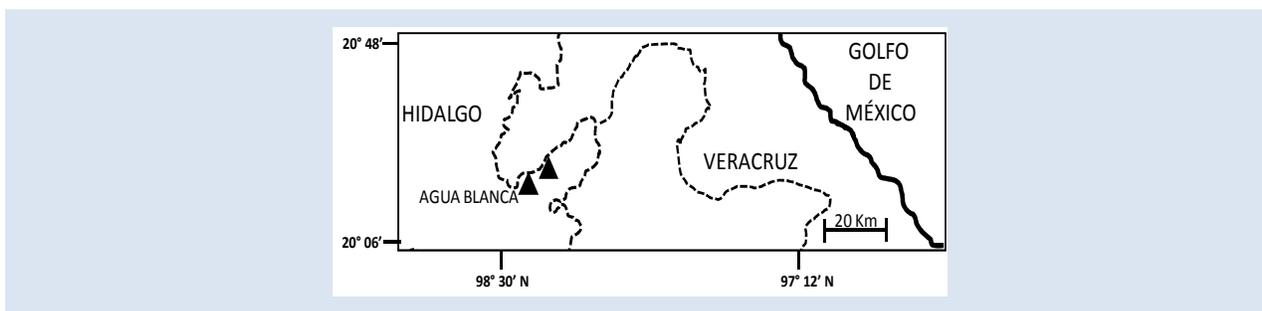


## ESTUDIO DE LA REMOCION DE IMPUREZAS DE ARCILLAS CAOLINÍTCAS DEL ESTADO DE HIDALGO (MÉXICO)

Felipe Legorreta-García, Leticia Hernández-Cruz, Pablo F. Mata Muñoz

Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México

\*e-mail: felegorreta@hotmail.com



## RESUMEN

En este trabajo se reporta el estudio de la remoción de impurezas y caracterización de arcillas de caolín procedentes de diferentes minas del Municipio de Agua Blanca de Iturbide, Hidalgo (México), tratadas con la finalidad de incrementar su índice de blancura las cuales fueron recolectadas mediante muestreo selectivo, procesadas por un método sencillo (tamizado, dispersión y asentamiento) y caracterizadas por difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB), análisis de tamaño de partícula (ATP), análisis químico con plasma acoplado (ICP) e índice de blancura (IB). Su procesamiento consistió en la trituración del mineral, atrición y cribado. Los productos finos de este último proceso (tamaños de partícula inferiores a  $37 \mu\text{m}$ ), fueron mezclados con agua desionizada a 45 por ciento de sólidos en peso adicionando  $2 \text{ Kg Ton}^{-1}$  de desfloculante y posteriormente diluidas a 20 por ciento de sólidos en peso, con el propósito de obtener partículas micrométricas. Los resultados pusieron en evidencia que el proceso de cribado separó el 30 % de arenas cuyos contenidos de sílice fueron superiores comparados con los contenidos en el material fino. Aplicando el proceso de asentamiento se obtuvieron partículas en suspensión con un tamaño promedio de  $1,83 \mu\text{m}$ . Al realizar el estudio cristalográfico, además de la caolinita, se identificaron diferentes impurezas tales como sulfuros, óxidos y carbonatos. Mediante los estudios cristalográficos, análisis químicos por ICP y la medición del índice de blancura, se llevó a cabo el seguimiento de la disminución de impurezas en cada proceso de separación. Se obtuvo un concentrado final con tamaño promedio de partícula de  $1,83 \mu\text{m}$ , un índice de blancura de 91,27% y una recuperación en peso global de 63 %.

Palabras Claves: Caolín, Blanqueo, Asentamiento.

## STUDY OF REMOVING IMPURITIES OF KAOLIN CLAYS FROM HIDALGO STATE, (MEXICO)

## ABSTRACT

This paper reports the study of the removal of impurities and characterization of kaolin clays from different mines in Agua Blanca de Iturbide, Hidalgo (Mexico), treated with the aim of increasing its whiteness index which were collected by selective sampling, processed by a simple method (sieving, dispersal and settlement) and characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), particle size analysis (ATP), chemical analysis coupled plasma (ICP) and whiteness index (IB). The mineral was processed by crushing, attrition and screening. Sieving of fine products were mixed vigorously with deionized water at 45 percent solids in wt.% adding  $1 \text{ Kg Ton}^{-1}$  of dispersant. Subsequently, the pulp was diluted and settling at 20 percent solids, with the purpose of obtaining micron particles and finally a second settling was applied. The results showed that the sieving process removed 30% of silica sand whose contents were higher compared with those contained in the fine material. Applying the process of settling suspended particles were obtained with an average size of  $1,83 \mu\text{m}$ . In the crystallographic study, in addition to kaolinite, were identified different impurities such as sulfides, oxides and carbonates. By crystallographic studies, chemical analysis by ICP and the whiteness index measurement was carried out monitoring of the reduction of impurities in each separation process. Final concentrate was obtained with average particle size of  $1,83 \mu\text{m}$ , a whiteness index of 91,27% and an overall weight recovery of 63%.

