

Influencia de la relación masa ácido oxálico: masa silicato de sodio en el blanqueamiento electroquímico de caolín. Influence of the oxalic acid: sodium silicate mass ratio on the electrochemical bleaching of kaolin.

M.F Muñoz-Torres ^a, P.A Sosa-Trápala ^a, V.E Reyes-Cruz ^{a,*}, G.A Maldonado-Bautista ^a, F. Legorreta-García ^a,
E.M Rodríguez-Vigueras ^a.

^a Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

El caolín blanco es la materia prima de muchos productos industriales pero las reservas de caolín blanco se están agotando por lo que el blanqueamiento electroquímico de caolín es una alternativa para resolver esta problemática. Es por ello que la finalidad de esta investigación es el blanqueamiento del caolín beige fijando la velocidad de la reacción de reducción electroquímica imponiendo una corriente de -0.7 A y variando la concentración del ácido oxálico: dispersante de silicato de sodio para determinar cómo influye la variación de la relación de ácido oxálico: dispersante de silicato de sodio en el blanqueamiento del caolín. Los resultados indicaron un incremento del índice de blancura de caolín de mina en las relaciones de masa ácido oxálico: masa dispersante de silicato de sodio: 3g/0.5g, 5g/0.5g y 6g/0.7g con valores de 64.2%, 69.9% y 65.8% respectivamente.

Palabras clave: caolín, electrolisis, blanqueamiento.

Abstract

White kaolin is the raw material for many industrial products; however, high-purity kaolin reserves are being depleted. Electrochemical bleaching has therefore emerged as an alternative to address this issue. Therefore, the objective of this research is the bleaching of beige kaolin by controlling the rate of the electrochemical reduction reaction by imposing a current of -0.7 A and varying the concentration of oxalic acid and sodium silicate dispersant mass, in order to determine how changes in the oxalic acid-to-sodium silicate dispersant ratio influence the bleaching of kaolin. The results showed an increase in the whiteness index of mined kaolin for ratios of 3 g/0.5 g, 5 g/0.5 g, and 6 g/0.7 g, reaching values of 64.2%, 69.9%, and 65.8%, respectively.

Keywords: kaolin, electrolysis, bleaching.

1. Introducción

En México existe una amplia variedad de yacimientos minerales de caolín. De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano, los estados de Chihuahua, Zacatecas, Jalisco, San Luis Potosí, Querétaro y Hidalgo se encuentran entre los principales productores de este mineral, como se muestra en la **Figura 1** [1]. Las reservas de caolín en diversas zonas del país se estimaron en 104.7 millones de toneladas [2]. La mayoría de estas reservas de caolines presentan diferentes colores debidos principalmente a la presencia de Fe en su composición.

El caolín es un mineral altamente utilizado como materia prima en las industrias cerámica, papelera y de pinturas, entre otras, debido a sus propiedades: baja abrasividad, estructura laminar, fácil dispersión, buena cobertura en diversas superficies, alta adherencia y su color naturalmente atractivo [3], [4], [5]. Sin embargo, las reservas de caolín blanco de alta pureza se están agotando, quedando principalmente yacimientos con impurezas de hierro que generan tonalidades que van del rojo al beige.

*Autor para la correspondencia: reyescruz16@yahoo.com

Correo electrónico: mu467743@uaeh.edu.mx (Mary Fher Muñoz Torres), so423921@uaeh.edu.mx (Pedro Antonio Sosa Trápala), reyesacruz16@yahoo.com (Víctor Esteban Reyes Cruz), ma484938@uaeh.edu.mx (Gustavo Andres Maldonado Bautista), felegorreta@hotmail.com (Felipe Legorreta García), ro484941@uaeh.edu.mx (Esau Moises Rodríguez Vigueras).

Existen diversos procesos para el blanqueamiento del caolín; sin embargo, muchos de ellos requieren condiciones muy específicas como la adecuada preparación de la suspensión, el control de parámetros de lixiviación, viscosidad, conductividad y acidez, así como el uso de reactivos determinados.

