

Flotación de molibdeno de un mineral tipo sulfuros de Cu-Mo.

Jesus Martin Galván Lira¹, Ma. de Jesús Soria Aguilar¹, Nallely Guadalupe Picazo Rodríguez², Francisco Raul Carrillo Pedroza^{1*}

¹Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma de Coahuila, Carretera 57 km 5, Los Bosques, Monclova, Coahuila., 25710, México.

² Instituto Tecnológico Superior de Monclova, Tecnológico Nacional de México, Carretera 57 km 4.5, Los 90's/n, Monclova, Coahuila., 25733, México.

*raul.carrillo@uadec.edu.mx

RESUMEN

En el presente trabajo se tuvo como objetivo diseñar un esquema general (diagrama de flujo y dimensionamiento conceptual) de una planta de flotación para la obtención de concentrado de molibdeno, a partir de un mineral tipo sulfuros (Cu-Mo). Para ello, se realizaron pruebas experimentales a escala laboratorio para la flotación selectiva de molibdeno, a fin de obtener datos (tales como esquema y dosificación de reactivos requeridos y tiempos de flotación) para el diseño de una miniplanta de flotación de 30 toneladas de concentrado por mes. Los resultados indican que es posible obtener un concentrado en la primera flotación (flotación primaria), con una ley de 50%, y una recuperación del 66%, siendo un resultado muy bueno para un primario. Concluyendo que lo más importante es tener el circuito primario, con los cálculos integrados para simular de acuerdo con las necesidades o expectativas de producción.

PALABRAS CLAVE: *flotación; Molibdeno; Cobre; Sulfuros*

ANTECEDENTES

En general, la flotación de minerales es un proceso cuya optimización se puede puntualizar en los siguientes factores clave:

- Conocimiento de la geología y las variaciones mineralógicas asociadas.
- Relación entre las reservas existentes y la producción minera.
- Calidad del agua usada en el proceso.
- Diseño del proceso, basado en las pruebas metalúrgicas, considerando el esquema de reactivos y el control del proceso.

En este trabajo se presenta, a manera de ilustración, el diseño simplificado de un proceso de flotación de molibdenita (sulfuro de molibdeno), en el cual, a partir de las pruebas de laboratorio, se hace un acercamiento preliminar de propuesta del primer banco (primario) de flotación, para una pequeña planta de flotación (30 toneladas de concentrado por mes).

Las etapas consideradas en el diseño del proceso de flotación son, en general:

- Caracterización de la muestra, desde la composición química, mineralógica y, recomendable, petrográfica. Previo a dicha caracterización, debe haber un buen muestreo, dado que los cuerpos minerales no son homogéneos, y, por lo tanto, los resultados de la flotación corresponderán a la muestra seleccionada. Algunos puntos por considerar son: tipo de roca, características mineralógicas, perfil y profundidad del cuerpo mineral, geología, etc.
- Selección de muestras. Aunque es común trabajar con muestras “representativas” en pruebas de laboratorio, dicha representatividad es difícil de lograr, por lo que se sugiere hacer pruebas de diferentes muestras, de acuerdo con un programa de muestreo (basado en la distribución espacial del cuerpo mineral). Esto permite tener control o, al menos, determinar las condiciones a diferentes variaciones en las cabezas de flotación. Otras consideraciones, que dependen del tipo de minerales, son la toma de muestras y la conservación de estas.

Resumiendo, los factores que hay que conocer o definir para un buen esquema de pruebas de flotación, son:

- Análisis mineralógico de la cabeza y estudio de liberación de los valores.
- Identificación de especies mineralógicas oxidadas y/o con grado de solubilización.
- Grado de control de variables de molienda (distribución de tamaño de partícula, tipo y medio de molienda, aditivos)
- Ley y recuperación mínima del mineral a obtener en el concentrado.

- Elementos indeseables (susceptibles de ser económicamente penalizados) en el concentrado.
- Selección de reactivos de acondicionamiento y de flotación, y condiciones (pH, concentración, agitación, temperatura, etc.).

