de un operador con efectos de traslación y rotación. En efecto, en la hipótesis de un material homogéneo que se conforma a la distribución exponencial descubierta por Gaudin (12), un aumento proporcional de las superficies correlativa a una disminución proporcional de los diámetros, se traduce en una traslación paralela de la recta representativa a la derecha, y un cambio de forma de la curva de frecuencia, por ejemplo un achatamiento que corresponde a una mayor dispersión, equivale a una rotación de esta recta en contra de los punteros del reloj. Los dos ejemplos que acabamos de analizar demues-

(12) An investigation of crushing phenomena, en Transactions A. I. M. M. E., vol. LXXIII, 1926, pág. 253 y del mismo autor: "Principles of mineral dressing", New York, 1939, pág. 128-129.

tran empíricamente que la discrasia interpreta y expresa en forma cuantitativa estas variaciones.

Finalmente, agregaremos que el ideal del molinero es que la discrasia sea nula. Es lo que ocurre cuando todas las partículas tienen el mismo diámetro. La razón de superficies viene a ser el factor dominante y ésta es inversamente proporcional a los diámetros.

17.—La aplicación de la discrasia presenta una pequeña complicación cuando la diametría deja un porcentaje de finos no clasificados relativamente grande. Cuando es del orden de 10%, se puede asignar a este "infra-fino" un diámetro igual a la mitad del diámetro inferior considerado; pero si se desea mayor precisión, y siempre que por lo menos los tres últimos porcentajes determinados, con exclusión del saldo no clasificado, muestran regularidad suficiente que permite colocar los puntos del gráfico logarítmico sobre una recta, puede extrapolarse para agregar algunos residuos más.

Sin embargo, es preferible y se ahorra tiempo si, en vez de recurrir a estos gráficos, se abarca en el análisis dos o tres diámetros más que permitan reducir el saldo no clasificado a menos de 10%. Veremos más adelante que la técnica es tan sencilla que no vale la pena complicar el cálculo de la discrasia con el de la forma de la distribución. Además, en muchos casos, cuando el material no es homogéneo, la distribución de las partículas en la rama descendente de la curva no es lineal y, por lo tanto, no será lícito extrapolar o no se puede.

18.—Hay casos excepcionales en que el cálculo presenta dificultades. Tomemos por ejemplo, el análisis del rebalse de un clasificador Akins en circuito cerrado con un molino de bolas de 5x5'. La muestra se tamizó en húmedo sobre 200 mallas y el residuo seco se tamizó por un juego de tamices de 65, 100, 150, y 200 mallas Tyler. El fino seco bajo 200 mallas se agregó a la pulpa bajo 200 mallas. Esta pulpa se sometió al análisis granulométrico según la técnica que se describirá más adelante. El análisis del residuo sobre 200 mallas y el fino bajo 200 mallas están refundidos en el cuadro VII.

CUADRO VII

Mallas	Diámetro μ	% relat.
+ 65	208	0,14
+ 100	147	0,57
+ 150	104	4,33
+ 200	74	8,36
+ 325	43	27,83
+ 800	18	24,82
+ 1120	13	8,83
+ 1500	10	5,62
— 1500		19,5
		100,00

La figura 2 es el gráfico logarítmico del análisis anterior, aunque no según la disposición de Gaudin sino la de Bond. En el eje de las abscisas hemos colocado los

“números ordinales” y en ordenadas los logaritmos de los porcentajes. El origen coincide con el número 41, que corresponde al diámetro mínimo de 74 micrones retenido por el tamiz de 200 mallas.

