

BLANQUEO DE ARCILLAS CAOLINÍICAS COLOR CAFÉ POR DISPERSION Y ASENTAMIENTO

F. LEGORRETA GARCÍA*, P. N. OLVERA VENEGAS, L. E. HERNÁNDEZ CRUZ,
F. SÁNCHEZ DE JESÚS, A. M. BOLARÍN MIRÓ

Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del
Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca – Tulancingo, Km 4.5 s/n, Mineral de la
Reforma, Hgo., C.P. 42184.

Correo electrónico de contacto*:
felegorreta@hotmail.com

ABSTRACT

This work shows a characterization study of treated kaolinitic clays in order to improve their bleaching. A composite of kaolinitic clays from different mines from Agua Blanca de Iturbide, Hidalgo (Mexico), were collected, processed and characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), size analysis particle (ATP) and chemical analysis coupled plasma (ICP). The mineral was processed by crushing, attrition and screening. Sieving of fine products were mixed vigorously with deionized water to 45 percent solids in wt. % adding 1 KgTon⁻¹ of dispersant. Subsequently, the pulp was diluted and settling to 20 percent solids, with the purpose of obtaining micron particles and finally a second settling was applied. The crystallographic study shown different minerals species such as iron sulfide (Fe₃S₄), titaniferrous oxide (Fe₂TiO₄), allotropic forms of quartz (SiO₂), magnetite (Fe₃O₄), calcite (CaCO₃) and kaolinite (Al₂O₃)₂(SiO₂).2(H₂O). The final concentrate shown contents of 0.52 wt. % Fe₂O₃ and 0.54 wt. % TiO₂. The whiteness index was 91.27% with an average particle size of 1.83 micrometers. A recovery of 63 wt. % was obtained.

Keywords: Kaolin; Bleaching; Settling.

RESUMEN

Este estudio muestra la caracterización de arcillas caoliniticas tratadas para incrementar su blancura. Arcillas caoliniticas, procedentes de diferentes minas del Municipio de Agua Blanca de Iturbide, Hidalgo (México), fueron recolectadas, procesadas y caracterizadas por difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB), análisis de tamaño de partícula (ATP) y análisis químico con plasma acoplado (ICP). El procesamiento consistió en la trituración del mineral, repulpado y cribado. Los productos finos de este último proceso (tamaños de partícula inferiores a 37 µm), fueron mezcladas con agua desionizada a 45 por ciento de sólidos en peso adicionando 1 Kg.Ton⁻¹ de dispersante 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 el material fino. Aplicando el proceso de asentamiento

se obtuvieron partículas en suspensión inferiores a 10 micrómetros. Al realizar el estudio cristalográfico se identificaron diferentes especies minerales tales como sulfuro de hierro (Fe_3S_4) y óxido titanoférreo (Fe_2TiO_4) así como formas alotrópicas del cuarzo (SiO_2), magnetita (Fe_3O_4), calcita (CaCO_3) y caolinita ($\text{Al}_2\text{O}_3)_2(\text{SiO}_2)_2(\text{H}_2\text{O})$. Mediante ICP se determinó la disminución de impurezas y por ende un incremento en la calidad del producto. Se obtuvo un concentrado final de 0.52% de Fe_2O_3 y 0.54% de TiO_2 , con un índice de blancura de 91.27% y una recuperación en peso de 63%.

Palabras claves: Caolín; Blanqueo; Asentamiento.