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

La muestra, tal como se recibió, fue tamizada para determinar su distribución de tamaño, mostrando el siguiente comportamiento en el análisis de cribas:

Tabla 1. Análisis de cribas

Análisis de mallas	Peso, gramos
Cabeza	100
malla+100	53.58
malla-100+230	21.12
fondo-230	23.91
Total	98.61

Esto indica que solo 47% del material está por debajo de la malla 100. Esta muestra fue caracterizada mineralógicamente, de cuyo estudio se observaron las siguientes especies: Cuarzo SiO_2 , Feldespatos KAlSi_3O_8 , Arcillas Caolín $\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, Pirita FeS_2 , Fierro Nativo Fe , Molibdenita MoS_2 , Magnetita Fe_3O_4 , Jarosita $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$, Calcopirita CuFeS , Hematita Fe_2O_3 , Galena PbS , Ilmenita TiO_2 , Esfalerita ZnS . Del estudio se de liberación al tamaño mencionado se tiene que el 77% de la molibdenita esta liberada. El análisis químico indico que la muestra contiene los siguientes elementos principales: 4.843 % Mo, 0.217 % Cu, 6.24% Fe, 4.72% S y 20.74 % Si

Una parte importante es la selección de reactivos. Dado que hay mucha información del tema y considerando las especies mineralógicas de la muestra, se seleccionaron los reactivos reportados como los más utilizados la flotación de molibdenita, y las condiciones recomendadas. Los reactivos seleccionados para las pruebas de flotación fueron:

Tabla 2. Esquema de reactivos seleccionado para las pruebas de flotación laboratorio

Reactivos químicos	Promotor	Depresor	Espumante
Nombre	AERO MX 2413	AERO NR 7321	OREPREP F-507

Conocidos los reactivos y las características mineralogías de la cabeza, se procedió a realizar las pruebas de flotación a escala laboratorio. En las siguientes tablas se muestran resultados de algunas de las pruebas

realizadas. Cabe mencionar que los análisis químicos de los materiales obtenidos en las pruebas se realizaron mediante FRX (Fluorescencia de Rayos X) en un equipo marca Panalytical Modelo Genesis.

Tabla 3. Condiciones experimentales de las pruebas de flotación, serie 1.

Prueba No. 1	Condiciones flotación primaria			
	Peso alimen, kg	Volumen agua, L	% sólidos	RPM
Celda	0.15	0.6	20	800
Reactivos químicos	Promotor	Depresor	Espumante	pH
Nombre	AERO MX 2413	AERO NR 7321	OREPREP F-507	Ácido sulfúrico
Densidad	1.31	0.98	0.95	1.5
Dosis, g/ton	850	650	300	

Tabla 4. Resultados de las pruebas de flotación, serie 1.

Análisis químico, %						
	Peso, g	Mo	Cu	Fe	S	Si
Cabeza	150	4.832	0.217	6.24	4.72	20.74
Concentrado	9.58	50.25	0.997	4.017	18.71	6.33
Medio	12.28	13.53	0.43	9.923	6.07	18.24
Colas	128.02	0.51	0.135	6	3.51	21.89
Recuperación, %						
	Mo	Cu	Fe	S	Si	
Cabeza	100	100	100	100	100	100
Concentrado	66.41	29.34	4.11	25.31	1.94	
Medio	22.92	16.22	13.01	10.52	7.19	
Colas	9.00	53.09	82.06	63.46	90.07	
Total	98.34	98.66	99.19	99.31	99.22	

Los resultados de esta serie de pruebas muestran que se pudo obtener un concentrado en la primera flotación (flotación primaria), con una ley de 50%, y una recuperación del 66%, siendo un resultado muy bueno para un primario. Para recuperar más el Mo, las colas fueron flotadas con los mismos reactivos, y agregando 300 g/ton del depresor. Con ello, se obtuvo un segundo concentrado, llamado medio, con una ley del 12%, y una recuperación del 23%, para obtener así una recuperación global de casi 90%.