Estos procesos convencionales, particularmente la lixiviación química, suelen operar a temperaturas elevadas (hasta 90 °C), tiempos prolongados de reacción y requieren un control estricto de variables fisicoquímicas, lo que incrementa el consumo energético y dificulta su escalamiento industrial. En contraste, el blanqueamiento electroquímico permite operar a temperatura ambiente y ofrece un control directo de la velocidad de reacción mediante la corriente aplicada, lo que lo convierte en una alternativa potencialmente más eficiente y sostenible.

Por ello, aún se investigan alternativas más eficientes y sostenibles para su blanqueamiento.

En 2010 Pérez et al. indicaron que cuando se realiza una lixiviación a 90 °C con una solución de ácido oxálico de 0.4 M, se logró eliminar casi todo el hierro que había en la arcilla (cerca del 98 %), logrando de esta manera un blanqueo efectivo del material [6]. De manera similar, Barros-Daza evaluó el blanqueamiento de caolín a escala de laboratorio, con base en un desarrollo teórico, analizando la remoción de óxidos de hierro sobre la superficie del mineral mediante diferentes concentraciones de ácido oxálico. Los resultados mostraron que, para concentraciones de 0.15 M, 0.015 M y 0.95 M, las remociones de hierro fueron de aproximadamente 72.2 %, 26.7 % y 90.8 %, mientras que los índices de blancura alcanzados fueron de 90.2 %, 83.8 % y 97 %, respectivamente [7].



Figura 1. Geología de rocas en el país, marcando la ubicación de productores de caolín. (Servicio Geológico Mexicano, SGM).

El blanqueamiento de arcillas caoliníticas mediante procesos electroquímicos se ha identificado como una opción viable para obtener caolín blanco apto para las industrias de transformación. Investigaciones previas han demostrado que las partículas micrométricas de caolín reaccionan de manera efectiva bajo procedimientos electroquímicos reductores, permitiendo la reducción de las especies de hierro presentes en el mineral [8], [9].

Otra investigación estudió la geometría y optimización de la posición y el tamaño de los electrodos del proceso de blanqueamiento de caolín mediante simulaciones en COMSOL Multiphysics, analizando la distribución del potencial eléctrico y de la densidad de corriente. Los resultados indicaron que colocar el ánodo en posición paralela respecto al cátodo y reducir su tamaño de ánodo mejora la distribución de la densidad de corriente sobre el cátodo y en consecuencia

aumenta la eficiencia en la eliminación de hierro por depósito electroquímico [10].

A pesar de que hay investigaciones del blanqueamiento de caolines, no hay investigaciones que seguían la cinética de este proceso electroquímico. Es por ello que en esta investigación se estudiar el efecto de la variación de la de ácido oxálico y del dispersante de silicato de sodio en el proceso de blanqueamiento de caolín al fijar la velocidad de transformación de masa reducida de Fe presente en el caolín al imponer una corriente de -0.7 A durante 4 horas de electrolisis.

2. Metodología

El blanqueamiento de caolín por electrolisis se lleva a cabo en una celda electroquímica equipada con un cátodo de latón y un ánodo de grafito como se muestra en la **Figura 1**. En donde se impone una corriente de -0.7 A durante 4 horas con una fuente de poder Hantek de 6.5A de capacidad en una solución electrolítica de 20 g de caolín, 50 mL de agua desionizada con variaciones de 3, 5 y 6 g de ácido oxálico y de dispersante de silicato de sodio de 0.5, 0.7, 1 y 1.2 g.

Es importante mencionar que cantidad de caolín utilizada en esta investigación es la requerida para llevar a cabo estudios electroquímicos en vasos de 100 mL (escala de laboratorio) y la relación de ácido oxálico: dispersante es acorde a los valores que indica la investigación de la patente de blanqueamiento de caolín donde se fija el potencial de celda en el arreglo electroquímico [11]. La corriente elegida en esta investigación corresponde a la observada en el arreglo electroquímico cuando se impone un potencial constante de 4 V con los parámetros experimentales de una relación de ácido oxálico y dispersante en escala del vaso de 100 mL. También es importante mencionar que el dispersante de silicato es ampliamente utilizado por su comportamiento reológico de las partículas de caolín sometida a cambios electroquímicos [12] para mantener una suspensión estable (reducir aglomeración y sedimentación).