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 mineral caolín es un aluminio silicato hidratado ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y la composición química teórica es 46.54% de SiO_2 ; 39.50% de Al_2O_3 y 13.96% de H_2O ; cuyas aplicaciones industriales son amplias si el índice de blancura es superior al 90%. Los yacimientos de arcillas caoliníferas con cierta coloración son inmensos pero no están cuantificados y aquellos de caolín blanco son cada vez más escasos (1). Las arcillas de caolín contienen minerales tales como el cuarzo, la calcita, feldespatos, sulfuros y óxidos de hierro y titanio (2,3). En consecuencia, la capacidad de aplicación está limitada por la presencia de estas impurezas. Es necesario entonces buscar alternativas que permitan beneficiar el caolín beige y disminuir las impurezas contenidas. Por otra parte, la empresa Freedonia Group dedicada al estudio de la investigación de negocios en base a materia prima, realizó estudios estadísticos del consumo de caolín, y 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). El valor agregado del caolín radica en su blancura, de aquí que se han realizado grandes esfuerzos para estudiar diversos procesos de purificación durante varias décadas (5-12). Para el beneficio de las arcillas caoliníticas es necesario agregar agua, de tal forma que las pulpas de caolín deben ser ampliamente estudiadas.

El comportamiento de las pulpas de caolín ha sido reportado por diversos autores (13-21). En varios trabajos se ha demostrado que la carga superficial de la caolinita en suspensión es positiva en los bordes y negativa en los planos basales y que la dispersión de las partículas está íntimamente relacionada con la repulsión entre las mismas, debido al cambio de la carga positiva del borde a negativa, cuando se adiciona un dispersante a la solución (11-13, 15, 17). 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, se dispersan. Este comportamiento está muy relacionado con las propiedades reológicas de la suspensión (14, 17-22). 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. Los autores pusieron en evidencia, mediante imágenes de 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. Ésta es una etapa crucial debido a que los tamaños de las arcillas de caolín son muy finas, originando la formación de cúmulos de partículas, dentro de las cuales se quedan atrapadas otras, impidiendo el contacto mineral-reactivo.

El encontrar un método de blanqueo y purificación alternativo que no requiera una alta inversión aumentaría el valor comercial del caolín mexicano, haciéndolo competitivo ante los productores a nivel mundial y ayudaría a la economía nacional a bajar el déficit en la balanza comercial del caolín. Es por ello que el propósito de este trabajo es aplicar un método simple de procesamiento (tamizado, dispersión y asentamiento), que permita remover los contenidos de impurezas de las arcillas caoliníticas procedentes de Agua Blanca de Iturbide, Hgo., (México), cuyas características finales le permitan tener más aplicaciones industriales (21).

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Preparación mecánica del mineral

Se trabajó con un compuesto formado por mineral recolectado, mediante muestreo selectivo, de yacimientos caoliníferos provenientes de diferentes minas del municipio de Agua Blanca de Iturbide, Hidalgo (México). El procesamiento 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 en peso y atricionarlo, durante 15 minutos. La pulpa se pasó lentamente sobre la criba No. 400 de la serie Tyler con ayuda de agua corriente, obteniendo dos productos: el primero, con tamaño de partícula superior a 37 μm y el segundo, con diámetro nominal de partícula inferior a 37 μm . Las arenas del primer producto se separaron y desecharon. La arcilla de tamaños finos se filtró y posteriormente, se secó en una estufa a 120°C durante 8 horas.

Dispersión y asentamiento

Una vez la arcilla seca, se mezcló con agua destilada en una celda de flotación marca Denver, a fin de obtener una pulpa a 45% de sólidos en peso, adicionando 2 KgTon^{-1} de hexametáfosfato de sodio $\text{Na}_2(\text{Na}_4\text{P}_6\text{O}_{18})$, como dispersante,

agitando a 300 rpm durante 30 minutos. Al mineral disperso se le agregó agua desionizada a fin de diluirlo a 20% de sólidos en peso, posteriormente se vació en una probeta de 1000 mL y se dejó asentar durante 30 minutos. Se tomó una muestra de la solución dispersa a fin de realizar los análisis correspondientes y se dejó en reposo durante 15 días a temperatura ambiente. Finalmente se obtuvo un material asentado de color blanco y en la parte superior del vaso de precipitado, una solución de arcilla de color rojizo. Se realizó una medición del pH obteniendo un valor de 10. El producto superior fue separado por decantación muy lentamente con una jeringa, posteriormente ambos productos fueron secados para su caracterización. En la figura 1 se muestra un diagrama esquemático del procesamiento que se llevó a cabo así como los productos obtenidos.

