

Beneficio por flotación de la mena de grafito de Osumita, Estado Cojedes, Venezuela

Mónica Martiz¹
Carlo DiYordio²

¹Departamento de Minas. Escuela de Geología y Minas. Universidad Central de Venezuela

²Departamento de Metalurgia Química. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Universidad Central de Venezuela

RESUMEN: Se realizan ensayos de preparación y concentración para una muestra de mena de grafito del yacimiento Cerro Osumita con el objetivo de establecer parámetros de moliendabilidad y estudiar las condiciones de flotación con el fin de lograr un grafito de calidad industrial. Como resultado se obtiene que esta mena libera las hojuelas a los 4 min de molienda y que al ser sometida posteriormente a un proceso de flotación convencional, en tres etapas, alcanza una calidad de 57 % de C y 26 % de SiO₂.

ABSTRACT: Some tests on preparation and concentration of graphite ore sample from Cerro Osumita deposit have been carried out in order to establish the parameters of grindability and to study the conditions of flotation with the purpose of obtaining an industrial high quality graphite. As a result it has been found that after a 4 minute grinding the foils from the ore become free and the one submitted immediately to 3-5 steps conventional flotation reached a concentration of 57 % of C and 26 % of SiO₂.

Palabras claves: Grafito, beneficio, flotación.

INTRODUCCIÓN

En la presente investigación se exponen los resultados obtenidos en los ensayos exploratorios, tanto de preparación como de concentración, realizados sobre una muestra de mena de grafito procedente del yacimiento del Cerro Osumita, Estado Cojedes, para *Corpocentro*, dentro del marco de cooperación mutua en el desarrollo minero de menas de la región central de Venezuela.

Se realizó un estudio de moliendabilidad de la mena con el fin de establecer algunos parámetros de reducción de tamaño hasta lograr el requerido para que el grafito se libere de la ganga que lo acompaña (plagioclasa y cuarzo) hasta alcanzar, al menos, un 95 % menor de la malla 150; asimismo se estudiaron las condiciones de flotación en tres etapas para lograr datos optimizados de aplicación industrial y conseguir un grafito de calidad industrial a la vez que se realiza una comparación de la flotación convencional con pruebas de flotación en columna.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Moliendabilidad de la mena

Conocido el grado de liberación del grafito, el cual se sitúa en un 90 % menor de la malla 150 (0,105 mm), se procedió a las pruebas de molienda necesarias para la aplicación de los estudios requeridos para el gráfico Gaudin-Schuman. A través de él se puede conocer el tiempo de molienda que se requiere para alcanzar al menos un 95 % menor a dicha malla; donde se encuentra liberado el grafito en un 90 %. Se partió de una muestra representativa del lote proveniente de mina, ya triturado primaria y secundaria, cuya granulometría puede observarse en la Tabla 1, conjuntamente con el análisis de contenido de carbón efectuados a cada malla.

TABLA 1. Granulometría de la muestra cabeza luego de triturada

Malla ASTM	retenido % peso	retenido % acumulado	pasante % acumulado	% C
10	18,40	18,40	81,60	2,82
16	19,40	37,80	62,20	4,60
35	23,00	60,80	39,20	5,53
50	9,20	70,00	30,00	7,70
70	4,00	74,00	26,00	9,46
150	6,20	80,20	19,80	8,56
200	3,00	83,20	16,80	9,42
325	2,40	85,60	14,40	8,79
-325	14,40	100,00	--	4,41

Se siguió para estas y el resto de las granulometrías un proceso normal de ensayo en húmedo. La muestra, bajo el procedimiento normal de ensayo de molienda, se sometió durante 5 y 10 minutos a las siguientes condiciones:

- Molino de barras de laboratorio (12x31) cm
- 12 barras para un peso de carga moledora de 9 700 Kg.
- 80 r.p.m.
- Pulpa con 60 % de sólidos
- 500 gramos de mena
- 334 gramos de agua

Del análisis del gráfico Gaudin-Schuman, (Figura 1) se desprende que a medida que aumenta el tiempo de molienda hay un aumento gradual de finos. Mediante este gráfico y aplicando las fórmulas de distribución de tamaños, se verifica que se requiere moler durante 4 minutos para obtener un 95 % menor a la malla 150 y así garantizar la liberación de los cristales de grafito que forman la mena de Osumita. Este rápido alcance de la liberación resulta favorable para el diseño del equipo de molienda a utilizar, ya que deberá garantizar un tiempo corto de molienda.

Flotación convencional

Se procedió a efectuar los estudios de flotación en tres etapas de desbaste, agotado y limpieza, a partir de las condiciones base, emanadas de los estudios exploratorios, a saber:

- Acondicionamiento: tiempo 2 minutos
- Pulpa: 40 % de sólidos
- Celda Denver Sub-A de 500 gramos
- 1.200 r.p.m.
- Granulometría: -150 mallas
- Dilución: 8:1

TABLA 2. Condiciones de la 1ra. etapa de flotación en columna

Ensayo	tiempo acondic. (min)	dosis colector (g/ton)	dosis espumte (g/ton)	flujo de aire (cc/min)	tiempo flotac. (min)	Observaciones
1	4	0	46	900	10	Aliment. interna
2	2	0	46	1 800	10	Aliment. interna
3	2	0	46	1 800	10	Aliment. externa
4	2	110	46	1 800	5	Aliment. externa
5	2	90	46	1 800	5	Uso de depresor y Aliment. externa

Reactivos:

- Colector: Fuel Oil, 90 g/ton
- Espumante: Froth 400, 46 g/ton
- Depresor de SiO₂: Silicato de Sodio, 260 g/ton
- pH neutro
- Caudal de aire: 0,021 L/s
- Tiempos de flotación: 5 min

Flotación en columna

Aprovechando la ventaja de poseer en las instalaciones del laboratorio un equipo de flotación en columna, se realizaron pruebas para observar el comportamiento de la mena de grafito en el proceso, considerando la reputación de este equipo en la economía de capital y reducción de costos de operación, además de tender por sí mismo a un control automático.