En las mediciones del índice de blancura se realizó en Espectrometro-UV-OcenView modelo-USB4000-y-un software Ocean View 1.4, 2014 las cuales fueron evaluadas por triplicado para tener un promedio y erradicar el margen de error en las lecturas.

Utilizando un diagrama Pourbaix de la literatura [13] para determinar la especie que se va a reducir o eliminar electroquímicamente del caolín beige. Seguido de los estudios de índice de blancura, pH y masa removida del Fe presente en el caolín con la finalidad al llevar a cabo el proceso electroquímico de blanqueamiento de caolín

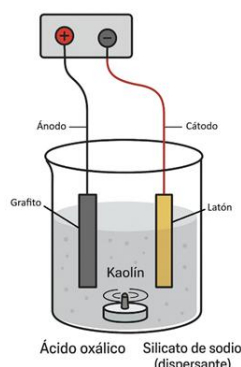


Figura 2. Esquema del experimento (Arreglo electroquímico).

Índice de blancura

El índice de blancura (WI) se determinó mediante espectrofotometría UV-Vis utilizando un equipo OceanView USB4000, midiendo la reflectancia difusa en el rango visible. Los valores fueron obtenidos por triplicado y promediados para asegurar reproducibilidad.

Hierro recuperado

La cantidad de Fe recuperado se determinó mediante la medición de la masa lixiviada y masa del depósito metálico obtenido en el cátodo después del proceso electroquímico.

3. Discusión y resultados

Con el fin de interpretar la especiación del hierro en el sistema electroquímico, se presenta en la Figura 3 un diagrama de Pourbaix de las especies Fe–oxalato reportado en la literatura [13]. Este diagrama permite identificar las regiones de estabilidad de las especies de Fe (III) y Fe (II) en función del pH y el potencial aplicado.

Es importante señalar que las concentraciones de Fe y ácido oxálico consideradas del diagrama de Pourbaix de la literatura son 0.35 g de Fe y 3.6 g de Ácido Oxálico. Mientras que en este trabajo el caolín contiene 0.45 g de Fe y se utilizan 3, 5 y 6 g de Ácido Oxálico. Por lo cual este diagrama de la literatura se puede utilizar para predecir el comportamiento de esta investigación.

En la Figura 3 se muestran el diagrama de Pourbaix de las especies de Oxalato de Fe (II) y Fe (III) tomado de la literatura [13] en un intervalo de potencial de -2 a 2 V con una ventana de pH de 0 a 14.

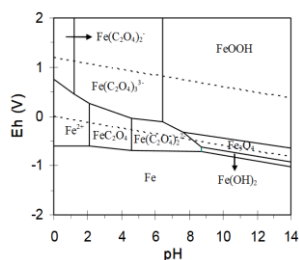


Figura 3. Diagrama de Pourbaix de las especies de Oxalato de Fe y Fe tomado de la literatura en un intervalo de potencial de -2 a 2 V con una ventana de pH de 0 a 14.

En la Figura 3 se observa que el intervalo de 0 a 6.5 de pH están presentes las especies de oxalato de hierro, también se aprecia que las especies de Fe (III): $\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_2^-$ y $\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3^{3-}$ se reducen a las especies de Fe (II): Fe^{2+} , FeC_2O_4 y $\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_2^{2-}$ para finalmente reducirse a su estado metálico Fe^0 . Además, se observa que en la reducción de las especies de Fe (II) a Fe^0 está presente la reacción secundaria de evolución de $\text{H}_2(\text{g})$ (línea punteada que inicia en el potencial 0).

En la Figura 4 se muestra el índice de blancura medido en muestras tratadas con diferentes proporciones de masa ácido oxálico: masa dispersante de silicato de sodio, mostrando el efecto de la formulación sobre las propiedades ópticas del caolín.

