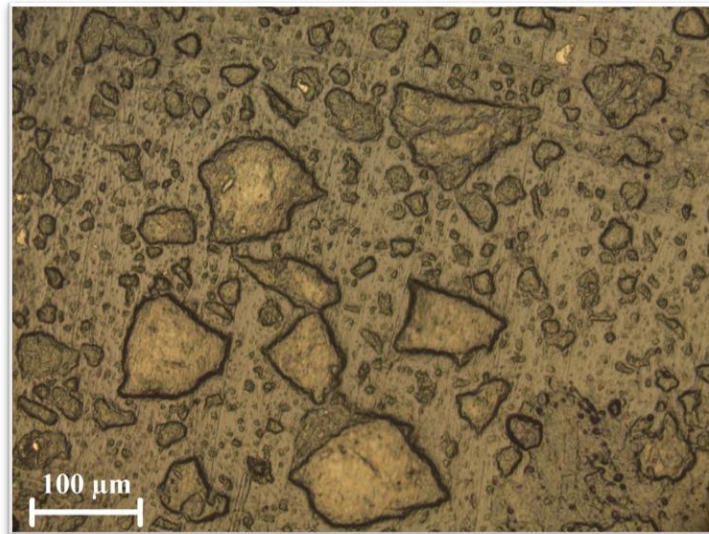


"Análisis de la distribución de partículas ultrafinas en la flotación de carbón y su relación con las variables metalúrgicas: recuperación y contenido de cenizas"

"Analysis of the distribution of ultrafine particles in the coal flotation and its relationship with metallurgical performance: recovery and ash content"



Fuente: Elaboración propia

Carrizales Méndez² Y. N., López-Saucedo¹, F., Rodríguez Vega¹, A., Carillo Pedroza², F.R., Beltrán Cruz, J. M., Batista Rodríguez¹, J.A. 1 Escuela Superior de Ingeniería "Lic. Adolfo López Mateos". 2 Facultad de Metalurgia Universidad

Autónoma de Coahuila, Unidad Norte

Correo electrónico: carrizalesyoaly@uadec.edu.mx

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolló un estudio en un banco de celdas de flotación, con el objetivo de analizar la distribución de tamaños de partícula del proceso de separación. La etapa experimental incluye los trabajos de muestreo (colección de muestras en las corrientes de alimentación, concentrado y colas del banco de celdas), y caracterización (análisis mineralógico a través de microscopía óptica y difracción de rayos-x). Los resultados indican que las partículas de carbón se presentan en tamaños entre 1 y 70 μm en las tres corrientes del banco de celdas. Sin embargo, el análisis de los resultados enfoca la atención sobre las partículas ultrafinas de la ganga hidrofílica, las cuales estimulan una serie de propiedades físicas que afectan la colisión entre las partículas de carbón y las burbujas de aire. Lo cual se refleja en una baja recuperación de partículas de carbón, al tiempo que las partículas ultrafinas de la ganga hidrofílica llegan al concentrado por mecanismos de arrastre y atrapamiento, lo que incrementa el contenido de ceniza en el concentrado. La conclusión más relevante permite establecer que las partículas ultrafinas de la materia mineral influyen de forma importante sobre las respuestas metalúrgicas recuperación y contenido de ceniza.

Palabras claves: Flotación de carbón, partículas ultrafinas, arcillas.

ABSTRACT

In the present work, a study was developed in a flotation cell bank, with the objective of analyzing the distribution of particle sizes of the separation process. The experimental stage includes sampling (collection of samples in the feed, concentrate and tails), and characterization (mineralogical analysis through optical microscopy and x-ray diffraction). The results indicate that the carbon particles occur in sizes between 1 and 70 μm in the three streams of the cell bank. However, the analysis of the results focuses attention on the ultrafine particles of the hydrophilic gangue,

which stimulate a series of physical properties that affect the collision between carbon particles and air bubbles. This is reflected in a low recovery of carbon particles, while the ultrafine particles of the hydrophilic gangue reach the concentrate by entrainment and entrainment mechanisms, which increases the ash content in the concentrate. The most relevant conclusion allows to establish that the ultrafine particles of the mineral matter have an important influence on the metallurgical responses, recovery and ash content.