Por su efectiva combinación de procesos de concentración y limpieza en una sola unidad, la columna está en capacidad de producir un concentrado de calidad superior a los que se obtienen por circuitos de flotación convencional, sin mencionar que no requiere de un mecanismo de agitación, lo que subsecuentemente reduce la turbulencia. Sin embargo, el rendimiento de una columna de flotación varía significativamente con la composición de la alimentación, velocidad de alimentación, tamaño de burbuja, flujo de aire, flujo de agua de lavado y altura del lecho de espuma. En un estudio típico de laboratorio es recomendable investigar los efectos de cada uno de estos factores.

Atendiendo a esta necesidad se procedió a efectuar las pruebas de acuerdo al esquema normal de ensayo para este tipo de aparato. Al igual que en la flotación convencional, se realizaron tres etapas sucesivas. En la Tabla 2 se dan las condiciones de las pruebas efectuadas en la primera etapa de flotación en columna, que constó de cinco ensayos. Luego se realizaron sucesivamente las siguientes fases, la segunda y tercera etapas, bajo las condiciones dadas en la Tabla 3.

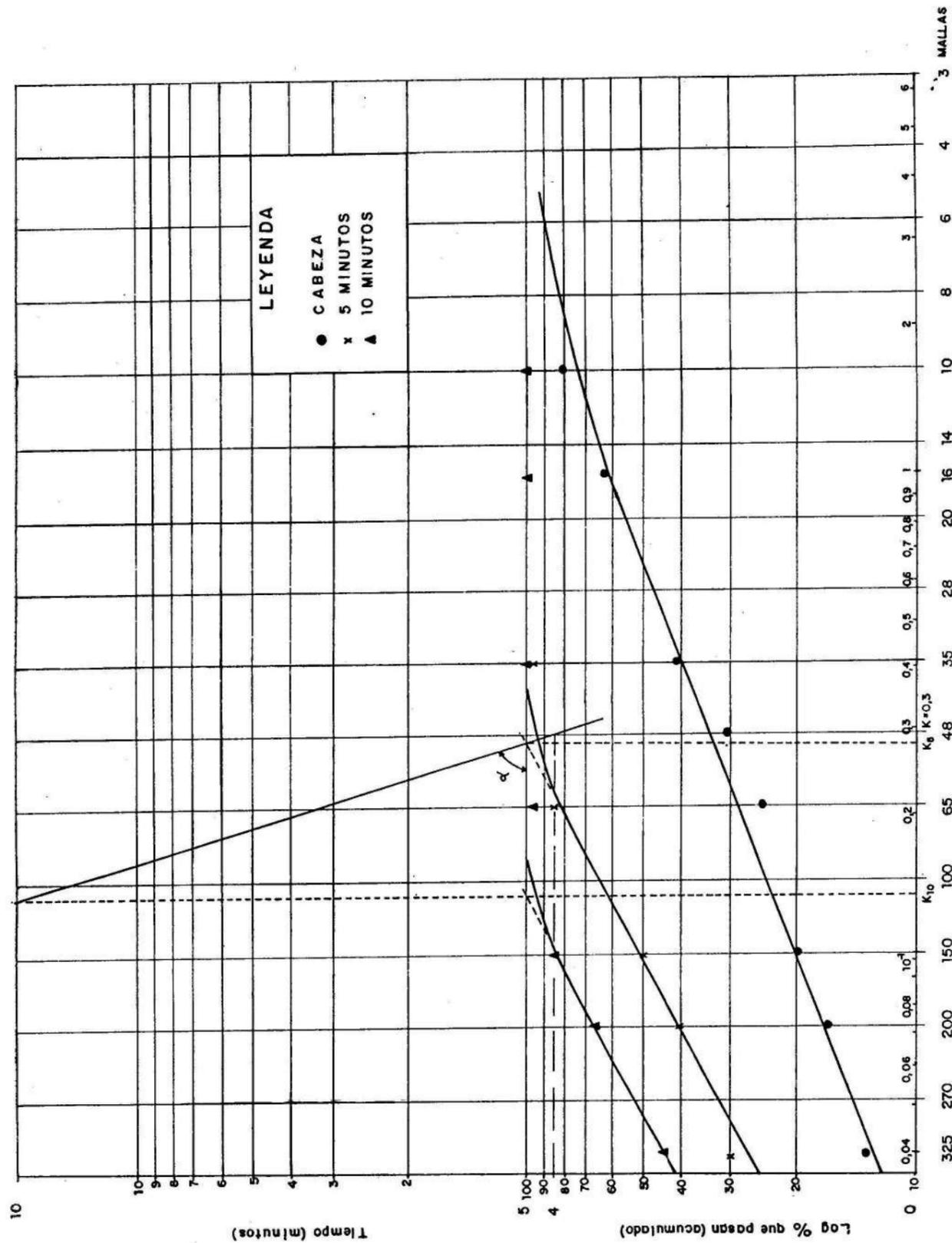


FIGURA 1. Gráfico Gaudin-Schuchman.

TABLA 3. Condiciones de la segunda y tercera etapas de la flotación en columna

Ensayo	tiempo acondic. (min)	dosis colector (g/ton)	dosis espumte (g/ton)	flujo de aire (cc/min)	tiempo flotac. (min)	Observaciones
6	2	0	46	900	5	Aliment. externa de conc. de la 1ª etapa
2ª etapa						
7	2	0	46	900	5	Aliment. externa de conc. de la 2ª etapa
3ª etapa						

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Primera etapa de flotación

A. Condiciones de los ensayos

Para conseguir un concentrado de desbaste, en el cual se trata de lograr la mayor cantidad de grafito a costa de su calidad, se analizaron, en tres niveles, cinco de los parámetros más importantes, lo que dio un análisis de experimentos de 5³.