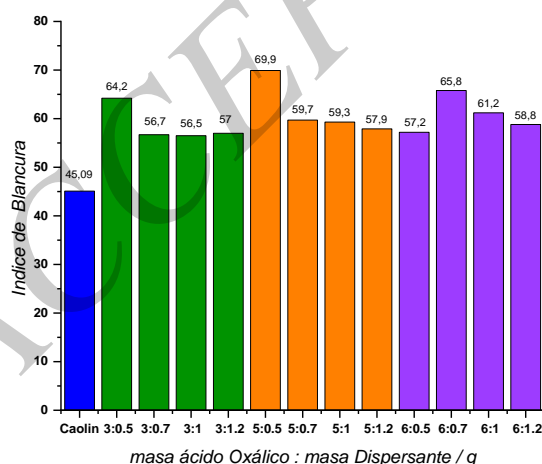


Figura 4. Índice de blancura medido en muestras tratadas con diferentes proporciones de masa ácido oxálico: masa dispersante de silicato de sodio, mostrando el efecto de la formulación sobre las propiedades ópticas del caolín.

En la Figura 4 se observa que el índice de blancura del caolín de mina que se utilizara en el proceso de blanqueamiento electroquímico es de 45.09%. También se aprecia en la Figura 4 que en la concentración de 3 g de ácido oxálico que conforme se incrementa la concentración de dispersante de silicato de sodio el índice de blancura de caolín utilizado en el proceso electroquímico disminuye. Cuando se utiliza 3 g de ácido oxálico y 0.5 g de dispersante de silicato de sodio, que guardan una relación entre ellos de 6, el índice de blancura es de 64.2 %; en el caso 3 g de ácido oxálico y 0.7 g de dispersante de silicato de sodio con relación entre ellos de 4.28, el índice de la blancura es de 56.7 %; mientras que en el caso 3 g de ácido oxálico y 1 g de dispersante de silicato de sodio con relación entre ellos de 3, el índice de la blancura es de 56.5 % y finalmente en el caso 3 g de ácido oxálico y 1.2 g de dispersante de silicato de sodio con relación entre ellos de 2.5, el índice de la blancura es de 57 %.

Además, en la Figura 4 se observa el mismo comportamiento de disminución del índice de blancura del caolín conforme se incrementa la concentración de dispersante de silicato de sodio en la concentración de 5 g de ácido oxálico. Cuando se utiliza 5 g de ácido oxálico y 0.5 g de dispersante de silicato de sodio con una relación entre ellos de 10, el índice de blancura es de 69.9 %; en el caso 5 g de ácido oxálico y 0.7 g

de dispersante de silicato de sodio con relación entre ellos de 7.14, el índice de la blancura es de 59.7 %; mientras que en el caso 5 g de ácido oxálico y 1 g de dispersante de silicato de sodio con relación entre ellos de 5, el índice de la blancura es de 59.3 % y con 5 g de ácido oxálico y 1.2 g de dispersante de silicato de sodio con relación entre ellos de 4.17, el índice de la blancura es de 57.9 %.

Este comportamiento de la disminución del índice de blancura cuando utilizan 3 y 5 g de ácido oxálico y se incrementa la cantidad de silicato de sodio, es atribuido a que la especie de oxalato de Fe (III) que se reduce en el proceso electroquímico es $\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3^{3-}$. Lo cual es debido a que hay mayor cantidad de iones silicato (SiO_3^{2-}) que reaccionan con el agua para formar H_2SiO_3 y iones hidroxilo OH^- que causan el desplaza el pH a valores más básicos; donde está el predominio de la especie $\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3^{3-}$ que requiere de un mayor potencial de reducción que la especie $\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_2^-$ a Fe^{2+}

