

INTERACCIÓN DE BROMURO CETILTRIMETILAMONIO CON LOS SITIOS SUPERFICIALES ACTIVOS DE LA CAOLINITA DURANTE LA FLOTACIÓN

INTERACTION OF BROMIDE CETYLTRIMETYL AMMONIUM WITH THE SITES SUPERFICIAL ACTIVES OF THE KAOLINITE DURING THE FLOTATION

ZORAIDA CHACÓN

Estudiante de Maestría en Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química

DIONISIO LAVERDE

Profesor Escuela de Ingeniería Química, PhD, dlaverde@uis.edu.co

JULIO PEDRAZA

Profesor Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Msc, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga

Recibido para revisar febrero 23 de 2007, aceptado Octubre 17 de 2007, versión final Diciembre 14 de 2007

RESUMEN: En el presente estudio, se investigó las interacciones entre superficies de caolinita y el colector bromuro cetiltrimetil amonio (CTAB), empleado en el proceso de flotación de la caolinita. Utilizando medidas de potencial zeta y flotación en tubo Hallimond, se confirmó que la flotación de la caolinita es dependiente del pH y de la concentración del colector. Las condiciones de mejor flotabilidad se presentan a $\text{pH}=4.1$ y $3.75 \cdot 10^{-4}$ M de CTAB. La interacción mineral/colector ocurre mediante un mecanismo adsorción/precipitación.

La espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) permitió determinar que los cationes de la amina forman enlaces fuertes, tipo puentes de hidrógeno, con los grupos silanol presentes en la superficie mineral. Se observa la evolución de bandas características de especies adsorbidas correspondientes a las vibraciones N-H, O-H, Si-OH y Si(Al)-O. La atracción de CTAB sobre la superficie de caolinita causa una reducción en las intensidades de las bandas correspondientes a las vibraciones OH y aparecen nuevas bandas en la región comprendida entre 3500 y 3700 cm^{-1} . Al trabajar con concentraciones del colector de $4.76 \cdot 10^{-4}$ M se aprecia la formación de estructuras micelares fuertes sobre la superficie de la caolinita y se observa un decrecimiento en la respuesta de flotación.

PALABRAS CLAVE: Caolinita, CTAB, Flotación, FTIR

ABSTRACT: En the present study, was investigated the interactions between kaolinite surfaces and the collector bromide cetyltrimethyl ammonium (CTAB), employee in the process of flotation of the kaolinite. Using measures of zeta potential and flotation in tube Hallimond, confirmed that the flotation of the kaolinite is dependent of the pH and of the concentration of the collector. The conditions of better flotability are presented to $\text{pH}=4.1$ and $3.75 \cdot 10^{-4}$ M of CTAB. The interaction mineral/collector happens by means of a mechanism adsorption/precipitation.

The infrared spectroscopy for transformed of Fourier (FTIR) it allowed to determine that the cations of the amine forms strong bonding, type bridges of hydrogen, with the groups present silanol in the mineral surface. The evolution of characteristic bands of species adsorbed corresponding to the vibrations N-H is observed, OR-H, If-OH and Si(Al)-O. The attraction of CTAB on the kaolinite surface causes a reduction in the intensities of the bands corresponding to the vibrations OH and new bands appear in the region understood between 3500 and 3700 cm^{-1} . When working with concentrations of the collector of $4.76 \cdot 10^{-4}$ M the formation of micelar structures strong it is appreciated on the surface of the kaolinite and a decrease is observed in the flotation answer.

KEYWORDS: Kaolinite, CTAB, Flotación, FTIR.

1. INTRODUCCIÓN

La caolinita es un aluminosilicato dioctaédrico tipo 1:1, que posee dos diferentes planos basales eléctricamente neutros [1], un plano basal que consiste de grupos siloxano tetraédricos –Si-O-Si, y otra superficie basal de octaedros (Al(OH)₃), en los cuales los oxígenos basales tienden a actuar como bases de Lewis: donan o aportan electrones formando enlaces con los complejos superficiales acuosos que se establecen durante el proceso de disolución del colector; por tal motivo se presenta la activación de los iones de carga opuesta, los cuales migran de acuerdo a factores como la carga y las interacciones hidrofóbicas que se establezcan [2-4].