Keywords: Kaolin, Whiteness, Settlement.

## 1. INTRODUCCIÓN

Diversos productos de uso común tales como el papel, las pinturas, objetos de cerámica, el plástico, algunos medicamentos y los cosméticos pareciera que poco tienen que ver entre sí. Sin embargo, durante alguna parte del proceso para su fabricación se requiere de una materia prima común: el Caolín. El valor agregado del caolín radica en su blancura y sus aplicaciones industriales son amplias si el índice de blancura es superior al 90%, de aquí que se han realizado numerosos estudios a fin de proponer diversos procesos de blanqueo durante varias décadas [1-8]. De acuerdo con los estudios realizados por el Servicio Geológico Mexicano, las reservas de caolín en el estado de Hidalgo rebasan las 25 millones de toneladas; sin cuantificar aquellas de los estados colindantes de Puebla y Veracruz [1]. Gran parte del potencial de las arcillas caoliníferas con cierta coloración no está cuantificado debido a que gran parte de ellas no tienen importancia económica. Las arcillas de caolín contienen impurezas minerales tales como cuarzo, calcita, feldspatos, sulfuros, óxidos de hierro y titanio [5-12]. Por otra parte, por medio de estudios estadísticos se ha calculado que para el año 2013 serán necesarias, aproximadamente, 24,8 millones de toneladas para satisfacer las necesidades de consumo de este mineral a nivel mundial [4].

En todo proceso de blanqueo de arcillas caoliníticas es necesario agregar agua, de tal forma que las pulpas de caolín han sido ampliamente estudiadas [12-20]. La carga superficial de la caolinita en suspensión es positiva en los bordes y negativa en los planos basales y la dispersión de las partículas está íntimamente relacionada con la repulsión entre las mismas, cuando se adiciona un surfactante a la pulpa, debido al cambio de la carga de los bordes de positiva a negativa, [9-11, 13,15]. A valores ácidos de pH, las cargas positivas y negativas de las partículas forman aglomerados del tipo “card house”, que tienden a precipitar; sin embargo a valores de pH básicos está presente una repulsión entre las partículas y por lo tanto, permanecen en suspensión. Este comportamiento está muy relacionado con las propiedades reológicas de la suspensión [13,16-21]. Loginov y col. observaron imágenes de soluciones acuosas de caolín a 30 % de sólidos en peso, sin y con adición de poliacrilato ácido de sodio, el cual fue utilizado como dispersante [16]. Estos autores pusieron en

evidencia, mediante imágenes de los sólidos en suspensión sin dispersante, la existencia de partículas agregadas con estructura tipo “card house”, mientras que en las imágenes cuya solución contenía dispersante, se observó que las partículas estaban orientadas en una misma dirección [17]. En diversos estudios, se ha publicado que la dispersión y la agitación son factores importantes para disminuir la viscosidad de la pulpa [10-15] así como para ayudar a liberar las partículas de caolinita de sus impurezas. Siendo esta una etapa crucial debido a que los tamaños de las arcillas de caolín son muy finos, provocando la formación de cúmulos cuyas partículas que se encuentran en su interior no tienen contacto con el surfactante.

Por otro lado, la minería mexicana necesita nuevas tecnologías referentes a estudios de blanqueo de arcillas caoliníticas de color beige, de bajo valor comercial, a fin de incrementar su valor, que permita hacerlas competitivas ante las necesidades a nivel nacional y ayudar a la economía regional, lo que podría ser a mediano plazo, un detonante de desarrollo social.

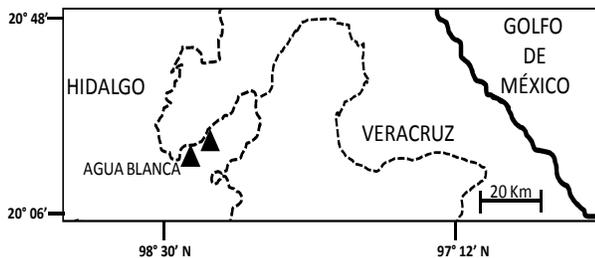
Es por ello que en este trabajo se reporta por primera vez un estudio que permite blanquear y purificar las arcillas de caolín del municipio de Agua Blanca de Iturbide Hidalgo, (México), removiendo los contenidos de impurezas; iniciando la apertura de un nuevo campo de investigación, a fin de beneficiar los minerales no metálicos del estado de Hidalgo.