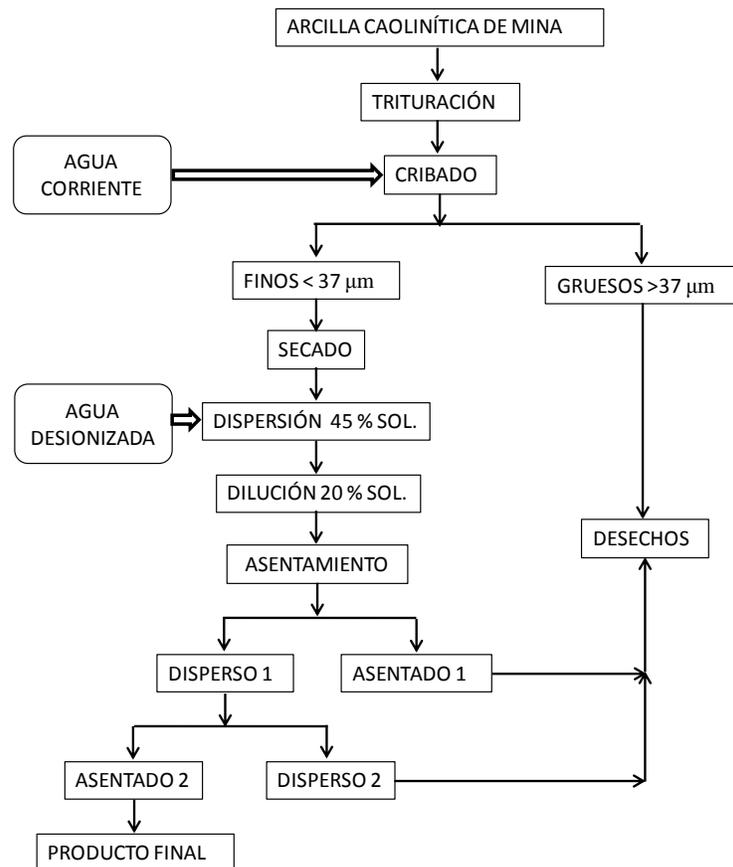


Figura 1. Diagrama de flujo del procedimiento experimental.

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 de partícula y el diámetro medio (D_{50}) se determinaron con un equipo de ATP Beckman & Coulter, modelo LS-13320. Se obtuvieron diagramas de difracción de cada uno de los productos obtenidos para su caracterización estructural con el equipo GBC marca MMA. Estos diagramas fueron elaborados con los datos

adquiridos en el intervalo de 10 a 60° (2 θ), con incrementos de 0.05°. En todos los experimentos se utilizaron radiaciones Cu-K α ($\lambda=1.5418$ Å).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Observaciones de MEB

En la figura 2 a) se presenta la micrografía de una muestra mineral de arcillas de caolín de finos de tamaño < 37 μm . Se observan aglomerados constituidos por la unión de numerosas partículas, este fenómeno es atribuido 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 no se reportan. En la figura 2 b) se muestra una ampliificación de la figura 2, observando las partículas con morfología laminar.