Estudios electrocinéticos [5] y de flotación de caolinita con CTAB [6,7] muestran que el punto de carga cero (PZC) de la caolinita se presenta a pH= 4.3 y se observa que la flotabilidad de la caolinita decrece con el incremento del pH y, la presencia del PZC explicaría la existencia de puntos de inversión de carga (PRC) en las curvas potencial zeta-pH, condiciones en las cuales la microflotabilidad es máxima [8]. La flotación catiónica del mineral puede ser atribuida a la agregación o dispersión de la caolinita en varios intervalos de pH [9,10] debido a la diferencia en la carga natural de los planos basales y bordes de la superficie mineral [11,12].

Para determinar las interacciones entre superficies sólidas y moléculas orgánicas, se utilizan medidas espectroscópicas que proveen información referente a la formación de enlaces. Espectros IR de caolinita [13-16], establecen las asignaciones vibracionales para Si-O en 1114 cm⁻¹, Si-O-Si: 1032 cm⁻¹ Si-O-Al: 1008 cm⁻¹, Al₂O-H: 912 cm⁻¹ y O-H: 3620 cm⁻¹ las cuales son modificadas al presentarse adsorción de colectores tipo aminas. Se han realizado estudios mediante FTIR y XPS [17,18] para determinar la adsorción de alquilaminas de cadena larga sobre sillicatos (cuarzo y albita) lográndose establecer que la adsorción ocurre mediante un mecanismo de precipitación. Otros estudios han permitido observar las bandas características de especies adsorbidas [19], las cuales dependen del

número de enlaces fragmentados Al-O y Si-O por unidad de celda que se presentan cuando ocurre flotación de aluminosilicatos en presencia de colectores catiónicos. En el presente trabajo se estudió la química superficial de la caolinita a través de ensayos de flotación en tubo Hallimond y medidas de potencial zeta. Con el análisis espectral mediante FTIR se pudieron establecer los modos de adsorción del CTAB y los fenómenos ocurrientes en la interfase colector/mineral.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

La caolinita utilizada en esta investigación fue obtenida de la Mina Barroblanco, ubicada en el municipio de Oiba, departamento de Santander (Colombia). La muestra fue inicialmente sedimentada y caracterizada de acuerdo a su grado de humedad, distribución de tamaño de partícula y composición mineralógica. El análisis del tamaño de partícula fue realizado utilizando un SediGraph 5100 - Micromeritics que determina el tamaño de partícula basado en la Ley de Stokes; el diámetro promedio de partículas de la muestra fue de 40 μm. La composición química promedio del caolín presenta: 27.6% Al₂O₃; 64.49% SiO₂, 0.62% Fe₂O₃, 1.59% TiO₂, 4.85% K₂O, 0.26% CaO y 0.59%MgO, 6,98% de PPI. Con el análisis DRX se encontraron varias fases cristalinas cuya abundancia en cada una de las muestras se presenta como: SiO₂ (Cuarzo) > (K₃H₃O)Al₂Si₃AlO₁₀(OH)₂ (Illita) > Al₂(Si₂O₅)(OH)₄ (Caolinita) > K₂(Al_{3.74}Fe_{0.26})(Si₆Al₂O₂₀)(OH)₄ (Moscovita) > TiO₂ (Anatasa). Con el análisis SEM se estableció que el caolín presentaba desorden en las placas, característico de caolines duros, que son de grano fino y tienen altos contenidos de hierro y titanio (asociados a impurezas) [1].

Una sal de amonio cuaternaria del 99% de pureza, Bromuro de Cetiltrimetil amonio (C₁₉H₄₂N.Br) marca Aldrich Chem. Co se utilizó como colector. Para el ajuste de pH en los ensayos de potencial zeta y flotación se utilizó NaOH y HCl. Para todos los experimentos se utilizó agua de-ionizada con

una conductancia específica de 1.2 a 2,0 $\mu\text{S cm}^{-1}$.

2.2 Ensayos de Flotación

Los ensayos de flotación se llevaron a cabo en un Tubo Hallimond de capacidad de 100 ml. Se tomó 1 g de muestra de caolín y se agregó 100 ml de una disolución de colector de concentración predeterminada y se dejó en acondicionamiento por un tiempo de 8 minutos. Posteriormente la suspensión obtenida se transfirió al Tubo Hallimond y se procedió a realizar el ensayo de flotación durante 5 minutos, con un flujo de aire de 8 cc/min. El pH de experimentación osciló entre 3.5 y 5.0.