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

### 2.1 Muestreo

Se trabajó con un compósito formado por mineral recolectado, mediante muestreo selectivo, de yacimientos caoliníferos provenientes de diferentes minas del municipio de Agua Blanca de Iturbide, Hidalgo (México). El mapa de localización del municipio se muestra en la figura 1.

La toma de las muestras se efectuó utilizando el método de muestreo selectivo, tomando muestras de mineral del frente de cada mina. En todos los casos se tomaron las muestras de un color beige sin variaciones macroscópicas significativas y con un peso aproximado de 25 Kg. El tipo de muestreo practicado aunque no fue totalmente exhaustivo, si fue lo suficiente amplio como para permitir un análisis estadístico correcto.



**Figura 1.** Mapa de localización del municipio de Agua Blanca de Iturbide, estado de Hidalgo, México.

Las muestras fueron tomadas de las minas: los Gavilanes, la Mohonera, la Niña, y la Lomita (marcadas con triángulos oscuros en la figura 1). La localización se presenta en la Tabla I. Es importante señalar que una vez colectadas las muestras en las minas, el mineral recolectado se mezcló obteniendo un solo compuesto del mineral de caolín.

**Tabla I.** Sistemas de referencia de las minas en donde se realizó el muestreo.

Nombre	Latitud Norte	Longitud Oeste
Los Gavilanes	20° 22' 56.15"	98° 25' 13.18"
La Mohonera	20° 22' 50.40"	98° 25' 12.37"
La Niña	20° 22' 53.39"	98° 25' 10.86"
La Lomita	20° 22' 45.25"	98° 25' 11.40"

## 2.2 Preparación mecánica

Con la finalidad de desaglomerar el material arcilloso y trabajar con material fino para un buen manejo de la pulpa, la preparación mecánica del mineral inició con la disgregación de terrones de grandes tamaños constituidos de partículas finas compactadas entre sí, mediante una quebradora de quijadas marca Allis Mineral Systems y una trituradora de rodillos, marca Quinn Process Equipment Company, para posteriormente colocar el mineral triturado en una celda de flotación (marca Denver) adicionando agua corriente, a fin de formar una solución al 45 % de sólidos. La pulpa se agitó a 300 rpm durante 15 minutos; se utilizó el aditamento de atricionado (con una propela de doble aspa) para mezclar la pulpa y se cubrió la parte superior de la celda para evitar pérdidas producidas por la agitación tan vigorosa. La pulpa se cribó lentamente sobre la malla No. 400 de la serie Tyler con ayuda de agua corriente, obteniendo dos productos: el primero de ellos, con tamaño de

partícula superior a 37  $\mu\text{m}$  y el segundo, con diámetro nominal de partícula inferior a 37  $\mu\text{m}$ . Las arenas del primer producto se desecharon. La arcilla con partículas de tamaños finos se filtró y posteriormente, se secó en una estufa a 120°C durante 8 horas, con la finalidad de eliminar totalmente el agua corriente, pues el proceso siguiente consistió en la utilización de un desfloculante, el cual es un reactivo muy sensible a los iones en solución. Tras el secado de la muestra, se procedió a desaglomerar el material, con ayuda de un mortero de ágata.

## 2.3 Dispersión y asentamiento

Después del proceso anterior, la arcilla seca se mezcló con agua desionizada en una celda de flotación marca Denver, a fin de obtener una pulpa a 45 % de sólidos en peso. Una vez generada la pulpa, se agregaron 2 Kg  $\text{Ton}^{-1}$  de hexametáfosfato de sodio ( $\text{NaPO}_3$ )<sub>n</sub>, marca Aldrich con 96 % de pureza, el cual fue utilizado como desfloculante (dispersante). La pulpa se agitó durante 30 minutos; bajo las mismas condiciones de atrición (30 minutos a 300 rpm). Posteriormente se le agregó agua desionizada a fin de diluir la pulpa a 20 % de sólidos en peso, se mezcló un minuto para después vaciarla en una probeta de 1000 mL dejándola asentar durante 30 minutos, obteniéndose dos productos. La pulpa que quedó en la parte superior de la probeta, a partir de ahora, se le llamará disperso 1 y a la pulpa asentada se le llamará asentado 1, este último material presentó un color grisáceo y se fue al fondo muy rápidamente. Este efecto de asentamiento rápido, es debido a la velocidad terminal de las partículas más grandes, en aplicación de la ecuación de Stokes, esto es explicado más adelante.