Finalmente, en la **Figura 4** se observa también que cuando se utilizan 6 g de ácido oxálico se tiene una disminución del índice de blancura del caolín conforme se incrementa la concentración de dispersante a partir de 0.7g de dispersante de silicato de sodio, debido a que la especie que se reduce es $\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3^{3-}$. Cuando se utiliza 6 g de ácido oxálico y 0.5 g de dispersante de silicato de sodio, con una relación entre ellos de 12, el índice de blancura es de 57.2%; en el caso 6 g de ácido oxálico y 0.7 g de dispersante de silicato de sodio con relación entre ellos de 8.57, el índice de la blancura es de 65.8 %; en el caso 5 g de ácido oxálico y 1 g de dispersante de silicato de sodio con relación entre ellos de 6, el índice de la blancura es de 61.2 % y con 5 g de ácido oxálico y 1.2 g de dispersante de silicato de sodio con relación entre ellos de 5, el índice de la blancura es de 58.8 %. Este comportamiento de tener un menor índice de blancura cuando el dispersante de silicato de sodio es de 0.5 g es atribuido a que la especie de oxalato de Fe (III) que se reduce en el proceso electroquímico es $\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_2^-$, mientras que en las concentraciones de 0.7 a 1.2 g se reduce la especie de oxalato $\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3^{3-}$. Lo cual es debido a que en 0.5 g de silicato de sodio hay menor cantidad de iones silicato (SiO_3^{2-}) y mayor cantidad de H^+ proveniente de la disociación de ácido oxálico $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ que favorecen el predominio de la especie $\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_2^-$ donde se requiere de un menor potencial para reducirlo a Fe^{2+} .

Los resultados hasta este momento con las relaciones de masa ácido oxálico- masa dispersantes de silicato de sodio de esta investigación indican que en relaciones iguales o menores a 10 la especie que se reducen en el proceso de blanqueamiento de caolín es la de oxalato de $\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3^{3-}$. Es importante mencionar que solo en la relación ácido oxálico- masa dispersantes de silicato de sodio de 12 (6 g de ácido oxálico y 0.5 g) la especie que se reducen es $\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_2^-$, debido a lo descrito en el párrafo anterior.

En la **Figura 5** se muestra la variación del pH en función de la relación masa ácido oxálico: masa dispersante de silicato de sodio antes y después del proceso electroquímico.

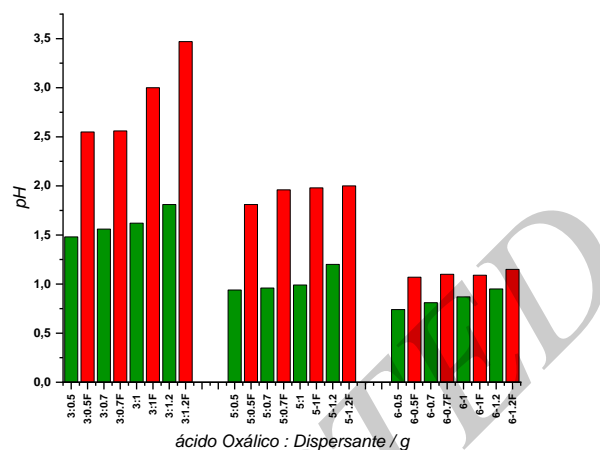


Figura 5. Variación del pH en función de la relación masa ácido oxálico: masa dispersante de silicato de sodio antes y después del proceso electroquímico.

En la **Figura 5** se observa que conforme se incrementa la cantidad de ácido oxálico ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$) el pH inicial (barras verdes) de la solución electrolítica de caolín se hace más ácido debido a mayor presencia de H^+ proveniente de este reactivo ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$). También se aprecia en todas las concentraciones de ácido oxálico que conforme se incrementa la cantidad de dispersante de silicato de sodio, el pH inicial de la solución electrolítica de caolín se hace menos ácido. Este comportamiento se atribuye a la naturaleza básica del silicato de sodio, el cual en solución acuosa genera especies como SiO_3^{2-} que reaccionan con el agua produciendo iones OH^- , incrementando así el pH del medio.

Cuando se utiliza 3 g de ácido oxálico y se incrementa el dispersante de silicato de sodio el pH inicial va de 1.48 a 1.81; para 5 g de ácido oxálico y se incrementa el dispersante de silicato de sodio el pH inicial va de 0.94 a 1.2, mientras que para 6 g de ácido oxálico y se incrementa el dispersante de silicato de sodio el pH inicial va de 0.74 a 0.95.