2.3 Mediciones de Potencial Zeta

El potencial zeta fue determinado utilizando un Zeta Meter Plus 3.0 Las soluciones fueron preparadas utilizando suspensiones al 0,01% en peso. Como electrolitos se utilizaron NaCl y KCl en concentraciones 10^{-3} M acondicionadas durante una hora a temperatura ambiente, en presencia de las muestras preparadas a diferentes pH.

2.4 Mediciones de FTIR

Los espectros infrarrojo se obtuvieron con un espectrómetro Shimadzu 8337, para su preparación las muestras de caolín se mezclaron con KBr en relación 1:5. Los espectros fueron medidos en el intervalo de longitud de onda de 400 a 4000 cm^{-1} con una resolución de 4 cm^{-1} .

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 Potencial Zeta

La Fig. 1 muestra que a valores de pH inferiores a 2 la carga superficial residual negativa del mineral se reduce y se presenta un

punto de inversión de carga (PCR). El punto isoelectrico del mineral, deducido mediante extrapolación de las curvas presentadas en la Fig. 1 se presenta a pH 1.85; este punto coincide con el obtenido utilizando KCl y NaCl como electrolitos indiferentes, éstos le dan mayor movilidad a los coloides y permiten verificar la obtención de puntos de inversión de carga.

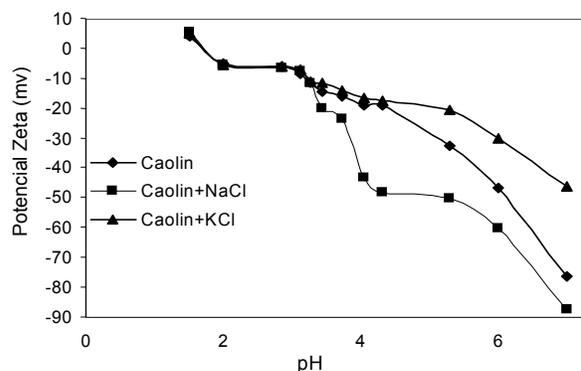


Figura 1. Potencial zeta de caolín como función del pH

Figure 1. Zeta Potential kaolin like function of the pH

En la Fig. 2 se aprecia la variación del potencial zeta a medida que se incrementa la concentración del colector. Aquí se observa la existencia de interacción entre la caolinita y los iones alquilamonio en solución, éstos son los responsables de dar hidrofobicidad a la superficie mineral. Se puede observar, en general que a valores de pH superiores a 3, la carga superficial residual del sólido se reduce notablemente y cambia completamente a positiva. La presencia de un PCR dependiente de la concentración del colector en medio ligeramente ácido, puede explicarse ya sea mediante adsorción específica de los iones $\text{RN}(\text{CH}_3)_3^+$ sobre sitios negativos y neutros de la caolinita, como también por adsorción de la amina neutra a través de puentes de hidrógeno con los sitios negativos o neutros del sólido.

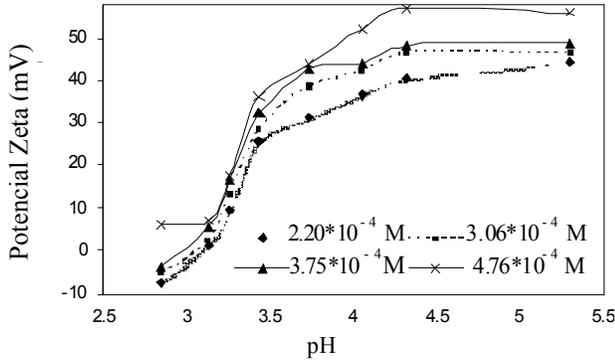


Figura 2. Efecto de la concentración de CTAB sobre el potencial zeta del caolín

Figure 2. Effect of the concentration of CTAB on the zeta potential of the kaolin

La concentración hemimicelar crítica (CHC), donde ocurre un rápido incremento en las curvas de potencial zeta, se presenta aproximadamente a pH 3.13 para todas las concentraciones de CTAB. No obstante, cuando se trabaja con concentraciones de $3.75 \cdot 10^{-4}$ M y $4.76 \cdot 10^{-4}$ M se exhiben incrementos más súbitos; estos resultados muestran buena correlación con los estudios de flotación para concentraciones de $3.75 \cdot 10^{-4}$ M; caso contrario ocurre a concentraciones de $4.76 \cdot 10^{-4}$ M, donde la respuesta en el porcentaje de recuperación de caolinita es mínimo.