A partir de las condiciones base de flotación dadas, se efectuó la Serie I-1 correspondiente a los ensa-

yos de variación de colector *fuel oil*. Seguidamente, se estudió la variación de dosis de espumante en la Serie I-2. Asimismo se constituyó la Serie I-3, donde se varió la dosis del depresor de sílice (NaSiO₃) con el fin de observar la importancia de la presencia o ausencia de este reactivo minero. Los tiempos de acondicionamiento estudiados se realizaron en la Serie I-4 y la variación de la velocidad de rotor de la celda resultó en la Serie I-5. Todos los ensayos se realizaron a partir de una cabeza con una composición promedio de 6,81 % de C y 55,08 % de SiO₂ (Tabla 4).

TABLA 4. Condiciones tecnológicas de la 1ra. etapa de flotación

Serie	Ensayo	Parámetro variable (PV)	Producto	% peso	% C	% SiO ₂	% C rec	% SiO ₂ rec
PV: Dosis del colector (g/ton)								
I-1	1	90	CON	25,60	24,85	41,30	93,45	75,25
			COL	71,40	0,60	61,87		
	2	100	CON	27,88	22,80	42,37	94,74	76,91
	3	110	CON	25,20	21,50	43,03	94,97	
			COL	72,00	0,49	60,95		74,41
PV: Dosis espumante (g/ton)								
I-2	4	46	CON	25,60	24,85	41,30	93,45	75,25
			COL	71,40	0,60	61,87		
	5	56	CON	29,36	21,70	41,02	95,86	73,32
	6	66	CON	30,60	20,20	48,89	94,91	59,95
			COL	66,00	0,51	60,17		
PV: Dosis de NaSO ₃ (g/ton)								
I-3	7	250	CON	25,60	24,85	41,30	93,45	75,25
			COL	71,40	0,60	61,87		
	8	270	CON	25,28	25,30	44,73	95,42	77,61
	9	290	CON	22,64	25,80	41,32	92,45	77,73
			COL	75,00	0,68	60,89		
PV: Tiempo de acondicionamiento (min)								
I-4	10	2	CON	25,60	24,85	41,30	93,45	75,25
			COL	71,40	0,60	61,87		
	11	4	CON	23,16	23,60	43,10	94,77	75,78
	12	5	CON	23,28	23,20	40,55	92,84	74,89
			COL	72,00	0,67	62,60		
PV: Velocidad del rotor (rpm)								
I-5	13	1 200	CON	25,60	24,85	41,30	93,45	75,25
			COL	71,40	0,60	61,87		
	14	1 400	CON	25,32	22,10	41,10	95,54	72,82
	15	1 600	CON	28,88	22,65	43,38	96,05	67,67
			COL	66,00	0,38	62,78		

B. Análisis de los resultados

Un aumento de la dosis de colector por encima de 90 g/ton no estimula la obtención de recuperaciones de grafito por encima de 95 %. El mejor concentrado de desbaste se consigue con la menor dosis estudiada. Por otra parte la variación de Froth 400, aumentando la dosis, mejora muy poco la recuperación de concentrado de grafito. Estos se recogen acompañados de contenidos de sílice que los impurifican, debido a que el espumante también lleva al arrastre de granos de ganga silíceo. Con relación a los cambios de dosis de depresor de la sílice, se consigue la mayor recuperación de sílice en las colas con la mayor dosis utilizada. Esto queda corroborado cuando se observa que para 290 g/ton de silicato de sodio se obtiene el concentrado de grafito más puro (Figura 2).

Un aumento de tiempo de acondicionamiento de 2 a 5 minutos no reporta cambios en la recuperación de grafito, por lo que 2 minutos resultan suficientes para alcanzar concentrados óptimos de desbaste. Esto se observa también en la Figura 3, donde para el mínimo de acondicionamiento estudiado se reporta el mejor concentrado de grafito, lo cual implica un ahorro en equipos de acondicionamiento. Con respecto a la variable velocidad del rotor de la celda, se comprueba que un aumento

de las revoluciones, aunque mejora la recuperación de grafito se recoge con contenidos mayores de sílice contaminante. Se demuestra así que la turbulencia producida en la celda propicia el arrastre hacia la espuma de ganga silíceo (Figura 3).

Segunda etapa de flotación

Una vez obtenidos los parámetros de flotación de desbaste ya optimizados, se procedió al estudio de las mejores condiciones de flotación en la segunda etapa, en la que se variaron tres parámetros en tres niveles, para un diseño de experimentos de 3³.

A. Condiciones de los ensayos

Se realizó una sexta (Serie I-6) de observancia de variación de dosis de colector, continuándose con la Serie I-7, correspondiente a la variación de la dosis de espumante para la segunda etapa. Seguidamente, se estudió la influencia de la velocidad de la celda en la Serie I-8. Todos estos ensayos fueron realizados con una cabeza correspondiente al concentrado de la primera etapa, que como promedio presentó contenidos de 20,03 % de C y 45,10 % de SiO₂ (Tabla 5).