Por otra parte, en la **Figura 5** se aprecia que los pH finales (barras rojas) en todas las concentraciones de ácido oxálico y dispersante de silicato de sodio son menos ácidos respecto a los pH iniciales (barras verdes). Cuando se utiliza 3 g de ácido oxálico y se incrementa el dispersante de silicato de sodio el pH final va de 2.55 a 3.47; para 5 g de ácido oxálico y se incrementa el dispersante de silicato de sodio el pH inicial va de 1.81 a 2, mientras que para 6 g de ácido oxálico y se incrementa el dispersante de silicato de sodio el pH inicial va de 1.07 a 1.15. Este comportamiento de tener pH finales menos ácidos es atribuido a que se está llevando a cabo: i) la reducción de la especie de oxalato de Fe (III) que da lugar a una mayor presencia de la especie (C_2O_4) $_2^{2-}$ y ii) una mayor evolución de hidrógeno de la solución electrolítica del caolín que da lugar a más especie OH^- .

Los pH finales de la **Figura 5** también indican que cuando se utiliza la concentración de 3 g de ácido oxálico se está formando la especie insoluble de F(II): $\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_2$ que ocasiona menos masa removida de Fe del caolín.

En la **Figura 6** se muestra la comparación de la masa de Fe^0 recuperado bajo distintas proporciones masa ácido oxálico: masa dispersante de silicato de sodio.

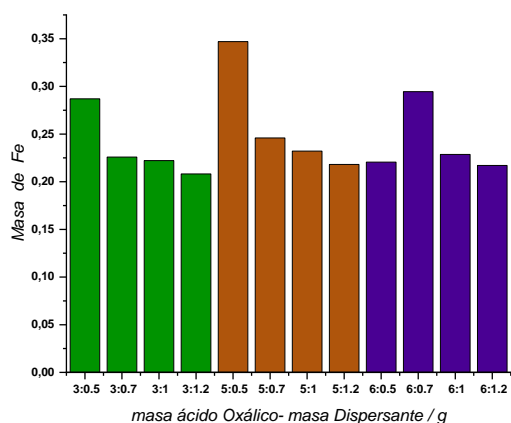


Figura 6. Comparación de la masa de Fe0 recuperado bajo distintas proporciones masa ácido oxálico: masa dispersante de silicato de sodio.

En la **Figura 6** se observa que la masa de Fe removida del caolín utilizado en el proceso electroquímico para todas las concentraciones de ácido oxálico y dispersante de silicato de sodio está en el mismo orden de magnitud. En la concentración de 3 g de ácido oxálico se obtiene 0.287 g, 0.226 g, 0.222 g y 0.208 g de Fe cuando se utiliza 0.5 g, 0.7 g, 1 g y 1.2 g de dispersante de silicato de sodio respectivamente. Mientras que en la concentración de 5 g de ácido oxálico la masa de Fe removida del caolín es 0.347 g, 0.246 g, 0.232 g y 0.218 g cuando se utiliza 0.5 g, 0.7 g, 1 g y 1.2 g de dispersante de silicato de sodio respectivamente.

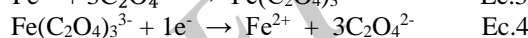
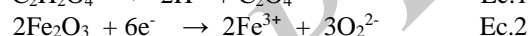
Los resultados cuando se utilizan 3 y 5 g de ácido oxálico indican que hay un incremento en la masa recuperada de Fe conforme se disminuye la cantidad de dispersante de silicato de sodio, lo cual concuerda con un mayor índice de blancura al disminuir la cantidad de dispersante de silicato de sodio (**Figura 4**); debido a que el Fe es el que le confiere la coloración al caolín. Es importante mencionar que en esta investigación los 0.5 g de dispersante de silicato de sodio es una cantidad menor a la reportada en la literatura del blanqueamiento de caolín controlado potencioestáticamente [14] que utiliza 0.6 g de dispersante.