Keys Word: Coal flotation, ultrafine particles, clays.

INTRODUCCIÓN

A diferencia de la industria del procesamiento de minerales metálicos, donde gran parte de la materia prima se separa por flotación de espuma, en la industria de la preparación de carbón solamente se utiliza en una parte de proceso. Es decir, la flotación en la industria del carbón se emplea para procesar entre 10 y 25% del tonelaje de alimentación, que corresponde a la fracción de tamaños de partícula fino (Noble, A., H, Gerald., 2015, Wills, B.A. 2006).

La actualización de la tecnología y modernización de la infraestructura en las minas dan como resultado la producción de una gran cantidad de partículas ultrafinas de carbón, que normalmente se descartan en las operaciones de una planta de preparación de carbón, debido a las dificultades en su separación. Bajo esta condición, se provoca un desperdicio de recursos de carbón y contaminación del medio ambiente. Por esta razón, la industria requiere de grandes espacios para construir depósitos y almacenar estos materiales.

En un entorno industrial, las plantas de preparación de carbón a menudo descartan el carbón ultrafino debido al alto contenido de arcilla, materia mineral y grado de oxidación. Estas partículas de carbón ultrafinas se clasifican como desechos, ya

que el carbón no puede separarse de manera eficiente y económica de la ganga mineral. El hecho de almacenar grandes cantidades de carbón ultrafino ha creado enormes preocupaciones ambientales. Se estima que la industria del carbón en Estados Unidos anualmente almacena entre 70 y 90 millones de toneladas de carbón ultrafino en depósitos de lodos de carbón. Esto representa una pérdida de un valioso recurso energético y la adjudicación de una posible responsabilidad ambiental (Orr, F.M, 2002). En el contexto anterior, la experiencia en las plantas de preparación de carbón de la Región Carbonífera de Coahuila, es similar. Sin embargo, se reconoce que esta desventaja puede abordarse de manera importante mediante el mejor conocimiento de los materiales, lo que, a su vez, permite establecer criterios de control para fortalecer la selectividad del proceso a través del acondicionamiento químico. Sin embargo, para lograr esto, se requiere de una buena comprensión del proceso y de las propiedades físicas y químicas de los materiales (i.e., carbón y materia mineral). A este respecto, el presente trabajo establece como objetivo caracterizar la distribución de tamaños de partículas de carbón en las corrientes de alimentación, concentrado y colas de un banco de celdas mecánicas industrial. Lo cual, permitirá visualizar el comportamiento del tamaño de partícula sobre la recuperación y el grado del concentrado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Procedencia de las muestras

El enfoque experimental está orientado a reconocer la distribución de tamaños de las partículas de carbón en la separación por flotación de espuma. El caso de estudio corresponde al análisis de un banco de celdas mecánicas que opera en la flotación primaria de una planta típica de preparación de carbón en la región noreste de Coahuila. Las muestras de pulpa se colectaron directamente de la corriente de alimentación, concentrado y colas del banco de celdas mecánicas. Posteriormente, las muestras se dejaron sedimentar, se decantaron y luego se secaron a 60 °C.

Análisis de la separación por flotación de espuma.

Para evaluar la separación de los materiales a través de la flotación de espuma, el balance de masa es particularmente importante para reconocer la distribución de los materiales valiosos, en este caso, de las partículas de carbón. En el contexto anterior, la fórmula de los dos productos es de gran utilidad para el balance de masa (Park, S., Huang, K.W., Yoon, R.H., 2018). Para el caso particular del procesamiento de carbón la fórmula de los dos productos se define con la Ecuación 1 (Park, S., Huang, K.W., Yoon, R.H., 2018; Dey, S., Paul, G.M., Pani, S., 2013).

$$R = \frac{(t - f)}{(t - c)} \times 100\%$$

(1)

Donde R , es la recuperación de sólidos en el concentrado. Mientras que, f , c y t representan los contenidos de ceniza de la alimentación, concentrado y colas, respectivamente.