Una de las mayores limitaciones para estudiar la adsorción de colectores sobre minerales ocuriente durante el proceso de flotación, es el conocimiento de la carga superficial, ya que ésta es influenciada por el pH y la ionización de grupos superficiales que alteran el pH de la solución; en este estudio se ajustó el pH al inicio de las pruebas de flotación, y se estableció que un pequeño incremento en la concentración del colector tuvo efecto en la carga superficial de la caolinita, observaciones que se evidenciaron en las medidas de potencial zeta a las diferentes concentraciones del colector. De esta manera se determina que la adsorción está sujeta a los cambios que se presenten en la densidad de carga del mineral, debido a la ocurrencia de capas adsorbidas electrostáticamente con las cabezas de grupo

del colector en solución, ya que, a medida que la carga superficial del mineral, que inicialmente era negativa pasa a ser positiva, lo cual indica que la adsorción del colector ha comenzado.

3.2 Flotación catiónica de la caolinita

La flotación de caolinita en función del pH de la suspensión y de la concentración del colector se presenta en la Fig. 3, allí se observa que el valor de pH donde se presenta mayor flotabilidad es pH 4.3, alcanzándose un porcentaje de recuperación del 82%. Cuando se disminuye la protonación de la suspensión se observa una disminución de la recuperación, esto debido a que en medios más alcalinos el mineral se comporta como intercambiador de aniones, y pierde la hidrofobicidad dada por las especies CTA^+ en solución que no alcanzan a compensar toda la carga residual negativa.

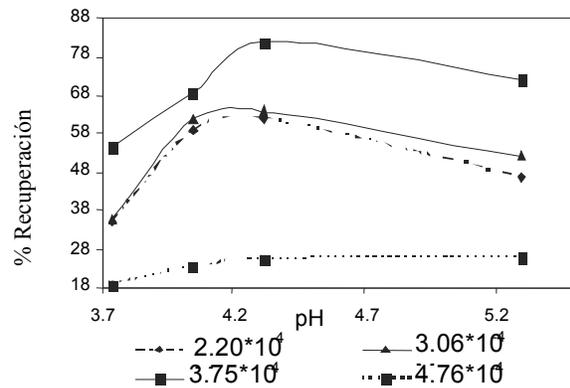


Figura 3. Efecto del pH y la concentración del colector (CTAB) en la flotabilidad de caolinita

Figure 3. Effect of pH and the concentration of the collector (CTAB) in the kaolinite flotability

La disminución en el porcentaje de recuperación, cuando se trabaja a pH menores a 3.7 ocurre debido a que hay una menor densidad de carga residual negativa de la superficie mineral, es decir, el pH se aproxima al punto isoeléctrico de la caolinita, entonces, para lograr la máxima recuperación se requiere una mayor concentración del colector, que pueda generar hidrofobicidad al mineral y así presentar una máxima flotabilidad. Cuando la

concentración del colector es de $4.76 \cdot 10^{-4}$ M se puede apreciar la formación de flóculos, lo cual señala que se ha conseguido la concentración micelar crítica en el sistema y en respuesta se observa la reducción del porcentaje de recuperación.

A concentraciones bajas e intermedias del colector ($2.20 \cdot 10^{-4}$ M y $3.06 \cdot 10^{-4}$ M) se puede afirmar que la hidrofobicidad del mineral depende fundamentalmente del enlace normal colector-superficie mineral, debido a que en estas condiciones las moléculas se adsorben independientemente, sin interacción lateral. Por otra parte, la cadena larga del colector influye en las interacciones laterales entre las cadenas hidrocarbonadas adsorbidas, en sitios contiguos; por ello, a concentraciones elevadas ($> 4 \cdot 10^{-4}$ M) la naturaleza electrostática de la interacción ion alquilamonio-mineral y la competencia entre dichos iones y los protones H_3O^+ , muy móviles, juegan un papel importante en la flotabilidad de la caolinita.