Finalmente, en la concentración de 6 g de ácido oxálico la disminución Fe removido del caolín es 0.220 g, 0.294 g, 0.229 g y 0.217 g cuando se utiliza 0.5 g, 0.7 g, 1 g y 1.2 g de dispersante de silicato de sodio respectivamente. Este comportamiento de la presentar el mismo orden de magnitud la masa de Fe removida del caolín es atribuido a que se fija la velocidad de transformación de la masa reducida electroquímicamente, al mantener fija la corriente impuesta (-0.7 A) en el proceso electroquímico del blanqueamiento del caolín.

Además, en la **Figura 6** sea aprecia que cuando se utilizan las relaciones de masa ácido oxálico/ masa dispersante de silicato de sodio de 3 g/0.5 g, 5 g/0.5 g y 6 g/0.7 g se tiene las máximas masas de Fe removidas del caolín, 0.287 g, 0.347 g y 0.294 g respectivamente. Lo cual indica por que en estas relaciones de masa ácido oxálico/ masa dispersante de silicato de sodio se obtienen los mayores valores de índice de blancura 64.2 %, 69.9 % y 65.8 % respectivamente al llevar a cabo el proceso electroquímico del blanqueamiento del caolín. Este comportamiento de obtener las máximas masas de Fe

removidas del caolín en estas relaciones de masa ácido oxálico/ masa dispersante es atribuida a los pH iniciales de la solución electrolítica de caolín que promueven la reducción de Fe (III): $\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3^{3-}$ y $\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3^{3-}$ a Fe^{2+} en valores de pH más ácidos (1.48, 1.81 y 0.81), como se discutió en la **Figura 3** (tomada de la literatura [13]) de esta investigación.

Es importante mencionar que la masa máxima de Fe que se removería del caolín al mantener constante la corriente en 0.7 A durante 4 horas que es de 1.944 g la cual es mucho menor a la masa real removida lo cual es atribuido a que los electrones suministrados por la corriente se están consumiendo en el siguiente mecanismo de reacción de Ec. 1 a Ec. 6, hasta obtener el Fe metálico.



En donde los pH finales de la solución electrolítica de caolín son mucho menos ácidos que los pH iniciales conforme disminuyen la cantidad de ácido oxálico debido a la reacción secundarias Ec.5 que provoca la evolución de hidrógeno y a la formación de 2OH^- .

El mecanismo de reacción indica que hay más masa removida de Fe del caolín al utilizar 5 g de ácido oxálico con 0.5 g de dispersante de silicato de sodio porque hay una mayor reducción de oxígeno (Ec. 2) que cuando se utilizan 6 g de ácido oxálico, de acuerdo con el diagrama de Pourbaix de la **Figura 3**, lo cual da lugar a una mayor formación de $\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3^{3-}$ disponible para lleva a cabo las reacciones Ec. 4 y Ec. 6.

4. Conclusiones

Al fijar la velocidad de transformación de reducción en el proceso de blanqueamiento de caolín se determinó que la variación de la concentración de la relación masa ácido oxálico: masa dispersante de silicato de sodio influyen en el incremento del índice de blancura de caolín mina procesado electroquímicamente, debido a que: a) Establece el pH inicial de la solución electrolítica del caolín con lo cual se fijan las especies de oxalato de Fe(III) que se reducirán electroquímicamente, b) Participa en la cinética de reducción electroquímica, Ec. 1 a Ec. 6 establecida en este trabajo, con la variación de la concentración de ácido oxálico y c) Promueve la disminución de la cantidad de masa de Fe presente en el caolín. Las relaciones de ácido oxálico: dispersante de silicato de sodio: 3 g/0.5 g, 5 g/0.5 g y 6 g/0.7 g son la más adecuadas para el proceso de blanqueamiento del caolín ya que presentan los mayores índices de blancura 64.2 %, 69.9 % y 65.8 % con las máximas masas de Fe removidas del caolín, 0.287 g, 0.347 g y 0.294 g respectivamente.