TABLA 5. Condiciones tecnológicas de la 2a. etapa de flotación

Serie	Ensayo	Parámetro variable (PV)	Producto	% peso	% C	% SiO ₂	% C rec	% SiO ₂ rec
PV: Dosis del colector (g/ton)								
I-6	16	90	CON	55,90	25,80	37,73	99,04	
			COL	37,80	0,83	57,82		47,03
	17	100	CON	57,20	25,37	38,52	99,22	
			COL	38,20	0,72	58,22		43,12
	18	110	CON	60,50	24,94	39,20	99,38	
			COL	30,60	0,62	56,90		42,05
PV: Dosis espumante (g/ton)								
I-7	19	36	CON	58,00	26,60	39,72	99,06	
			COL	32,50	0,74	55,30		42,34
	20	50	CON	61,60	27,95	30,73	99,07	
			COL	36,60	0,64	58,14		67,58
	21	56	CON	63,30	25,59	39,88	99,09	
			COL	31,10	0,81	57,16		38,29
PV: Dosis de NaSO ₃ (g/ton)								
I-8	22	1 000	CON	56,00	25,80	40,57	99,05	
			COL	40,30	0,82	52,90		43,09
	23	1 400	CON	64,10	24,94	32,83	99,28	
			COL	35,20	0,71	51,83		74,22
	24	1 600	CON	63,50	24,94	36,59	99,85	
			COL	35,50	1,12	55,73		54,94

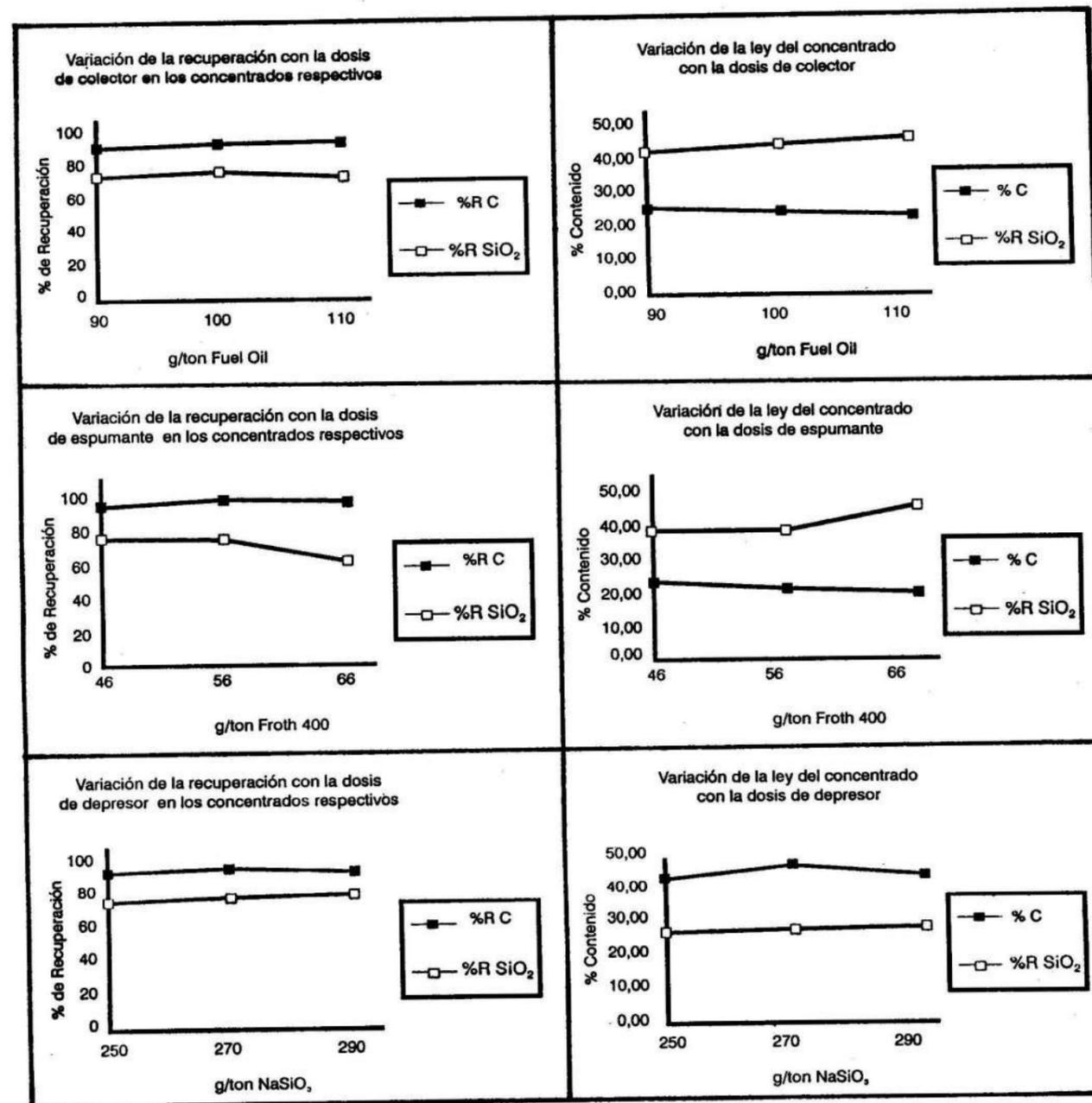


FIGURA 2.