La caolinita es un mineral aluminosilicato dioctaédrico tipo 1:1 que posee dos diferentes planos basales: un plano basal que consiste de grupos siloxano tetraédricos $-Si-O-Si$ y la otra superficie basal consistente en octaedros $Al(OH)_3$. Los planos (00 $\bar{1}$) y (001) tienen diferentes propiedades superficiales; los grupos $Al(OH)_3$ que se encuentran en el plano (00 $\bar{1}$) tiene seis átomos de hidrógeno por unidad de celda con baja electronegatividad, estos átomos interactúan fácilmente con elementos electronegativos. En contraste el plano (001) posee seis átomos de oxígeno altamente electronegativos por unidad de celda, los cuales forman enlaces de hidrógeno con los iones positivos por interacciones electrostáticas. Los planos basales (00 $\bar{1}$) y (001) son constantemente cargados negativamente en medio ácido debido a las sustituciones isomorfas de Al^{3+} por Si^{4+} y Mg^{2+}/Fe^{2+} por Al^{3+} [20].

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, existen diversos modos de interacción de CTAB sobre las caras (00 $\bar{1}$) y (001) del mineral. En este estudio se estableció que la adsorción de CTAB sobre las caras de la caolinita puede ser conducida de acuerdo a las siguientes consideraciones: a) la interacción se realiza a través de los átomos de hidrógeno del grupo

amina y un átomo de oxígeno de la superficie de caolinita; b) sólo los átomos de hidrógeno de la amina y un átomo de oxígeno de la cara (00 $\bar{1}$) y (001) de la caolinita pueden moverse para interactuar; c) todos los átomos de la superficie mineral son fijos excepto los átomos de oxígeno que interactúan durante el proceso; d) la estructura geométrica de la amina es invariable durante el proceso y e) la distancia entre la amina y la superficie mineral decrece a medida que interactúan y se produce la adsorción.

Conforme a las anteriores consideraciones, se plantea que los átomos de oxígeno que quedan expuestos pueden tomar lugar entre las caras y los planos (00 $\bar{1}$) a través de enlaces de hidrógeno entre grupos $Al-O-H$, y de esta manera se espera que las caras (001) queden más expuestas. La naturaleza de las caras (001) donde se encuentran los grupos $Si-O$ y su interacción con la amina son las que dominan la superficie mineral y determinan la flotabilidad de la caolinita en este caso. En medio ácido los planos (001) se vuelven hidrofóbicos por la adsorción de CTAB y la caolinita exhibe una buena respuesta de flotación, tal como se muestra en los resultados presentados anteriormente para la flotación de la caolinita.

Al igual que el pH de la solución, la concentración de la amina juega un papel muy importante en la respuesta de flotación, ya que al aumentar un poco la concentración de CTAB, el medio se vuelve más alcalino y las partículas de caolín se dispersan; en este caso la interacción de los planos (00 $\bar{1}$) con CTAB se debilita por la fuerte interacción con las moléculas de H_2O que hacen que el plano (00 $\bar{1}$) sea más hidrofílico. La agregación hidrofóbica de partículas de caolinita puede tomar lugares entre las caras (001) con las moléculas de CTAB adsorbido por interacción entre las cadenas, quedando las caras hidrofílicas(00 $\bar{1}$) con grupos $Al-O-H$ expuestos, lo que explica que la flotación catiónica de la caolinita en medios menos ácidos disminuya a través de la adsorción/precipitación del CTAB. Esta interacción se presenta esquemáticamente en la Fig 4 en donde se aprecia una caolinita desordenada estructuralmente, factor que dificulta su flotabilidad.

