

Juan Sebastian Guerrero

Docente Investigador
Institución Universitaria Tecnológica de
Comfacauca
email: sguerrero@unicomfacauca.edu.co
Sede Puerto Tejada - Cauca

Juan M. Barraza

Investigador
Escuela de Ingeniería Química
Universidad del Valle

Pedro Colom

Carbones del Cerrejón Limited
Guajira-Colombia

Cinética de Flotación de Lodos Finos de Carbón.

Resumen: la descripción del proceso de flotación, a través de modelos matemáticos, ha sido tema de investigación desde hace más de 50 años. Dicho esfuerzo ha permitido la introducción de diferentes modelos cinéticos que representan la operación. Sin embargo, el grado de ajuste a los datos experimentales de cada modelo es sensible a diversos factores, por lo que ningún modelo en particular ha obtenido una aceptación predominante en el área dependiendo del tipo de material flotado, el equipo y los parámetros de operación. En este estudio, se evaluó el comportamiento de los modelos cinéticos, de primer orden, en el ajuste de datos experimentales de la flotación de lodos finos de carbón, provenientes de la planta de lavado de la mina Cerrejón (Guajira). Éstos fueron flotados en una celda tipo Denver, utilizando Aerofroth-65 y Kerosene como reactivos de flotación. Los lodos se procesaron con una concentración fija de colector de 2 lb/ton y tres concentraciones de espumante (10, 15 y 20 ppm). Por cada concentración de espumante se obtuvieron datos de recuperación versus tiempo y se evaluó el ajuste de tres modelos cinéticos, el modelo de Kelsall, el modelo de Meyer y Klimpel y el modelo de Huber-Panu. El mejor ajuste de las curvas cinéticas experimentales se observó con el modelo cinético de Huber-Panu, el cual presentó un error máximo de 0.0079. A éste le siguieron el modelo de Kelsall y el modelo de Meyer y Klimpel, con un error máximo de 0.0203 y 0.0218 respectivamente.

Palabras clave: flotación, cinética, modelos de primer orden, lodos de carbón.

INTRODUCCIÓN

Los lodos finos de carbón, producidos en las plantas de lavado en las que se busca mejorar las características térmicas de los carbones extraídos, que presentan altos contenidos de materia mineral, se disponen habitualmente en embalses, representando pérdidas económicas y consecuencias ambientales severas para las compañías mineras. Por esta razón, la implementación

de técnicas que permitan la recuperación de la materia orgánica, presente en estos lodos, convertiría este material en una importante fuente de energía, con beneficios económicos y ambientales muy significativos [1].

Aunque existen diversas técnicas que pueden aplicarse con este fin, la más apropiada es la flotación espumante, la cual se aplica preferiblemente a tamaños de partícula finos y que aprovecha las diferencias

fisicoquímicas existentes entre la superficie de la materia orgánica (carbón), altamente hidrófoba, y la materia mineral, principalmente hidrofílica [2]. Así, evaluar la cinética de la flotación de lodos finos de carbón será indispensable para la implementación de la técnica a nivel industrial como solución a esta problemática.

Pese a la importancia de describir el proceso de flotación mediante un modelo matemático, los equipos empleados, el material flotado y los diversos parámetros que pueden afectar la operación (concentración de reactivos, flujo de aire y velocidad de agitación), han conducido a la incorporación de una gran variedad de modelos cinéticos, con aplicaciones restringidas dentro de la flotación de diversos materiales. Por esta razón, sólo determinados modelos pueden aplicarse a la flotación de un material bajo unas condiciones específicas [3].

En este estudio, se retomaron tres modelos cinéticos, de primer orden, para describir el proceso de flotación espumante de lodos finos de carbón y se evaluó su grado de ajuste desde el punto de vista del coeficiente de correlación, la desviación estándar y el error máximo.

MODELOS DE FLOTACIÓN CONSIDERADOS

Los siguientes modelos fueron analizados en este trabajo.

Modelo de Kelsall

Modelo de tres parámetros que considera partículas de flotación lenta y rápida. Este modelo se expresa matemáticamente como:

$$r = (1 - \Phi)[1 - \exp(-K_f t)] + \Phi[1 - \exp(-K_r t)] \quad (1)$$

Donde r es la recuperación orgánica en el tiempo (t), Φ es la fracción del material orgánico con flotación lenta y K_f y K_r las constantes cinéticas rápidas y lentas (min^{-1}) [3].