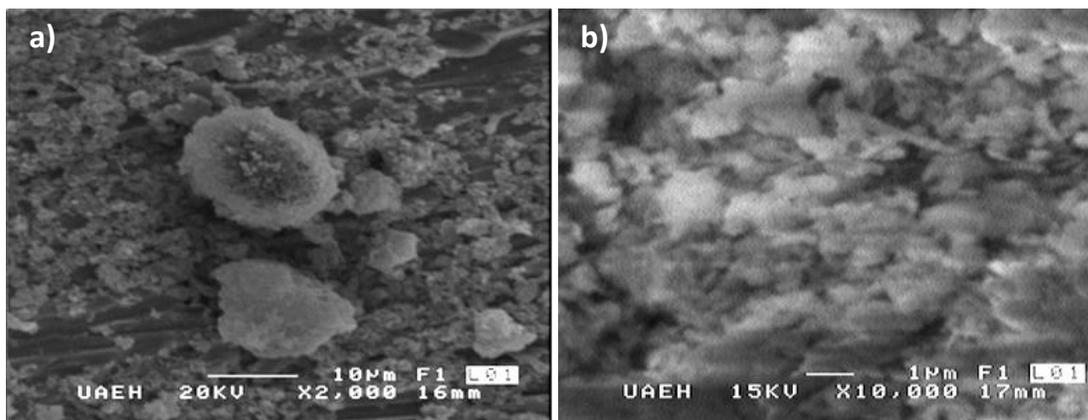


Figura 2. Imágenes de una muestra mineral de arcillas tamizadas de caolín de mina (finos a – 37 μm).

También es posible apreciar, que las partículas no se ordenan en una sola dirección, haciendo aglomerados del tipo “card house”, como reportaban algunos autores.

Análisis Cristalográfico

En la figura 3, 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 (Fe₃O₄), la griegita (Fe₃S₄) y óxidos de hierro y titanio (Fe₂TiO₄). En esta figura se aprecia como disminuyen las impurezas de las arcillas de caolín, conforme el procesamiento avanza. Esto significa que desde la primera separación por medio de tamizado, es posible efectuar una disminución de impurezas, principalmente de minerales tales como óxidos de Fe y SiO₂. Resalta además, que a una distancia interplanar de 30.5 grados (2 θ), haya una disminución importante y gradual en cada etapa para el

mineral de tridimita, el cual prácticamente desaparece en el difractograma del producto final llamado asentado 2. Para el caso del cuarzo, no se presenta una significativa disminución en las señales de difracción, prevaleciendo los picos característicos. Este comportamiento de la sílice sugiere que existen partículas de la fase tridimita de un tamaño tal, que pueden ser eliminadas por cribado y asentado; lo cual no se observa para el caso de la fase del mineral de cuarzo, cuyas partículas son posiblemente lo suficientemente pequeñas que pasan por el tamiz, y permanecen en suspensión.

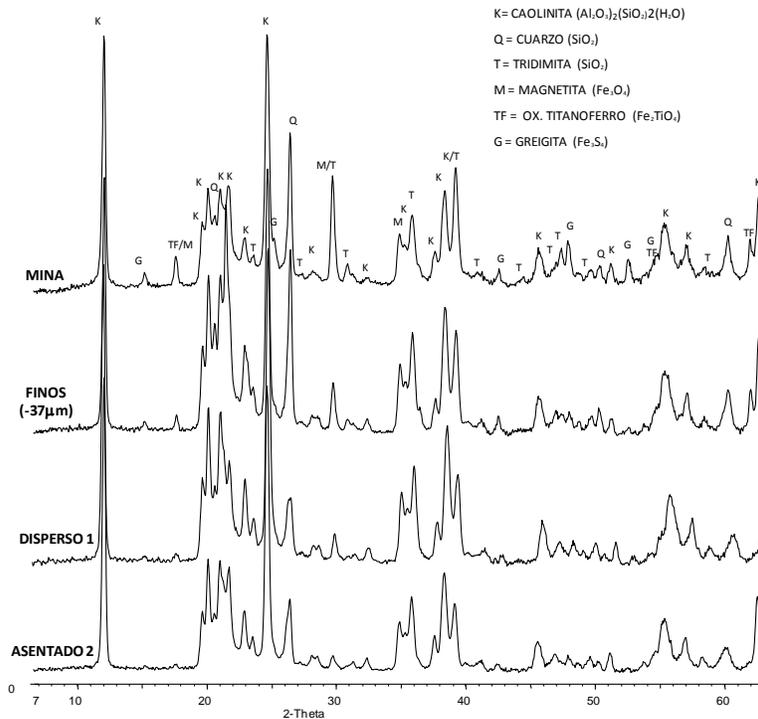


Figura 3. Difractogramas del mineral de caolín inicial y de los productos obtenidos en cada etapa de su beneficio.

