

Análisis comparativo de caolines del Municipio de Agua Blanca de Iturbide, Estado de Hidalgo para uso industrial

Comparative analysis of kaolins from the Municipality of Agua Blanca de Iturbide, State of Hidalgo for industrial use

M. Vargas-Ramírez ^a, D. A. Fabila-Bustos ^b, J. Hernández-Ávila ^a, M. Hernández-Chávez ^{b*}

^a Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Ciudad del Conocimiento, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carr. Pachuca-Tulancingo km 4.5, Colonia Carboneras, C. P. 42184, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

^b Laboratorio de Optomecatrónica y Energías, UPIIH, Instituto Politécnico Nacional, DESCTI, San Agustín Tlaxiaca, 42162, Hidalgo, México.

Resumen

Este estudio tiene como objetivo caracterizar y comparar dos arcillas caoliniticas de coloración beige y blanca procedentes de la mina “El Recreo”, perteneciente al Ejido “El Palizar” del Municipio de Agua Blanca de Iturbide, Estado de Hidalgo, determinando sus posibles aplicaciones industriales, ya que hasta el momento no se cuenta con un estudio al respecto.

En este trabajo se caracterizó fisicoquímicamente la superficie de muestras de caolín beige y blanco mediante la medición del potencial Z en función del pH de suspensiones caoliniticas acuosas. Asimismo, se evaluaron las viscosidades de suspensiones de caolín beige a diferentes concentraciones (3 a 40 % en peso de sólidos), considerando la variación de las rpm y el pH. Los resultados muestran que la viscosidad aumenta conforme se incrementa la concentración del caolín en suspensión y alcanza su valor máximo cuando el pH es cercano al pH natural (≈ 5.0). En contraste, la viscosidad disminuye al alejarse de dicho valor, ya sea por incremento o disminución del pH.

El caolín blanco presenta una composición aproximada de 94.5 % de caolinita y 5.5 % de cuarzo. En el caso del caolín beige, su composición corresponde a 92 % de caolinita, 3.3 % de cuarzo, 1.9 % de alunita, 1.1 % de illita, 0.8 % de rutilo y 0.9 % de Fe_2O_3 . En cuanto al contenido de caolinita, ambos materiales cumplen con la normatividad para su empleo en la industria del papel, materiales cerámicos y refractarios, pinturas, cementos y plásticos. No obstante, el contenido de impurezas, particularmente de SiO_2 (mineral abrasivo), requiere ser reducido en ambas muestras de caolín. En el caso específico del caolín beige, la presencia de óxidos como Fe_2O_3 , TiO_2 y K_2O disminuye su valor comercial y limita su uso en aplicaciones como refractarios y plásticos, debido a la coloración que confieren al producto final. Se comprobó que es posible modificar las condiciones reológicas en las suspensiones de caolín mediante el control de carga superficial modificando el medio alrededor de las suspensiones, por variación del pH.

Palabras Clave: caolín, viscosidad, potencial Z, uso industrial.

Abstract

The objective of this study is to characterize and compare two kaolinitic clays of beige and white coloration from the mine “El Recreo”, belonging to the Ejido “El Palizar” of the Municipality of Agua Blanca de Iturbide, State of Hidalgo, determining their possible industrial applications, since so far there is no study on this subject.

In the present work, the physicochemical characterization of the surface of beige and white kaolin samples was carried out by measuring the Z-potential as a function of pH of aqueous kaolinitic suspensions. Viscosity measurements of beige kaolin suspensions at different concentrations (weight percentage of solids from 3 to 40) considering rpm and pH were carried out, obtaining as a result that viscosity increases with increasing concentration of kaolin in suspension and when pH is close to natural pH (5.0); viscosity decreases with decreasing and increasing pH, that is, when moving away from natural pH, where viscosity is maximum.

*Autor para la correspondencia: ajalcantaram@ipn.mx

Correo electrónico: marissav@uaeh.edu.mx (Marissa Vargas-Ramírez), dfabilab@ipn.mx (Diego Adrián Fabila-Bustos), herjuan@uaeh.edu.mx (Juan Hernández Ávila), macaria.hernandez@gmail.com (Macaria Hernández Chávez).