El producto disperso 1 se separó por decantación y se vertió en un vaso de precipitados de 1 L y se dejó en reposo durante 15 días, a temperatura ambiente. Pasado el tiempo, se obtuvo un material asentado de color blanco (asentado 2) que es el producto final y en la parte superior del vaso de precipitados, una suspensión de arcilla de color rojizo (disperso 2), a la cual se le realizó una medición del pH obteniendo un valor de 10. El producto superior fue extraído muy lentamente con una jeringa. En la figura 2 se muestra un diagrama esquemático del procesamiento que se llevó a cabo así como los productos obtenidos. Se tomó una muestra de cada producto a fin de realizar los análisis y los balances correspondientes.

Para la caracterización de los productos, se empleó un microscopio electrónico de barrido marca JEOL JSM-6300 para observar la morfología y los tamaños de las partículas. La distribución de tamaño y el diámetro medio de las partículas (D50) se determinaron con un equipo de la marca Beckman & Coulter, modelo LS-13320. El estudio cristalográfico se realizó con el equipo GBC marca MMA. Los diagramas fueron elaborados con los datos adquiridos en el intervalo de 10 a 60° (2θ), con incrementos de 0.05°, utilizando radiaciones Cu-Kα (λ=1.5418 Å). Para las mediciones de índice de blancura se utilizó un espectrofotómetro marca Gretag Macbeth, modelo Color Eye® XTS; equipado con el software para análisis de los datos de reflectancia Color IQC® de la misma marca.

aglomerados constituidos por la unión de numerosas partículas, atribuyendo este fenómeno a las fuerzas electrostáticas. También se puede observar una importante población de pequeñas partículas de mineral cuyos tamaños oscilan entre 1 y 2 μm. Estos resultados son acordes a los determinados por el equipo analizador de tamaños (ATP), los cuales, para este producto, no se reportan.

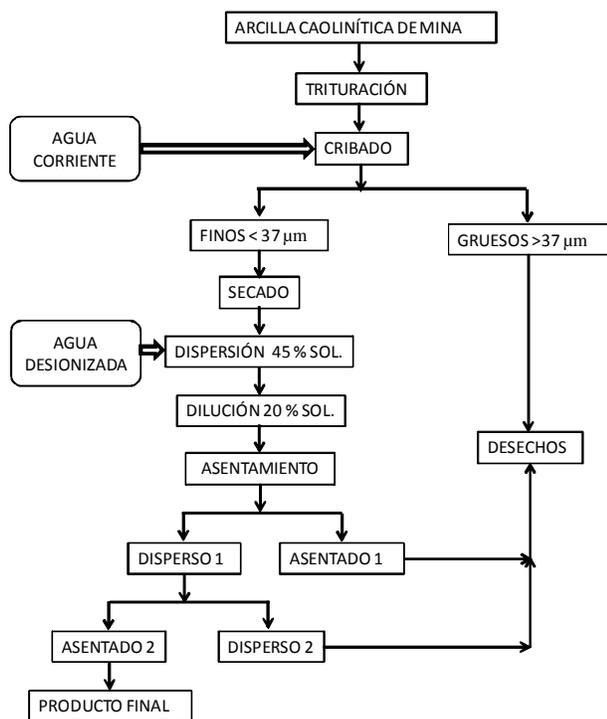


Figura 2. Diagrama de flujo del procedimiento experimental.

Finalmente para efectuar la cuantificación de los iones metálicos en solución, se utilizó un espectrofotómetro de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP) marca Perkin-Elmer, modelo Optima 3000XL.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 3a) se presenta la micrografía de una muestra mineral de arcillas de caolín de finos de tamaño inferior a 37 μm, en la cual se observan