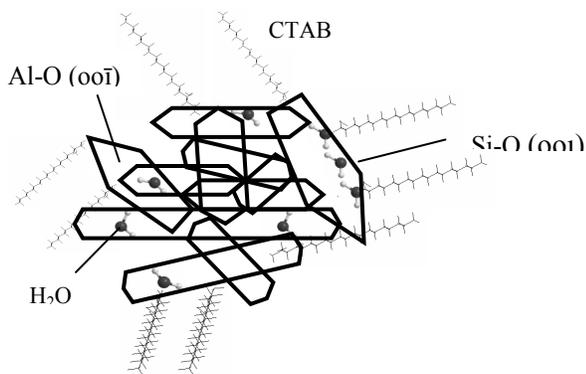


Figura 4. Interacción CTAB/Caolinita
Figure 4. Interaction CTAB/Kaolinite

3.3 Análisis espectral FTIR de CTAB adsorbido por caolinita

Los espectros del bromuro cetiltrimetil amonio y caolinita de manera individual, se presentan en la fig. 5. Para la caolinita, las vibraciones del enlace OH a 938 y 913 cm^{-1} , que en el espectro no se muestran bien marcadas, se refieren a los hidroxilos de la superficie y los hidroxilos internos [21]; se aprecia estiramiento simétrico Si-O-Si en la región de 1000,99 cm^{-1} , región en la cual también aparecen las vibraciones debidas a Si-O y Si-O-Al. Las bandas que aparecen a bajas frecuencias (790,76 y 754,12 cm^{-1}) pueden ser atribuidas a las vibraciones Si-Al-O y Al-O y la deformación de H_2O (agua adsorbida acompañada de transiciones rotacionales) se presenta en las frecuencias: 1634, 1824,53 y 1934,47 cm^{-1} . Los enlaces de H debidos al agua adsorbida aparecen en 3448,49 cm^{-1} , los OH Internos y los estiramientos debidos a los enlaces $\text{Al}_2\text{O-H}$ se encuentran en la región comprendida entre 3600 a 3700 cm^{-1} . Las bandas características de las cadenas alquílicas del CTAB aparecen como enlaces simétricos CH_3 en 1398,3 cm^{-1} . Las vibraciones de los enlaces CH_3^+ en el plano simétrico de enlace con CH_2 aparece en 1475,4 cm^{-1} , las vibraciones simétricas y antisimétricas para el CH_2 aparecen en 2848,7 y 2918,1 cm^{-1} respectivamente y la vibración antisimétrica $\text{N}(\text{CH}_3)_3^+$ en la región de 3014,5 cm^{-1} . Para los enlaces C-N se evidencian estiramientos alrededor de 960 y 1034,5 cm^{-1} .

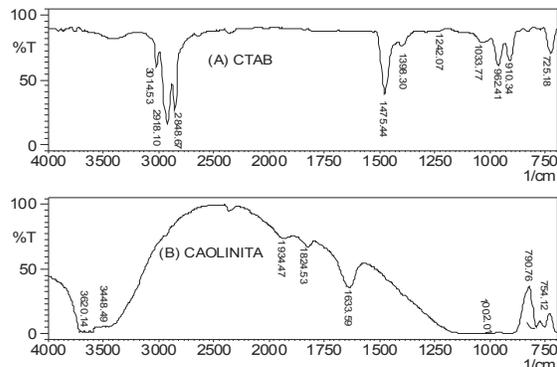


Figura 5. Espectros IR de (A) CTAB y (B) Caolinita concentrada mediante flotación
Figure 5. Spectra IR of (A) CTAB and (B) concentrated kaolinite by means of flotation

Las variaciones del espectro de la caolinita, causadas por la adsorción de CTAB, muestra la aparición de bandas a 2850 y 2920 cm^{-1} (Fig. 6), atribuidos a las vibraciones simétricas y antisimétricas de las cadenas C-C. De acuerdo a la configuración de las moléculas de CTAB sobre la superficie de caolinita, ya sea en forma de monómeros o micelas, las bandas de vibración aparecen a 2850.59 y 2920.1437 cm^{-1} ; se observa un decrecimiento en las bandas correspondientes al CH_2 con respecto al espectro del CTAB sólido mostrado en la Fig. 5.

La adsorción de moléculas de CTAB no solo afecta los modos de vibración de los grupos hidroxilo sino también los modos de vibración de los grupos Si(Al)-O, en donde este grupo es directamente enlazado con el catión CTAB^+ mediante interacciones electrostáticas. Se puede apreciar un efecto significativo en el espectro de la caolinita en el intervalo de longitudes de onda entre 500-1650 cm^{-1} .