Análisis químico e índice de Blancura

Los análisis químicos del mineral inicial y de los productos obtenidos en cada etapa de beneficio son mostrados en la Tabla 1. Se observa claramente una disminución gradual del contenido de Fe_2O_3 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_2 , la disminución más importante se presenta en la última etapa del proceso. Este hecho podría significar que los óxidos de Ti y Fe, poseen tamaños extremos, es decir por un lado, por medio del tamizado pueden ser parcialmente desechados, dado que son minerales con tamaños superiores a $37 \mu m$ 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.

Tabla I. Análisis químico por ICP e índice de blancura de los diferentes productos obtenidos.

PRODUCTO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Peso	Índice de Blancura
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Min. Mina	1.47	0.90	58.57	38.18	100.00	87.54
Finos (-37 μm)	1.30	0.83	56.12	37.98	79.87	89.42
Disperso 1	0.94	0.84	56.49	38.88	72.87	91.27
Asentado 2	0.52	0.54	57.02	38.12	63.00	91.75

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. Considerando estas cifras así como los minerales de cuarzo y tridimita detectada por DRX, se podría asumir que el exceso de SiO₂ es debido a partículas aisladas del mineral de sílice, principalmente en forma de tridimita.

Separación por tamaños

La primera separación por tamaños fue el tamizado con malla de abertura nominal de 37μm. 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 observa la formación en el fondo de la probeta de una capa 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 hay una dispersión correcta. Los resultados de la distribución de tamaños del producto disperso 1, se muestran en la figura 4. La curva revela que las partículas son inferiores a 10 μm. El tamaño promedio es de 1.83 μm, determinado por el equipo analizador de tamaños (ATP). Estos resultados son semejantes a aquellos obtenidos con el proceso de desarenado con ciclones reportado por Raghavan (11).

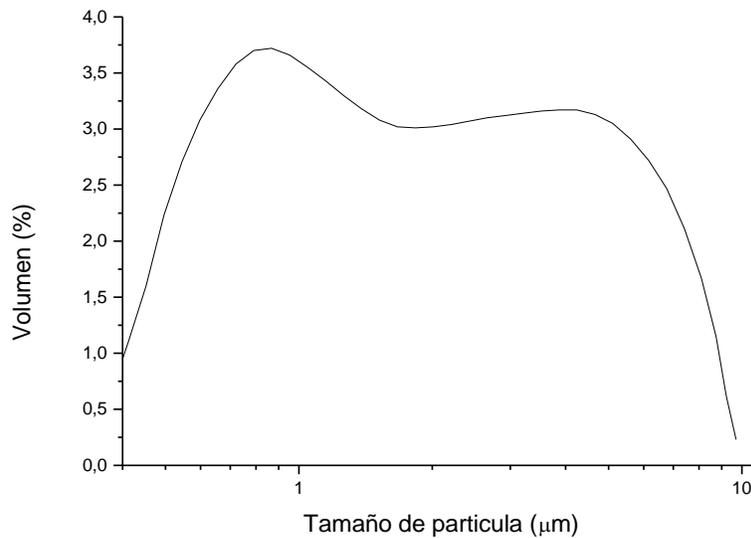


Figura 4. Distribución de tamaños de partícula del material disperso 1.

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 se dejó asentar en una probeta de 1L durante 5 días. Tras el paso del tiempo establecido, se observa que como en el proceso anterior, no se presenta ninguna interface sólidos–agua, de tal forma que se obtienen dos productos, la arcilla dispersa y la arcilla asentada, llamadas disperso 2 y asentado 2 respectivamente. El material disperso 2 se muestra de una coloración roja intensa. Los productos son separados por decantación y secados para su caracterización.