Otra serie fue realizada con 1500 gramos, tal como se muestran en las siguientes tablas. En esta serie se agregó más depresor (Tabla 5) a fin de obtener un concentrado con una mayor ley.

Tabla 5. Condiciones experimentales de las pruebas de flotación.

Prueba No. 3	Condiciones flotación primaria			
	Peso alimen, kg	Volumen agua, L	% sólidos	RPM
Celda	1.5	0.6	20	800
Reactivos químicos	Promotor	Depresor	Espumante	pH
Nombre	AERO MX 2413	AERO NR 7321	OREPREP F-507	Acido sulfúrico
Densidad	1.31	0.98	0.95	1.5
Dosis, g/ton	850	975	300	

Tabla 6. Resultados de las pruebas de flotación. Prueba 1.

Análisis químico, %						
	Peso, g	Mo	Cu	Fe	S	Si
Cabeza	1500	4.83	0.21	6.24	4.72	20.74
Concentrado	57.58	54.61	0.36	2.23	20.24	4.25
Medio	70	39.55	0.46	5.4	13.91	10.96
Colas	1330	0.71	0.17	6	3.51	21.89
Recuperación, %						
	Mo	Cu	Fe	S	Si	
Cabeza	100	100	100	100	100	100
Concentrado	43.38	6.49	1.37	16.46	0.78	
Medio	38.20	10.04	4.03	13.75	2.46	
Colas	13.19	69.87	85.25	65.93	93.58	
Total	100	100	100	100	100	100

Tal como lo muestran los resultados de la Tabla 6, se incrementó la ley del concentrado a 54.61%, pero bajo la recuperación, a 43.38%. Al limpiar las colas del primario, se obtuvo un medio (segundo concentrado) más rico, con un casi 40% de Mo, recuperando otro 38%, con lo cual juntando ambos se puede obtener un concentrado mixto con una ley de 42%, con una recuperación del 81%. Cabe señalar que, a las colas de la segunda flotación, fueron nuevamente procesadas (segunda limpia), con el cual se obtuvo un tercer concentrado (llamado segundo medio) de 28% de Mo, recuperando casi un 4% de Mo restante, por lo cual se elevaría la recuperación global a 85%. Obviamente, el considerar más limpias conlleva a tener más celdas y un mayor costo de producción, con lo cual se debe analizar económicamente para determinar si es costoso incrementar la recuperación en algunos puntos porcentuales.

Siguiendo este esquema de optimización, se realizaron pruebas con diferentes pesos de mineral, con una relación de sólidos de 30% en promedio (porcentaje normalmente usado en escala industrial). De los

resultados de todas las pruebas, se obtiene la relación de concentración, la cual promedio a un valor de 25, valor que indica que se requieren 25 toneladas de mineral de alimentación (o cabeza) a procesar para obtener una tonelada de concentrado. El tiempo de flotación en todas las pruebas fue de máximo 7 minutos, considerando maximizar la recuperación, aunque la máxima concentración se obtiene a los 5 minutos. La mejor ley obtenida fue 50% con una recuperación del 66%.

Cálculos de celdas de flotación

Para determinar el número y tamaño de celdas de flotación se deben considerar los siguientes puntos:

- Recirculante. Generalmente las celdas se diseñan con un recirculante del 20%, por lo que hay un primer ciclo necesario para que la producción se estabilice.
- Caudal de pulpa. Este parámetro se determina conociendo la relación de concentración, y considerando un porcentaje de sólidos del 30%.
- Volumen efectivo. Este se calcula conociendo el caudal de pulpa, el tiempo de flotación y un factor de volumen. La fórmula es:

$$\text{Volumen efectivo} = \text{Caudal} * \text{tiempo de flotación} * \text{factor de volumen}$$

El volumen efectivo es el volumen por tratar de mineral, en tanto que el tiempo de flotación, obtenido en laboratorio, se multiplica por un factor de corrección de 2.1 (por dimensionamiento). Y el factor de volumen es una corrección que considera el aumento de volumen debido al aireamiento, es decir, el volumen que ocupa el aire en la pulpa (generalmente se considera un 15%).