5. Abreviaciones y Acrónimos

Ec.	Ecuación
Na_2SiO_3	Silicato de sodio (dispersante)

$\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3^{3-}$	Complejo ferrioxalato de Fe (III)
$\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_2^-$	Complejo de Fe (III) con oxalato
FeC_2O_4	Oxalato ferroso (Fe (II))
Fe^{2+}	Ion hierro en estado de oxidación +2
Fe^{3+}	Ion hierro en estado de oxidación +3
Fe^0	Hierro metálico
$\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$	Ion oxalato
H_2O	Agua
H_2	Hidrógeno molecular
OH^-	Ion hidróxido
pH	Potencial de hidrógeno
A	Ampere (unidad de corriente eléctrica)
V	Volt (unidad de potencial)
g	Gramos
mL	Mililitros
WI	Whiteness Index (índice de blancura)
COMSOL	COMSOL Multiphysics (software de simulación)

Agradecimientos: Los autores agradecen a SECIHTI por el apoyo financiero del Doctorado en Ciencia de Materiales (1235136) y (1008946) del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales del Instituto de Ciencias Básicas e Ingenierías de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Referencias

- [1] Servicio Geológico Mexicano (SGM), (varios años). Anuario Estadístico de la Minería Mexicana. Secretaría de Economía, México.
- [2] García Pérez, J. (2018). *Anteproyecto para el beneficio de caolines nacionales* [Tesis de licenciatura, UNAM]. Repositorio Institucional UNAM. <https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/pmig2018/0040696/0040696.pdf>
- [3] Ospina, R., Blanco, D., (1994). Geología del caolín y su procesamiento. Universidad Nacional de Colombia.
- [4] Allo, G., (2004). Propiedades físicas y químicas del caolín. Ediciones Tecnomin..
- [5] Villa-Ruiz, J., (2023). Caracterización de arcillas caoliníticas y su aplicación industrial. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, México.
- [6] Pérez, M., Gómez, L., Torres, J., (2010). Blanqueamiento de arcillas caoliníticas mediante ácido oxálico. *Revista Química Aplicada* 22(4), 201–210.
- [7] Daza, M. J. B., Baena, P. B., Rua, M. O. B., (2016). Blanqueo de caolín por medio de lixiviación en pilas con ácido oxálico. *Respuestas* 21(1), 65–76.
- [8] Flores-Segura, J., (2012). Reducción electroquímica de impurezas de hierro en caolín. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, México.
- [9] Melo-López, A., (2014). Estudio electroquímico del blanqueamiento de arcillas caoliníticas. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, México.
- [10] Cobos-Murcia, J. A., Hernández-Aguilar, E., Trujillo-Estrada, A., gallegos-Ortega, G., Reyes-Cruz, V. E., (2022). Geometry optimization of an electrochemical reactor for bleaching kaolin. *Clay Minerals* 57(3–4), 183–191.
- [11] Juan, C. F. S., Víctor, E. R. C., & Del Estado de Hidalgo Star, U. A. (2015, 30 abril). *MX387706B - POTENCIOSTATIC KAOLIN BLEACHING PROCESS*. - Google Patents. [https://patents.google.com/patent/MX387706B/en?q=\(potenciostatic+kaolin+bleaching+process\)&oq=potenciostatic+kaolin+bleaching+process](https://patents.google.com/patent/MX387706B/en?q=(potenciostatic+kaolin+bleaching+process)&oq=potenciostatic+kaolin+bleaching+process)
- [12] Molina-Macías, A. K., & Peñuela, G. A. (2019). Efecto de la calidad del agua del proceso de beneficio en la reología de las suspensiones de caolín cerámico. *Ingeniería y competitividad*, 21(1), 117-126.
- [13] Zulay, P. A. G., Carolina, V. R. Y., & María, C. T. E. (2010). Beneficio de una arcilla caolinítica de la región de Barichara (Santander) para la fabricación de refractarios. *Dyna*, 164, 29-38. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7734736>
- [14] De la Propiedad Industrial, I. -. I. M. (s. f.). *Visor*. IMPI – Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. <https://vidoc.impi.gob.mx/visor?d=MX/E/2015/035230>