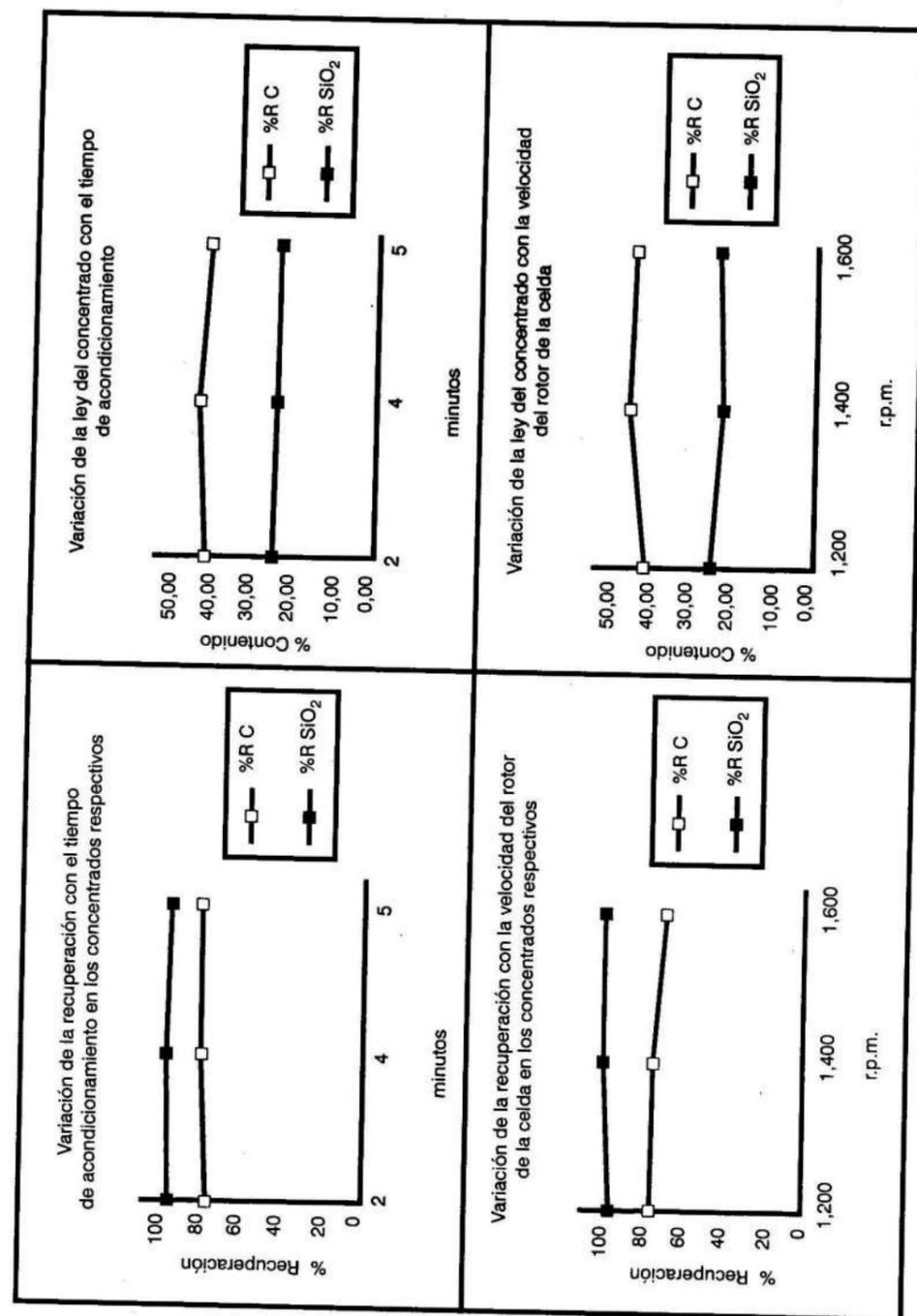


FIGURA 3.

B. Análisis de los resultados

Para esta segunda fase de la flotación, añadir más de 90 g/ton no repercute en el aumento de la recuperación, la cual se muestra estable y casi total dado que se recupera hasta un 99 % de grafito. Con relación al contenido de los concentrados obtenidos, se observa que para mayores dosis de colector comienza a flotar también la sílice (Figura 4), contaminándolos. Igualmente se observa que, en esta segunda etapa, agregar más de 36 g/ton de espumante no trae aumento en la recuperación de grafito, que por lo demás, con esta dosis alcanza un 99 % y un concentrado de grafito aceptable para la siguiente fase. Se descartan las dosis 50 y 56 g/ton, por no ser económicamente utilizables ya que encarecen el pro-

ceso. Con respecto a las velocidades del rotor de las celdas, conviene seguir utilizando 1 200 rpm. Se puede observar (Figura 4) cómo, a pesar de obtenerse una alta recuperación a 1 000 rpm, el material viene acompañado de sílice contaminante.

Tercera etapa de flotación

A. Condiciones de los ensayos

Finalmente, se realizaron ensayos para optimizar parámetros para la fase de limpieza. Se realizaron las series I-9, variando la dosis de colector, I-10, con la dosis de reactivo espumante y I-11, variando la velocidad del rotor en terceras celdas (Tabla 6).

TABLA 6. Condiciones tecnológicas de 3ra. etapa de flotación

Serie	Ensayo	Parámetro variable (PV)	Producto	% peso	% C	% SiO ₂	% C rec	% SiO ₂ rec
PV: Dosis del colector (g/ton)								
I-9	25	90	CON	68,18	29,24	42,37	95,84	
			COL	25,09	4,56	55,49		20,61
	26	100	CON	66,36	31,10	30,97	97,00	
			COL	28,55	3,10	61,65		61,22
27	110	CON	64,36	36,12	37,85	93,06		
		COL	29,27	4,30	50,45		60,14	
PV: Dosis espumante (g/ton)								
I-10	28	0	CON	36,36	56,76	39,72	99,06	
			COL	54,36	4,39	55,30		42,34
	29	36	CON	59,09	38,39	37,23	99,56	
			COL	36,49	3,15	56,88		47,51
30	50	CON	66,00	34,75	36,05	95,65		
		COL	30,36	3,03	53,95		57,41	
PV: Dosis de NaSO ₃ (g/ton)								
I-11	31	1 000	CON	50,73	37,84	36,62	85,17	
			COL	45,55	7,65	56,61		50,36
	32	1 400	CON	62,36	32,25	40,15	94,97	
			COL	30,00	4,04	64,95		25,81
33	1 600	CON	70,36	32,68	38,76	95,29		
		COL	27,27	3,70	60,30		37,69	

Estos ensayos fueron realizados con una cabeza correspondiente al concentrado de la segunda etapa que presentó contenidos promedios de 23,87 % de C y 44,54 % de SiO₂.