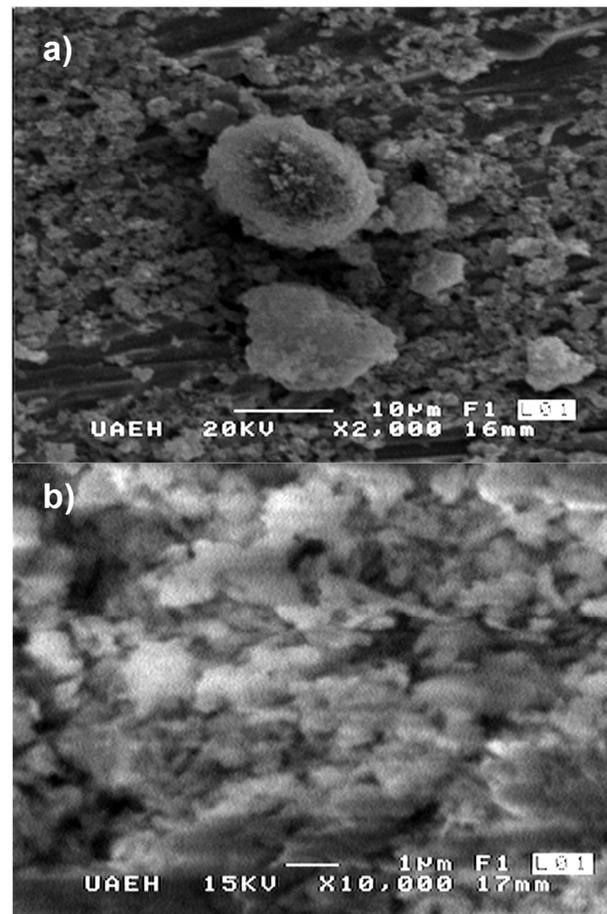


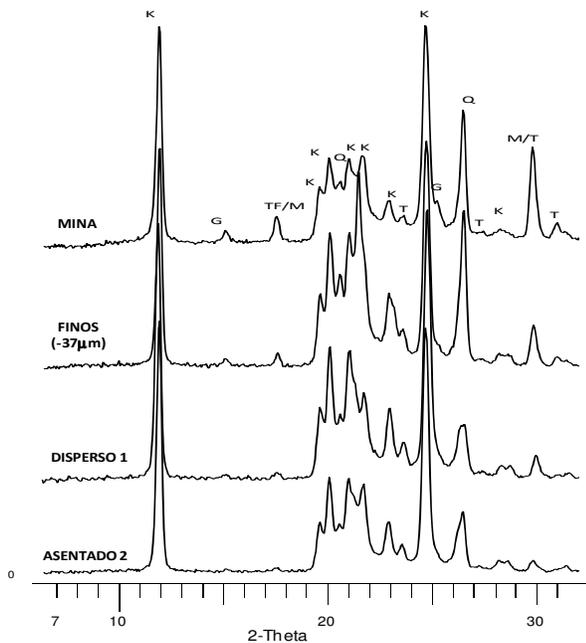
Figura 3. Imágenes de una muestra mineral de arcillas tamizadas de caolín de mina (finos a – 37μm); a) 2000 x y b) 10000 x .

En la figura 3b) se muestra una ampliificación (10000 x) de la figura 3a), observando las partículas con morfología laminar. También es posible apreciar, que las partículas no se ordenan en una sola dirección, haciendo aglomerados del tipo “card house”.

En la figura 4, se muestran los difractogramas de los productos obtenidos en cada etapa de beneficio. Dentro de las impurezas detectadas se puede observar en el difractograma del mineral de mina, señales de sílice, en las formas alotrópicas de cuarzo

y tridimita; además de la magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), la greigita (Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub>) y óxidos de hierro y titanio (Fe<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub>).

También se aprecia claramente la disminución de las impurezas de las arcillas de caolín, para cada producto obtenido. Resaltando la disminución importante y gradual en cada etapa para el mineral de tridimita, (30,5 °2theta), el cual prácticamente desaparece del difractograma del asentado 2. Para el caso del cuarzo, no se presenta una disminución significativa en las señales de difracción, prevaleciendo los picos de óxido de Fe y SiO<sub>2</sub>, característicos. Este comportamiento de la sílice en el paso de cribado, sugiere la existencia de partículas de fase tridimita más pequeñas que aquellas de cuarzo, por lo que pueden ser eliminadas por cribado.



**Figura 4.** Difractogramas del mineral caolín de partida y de los productos obtenidos en cada etapa de beneficio. K= Caolinita (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(SiO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O); Q = Cuarzo (SiO<sub>2</sub>); T = Tridimita (SiO<sub>2</sub>); M = Magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>); TF = Oxido Titanoferro (Fe<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub>); G = Greigita (Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub>).

En la etapa de asentado, disminuyen considerablemente las señales de cuarzo y tridimita, indicando la presencia de partículas suficientemente grandes que se asientan y se desechan, pero también sugiere la presencia de impurezas de partículas muy pequeñas que permanecen en suspensión.

Los análisis químicos del mineral inicial y de los

productos obtenidos en cada etapa de beneficio son mostrados en la Tabla II en donde es posible observar claramente una disminución gradual del contenido de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de una etapa a otra, y un incremento del índice de blancura. Basándose en el argumento anterior, se asume que éstas impurezas son las responsables de la coloración beige de las arcillas caoliníticas.

Para el caso del TiO<sub>2</sub>, la disminución más importante se presenta en la última etapa del proceso.