Las bandas de vibración correspondientes al OH de la caolinita son fuertemente influenciadas por la presencia de moléculas de CTAB. En la Fig. 5 se asignan para los grupos hidroxilo de la caolinita longitudes de onda que van desde 3650 a 3700 cm^{-1} para los modos de vibración $\nu(\text{O-H})$; en la Fig. 6 se aprecia una reducción en las intensidades de estas bandas y se observa la aparición de nuevas bandas a 3622,07 cm^{-1} y 3699,21 cm^{-1} , la aparición de estas nuevas bandas de vibración $\nu(\text{O-H})$ indican la formación de enlaces de H

con especies N---O correspondientes a N_{CTAB}^+
 ----O_{Al-OH}

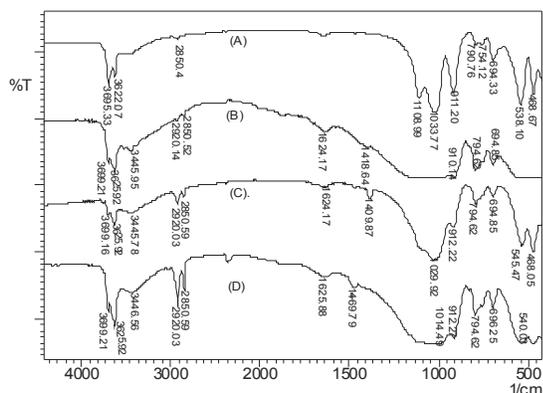


Figura 6. Espectros IR de caolinita flotada a diferentes concentraciones de CTAB: (A) $2.20 \cdot 10^{-4} M$, (B) $3.06 \cdot 10^{-4} M$, (C) $3.75 \cdot 10^{-4} M$ y (D) $4.76 \cdot 10^{-4} M$

Figure 6. Spectras IR of kaolinite floated to different concentrations of CTAB: (A) $2.20 \cdot 10^{-4} M$, (B) $3.06 \cdot 10^{-4} M$, (C) $3.75 \cdot 10^{-4} M$ y (D) $4.76 \cdot 10^{-4} M$

Influencia de la concentración del colector. A concentraciones del colector de $2.20 \cdot 10^{-4} M$ y $3.06 \cdot 10^{-4} M$ y pH de 3.5 (Fig. 6), se aprecia una ligera aparición de las bandas a 2850.52 y 2920.14 cm^{-1} , por lo que se considera que la configuración de las especies $CTAB^+$ se da en forma de monómeros. Para las demás concentraciones ($3.75 \cdot 10^{-4} M$ y $4.76 \cdot 10^{-4} M$), las bandas de vibración se fijan en 2851 y 2920 cm^{-1} , cuya configuración del colector se presenta entre monómeros y micelas, dada la intensidad de los picos.

En los espectros se observa el rompimiento de enlaces hidrógeno entre los grupos hidroxilo de uno de los planos basales y los oxígenos tetraédricos del siguiente plano. Los hidrógenos libres interactúan fácilmente con los grupos OH o $N(CH_3)^+$ y ocurre un corrimiento del pico a 3620.14 cm^{-1} , característico del grupo del caolín, con la aparición de un doblete a 3622.5 y 3699.21 cm^{-1} ; la posición relativa que ocupen estas bandas de vibración es indicativo de un incremento en el índice de cristalinidad o a un alto orden en la

conformación de los cristales de la caolinita. Además, al trabajar con concentraciones de $4.76 \cdot 10^{-4} M$ se observa la formación de estructuras micelares fuertes sobre la superficie de la caolinita con el subsecuente decrecimiento en la respuesta de flotación, ya que se alcanza la concentración micelar crítica y se observa la precipitación del colector.

4. CONCLUSIONES

La presencia de un punto de inversión de carga (PCR) en las curvas de potencial zeta vs. pH, dependiente de la concentración del colector en medio ácido, es debido a la adsorción específica de iones $RN(CH_3)_3^+$ sobre la caolinita. En los ensayos de flotación se observó una disminución en los porcentajes de recuperación del mineral a medida que se incrementó la concentración de CTAB, dada la naturaleza electrostática de la interacción ion alquilamonio-caolinita en los sitios laterales de las cadenas hidrocarbonadas adsorbidas, que no permite la movilidad de los iones hacia la superficie.

La agregación hidrofóbica de partículas de caolinita puede tomar lugares entre las caras (001) con las moléculas de CTAB adsorbido por interacción entre las cadenas, quedando las caras hidrofílicas (00 $\bar{1}$) con grupos Al-O-H expuestos, lo que explica que la flotación catiónica de la caolinita disminuya a medida que el pH aumente durante la acción del colector, lo cual puede ocurrir mediante un mecanismo de interacción adsorción/precipitación.