Al calcular gráfica o analíticamente el residuo sobre el tamiz teórico equivalente al número ordinal 28, que corresponde a un diámetro mínimo de $0,8 \mu$ y medio de $0,98 \mu$, límite inferior alcanzado por la subdivisión mecánica en la molienda; es decir, al computar el porcentaje en peso de las partículas cuyos diámetros están comprendidos entre 10 y $0,8 \mu$, se encuentra sólo $4,178\%$, que se descompone como sigue:

CUADRO VIII

Número ordinal	Diámetro mínimo μ	Peso %
34	6,5	2,52
33	4,5	1,00
32	3,2	0,40
31	2,3	0,16
30	1,6	0,063
29	1,1	0,025
28	0,8	0,010

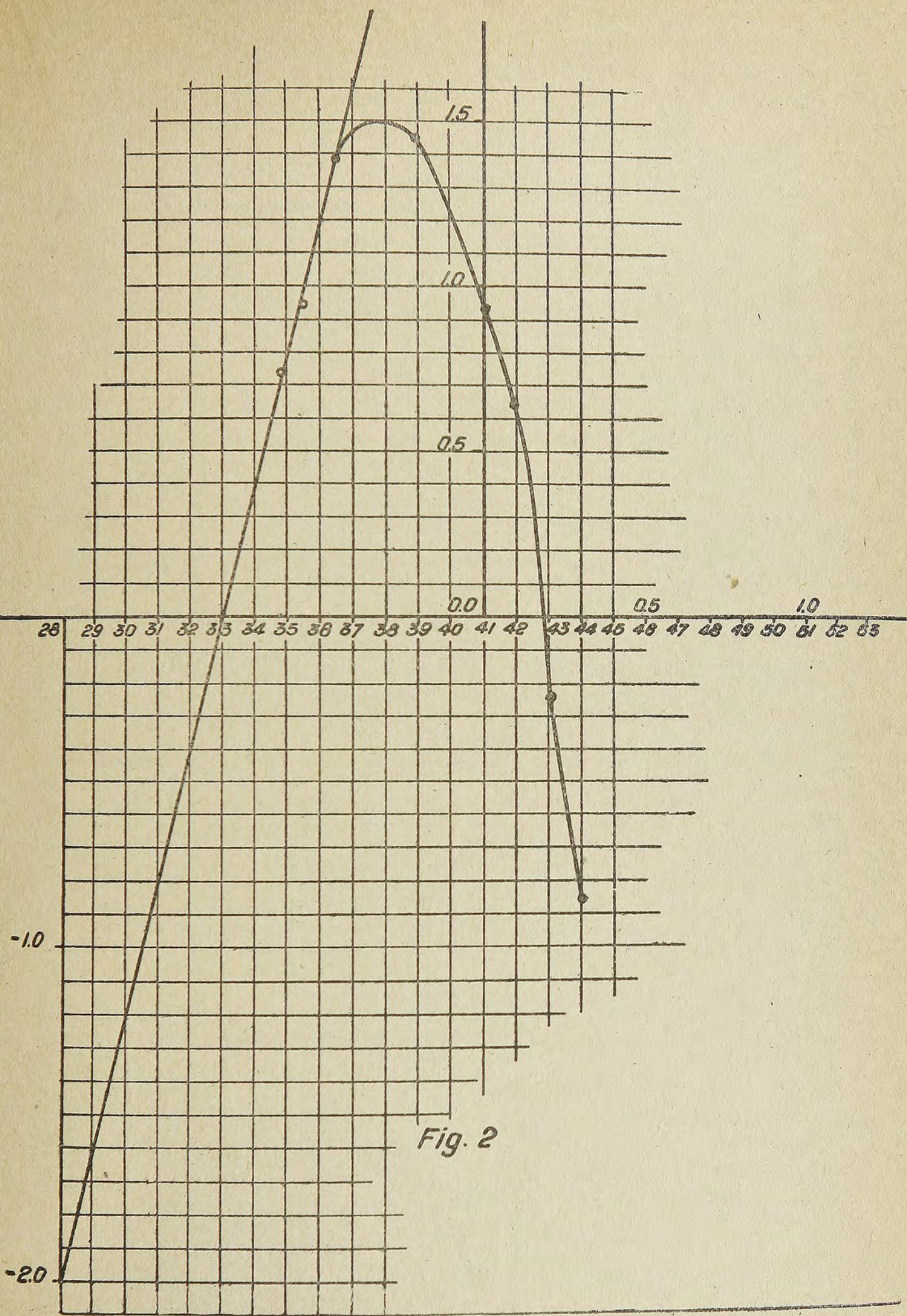
Como el fino bajo 10μ era de $19,5\%$, queda un saldo de $15,3\%$ que no es imputable a la molienda, como proceso meramente mecánico, compuesto de lama primaria o pseudo primarias.