Este hecho permite asumir que los óxidos de Ti y Fe, poseen tamaños superiores a 37 µm, es decir por un lado, por medio del tamizado pueden ser parcialmente desechados, dado que son minerales con tamaños superiores a 37 µm y por otro lado, partículas muy finas de un tamaño tal, que no se asientan después de los procesos de dispersión. Los contenidos de sílice y alúmina no presentan variaciones significativas. Adicionalmente, se puede apreciar que el porcentaje en peso de sílice del mineral de mina es de 58,57%, este valor es superior comparado con el 46,54% teórico.

**Tabla II.** Análisis químico por ICP e índice de blancura de productos obtenidos.

	Caolín Mina	Finos (-37 µM)	Disperso 1	Asentado 2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	1,47	1,3	0,94	0,52
TiO <sub>2</sub> (%)	0,9	0,83	0,84	0,54
SiO <sub>2</sub> (%)	58,57	56,12	56,49	57,02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	38,18	37,98	38,88	38,12
Masa (%)	100	79,87	72,87	63
Índice de Blancura	87,54	89,42	91,27	91,75

Considerando estas cifras así como los minerales de cuarzo y tridimita detectada por DRX del producto final, se considera que el exceso de SiO<sub>2</sub> está compuesto por partículas aisladas del mineral de sílice, principalmente en forma de tridimita.

En lo referente a la separación por tamaños, el proceso inicial fue el tamizado con malla de abertura nominal de 37 µm. El porcentaje en peso del material que pasó por la malla fue de 61,7%.

Una segunda separación por tamaños del producto fino, se realizó por medio de una dispersión con agua desionizada y posteriormente se efectuó un asentamiento al 20 % de sólidos en peso. Durante el asentamiento y desde los primeros minutos se observó la formación en el fondo de la probeta de una cama de mineral de color grisáceo, que se asienta y va incrementando su espesor conforme pasa el tiempo. El máximo espesor del material asentado se obtuvo en 30 minutos. En la parte superior de la probeta, no se observó ninguna interface sólidos – agua, lo que significa que no se presenta el efecto de la sedimentación.

Los resultados de la distribución de tamaños del producto disperso 1, se muestran en la figura 5.

La curva revela que las partículas son inferiores a 10 μm, y el tamaño promedio es de 1,83 μm. Estos resultados son semejantes a aquellos obtenidos con el proceso de desarenado con ciclones reportados por Raghavan y col. [10 -12].

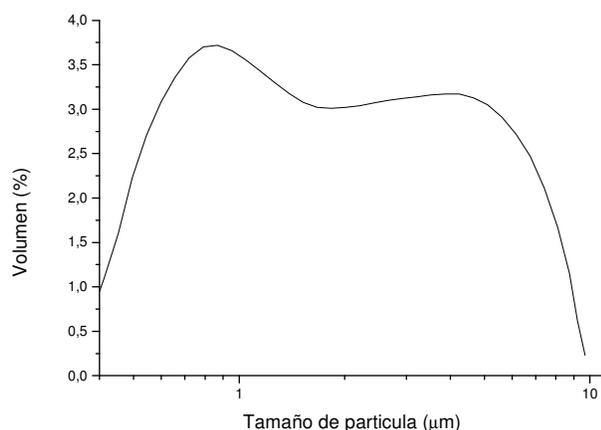


Figura 5. Distribución de tamaños de partícula del material disperso 1.

Posteriormente, el material asentado 1 se desecha y el mineral disperso 1 obtenido del proceso de asentamiento es separado por decantación. El producto disperso 1 es agregado en una probeta de 1L durante 15 días. Tras el paso del tiempo establecido, se observa que como en el proceso anterior, no se presenta ninguna interface sólidos–agua, sin embargo se observan muy claramente dos productos, la arcilla dispersa y la arcilla asentada, las cuales serán nombradas en adelante: disperso 2 y asentado 2, respectivamente. El material disperso 2 muestra una coloración roja. Esta coloración se atribuye a la formación de hidroxicomplejos metálicos, que se explicará más adelante. Los

productos son separados por decantación y secados para su caracterización.

Con la finalidad de evaluar la velocidad terminal de asentamiento de las partículas, se puede aplicar la fórmula de Stokes para partículas esféricas, de acuerdo a  $D_0$  (ver Ec. 1) llamado diámetro de Stokes a partir de una columna de altura  $h$  y el tiempo de sedimentación  $t$  con una muy buena aproximación:

$$D_0 = \sqrt{\frac{18\eta h}{(\rho_s - \rho_l)gt}} \tag{1}$$

Donde  $\eta$  es el coeficiente de viscosidad,  $\rho_s$  la densidad de la fase sólida,  $\rho_l$  la densidad de la fase líquida y  $g$  la aceleración de la gravedad. Puesto que la validez de la ecuación 1 se basa esencialmente en la hipótesis geométrica de que las partículas son esféricas. Una ecuación transformada (ver Ec. 2), basada en una modificación física justificada de la ley de Stokes, para partículas no esféricas fue desarrollada por Pabst et al. [18]. En esta ecuación, se interpreta el diámetro de las partículas de la caolinita y de la arcilla en función de los diámetros equivalentes de la esfera, es decir, los autores utilizaron la geometría de la partícula como discos circulares, obteniendo la ecuación siguiente:

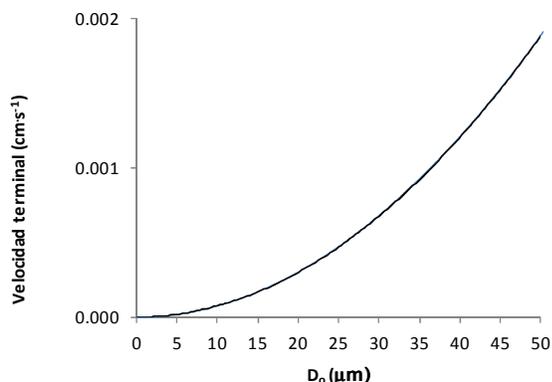
$$D_0 = \sqrt{\frac{32\eta h \Psi}{\pi(\rho_s - \rho_l)gt}} \tag{2}$$

Donde  $\Psi$  es el factor de forma.

Haciendo  $h/t = V_t$ ,  $\Psi = 20$  [18] y despejando  $V_t$ , se puede entonces calcular la velocidad terminal a un diámetro de partícula determinado. En la figura 6, se muestra la velocidad terminal de la partícula en función de su diámetro, la cual muestra una función de tipo potencial que se ajusta perfectamente a la ecuación  $V_t = 8E-7D_0^2$ .

Se observa además que las partículas cuyo diámetro es superior a 5 μm, la velocidad terminal incrementa de manera potencial. No obstante, las partículas inferiores a 5 μm, adquieren una velocidad terminal con magnitudes del orden de  $10^{-5} \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Lo anteriormente expuesto explica el asentamiento rápido de las partículas de mineral que forman una cama de mineral al fondo de la probeta a los 10 minutos, mientras que las partículas finas de caolinita con ayuda del dispersante se mantienen en

suspensión debido además a la velocidad terminal extremadamente lenta de asentamiento.



**Figura 6.** Velocidad terminal ( $V_t$ ) de la partícula en función de su diámetro ( $D_0$ ).

Algunos autores, han demostrado que el hexametáfosfato de sodio, es fuertemente adsorbido en los bordes positivos de las partículas de la caolinita [19, 20, 23]. Teo y col., manifiestan que el dispersante presenta el fenómeno de quimisorción sobre las partículas de la caolinita, debilitando su atracción electrostática y permitiendo incrementar la carga negativa de esta [23]. Se asume entonces, que la separación observada en la probeta está gobernada principalmente por dos fenómenos: a) el valor básico del pH de la pulpa y b) por la distribución de tamaños de las partículas. El pH de la pulpa juega un papel importante ya que a valores básicos, la carga de las partículas coloidales de óxido férrico es negativa [24]. Grieves y Bhattacharyya, demostraron que el óxido de hierro coloidal presenta cargas negativas, entre pH 8 y pH 10 dando como resultado una separación eficiente al aplicar una flotación con un surfactante catiónico [25]. Lo anterior sugiere que los iones de óxido férrico e hidroxocomplejos metálicos (Fe, Ti, K, Ca) de tamaño coloidal, debido a su carga negativa, experimentan repulsión contra las demás partículas de la caolinita. De esta manera, las partículas de caolinita sedimentan muy lentamente y como consecuencia, las partículas coloidales (impurezas) se acumulan en la parte superior de la probeta, presentando progresivamente y al cabo de unos días, un color rojizo característico.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo fue posible remover las impurezas y caracterizar arcillas caoliníticas provenientes del