B. Análisis de los resultados

La dosis de colector en la tercera etapa conviene aumentarla a 100 g/ton, donde se registra la mayor recuperación de grafito libre de la mayor cantidad de sílice. Para la dosis de 110 g/ton el concentrado de grafito, aun-

que con contenido de 36 % de carbono, sale aún contaminado con un 38 % de sílice. Es conveniente no utilizar más espumante a partir de la tercera etapa, ya que aunque la recuperación es de 88 %, el concentrado es altamente puro, 57 % de carbono, el más bajo contenido de sílice conseguido. También conviene, para la tercera etapa, aplicar 1 000 rpm de velocidad de rotor de la celda. Aunque se alcanza un 86 % de recuperación de grafito, es necesario continuar su limpieza ya que aún posee un 36 % de sílice (Figura 5).

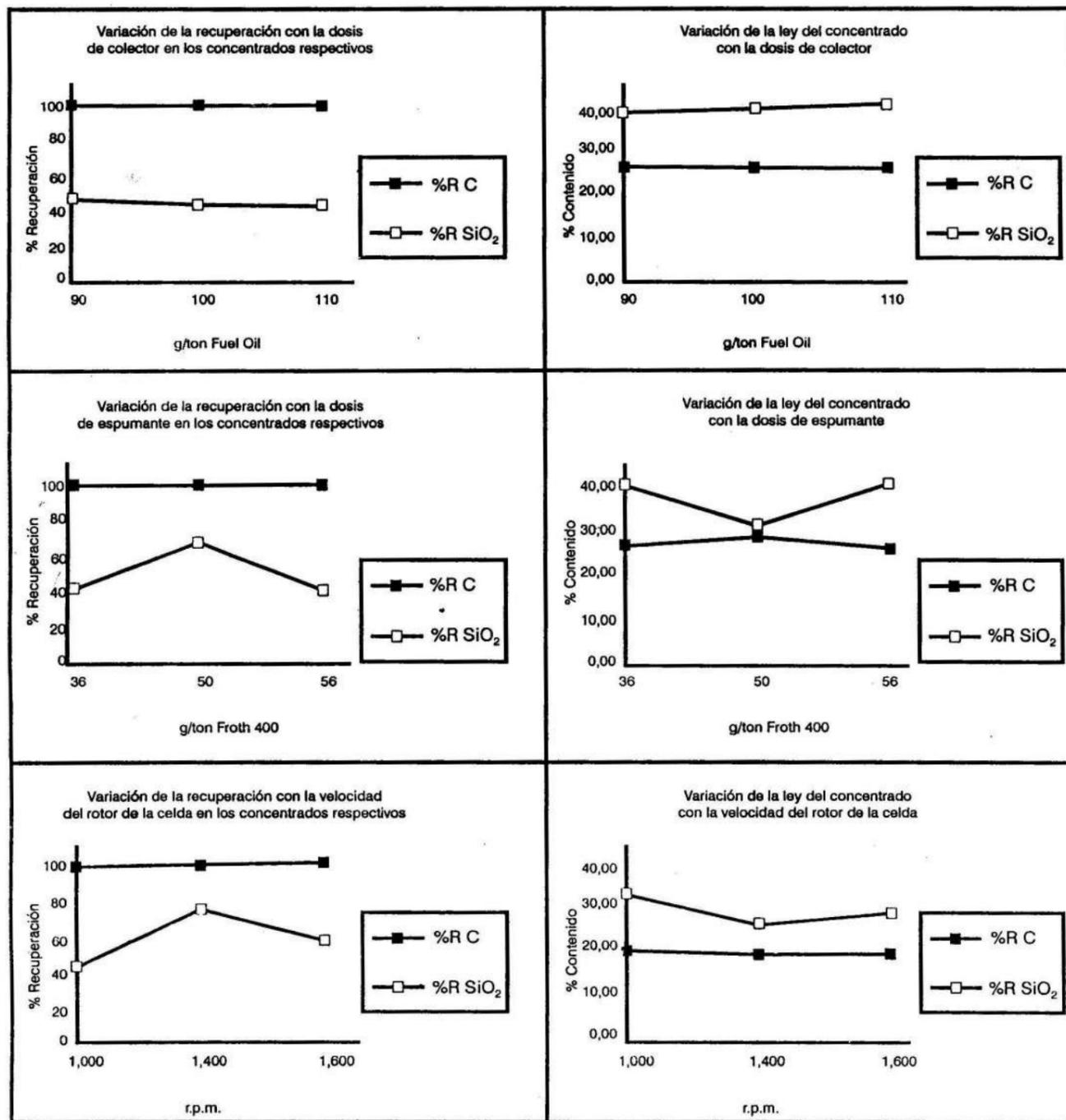


FIGURA 4.