Las mediciones de ceniza se desarrollaron de acuerdo a la norma ASTM D 3174-73. Para esta medición se pesa una masa de 1.0 g y se deposita en un crisol de cerámica, posteriormente el crisol con la muestra se introduce en un horno, a temperatura de 750°C, por un intervalo de tiempo de 120 minutos (ASTM D 3174-73). Una vez concluido el intervalo de tiempo, se pesa el crisol (el cual contiene los productos que se generaron durante la combustión) y se registran los datos para calcular el contenido de ceniza con la Ecuación 2.

$$A = \frac{(F - G)}{W} \times 100\%$$

(2)

Donde F (g) es el peso del crisol y el residuo de ceniza, G (g) es el peso del crisol vacío, W es el peso de la muestra y A es el contenido de ceniza (A_f , A_c y A_t , en turno). Se reporta el valor de ceniza en base seca.

Análisis mineralógico

Para identificar las fases minerales de los materiales colectados en las corrientes de alimentación, concentrado y colas, se caracterizaron las muestras por difracción de rayos-x (DRX). La caracterización se desarrolló en un difractómetro marca BRUKER modelo D8 Advance con tubo de radiación de Cu-K α de longitud de onda 1.541874 Å 2 θ .

El análisis mineralógico también incluye la medición de los tamaños de las partículas de carbón, para lo cual, se prepararon briquetas. El procedimiento convencional de preparación de briquetas indica realizar una mezcla, de 10 g de la muestra de carbón, más 8 ml de resina Epoxicure®Epoxy y 1.6 ml de acelerador Epoxicure®Epoxy. Estos materiales se mezclan en un molde cilíndrico de plástico de 15 ml, después, la mezcla se deja secar y una vez que haya endurecido se retira del molde. Posteriormente se corta la briqueta en dos partes, una de ellas se conserva como testigo, y a la segunda se le realiza un desbaste y pulido, hasta conseguir un acabado espejo sobre la superficie de análisis.

El análisis petrográfico se desarrolló en un microscopio petrográfico mediante el modo de luz reflejada marca Leica, modelo DM2500P, el cual se encuentra equipado con un sistema de video que incluye una cámara Leica DFC450 y un software Leica Application Suite (LAS).

El cálculo del tamaño de las partículas de carbón se desarrolló con una metodología basada en análisis de imágenes, cuyos elementos que la conforman se muestran en la **Figura 1** El tamaño de las partículas se realizó por medio del diámetro equivalente (d_e), que es función del área de la partícula, como se observa en la Ecuación 3. Este parámetro indica el diámetro del objeto a través de la reproducción de un círculo de la misma área que el objeto (Yanhong y col, 2019).

$$d_e = 2\sqrt{\frac{\text{Área}}{\pi}}$$

(3)

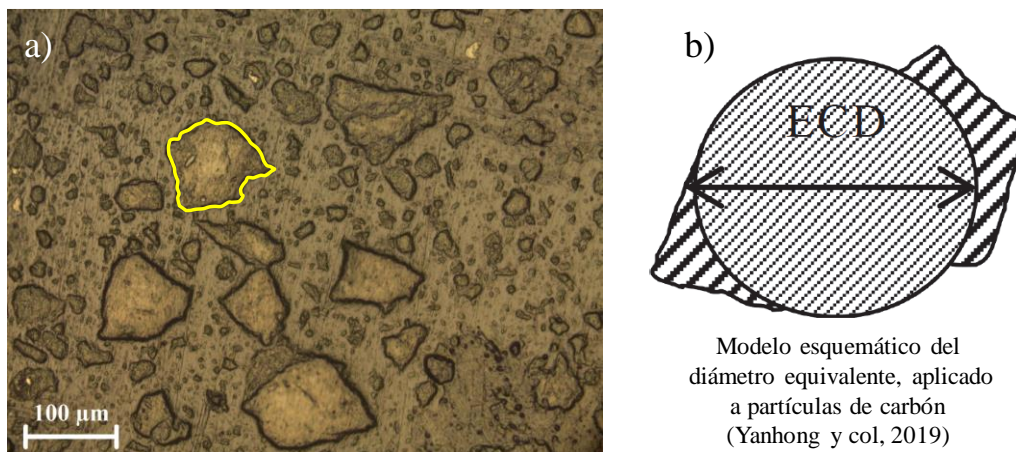


Figura 1. a) Ilustración de las partículas de carbón, un ejemplo se señala en color amarillo; b) Esquema del diámetro equivalente (Yanhong y col, 2019)

El conjunto de datos adopta un carácter cuantitativo, pluridimensional y continuo. La información se presenta en términos de las medidas de posición central (p. ej., media) y medidas de dispersión absoluta (p. ej., valor máximo, mínimo, desviación estándar, etc.) (Montgomery y Runger, 2005).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de distribución de tamaños de partícula.