Se asume que la separación observada en la probeta está gobernada principalmente por el valor básico del pH de la pulpa y por los tamaños de las partículas. Se ha reportado que a valores de pH básicos, la carga de las partículas coloidales de óxido férrico es negativa (24). Los óxidos metálicos forman hidroxocomplejos, también de carga negativa. Algunos autores, han demostrado que el hexametáfosfato de sodio y mezclas de poliacrilamida, son fuertemente adsorbidos en los bordes positivos de las partículas de la caolinita (19, 20, 23). Teo et al., manifiestan que la quimisorción del dispersante sobre las partículas del mineral permite incrementar la carga negativa, debilitando la atracción electrostática entre estas (23). Lo anterior sugiere que los iones de óxido férrico e hidroxocomplejos metálicos (Fe, Ti, K, Ca), debido a su carga y tamaño, experimentan repulsión contra las demás partículas de la caolinita. De esta manera, las partículas de caolinita de mayor tamaño, sedimentan muy lentamente y desplazan a aquellas coloides que no sedimentan debido a su tamaño tan pequeño. Como consecuencia, las partículas coloidales (impurezas) son desplazadas a la parte superior de la probeta, por las partículas que si sedimentan. Grieves y Bhattachary demostraron que el óxido de hierro coloidal con cargas negativas, con un pH 8-10 da como resultado una separación eficiente al aplicar una flotación iónica, sin embargo a valores de pH ácidos, la

carga del óxido de Fe es positiva y los resultados de recuperación son deficientes (25).

CONCLUSIONES

En este trabajo fue posible caracterizar y blanquear arcillas caoliníticas provenientes del municipio de Agua Blanca de Iturbide, Hgo. (México), mediante los procesos de dispersión y asentamiento obteniéndose partículas inferiores a 10 μm , con un tamaño promedio de 1.83 μm . Se identificó por DRX la caolinita del tipo $(\text{Al}_2\text{O}_3)_2(\text{SiO}_2)2(\text{H}_2\text{O})$, así como la presencia de diferentes especies minerales contenidas como impurezas, tales como el sulfuro de hierro (Fe_3S_4), magnetita (Fe_3O_4), óxido titanoférreo (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 de 0.52 % de Fe_2O_3 y 0.54% de TiO_2 , con un índice de blancura de 91.27% y una recuperación en peso de 63%. La separación por tamaños y coloración en la probeta están gobernadas probablemente por el 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 y los coloides que no sedimentan son desplazados a la parte superior de la probeta.

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. Igualmente al Programa de Mejoramiento del Personal Académico, PROMEP de la SEP, a través de su apoyo a las Redes Nacionales.

REFERENCIAS

1. FIFOMI, “*Inventario físico de los recursos minerales de Agua Blanca, Hidalgo*”, pp. 4, (2004).
2. Coordinación General de Minería. Dirección General de Promoción Minera. “*Perfiles de Mercado del Caolín*”, pp. 7-12, (2007).
3. Departamento de Estadística Minera, “*Anuario Estadístico de la Minería Mexicana Ampliada*”, Servicio Geológico Mexicano, (2009).
4. Freedonia Group. “*World Kaolin. Industry Study with Forecast for 2013*”, Freedonia Group Forecast. pp.1-3. (2009).
5. N.J. Saikia, D.J. Bharali, P. Sengupta, D. Bordoloi, R.L. Goswamee, P.C. Saikia, P.C. Borthakur, “*Characterization, beneficiation and utilization of a kaolinite clay from Assam, India*”, App. Clay Sc., 24, pp. 93– 103 (2003).
6. S. Mathur, “*Kaolin flotation*”. J. Col. Int. Sci., 256, pp. 153-158 (2002).