Modelo de Meyer y Klimpel

Modelo de dos parámetros que tiene en cuenta una distribución rectangular de flotabilidades.

Matemáticamente, este modelo puede describirse como:

$$r = R \left[1 - \frac{1}{Kt} (1 - \exp(-Kt)) \right] \quad (2)$$

Donde R es la recuperación final a tiempos de flotación largos, K es la constante cinética y r la recuperación orgánica en el tiempo (t) [3].

Modelo de Huber-Panu

Modelo de tres parámetros que asume una distribución gama de flotabilidades. Se expresa matemáticamente de la siguiente forma:

$$r = R \left\{ 1 - \left[\frac{\lambda}{\lambda + t} \right]^P \right\} \quad (3)$$

La distribución gama puede describirse como la suma de P distribuciones exponenciales con parámetro λ , donde R es la recuperación final [3].

EXPERIMENTAL

En este estudio se emplearon lodos finos de carbón provenientes de la planta de lavado de la mina Cerrejón (Guajira), los cuales se recibieron en un tanque de 55 galones, procedentes directamente de la corriente de fondo del sedimentador de la planta. Estos lodos se dejaron sedimentar en el tanque y una muestra del material sólido se extrajo y se extendió sobre una bandeja metálica de 4m^2 , buscando que el agua remanente se evaporara al aire. El lodo seco se homogenizó y cuarteó para obtener tres muestras de 100 gramos, utilizadas como material de alimento en las pruebas cinéticas de flotación en celda. Este material se caracterizó por análisis próximo.

La flotación se llevó a cabo en una celda tipo Denver, usando kerosene como colector y aerofroth-65 (AF-65) como espumante. Se realizaron tres pruebas con nomenclatura CF1, CF2 y CF3, variando la concentración de espumante (10, 15 y 20 ppm), y manteniendo constante la velocidad de agitación, el porcentaje de sólidos de la pulpa a flotar y la concentración de colector en 1400 rpm, 5% (en peso) y 2 lb/ton de lodo seco (LS), respectivamente. En las pruebas, la pulpa se dejó homogenizar inicialmente con el colector durante dos minutos, luego de los cuales se agregó el espumante, dejando acondicionar la mezcla por dos minutos más. Posteriormente, se abrió el flujo

de aire y se inició la remoción del material flotado, el cual se recolectó a 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 2.00, 4.00 y 8.00 minutos de iniciada la flotación en recipientes individuales.

El material recuperado (flotado), a cada intervalo de tiempo, se pesó luego de un proceso de filtración y secado, y se analizó su contenido de humedad y ceniza. Con los datos tabulados de recuperación orgánica, versus tiempo, se calcularon los parámetros de cada uno de los modelos cinéticos de primer orden contemplados en este estudio, empleando para ello el paquete computacional Polymath 6.1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización por análisis próximo de los lodos finos de carbón, alimentados a la celda, arrojó un contenido de cenizas en base seca (bs) de cerca del 59% y un poder calorífico de 3073 Btu/lb. Otras características evaluadas en este análisis, para un tamaño de partícula menor a malla 60, se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Análisis próximo de los lodos finos de carbón, base seca (bs), pasante malla 60.

Característica	Valor
Materia volátil, %	19.86
Cenizas, %	58.63
Carbono fijo, %	21.52
Poder calorífico, Btu/lb	3073.0
Azufre total, %	1.13

La figura 1 muestra las recuperaciones orgánicas, en función del tiempo, durante las pruebas cinéticas de flotación a tres concentraciones de espumante. Las curvas cinéticas muestran el efecto de la concentración de espumante en la velocidad de recuperación del material orgánico y el porcentaje de recuperación final

en la flotación de lodos finos de carbón, al mantener constante la concentración de colector en 2 lb/ton.

Pese a que para todas las curvas cinéticas la recuperación aumenta de manera continua con el tiempo, llegando a un valor casi estable hacia el tiempo máximo, la figura 1 muestra que la recuperación aumenta más rápidamente cuando se emplean mayores concentraciones de espumante. La recuperación final de cada curva también aumentó al utilizar una mayor cantidad de reactivo, obteniéndose una recuperación orgánica máxima de 75% al emplear 20 ppm de AF-65. Este comportamiento está de acuerdo con lo reportado por Mohns [4] para la flotación de lodos finos de carbón, usando Kerosene y MIBC como reactivos de flotación.