Los resultados de la **Tabla 1** describen que la corriente de alimentación se caracteriza por la presencia importante de partículas ultrafinas, entre 1.19 y 132.80 μm . No obstante, prevalece la población de partículas entre 1.19 y 69.86 μm (que representa el 98.57%), las cuales ingresan al banco de celdas. La distribución de tamaños de partícula (de carbón) en la corriente de concentrado se define por tamaños entre 1.14 y 111.36 μm (y predomina el rango entre 1.14 y 68.23 μm , que representa el 97.54%) y en la corriente de colas los resultados de la distribución de tamaños de partícula se definen por el rango de 2.56 a 151.29 μm (y predomina el rango entre 2.56 y 67.22 μm , que representa el 98%).

Tabla 1: Tamaño y distribución de las partículas de carbón en las corrientes

Estadígrafos	<i>F</i> (μm)	<i>C</i> (μm)	<i>T</i> (μm)
Media	16.02	25.48	12.96
Desviación Estándar	13.98	19.15	14.80
Mínimo	1.19	1.14	3.03
Máximo	136.16	109.64	153.44

A través de la Ecuación (1), la cual está en función de las mediciones de ceniza en la corriente de alimentación ($A_f = 36.56\%$), concentrado ($A_c = 13.80\%$) y colas ($A_t = 60.28\%$), se reconoce que la recuperación es de 51.02%, una magnitud relativamente baja. Sin embargo, la producción de un banco de celdas en una planta de preparación de carbón, por lo general tiende a un valor de recuperación del 70%

(Wills y Nappier, 2006). A este respecto, normalmente, la recuperación por flotación de espuma depende del tamaño de partícula (Gontijo y col., 2007), estudios fundamentales indican que el tamaño óptimo para el proceso oscila entre 50 y 250 μm (Wang y col., 2018). En contraste, se observa que la mayoría de las partículas que entran al banco de celdas no cumplen con esta característica, prevalece notablemente la presencia de partículas por debajo de 50 μm (ver **Tabla 1**). Bajo esta condición, debido al tamaño, las partículas de carbón desarrollan una inercia de muy baja magnitud, y por lo tanto las partículas ultrafinas tienden a seguir las líneas de corriente alrededor de las burbujas. Así mismo, por el hecho de presentar poca inercia, las partículas no cuentan con suficiente energía cinética para romper la película líquida y hacer contacto con las burbujas, lo que da como resultado una baja eficiencia de colisión entre las partículas ultrafinas y las burbujas de aire (Wang y col., 2018). En términos operacionales, este efecto se presenta en términos de una baja recuperación, como es el caso del presente estudio, donde la recuperación es de 51.02%. Sin embargo, no se puede perder de vista la participación de la materia mineral durante el proceso, que se reconoce por sus propiedades hidrófilas. De acuerdo con los resultados de rayos-x de las muestras de alimentación, la materia mineral se presenta en forma de calcita, caolinita, pirita y cuarzo, como se observa en la **Figura 2** (Alimentación). En el caso particular de las arcillas, por ejemplo, la caolinita, estudios recientes indican que causan una serie de efectos negativos sobre el proceso de flotación (Xing et al., 2017).