7. N. Maynard, N. Millman, J. Iannicelli, "A method for remove titanium oxide impurities from kaolin", *Cla. Cia. Min.*, 17, pp. 59-62 (1969).
8. S.N. Groudev, "Biobeneficiation of mineral raw materials". *Min. Met. Pro.*, 16, pp 19–28 (1999).
10. P. Raghavan, Chandrasekhar, Sathy, A.D. Demodaran, "Value addition of paper coating grade kaolins by the removal of ultrafine colouring impurities". *Int. J. Min. Pro.*, 50, pp. 307-316 (1997).
11. P. Raghavan, S. Chandrasekhar, V. Vogt, E. Gock, N. Suresh, "Additional investigations on the separation of titaniferous impurities from kaolin by high shear pretreatment and froth flotation—Part I" , *App. Clay Sc.*, 38, pp. 32–42 (2007).
12. P. Raghavan, S. Chandrasekhar, V. Vogt, E. Gock, N. Suresh, "Additional investigations on the separation of titaniferous impurities from kaolin by high shear pretreatment and froth flotation — Part II" , *App. Clay Sc.*, 42, pp. 50–56 (2008).
13. H. Zuquiang, P. Liupiug, "Applications of Flocculant In Bleaching and Washing of Kaolin", *J. SCUT.*, 6, pp. 120-123 (1999).
14. P. Acevedo-Peña, A. Y. Carreño-Contreras, J. F. Macias-Chacón, J. E. Pedraza-Rosas, "Preparación de Suspensiones Acuólicas Coloidales Dispersas de Arcillas Montmorilloníticas", *Rev Lat. Met. Mat.*, 2, pp. 859-868 (2009).
15. D. R. Nagaraj, "Non-Sulfide Mineral Flotation: An Overview", *Proceedings of Symp., Inc., Littleton, Co.* (1999).
16. J. L. Amorós, V. Beltrán, V. Sanz, J. C. Jarque, "Electrokinetic and Rheological Properties of Highly Concentrated Kaolin Dispersions: Influence of Particle Volume Fraction and Dispersant Concentration", *App. Clay. Sc.*, 49, pp. 33-43 (2010).
17. M. Loginov, O. Larue, N. Lebovka, E. Vorobiev, "Fluidity of Highly Concentrated Kaolin Suspensions: Influence of Particle Concentration and Presence of Dispersant", *Col. Surf. A. Phy. Eng. Asp.*, 325, pp. 64-61, (2008).
18. N.V. Sastry and P.N. Dave, "Adsorption Behavior of Surfactant–Polyacrylamide Mixtures with Kaolin", *J. Surf. Det.*, 2, pp. 459-472 (1999).
19. L. Besra, D.K. Sengupta, S.K. Roy, P. Ay, "Flocculation and Dewatering of Kaolin Suspensions in the Presence of Polyacrylamide and Surfactants", *Int. Min. Proc.*, 66, pp. 203-232 (2002).
20. G. G. Jayson, I. P. McKeown and H. Morris, "Adsorption of Surfactants onto Kaolin", *J. Phys.: Cond. Mat.*, pp. 187-188 (1989).
21. V. V. Mikhalev and A. S. Vlasov, "Kaolins for Production of Sanitary Ceramics", *Col. Surf. A. Phy. Eng. Asp.*, 63, pp. 293-297 (2006).
22. I. A. Novakov, S. S. Dryabina, Zh. N. Malysheva, A. V. Navrotskii, and A. V. Kuptsov, "Regularities of Flocculation of Aqueous Kaolinite Dispersions with Binary Compositions of Cationic Polyelectrolytes", *Col. J.*, 71, pp. 97-103 (2003).
23. J. Teo & W. K. Liew & Y. K. Leong, "Clay, Phosphate Adsorption, Dispersion, and Rheology", *Wat. Air Soil Pol. Foc.*, 9, pp. 403–407 (2009).
24. P. C. Sontum, A. Nöevestad, A. K. Fahlvik and H. G. Gundersen, "Adsorption of poly(sodium(4)styrenesulfonate) on colloidal iron oxide particles", *Int. J. Pha.*, 128, pp. 269-275 (1996).

25. R. B. Grieves and D. Bhattacharyya, "*The foam separation of colloidal ferric oxide with an anionic and a cationic surfactant*", J. Am. Oil Chem. Soc., 44, pp. 498-501 (1974).