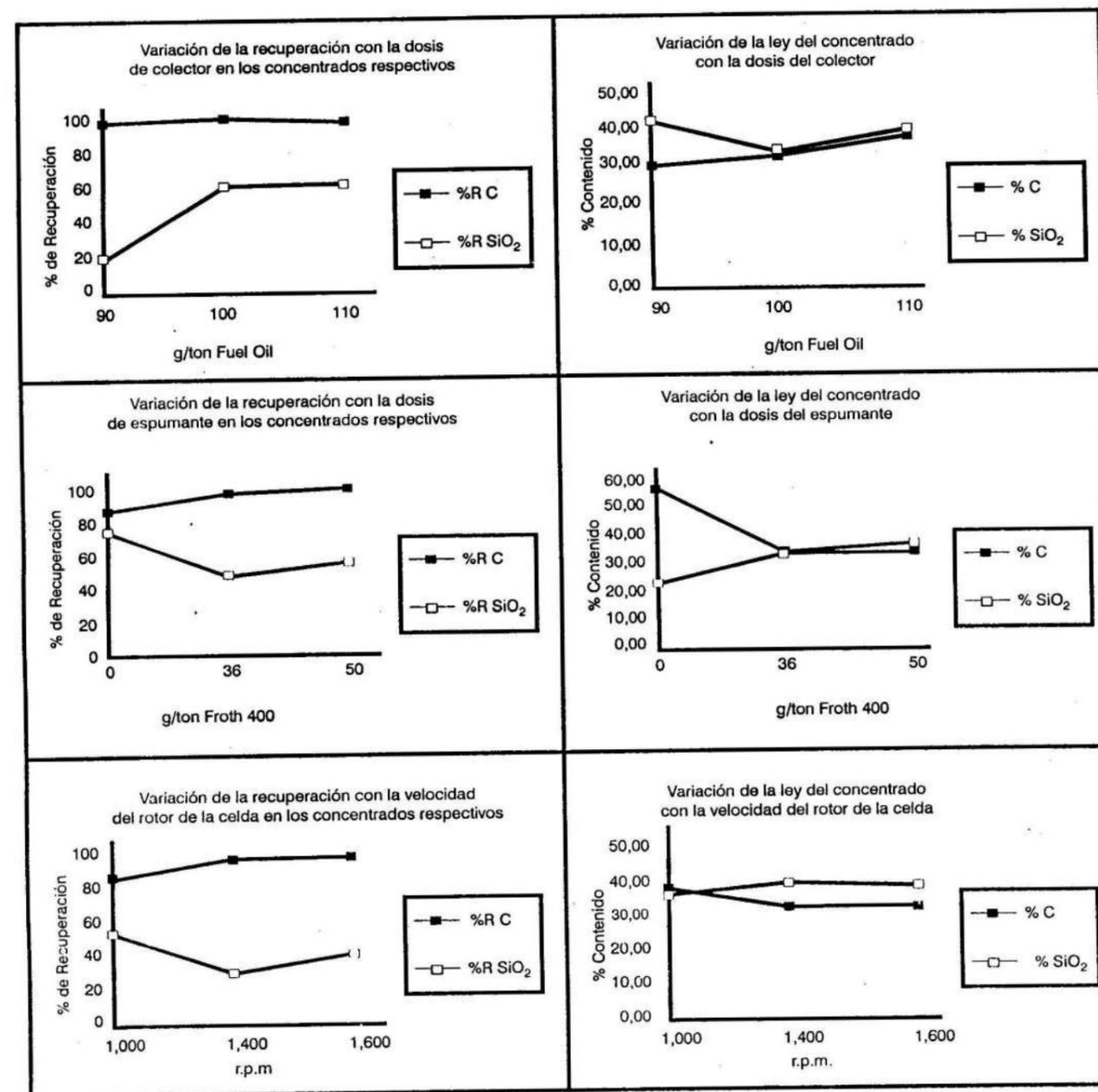


FIGURA 5.

3.4. Flotación en columna

A. Resultados

En la Tabla 7 se dan los resultados obtenidos de la flotación en columna. Aquí se relacionan las recupera-

ciones de carbono y sílice y se muestra la variación de la ley de carbono y sílice para los distintos ensayos, y en relación con la segunda y tercera etapas.

TABLA 7. Resultados de la flotación en columnas.

Etapas	Ensayo	Producto	% peso	% C	% SiO ₂	% C rec	% SiO ₂ rec
1	1	Cabeza 1	100,00	6,81	55,08		
		CON	29,04	20,64	46,50	92,98	
	COL	36,64	0,69	59,92		69,55	
	2	CON	22,00	15,48	51,47	93,52	
		COL	45,60	0,75	57,69		60,79
	3	CON	38,44	12,90	52,99	94,64	
		COL	52,92	0,73	57,33		50,12
	4	CON	27,49	15,05	49,75	95,41	
		COL	47,80	0,55	71,35		31,96
	5	CON	26,52	15,48	53,55	94,42	
COL		48,28	0,65	56,10		61,11	
2	6	Cabeza 2	100,00	15,91	52,25		
		CON	48,60	22,36	49,29	98,79	
	COL	47,80	0,65	59,06		61,11	
	7	Cabeza 3	100,00	22,36	52,25		
CON		26,00	31,20	41,70	98,30		
COL	47,00	0,95	56,20		43,13		

En la Figura 6 se relacionan las recuperaciones de carbono y sílice para los diferentes ensayos. Se observa que las recuperaciones de concentrado de grafito son elevadas, mayores de 90 %, independientemente de las condiciones de operación. También se muestra la variación de la ley de carbono y sílice para los diferentes ensayos y en relación con la segunda y tercera etapas.

B. Análisis de los resultados

Primera etapa: Los resultados de la flotación en columna de esta indican que para regimenes de menor flujo de aire en la columna se permite un mayor contacto burbuja-grafito, con lo que se logra un enriquecimiento mayor con relación a los ensayos posteriores a mayor flujo de aire. Sin embargo, la recuperación es relativamente más baja que en los casos de flujo mas alto.

En los ensayos 2 y 3 el cambio de alimentación de la mena hacia la columna indica la importancia del tiempo y las características del flujo de agua y aire sobre el contacto burbuja-partícula. Este parámetro de operación debe tomarse en cuenta al momento de definir el diseño de la planta. En términos generales, el uso de fuel oil como colector, no altera las características hidrofóbicas naturales del grafito, tal y como se observa en los ensayos 3 y 4. Por otro lado, la acción conjunta del colector con un depresor de sílice, tal como el silicato de sodio, permite disminuir en gran medida la contaminación del concentrado y mejorar levemente la ley del grafito.

De los ensayos 4 y 5, se observa una mejora del concentrado de grafito, a pesar de una leve disminución en la recuperación. Este resultado parece indicar que el silicato de sodio actúa preferencialmente sobre una porción de la superficie de sílice libre, disminuye el ángulo de contacto burbuja-mineral y de esta manera una mayor proporción de grafito existente en la pulpa se adhiere a las burbujas ascendentes lo que incrementa el contenido del concentrado. Por otro lado, y como consecuencia del efecto del depresante sobre la superficie de la sílice, una mayor cantidad de esta desciende a través de la columna y es recogida en la cola, lo que provoca un incremento de la recuperación de la sílice.