Conociendo el volumen efectivo, se procede a seleccionar el tipo (o tamaño) de celda y número de celdas requeridas. Generalmente se toma en cuenta las celdas de flotación tipo Denver, de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 7. Tamaños de celdas de flotación tipo Denver sub A

Tamaño	Volumen de la celda (m ³)	Caudal máximo (m ³ /h)
18	0,34	15
18SP	0,71	40
24	1,4	80
100	2,8	160

Considerando lo anterior, se procede a calcular el número de celdas, dividiendo el volumen a tratar entre el volumen de celda.

Dado que las celdas vienen en columnas o bancos, se puede calcular los bancos necesarios. Esto dependerá de las celdas que vengan por bancos. Con ello, se tiene el diseño del circuito primario. Los demás circuitos que se necesiten se calculan de la misma manera, solo que tomando en cuenta los datos (caudal, volumen efectivo) de concentrados y colas, en caso de que requieran limpieza o agotativos.

A continuación, se muestra un ejemplo de los cálculos para el dimensionamiento.

Tabla 8. Cálculos para el diseño de celdas.

ton mes concentrado	30	Tiempo de flotación, min=			7		
(Ley 45%, Recup. 75%)							
% sólidos=	30	Alimentación, ton secas			Volumen, m ³ .		
Relación de concentración		mensual	día	hora	mensual	día	hora
Máximo	20	600	30	3	2000	100	10
Concentrado, ton	30	1.5	0.15				
Acondicionamiento							
Caudal, m3/h	Vol Tanque, m ³						
12	1.68						
		Celdas Denver			Dimensionamiento		
Caudal, M3/h	Vol efectivo m ³	Tamaño	Volumen, m3	Caudal m3/h	No. celdas	No columnas	Celdas/columna
31.42857143	7.788	18	0.34	15	23	2	11
		18	0.71	40	11	1	14
		24	1.4	80	6	1	6
		100	2.8	160	3	1	3

CONCLUSIONES

1. La muestra a partir de la cual se realizaron las pruebas de concentración por flotación presenta una mineralogía con buena ley de molibdeno, en forma de sulfuro, llamado molibdenita. Casi no presenta cobre, en tanto que el hierro presente viene tanto como pirita como hierro elemental (este último debido al proceso utilizado para la molienda).

2. Al tamaño de partícula original de la muestra (50% por debajo de la malla 100), se tienen un buen porcentaje de liberación del molibdeno (67%). Se espera que moliendo 80% debajo de malla 100, se incrementara la liberación, y con ello, la recuperación de Mo por flotación.
3. Dadas las condiciones de la muestra, se observó una muy buena flotabilidad con los reactivos seleccionados, obteniéndose buena ley y recuperación en la primera flotación. Resultados que mejoraran si se muele más fino. Aun así, le recuperación se incrementa sustancialmente al limpiar las colas, con lo cual se obtiene un segundo concentrado (o medios).
4. La relación de concentración, que depende de la ley de la cabeza, determina la cantidad de alimentación requerida por tonelada de concentrado a obtenerse en la flotación primaria. El resto de los circuitos de flotación (limpias, agotativos, etc.) se van diseñando de acuerdo con la proporción de caudales. Lo más importante es tener el circuito primario, con los cálculos integrados para simular de acuerdo con las necesidades o expectativas de producción.

REFERENCIAS

Sangita Mondal, S., Acharjee, A., Mandal, U. Saha, B. (2012) Froth flotation process and its application. Vietnam J. Chem., 59(4), 417-425. DOI: 10.1002/vjch.202100010.

Yi, G., Macha, E., Van Dyke, J., Macha, R., MKay, T., Free, M. (2021) Recent progress on research of molybdenite flotation: A review. Advances in Colloid and Interface Science, 295, 102466. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102466>.

Castro, S. Lopez-Valdivieso, A., Laskowskic, S. (2016) Review of the flotation of molybdenite. Part I: Surface properties and floatability. International Journal of Mineral Processing, 148 (10), 48-58. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.01.003>.