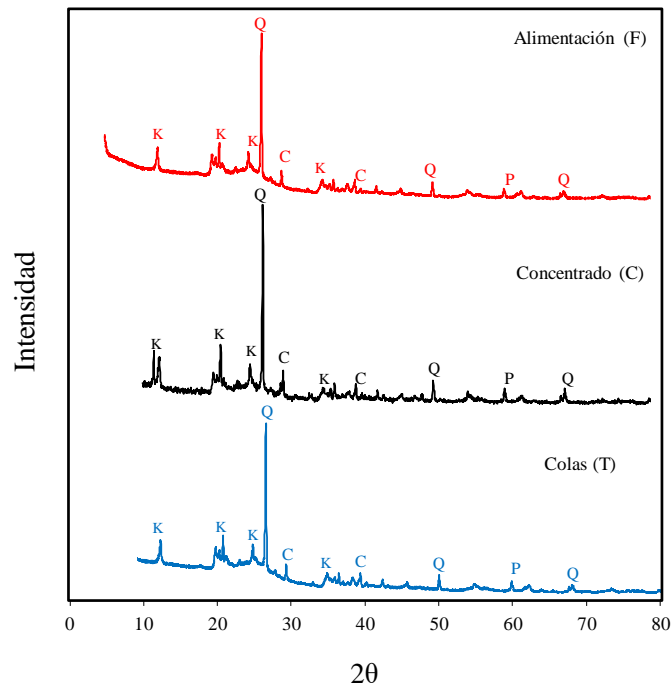


Figura 2. Patrones de difracción de rayos-x de los materiales en las corrientes de alimentación, concentrado y colas del banco de celdas. Las fases minerales se reconocen como: (K) caolinita, (Q) cuarzo, (C) calcita y (P) pirita.

En concreto, debido al tamaño natural (ultrafino) de los minerales arcillosos, estos se dispersan fácilmente en la fase líquida (Wang y col., 2018), lo cual incrementa la viscosidad del medio, y, en consecuencia, el tamaño de la burbuja disminuye y junto con ello, la velocidad de movimiento de las partículas minerales, lo que puede afectar la eficiencia de flotación de las partículas de carbón (Ndlovu y col., 2013). Así mismo, las partículas finas de arcilla en la pulpa pueden entrar fácilmente a la zona de espuma y disminuir el grado por atrapamiento mecánico en el concentrado (George y col., 2004). Por esta razón, se puede justificar la presencia de caolinita en la corriente de concentrado del banco de celdas. Haishan y col. (2019) explican que el cuarzo también tiene un comportamiento equivalente a la caolinita, es decir, se dispersa fácilmente en el agua y forma sistemas coloidales, limitando la recuperación de las partículas de carbón (e.g., recuperaciones del orden de 50%,

sujeta a un alto contenido de ceniza). Así mismo, se reconoce que el cuarzo llega al concentrado por medio de mecanismos de arrastre (Liang y col., 2019).

Finalmente, estas observaciones toman sentido cuando se analiza el grado del concentrado, el cual se define por un contenido de 13.80% de ceniza, compuesta principalmente por calcita, caolinita, pirita y cuarzo (de acuerdo con los resultados de DRX, ver **Figura 2** (Concentrado)).

Para explicar la presencia de las partículas de carbón en la corriente de colas, se debe abordar nuevamente el comportamiento de las arcillas durante el proceso de flotación. Estudios fundamentales indican que la superficie de los minerales arcillosos presenta una carga negativa, cuya distribución de carga hace que las partículas finas de arcilla se adhieran fácilmente a las partículas de carbón por interacción electrostática (Tombácz y Szekeres, 2004; Liu y col., 2020). Este fenómeno, reduce la hidrofobicidad de las partículas de carbón y disminuye la probabilidad de colisión, adhesión y transporte de la zona de colección a la zona de espuma (Ndlovu y col., 2013). En contraste, las partículas de carbón presentan una aparente superficie hidrófila y se canalizan por la corriente de colas en compañía de la materia mineral que se indica en la **Figura 2** (Colas). Una vez que las partículas de carbón ingresan a la corriente de colas, el siguiente proceso es dirigir el material a un depósito denominado presas de jales, donde se almacenan en forma de residuos de granulometría fina.

No obstante, el desarrollo tecnológico orientado al procesamiento de partículas ultrafinas, también sugiere explorar otras técnicas de separación, por ejemplo, la aglomeración (Galvin y Netten, 2017; Netten y Moreno-Atanasio, 2014) y separación de materiales hidrofóbicos e hidrófilos (Yoon y col., 2016). Estas técnicas han demostrado excelentes resultados para procesar partículas ultrafinas; por ejemplo, concentrados con bajo contenido de ceniza (<5%) y recuperaciones en el rango de

94.0 a 99.7% (Gupta y col., 2016). Bajo este panorama, resulta pertinente enfocar esfuerzos para mejorar el aprovechamiento de los recursos de carbón en la región carbonífera de Coahuila. Un área de oportunidad es considerar estas técnicas de separación, como pretratamiento previo a la separación por flotación, lo cual puede fortalecer la sustentabilidad de la operación.