municipio de Agua Blanca de Iturbide, Hidalgo. (México) mediante un método simple consistente en el tamizado, dispersión y asentamiento. Se identificaron por DRX la presencia de caolinita del tipo  $(Al_2O_3)_2(SiO_2)_2(H_2O)$ , así como diferentes especies minerales contenidas como impurezas, tales como el sulfuro de hierro ( $Fe_3S_4$ ), magnetita ( $Fe_3O_4$ ), óxido titanoférrico ( $Fe_2TiO_4$ ) y las formas sílice ( $SiO_2$ ) en las estructuras de tridimita y cuarzo. Este estudio sugirió que la sílice está presente en partículas de tridimita de un tamaño que puede ser eliminado por cribado y asentado; este fenómeno no se apreció para el mineral de cuarzo. Por medio de los análisis de DRX y análisis químicos, se puso en evidencia la disminución de las impurezas de las arcillas de caolín lo cual se corroboró mediante un incremento de su índice de blancura. Se obtuvo un concentrado final conteniendo 0,52 % de  $Fe_2O_3$  y 0,54% de  $TiO_2$ , con un índice de blancura de 91,27%, una recuperación en peso de 63% y con partículas inferiores a 10  $\mu m$ , con un tamaño promedio de 1,83  $\mu m$ . Se asume que la separación por tamaños y coloración en la probeta están gobernadas por un valor básico del pH de la pulpa así como por los tamaños de las partículas. Los iones de óxido férrico e hidroxocomplejos metálicos, debido a su carga, experimentan repulsión contra las demás partículas de la caolinita. De esta manera, las partículas de caolinita de mayor tamaño, sedimentan muy lentamente y los coloides se almacenan en la parte superior de la probeta.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Hidalgo por los apoyos recibidos mediante el proyecto FOMIX No. 97367.

#### 6. REFERENCIAS

- [1]. Fideicomiso de Fomento Minero (FIFOMI), Inventario físico de los recursos minerales de Agua Blanca, Hidalgo, 2004, 4.
- [2]. Coordinación General de Minería, Perfiles de Mercado del Caolín, 2007, 7-12.
- [3]. Servicio Geológico Mexicano, Departamento de Estadística Minera, Anuario Estadístico de la Minería Mexicana Ampliada 2009, 2010, 208-209.
- [4]. Freedonia Group Forecast, World Kaolin. Industry Study with Forecast for 2013, 2009, 1-3.
- [5]. Saikia N.J., Bharali D.J., Sengupta P., Bordoloi D., Goswamee R.L., Saikia P.C. Borthakur P.C.,

- App. Clay Sc., 2003, 24: 93– 103.
- [6]. Mathur S., J. Col. Int. Sci., 2002, 256: 153-158.
- [7]. Maynard N., Millman N., Iannicelli J., Cla. Cla. Min., 1969, 17: 59-62.
- [8]. Groudev S.N., Min. Met. Pro., 1999, 16: 19-28.
- [9]. Raghavan P., Chandrasekhar S., Sathy, Demodaran A.D., Int. J. Min. Pro., 1997, 50: 307-316.
- [10]. Raghavan P., Chandrasekhar S., Vogt V., Gock E., Suresh N., App. Clay Sc., 2007, 38: 32-42.
- [11]. Raghavan P., Chandrasekhar S., Vogt V., Gock E., Suresh N., App. Clay Sc., 2008, 42: 50-56.
- [12]. Zuquiang H., Liupiug P., J. SCUT., 1999, 6: 120-123.
- [13]. Acevedo-Peña P., Carreño-Contreras A. Y., Macias-Chacón J. F., Pedraza-Rosas J. E., Rev Lat. Met. Mat., 2009, 2: 859-868.
- [14]. Nagaraj D. R., Proceedings of Symp., Inc., Littleton, Co., 1999.
- [15]. Amorós J. L., Beltrán V., Sanz V., Jarque J. C., App. Clay. Sc., 2010, 49: 33-43.
- [16]. Loginov M., Larue O., Lebovka N., Vorobiev E., Col. Surf. A. Phy. Eng. Asp., 2008, 325: 64-61.
- [17]. Sastry N. V., Dave P. N., J. Surf. Det., 1999, 459-472.
- [18]. W. Pabst, K. Kunes, J. Havrda, E. Gregorova., J. Eur Cer Soc., 2000, 20: 1429-1437.
- [19]. Besra L., Sengupta D.K., Roy S.K., Ay P., Int. Min. Proc., 2002, 66: 203-232.
- [20]. Jayson G.G., McKeown I. P., Morris H., J. Phys.: Cond. Mat., 1989, 187-188.
- [21]. Mikhalev V.V., Vlasov A. S., Col. Surf. A. Phy. Eng. Asp., 2006, 63: 293-297.
- [22]. Novakov I. A., Dryabina S. S., Malysheva Zh. N., Navrotskii A. V., Kuptsov A. V., Col. J., 2003, 71: 97-103.
- [23]. Teo J., Liew W. K., Leong Y. K., Wat. Air Soil Pol. Foc., 2009, 9: 403-407.
- [24]. Sontum P.C., Nöevestad A., Fahlvik A. K., Gundersen H. G., Int. J. Pha., 1996, 128: 269-275.
- [25]. Grieves R. B., Bhattacharyya D., J. Am. Oil Chem. Soc., 1974, 44: 498-501.