Se deduce que, dentro de las condiciones de abastecimiento de la planta en que se realizó la investigación en Abril de 1943, de haberse agregado una sola determinación más, por ejemplo para un diámetro de $4,6 \mu$, podía haberse descartado el 16% del saldo no clasificado. Los residuos del análisis, prorratedos hasta sumar 100, darán los pesos definitivos para calcular la discrasia. Este método es mucho más exacto que atribuirle al saldo no clasificado un diámetro determinado.

En el cuadro IX hemos prescindido del fino bajo 10μ y prorratedo los residuos, que suman 80,5, para que sumen 100.

CUADRO IX

d	P	$9^{10^{-1}}$	$9^{10^{-2}}$	$P_{10^{-1}}$	$P_{10^{-2}}$
r	%				
208	0,17	20,8	432,5	3,54	73,4
147	0,71	14,7	216,6	10,42	153,4
104	5,38	10,4	108,1	56,00	582,0
74	10,36	7,4	54,8	76,60	567,0
43	34,62	4,3	18,5	149,00	641,0
18	30,33	1,8	3,24	55,50	100,0
13	10,96	1,3	1,69	14,24	18,5
10	6,97	1,0	1,00	6,97	6,97
	100,00			372,27	2142,27



Resulta una discrasia:

$$= \frac{2142,27}{37,227^2} - 1 = 0,545$$

19.—Describiremos ahora brevemente la técnica de la “diametría” con ayuda de la fig. 3, que representa el aparato que utilizamos. Reproduce exactamente el modelo existente en la Escuela de Minas de Copiapó. El principio aplicado es el de la caída de partículas sólidas en un líquido viscoso de acuerdo con la fórmula de Stokes

$$4) \quad v = C \cdot r^2$$

en que r es el radio de la partícula y C es la “constante de Stokes”, cuya expresión es

$$5) \quad C = \frac{2 \cdot (D_1 - D_2)}{9 \cdot N} \cdot g$$

siendo: D_1 la densidad de la partícula

D_2 la densidad del líquido

N la viscosidad del líquido

g aceleración de gravedad.

La tabla X (13) de los valores de la constante C en el sistema C. G. S.

La velocidad se determina mediante el tiempo t empleado por una partícula en caer desde el nivel superior de la pulpa hasta una hondura H . Si reemplazamos V por su equivalente $\frac{H}{t}$ en la fórmula 4) y despejamos t , se tendrá

$$5) \quad t = \frac{H \text{ (cm)} \cdot 10^4}{C \cdot r^2 \text{ } (\mu)}$$

t quedará expresado en segundos.

Para $H=20$ cm y temperatura $T=23,2^\circ$ Ce, los tiempos t en función de los radios en micrones serán dados en virtud de 5), por la expresión

$$5') \quad t = \left(\frac{239}{r} \right)^2$$

20.—La pulpa que contiene todo el material bajo 200 mallas, con partículas de diámetro máximo de 74μ , se coloca en el termos T hasta enrasar a 1.000 cm^3 . Cuando la temperatura de la pulpa se haya estabilizado, se busca C en la tabla X, sin considerar el factor numérico 10^4 , y se calculan los tiempos t en segundos correspondientes a diversos radios r en micrones, mediante la fórmula 5), que se reduce para mayor expedición del cálculo a la forma 5').

Se obtiene así una serie creciente de tiempos $t_1, t_2 \dots$ en función de una serie decreciente de radios $r_1, r_2 \dots$. Esta última serie puede ser enteramente arbitraria;

(13) H. Gessner, Die Schlämmanalyse, Leipzig, 1931, pág. 232.