Los espectros FTIR en el presente estudio muestran que la adsorción de moléculas de CTAB afectan los modos de vibración de los grupos OH y de los grupos Si(Al)-O de la caolinita en la región de 1500 a 500 cm^{-1} . Las bandas de vibración correspondientes a OH de la caolinita son fuertemente influenciadas por la presencia de CTAB y revelan la formación de enlaces de H con especies N—O. A medida que se aumenta la concentración de CTAB surgen nuevas bandas en la región entre 2800 y 3700 cm^{-1} , lo cual indica la formación de estructuras micelares fuertes sobre la superficie de caolinita.

REFERENCIAS

- [1] VAN OLPHEN, H. An Introduction to Clay Colloid Chemistry. 2nd. Ed. Wiley, New York, 1977.
- [2] NEWMAN A.C.D., The Specific Surface of Soils determined by Water Sorption, *Journal of Soil Science.*, 34, 23 – 32 ,1983.
- [3] PECINA, E. Colectores para la flotación de minerales. [Msc. Tesis], México, Universidad Autónoma de México, 2003.
- [4] POPIEL W.J., Introduction to Colloid Science, Exposition Press, New York 1978.
- [5] DUKHIN, S y DERYAGUIN, B. Electrokinetic phenomena and calculation of zeta potential. *Surface and colloid science.*, 7, 345-353,1974.
- [6] BESRA, L; SENGUPTA, D.K. y ROY, S.K. Polymer adsorption: its correlation with flocculation and dewatering of kaolin suspension in the presence and absence of surfactants. *International Journal of mineral processing.* 66, 83-202, 2002.
- [7] HU, Y y LIU, X. Chemical composition and surface property of kaolins. *Minerals Engineering.* 16, 1279-1284, 2003.
- [8] MONTES, S; VALERO, E y SCMIDT, R. Estudio de los mecanismos de flotabilidad del cuarzo en presencia de sales de alquilamonio. *Boletín de la Sociedad Chilena de Química.* 45, No.1, 1999.
- [9] KAYA, Abidin y FANG, Hsai-Yang. The effects of organic fluids on physicochemical parameters of fine-grained soils. *Canadian Geotechnical Journal.* 37, 943-50, 2000.
- [10] ABBAS y M. SHARAD. *Journal of Colloid and Interface Science.* 271,124-127 2004.
- [11] YUEHUA H., WEI S., HAIPU, L. y XU, Z. The anomalous behaviour of kaolinite flotation with dodecyl amine collector as explained from crystal structure considerations. *International Journal of Mineral Processing.* 76, 163-172, 2005.
- [12] HERRINGTON, T.M., CLARKE, A.Q. WATTS, J.C. The surface charge of kaolin. *Colloids and Surfaces.* 68, 161-169, 1992.
- [13] QTAITAT, M y AL-TRAWNEH. Characterization of kaolinite of the Baten El-Ghoul region/south Jordan by infrared spectroscopy. *Spectrochim Acta Part A.* 61, 1519-1523, 2005.
- [14] M.J. WILSON. *Clay Mineralogy: Spectroscopic and Chemical Determinative Methods*, Chapman and Hall, London, 1994.
- [15] COLTHUP, N.B., DALY, L.H., WIBERLEY, S., *Introduction to Infrared and Raman Spectroscopy*, Academic Press, Oxford, 1990.
- [16] V.C. Farmer, *The Infrared Spectra of Minerals*, Mineralogical Society, London, 1974.
- [17] CHERNYSHOVA I. V., HANUMANTHA R. y VIDYADHAR, A. Interaction Long-Chain Alkyl Amines on Silicates: Quartz. *A Spectroscopy Study. Langmuir.* 16, 8071- 8084, 2000.
- [18] CHERNYSHOVA I. V., HANUMANTHA R. y VIDYADHAR, A. Interaction Long-Chain Alkyl Amines on Silicates: Albite. *A Spectroscopy Study. Langmuir.* 16, 775-785, 2001.
- [19] QIN et al. Mechanism of flotation in amines. *Applied Clay Science.* 12, 321-326, 2001. [20] HU, Y; LIU, X y XU, ZHENGHE. Role of cristal structure in flotation separation of diaspore from kaolinite, pyrophyllite and illite. *Minerals Engineering.* Vol. 16, p:219-227, December, 2003.
- [21] FROSWT, R.L., MAKO, E., KRISTOF, J., KLOPROGGE J.T. Characterization Spectroscopy the Alkyl Amines. *Spectrochim Acta Part A.* 58, 2894-2897, 2002.