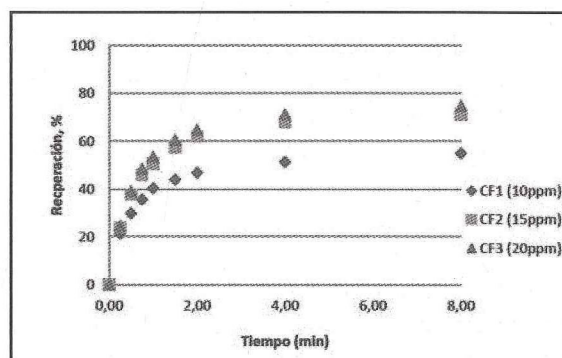


Figura 1. Efecto de la concentración de AF-65 sobre la recuperación orgánica a 2 lb/ton de kerosene.

Los parámetros de los modelos cinéticos de primer orden de Kelsall, Meyer y Klimpel y de Huber-Panu, cuya capacidad para describir el proceso de flotación de minerales ya ha sido demostrado por diversos autores [3] [5], se calcularon teniendo en cuenta el coeficiente de correlación, la desviación estándar y el error máximo, se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de los modelos cinéticos de Kelsall, Meyer y Klimpel y Huber-Panu para la flotación de lodos finos de carbón.

Prueba	Kelsall			Meyer y Klimpel		Huber-Panu		
	Φ	K_s	K_f	R	K	R_∞	P	λ
CF1	0.5664	0.0304	2.2675	0.5503	3.6769	0.5908	0.8312	0.3617
CF2	0.4073	0.0464	1.8784	0.7327	3.2536	0.7319	1.4737	0.7998
CF3	0.3768	0.0540	1.8538	0.7713	3.2088	0.7713	1.5986	0.8900

Para todos los casos, la concentración de espumante afecta de forma directa el valor de los parámetros característicos de cada modelo. En el modelo de Kelsall, la fracción del material orgánico que flota lento, Φ , disminuye al aumentar la concentración de espumante, lo cual era evidente en las curvas cinéticas, en las que la mayor concentración de AF-65 demostraba una recuperación global más rápida del material orgánico. Las constantes cinéticas, lentas y rápidas de este modelo, también mostraron cambios con relación a la concentración del reactivo, mientras K_s aumenta, K_f disminuye al emplear mayores cantidades de espumante. Estos cambios comprueban que el espumante favorece la operación acelerando la cinética lenta, que es la etapa limitante de la flotación de acuerdo a este modelo.

En el modelo de Meyer y Klimpel, la recuperación final, R , fue mayor para las corridas en las que se utilizó una mayor cantidad de reactivo, siendo de 77% para una concentración de 20 ppm de AF-65. El aumento en la recuperación final es el resultado de la reducción en la tensión superficial del sistema al emplear mayor cantidad de espumante. Una menor tensión superficial genera burbujas más estables y de tamaño más pequeño, características que se asocian con flotaciones más eficientes [6]. Por su parte, la constante cinética de distribución rectangular, K , disminuye al incrementar la concentración de Aerofroth 65.

Los parámetros del modelo de Huber-Panu fueron más altos para las pruebas cinéticas, realizadas con una mayor concentración de espumante. Tanto la recuperación final, R_∞ , como los parámetros λ y P , reflejan que la operación se favoreció cuando se emplearon mayores concentraciones de AF-65, en el rango de concentraciones contempladas en este estudio. De acuerdo a este modelo, la recuperación final más alta es de 77% cuando se emplean 20 ppm de espumante, lo cual está de acuerdo con el resultado arrojado por el modelo de Meyer y Klimpel.

Los correspondientes valores del coeficiente de correlación, R^2 , la desviación estándar, S_r , y el error máximo de los modelos estudiados, en cada una de las pruebas cinéticas, se muestran en la Tabla 3. Se observa que los tres modelos pueden representar la flotación de lodos finos de carbón, con coeficientes de correlación superiores a 0.988. Tanto los valores de R^2 como la desviación estándar y el error máximo corroboran que la flotación sigue una cinética de primer orden, como lo han reportado diferentes autores [7]. De acuerdo a la tabla 3, para el caso específico de la flotación de lodos finos de carbón, estos modelos de primer orden describen la operación con un alto grado de ajuste de los datos experimentales.

Tabla 3. Ajuste de los modelos cinéticos de Kelsall, Meyer y Klimpel y Huber-Panu para la flotación de lodos finos de carbón.