CONSTANTE DE STOKES PARA EL AGUA

Temperatura. +°C	Densidad	Viscosidad N · 1000	CONSTANTE C DE LA ECUACIÓN DE STOKES PARA:				
			$D_1 = 2,50$ ($D_1 - D_2$) = 1,5	2,60 1,60	2,65 1,65	2,70 1,70	
0	0,99987	17,94	1,827 · 10 ⁴	1,945 · 10 ⁴	2,005 · 10 ⁴	2,067 · 10 ⁴	2,430 · 10 ⁴
5	0,99999	15,19	2,158 · 10 ⁴	2,295 · 10 ⁴	2,370 · 10 ⁴	2,440 · 10 ⁴	2,872 · 10 ⁴
10	0,99975	13,10	2,495 · 10 ⁴	2,660 · 10 ⁴	2,745 · 10 ⁴	2,830 · 10 ⁴	3,328 · 10 ⁴
15	0,99916	11,45	2,857 · 10 ⁴	3,046 · 10 ⁴	3,142 · 10 ⁴	3,237 · 10 ⁴	3,809 · 10 ⁴
16	0,9990	11,16	2,931 · 10 ⁴	3,126 · 10 ⁴	3,224 · 10 ⁴	3,322 · 10 ⁴	3,908 · 10 ⁴
17	0,9988	10,88	3,007 · 10 ⁴	3,208 · 10 ⁴	3,307 · 10 ⁴	3,408 · 10 ⁴	4,009 · 10 ⁴
18	0,9986	10,60	3,084 · 10 ⁴	3,290 · 10 ⁴	3,392 · 10 ⁴	3,495 · 10 ⁴	4,112 · 10 ⁴
19	0,99845	10,34	3,162 · 10 ⁴	3,373 · 10 ⁴	3,479 · 10 ⁴	3,584 · 10 ⁴	4,217 · 10 ⁴
20	0,99826	10,09	3,242 · 10 ⁴	3,458 · 10 ⁴	3,566 · 10 ⁴	3,674 · 10 ⁴	4,322 · 10 ⁴
21	0,9980	9,84	3,322 · 10 ⁴	3,544 · 10 ⁴	3,654 · 10 ⁴	3,765 · 10 ⁴	4,430 · 10 ⁴
22	0,9978	9,61	3,403 · 10 ⁴	3,630 · 10 ⁴	3,744 · 10 ⁴	3,857 · 10 ⁴	4,538 · 10 ⁴
23	0,9976	9,38	3,486 · 10 ⁴	3,718 · 10 ⁴	3,835 · 10 ⁴	3,951 · 10 ⁴	4,648 · 10 ⁴
24	0,99735	9,16	3,569 · 10 ⁴	3,807 · 10 ⁴	3,926 · 10 ⁴	4,045 · 10 ⁴	4,760 · 10 ⁴
25	0,99712	8,95	3,654 · 10 ⁴	3,898 · 10 ⁴	4,019 · 10 ⁴	4,141 · 10 ⁴	4,872 · 10 ⁴
30	0,99577	8,00	4,100 · 10 ⁴	4,355 · 10 ⁴	4,495 · 10 ⁴	4,635 · 10 ⁴	5,450 · 10 ⁴

pero conviene adoptar una serie de uso generalizado. En el cuadro IX se empleó la escala Tyler de tamices hasta 200 mallas y después una escala de la American Cyanamid.

Determinados los tiempos t se agita la pulpa durante 3 minutos y se miden los tiempos desde el instante en que se deja en reposo la pulpa. En el instante t_1 , se saca una muestra con la pipeta y se deja caer, girando la llave de doble paso L_1 , a una cápsula tarada. Transcurrido el tiempo t_2 se repite la operación y se traspasa la muestra a otra cápsula tarada, y así sucesivamente. Las muestras se evaporan a sequedad, se dejan enfriar y se pesan.

Después de tomar una muestra con la pipeta y vaciar la bureta graduada P , ésta se lava con agua destilada contenida en la copa separada de la bureta por la llave de doble paso L_2 . En seguida se deja escurrir lentamente la pulpa sobrante en el tubo delgado de la pipeta.