Segunda y tercera etapas: Al utilizar un flujo de aire de 900 cc/min para las flotaciones posteriores y reacondicionar la pulpa únicamente con espumante, se obtiene un enriquecimiento gradual de grafito en el concentrado, con altas recuperaciones. De igual forma se logra una disminución del contenido de sílice en el concentrado. Estos resultados indican que el colector no es un factor predominante en la hidrofobicidad del grafito.

Los resultados de la flotación en columna indican que tanto el flujo de aire como la dosis de depresor, el tiempo total de flotación, y la alimentación a la columna son de mayor importancia que la dosis de colector y el tiempo de acondicionamiento. Es posible que si se mejora la operatividad de la columna y se realiza un mayor número de etapas se puedan alcanzar valores de grafito con al menos 90 % de carbono.

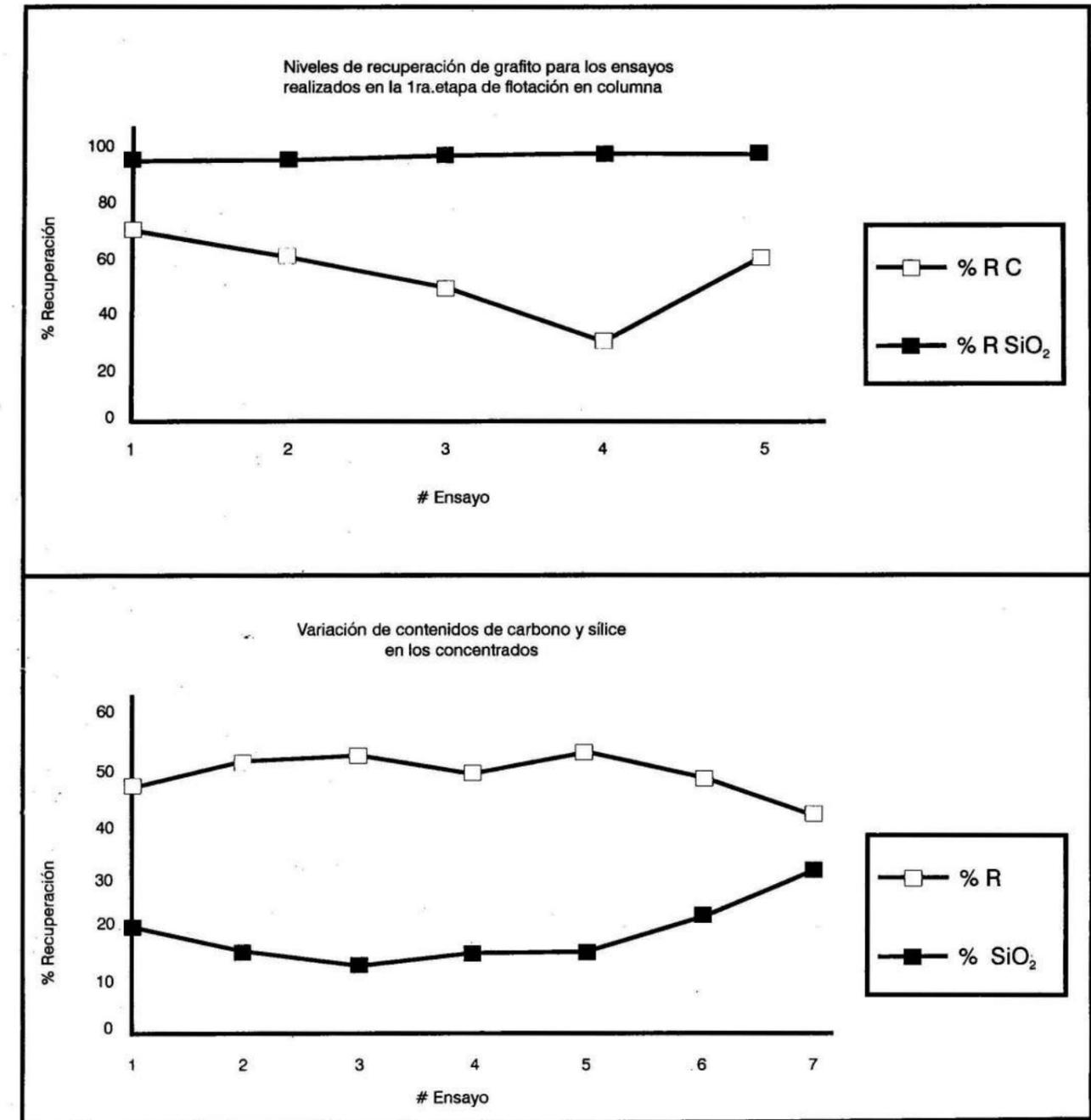


FIGURA 6.

CONCLUSIONES

- La mena de grafito de Osumita libera las hojuelas a los cuatro minutos de molienda, y al ser sometida posteriormente a un proceso de flotación convencional, en tres etapas, alcanza una calidad de 57 % de C y 26 % de SiO₂.
- La mena debe ser sometida, al menos, a dos etapas más de flotación para que pueda alcanzar la especificación del mercado.

- Se debe profundizar el estudio de flotación en columna, ajustándose a las condiciones críticas que se consiguieron en este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

ARR-MAZ PRODUCTS INC.: *Products Information*. [s.a.]
 Shiou-Chuan Sun.: *Hypothesis for Different Floatabilities of Coals, Carbons, and Hydrocarbon minerals*. SME of AIME. 199:67, 1954.
 SME of AIME.: *Industrial Minerals and Rocks*, 1983.