CONCLUSIONES

- Se desarrolló un estudio en un banco de celdas mecánicas, para analizar las características de los tamaños de partícula en las corrientes de alimentación, concentrado y colas (del banco). De los resultados, se reconoce la presencia de partículas ultrafinas de carbón en las tres corrientes en un rango muy similar, entre 1 y 130 μm .
- El estudio reveló la presencia de caolinita como ganga hidrófila, la cual también se presenta en tamaños ultrafinos. El efecto de este mineral está asociado a una serie de procesos físicos (e.g., experimenta fuerzas de atracción con las partículas de carbón, e incrementa la viscosidad de la pulpa) que afectan las condiciones de colisión y adhesión entre las partículas ultrafinas de carbón y las burbujas de aire, lo cual se refleja en una recuperación baja (51.02%).
- Se reconoce que se debe fortalecer la revisión bibliográfica para mejorar el conocimiento sobre los efectos de las partículas ultrafinas de la ganga hidrófila en la separación por flotación de espuma. Esto puede representar un área de oportunidad para incrementar la producción del banco de celdas, en particular, que la recuperación de carbón incremente y el contenido de ceniza en el concentrado disminuya.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- American Society for Testing and Materials D3174-73, (2012), Standard test method for ash in the analysis sample of coal and coke from coal
- Dey, S., Paul, G.M., Pani, S., (2013). Flotation behavior of weathered coal in mechanical and column flotation cell. *Powder Techno* 2013; 246:689–94.
- George P, Nguyen AV, Jameson GJ. (2004) Assessment of true flotation and entrainment in the flotation of submicron particles by fine bubbles. *Miner Eng* 2004;17(7–8):847–53.
- Gontijo F, Fornasiero D., Ralston J, (2007) The limits of fine and coarse particle flotation, *Can. J. Chem. Eng.* 2007:85 739–747
- Haishan, Hu., Ming, Li., Lulu, Li. And Xiuxiang, Tao., (2019). Improving bubble-particle attachment during the flotation of low rank coal by surface modification. *International Journal of Mining Science and Technology.*
- Liang, L., Tan, J., Li, B. and Xie, G., (2019). Reducing quartz entrainment in fine coal flotation by polyaluminum chloride. *Fuel*. Vol. 235, p. 150-157
- Liu J, Ejtemaei M, Nguyen AV, Wen S, Zeng Y. (2020) Surface chemistry of Pb-activated sphalerite. *Miner Eng* 2020; 145:106058.
- Ndlovu B, Farrokhpay S, Bradshaw D. (2013) The effect of phyllosilicate minerals on mineral processing industry. *Int J Miner Process* 2013; 125:149–56.
- Noble, A., H, Gerald., (2015). In: A Noble., Gerald. H. A review of state of the art processing operations in coal preparation., *International Journal of Mining Science and Technology*pp. 511-521.
- Orr, F.M., (2002), *Coal Waste Impoundments: Risks, Responses, and Alternatives*, National Research Council, Washington D.C. National Academies Press.
- Park, S., Huang, K.W., Yoon, R.H. (2018) Predicting bubble coarsening in flotation froth: effect of contact angle and particle size. *Miner Eng*; 127:2; 56–64

Tombácz, E., Szekeres, M., (2004) Colloidal behavior of aqueous montmorillonite suspensions: the specific role of pH in the presence of indifferent electrolytes. *Appl Clay Sci* 27(1–2):75–94.

Wang G, Baib X, Wub C, Lib W, Liub Ke, Kianid. A, (2018) Recent advances in the beneficiation of ultrafine coal particles, *Fuel Processing Technology* 178, 104-125

Wills, B.A. (2006). *Mineral Processing Technology*. Oxford.

Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects 1–7.

Yanhong Fu, Zhen Li, Anning Zhou, Shanxin Xiong, Chao Yang, (2019) Evaluation of coal component liberation upon impact breakage by MLA, *Fuel* 258, 116-136