El empleo de una bureta graduada para medir el volumen de pulpa retirado en cada operación, mejora la precisión del experimento. En efecto, no es necesario enrasar, sino sacar simplemente la muestra, pues cualquiera que sea su volumen, éste será leído después con toda exactitud. La rapidez de la operación reduce el error que para la primera muestra puede ser considerable si el tiempo t_1 es del orden de sólo 2 a 3 minutos. Además, se evita la sedimentación en la columna de líquido de la pipeta.

Si llamamos p el peso del material contenido en un volumen v determinado de la pulpa homogénea obtenida por agitación, siendo v el volumen retirado cada vez por la pipeta, se encontrarán pesos p_1, p_2, \dots en las cápsulas respectivas. Las diferencias $p-p_1, p-p_2, \dots$ expresadas en por ciento del peso original p representarán los porcentajes en la muestra del termos, de partículas de diámetros superiores a r_1, r_2, \dots , o sea, los residuos acumulados sobre los tamices teóricos r_1, r_2, \dots . Que esto es así resulta de simples consideraciones de simetría que omitimos en obsequio a la brevedad. El cuadro XI ilustra la tabulación de los datos y el cálculo de los porcentajes.

CUADRO XI

Mallas p/pulg. lin.	Volumen cm ³	Tiempo			Peso gr.	Peso corr. gr.	Peso orig. gr.	Diferencia gr.	Porcentajes	
		Hr	min	seg.					+	-
325 (43)	10,2		2	4	0,1048	0,1027	0,1513	0,0486	32,1	67,9
800 (18)	10,4		11	49	0,06175	0,0594		0,0920	60,8	39,2
1120 (13)	10,2		22	39	0,0448	0,0439		0,1074	71,0	29,0
1500 (10)	9,5		38	15	0,0324	0,0341		0,1172	77,5	22,5

Los números en paréntesis del cuadro XI son los diámetros equivalentes.

21.—El aparato puede perfeccionarse y admite modificaciones en tal sentido. Es conveniente que el porta-pipeta se mueva mediante cremallera y piñón provisto de un pequeño volante. De esta manera se puede introducir la pipeta en el termos sin ocasionar perturbaciones en la pulpa. Otra mejora consiste en el empleo de aire a presión para agitar la pulpa. El aire debe inyectarse por abajo a través de un fondo perforado. La precisión no mejora; pero se facilita la manipulación, especialmente con modelos de grandes dimensiones.

A mi juicio, para el control de la molienda en una planta de beneficio basta el modelo de un litro descrito en el presente artículo. Para investigaciones más precisas conviene un modelo de 5 litros, con alturas de caída H hasta 50 cm y movimiento de cremallera. Se podrá sacar una muestra de 50 cm^3 en cada operación.

Si se desea someter al análisis químico las muestras retiradas de la pulpa contenida en el termos hay materia suficiente para la mayoría de los casos cuando se opera con el modelo de 5 l; pero si se trata de minerales de oro, es necesario emplear modelos más grandes, o bien operar con pulpas de alta concentración. En este último caso es imprescindible el uso de peptisantes para evitar el efecto coagulante de los electrolitos, que aumenta con la densidad de la pulpa. Con gangas de cuarzo se recomienda el amoníaco, para gangas calizas el oxalato de sodio, para sulfuros metálicos coloidales las *saponinas*, glucósidos de estructura complicada que en el agua dan espuma semejante a la del jabón. Los análisis granulométricos se efectuarán por duplicado y con diferente concentración del peptisante a fin de observar si hay efecto de coagulación.

22.—La diametría de los finos bajo 200 mallas debiera introducirse en la práctica del control sistemático de las plantas de flotación y cianuración y en los experimentos destinados a fijar el flow-sheet definitivo de una planta en proyecto.

De las nociones que hemos procurado divulgar con estas notas, se desprenden ciertas normas para proyectar los circuitos de plantas nuevas o mejorar las existentes. Procuraremos desarrollar el tema e ilustrarlo con ejemplos de la práctica en otra oportunidad.