Prueba	Kelsall			Meyer y Klimpel			Huber-Panu		
	R^2	S_r	e_{max}	R^2	S_r	e_{max}	R^2	S_r	e_{max}
CF1	0.9901	0.0133	0.0203	0.9880	0.0133	0.0218	0.9985	0.0052	0.0079
CF2	0.9950	0.0133	0.0179	0.9983	0.0072	0.0094	0.9997	0.0039	0.0034
CF3	0.9969	0.0112	0.0166	0.9990	0.0057	0.0070	0.9996	0.0042	0.0070

Para los lodos finos de carbón, el modelo cinético de Huber-Panu tuvo el mejor ajuste de los datos experimentales, logrando predecir la recuperación orgánica en función del tiempo con un error máximo de 0.0079, seguido por el modelo de Kelsall y el modelo de Meyer y Klimpel. Un resultado similar, para la flotación de mineral de hierro, fue reportado por Saleh [3], quien comparó estos tres modelos con otros modelos cinéticos de primer y segundo orden. En el caso del mineral de hierro, el modelo cinético de Meyer y Klimpel tuvo el mejor comportamiento

describiendo la flotación de este material, seguido por los modelos de Kelsall y Huber-Panu, con grados de ajuste superiores a los demás modelos cinéticos contemplados en el estudio.

CONCLUSIONES

1. La concentración de espumante afecta la recuperación final en la flotación de lodos finos de carbón, obteniéndose mayores porcentajes de material orgánico, recuperado a mayores concentraciones

de este reactivo. La velocidad con la que el material orgánico se recupera también aumenta al incrementar la cantidad de espumante.

2. La mayor recuperación orgánica en la flotación de lodos finos de carbón se alcanzó al emplear una concentración de espumante de 20 ppm y una concentración de colector de 2 lb/ton. Bajo estas condiciones se obtiene una recuperación final de 75%, cuando el porcentaje de sólidos de la pulpa a flotar y la velocidad de agitación es de 5 % y 1400 rpm respectivamente.

3. La flotación de lodos finos de carbón puede describirse con modelos cinéticos de primer orden, cuyos parámetros se encuentran afectados directamente por la concentración de espumante.

4. Los tres modelos cinéticos, contemplados en este estudio, lograron ajustar los datos experimentales de las pruebas cinéticas de flotación de lodos finos de carbón, con coeficientes de correlación mayores a 0.988.

5. El mejor ajuste de las curvas cinéticas experimentales se observó con el modelo cinético de Huber-Panu, que presentó un error máximo de 0.0079. A éste le siguieron el modelo de Kelsall y el modelo de Meyer y Klimpel, con un error máximo de 0.0203 y 0.0218 respectivamente.

AGRADECIMIENTOS

Se expresan agradecimientos al Instituto Colombiano de Ciencia y Tecnología (Colciencias) y a Carbones del Cerrejón Limited, por el apoyo a través del proyecto de investigación "Limpieza de carbones del Cerrejón bajos en poder calorífico usando una columna de flotación a escala piloto" (contrato RC No. 561 - 2008).

REFERENCIAS

- [1] D. Tao, B. Li, S. Johnson y B.K. Parek. *A Flotation Study of Refuse Pond Coal Slurry*. Fuel Processing Technology, n.76, 2002, pp.201-210.
- [2] E. Jorjani, H. Asadollahi Poorali, A. Sam, S. Chehreh Chelgani, Sh. Mesroghli y M.R. Shayestehfar. *Prediction of Coal Response to Froth Flotation Based on Coal Analysis Using Regression and Artificial Neural Network*. Minerals Engineering, 2009, pp.970-976.

- [3] A.M. Saleh. *A Study on the Performance of Second Order Models and Two Phase Models in Iron ore Flotation*. Physicochemical Problems of Mineral Processing, n. 44, 2010, pp.215-230.
- [4] C.A. Mohns. *Effect of Particle Size on Coal Flotation Kinetics*. Disertación de maestría. Departamento de Ingeniería de Minas. Universidad de Queen, pp.119-166, 1997.
- [5] Y. Wei y R.F. Sandenbergh. *Effects of Grinding Environment on the Flotation of Rosh Pinah Complex Pb/Zn ore*. Minerals Engineering, pp. 264-272, 2007.
- [6] J.L. Piñeres y J.M. Barraza. *Colombian Coal Cleaning Using a Test Rig Flotation Column*. XVI International Coal Preparation Congress, Lexington, Kentucky, pp. 26-29, 2010.
- [7] G.S. Dobby y J.A. Finch. *Flotation column scale-up and modeling*. CIM Bulletin, n.79, pp. 90-96, 1986.