NOTA*Ejemplos de moliendas finas:**Empire Star, Grass Valley, California, 1940.*

			%
+	20	μ	6,8
+	20	"	11,42
+	15	"	13,00
+	10	"	12,80
+	7	"	12,25
-	7	"	43,73

*Idaho — Mariland, Grass Valley, 1940.*Todo *bajo* 325 mallas

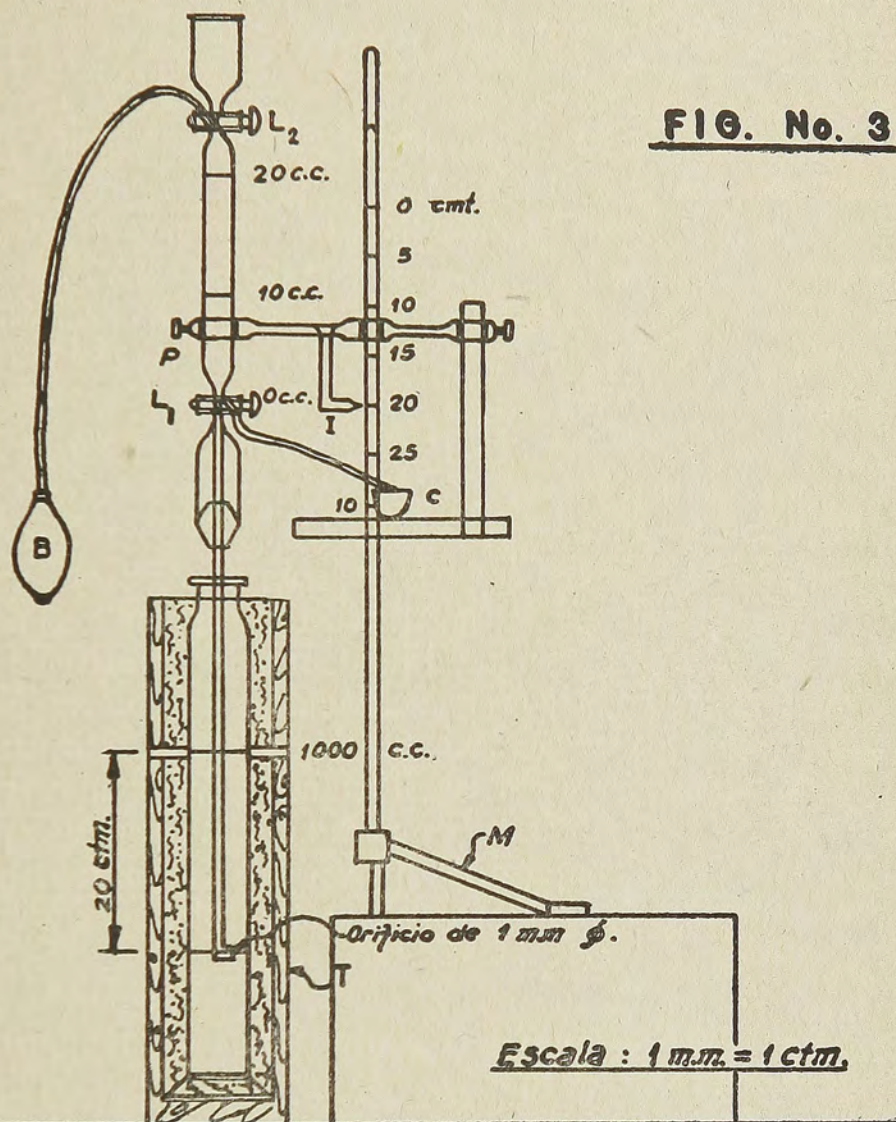
270 mallas 53 min 74 max

400 mallas 38 min 53 max

*Central Eureka, Mother Lode, California, 1940*Todo *bajo* 20 μ 53% *bajo* 7 μ

En los tres casos trátase de cianuración de concentrados de flotación (información personal).

PIPETA PARA ANALISIS GRANULOMETRICO



- T.- Termos compuesto de una probeta de 1000 c.c. con tapa un cilindro de madera y aislamiento de asbesto.-
M.- Soporte con vara graduada de 5 en 5 cm.-
P.- Pipeta.-
I.- Indicador de profundidad para la pipeta.-
C.- Soporte para crisoles
B.- Pera para succionar la pulpa.-
L.- Llave de 2 pasos