White kaolin has a composition of approximately 94.5% kaolinite and 5.5% quartz. In the case of beige kaolin, it has 92% kaolinite, 3.3% quartz, 1.9% alunite, 1.1% illite, 0.8% rutile and 0.9% Fe_2O_3 . In terms of kaolinite content, it complies with regulations for use in the paper, ceramic and refractory materials, paints, cements and plastics industries. However, as for the content of impurities such as SiO_2 , an abrasive mineral, it is necessary to reduce its content in both kaolin samples. The content of impurities in beige kaolin, such as Fe_2O_3 , TiO_2 , K_2O , reduces its commercial value and its use in applications such as refractories and plastics, due to the coloration they confer to the final product. The main restriction for its use at industrial level is the particle size, this due to the grinding method used, the particle size of both kaolins exceeds the particle size necessary for its use at industrial level in general, with the exception of its use in the cement industry, for the other industrial cases it is necessary that the particle size is less than 2 μm . It was proved that it is possible to modify the rheological conditions in kaolin suspensions by controlling the surface charge by modifying the medium around the suspensions, by varying the pH.

Keywords: kaolin, viscosity, Z potential, industrial use.

1. Introducción

El caolín, posee múltiples aplicaciones industriales, las más conocidas son: como recubrimiento y relleno para papel, imprenta, lubricación, adhesión, industria cerámica, pinturas, plásticos, refractarios, cementos, muy importante en la industria de cosméticos y farmacéutica, construcción, en cauchos y hules, química y forraje (Bartolomé, 1997).

El caolín es un mineral que, se usa generalmente disperso en agua para determinadas aplicaciones en la industria, se utiliza en suspensiones de altas concentraciones en sólidos y baja viscosidad (Acevedo et al., 2006). Esta variedad de usos deriva de sus propiedades fisicoquímicas entre las que destacan: blancura, poca reactividad ante agentes químicos, atoxicidad, poder cubriente, resistencia mecánica después de calcinación y elevada refractariedad (Bartolomé, 1997; Hernández, 2017; Murray, 2000; Prasad et al., 1990), así como de sus características superficiales y concentración en suspensión, tamaño de partícula y propiedades reológicas como la viscosidad (Horn, 1990; Lewis, 2000; Luckham & Ukeje, 1999; Mooney, 1951; Mueller et al., 2010; Zhou et al., 2001).

De acuerdo a la información del Servicio Geológico Mexicano (SGM), el estado de Chihuahua aportó el 62% de la producción nacional en el año 2019, ocupando el primer lugar a nivel nacional (Servicio Geológico Mexicano, 2016).

La palabra caolín, es un término comercial usado para describir a una arcilla blanca compuesta esencialmente de caolinita, $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$. El término se usa generalmente para referirse tanto a la arcilla cruda como al producto comercial refinado (Bloodworth et al., 1993). El caolín es un silicato de aluminio hidratado, producto de la descomposición de rocas feldespáticas principalmente. El término caolín se refiere a arcillas en las que predomina el mineral caolinita; su peso específico es de 2.6; su dureza es 2; de color blanco, puede tener diversos colores debido a las impurezas (Velde, 1992); brillo generalmente terroso mate; es higroscópico (absorbe agua); su plasticidad es de baja a moderada. Otras propiedades importantes son su blancura, su inercia ante agentes químicos, es inodoro, aislante eléctrico, moldeable y de fácil extrusión; resiste altas temperaturas, no es tóxico ni abrasivo y tiene elevada refractariedad y facilidad de dispersión. Es compacto, suave al tacto y fácilmente fusible. Tiene gran poder cubriente y absorbente y baja viscosidad en altos porcentajes de sólidos. Los caolines de alta calidad son caracterizados por bajos niveles de impurezas como hierro, titanio y minerales de tierras alcalinas. Su blandura es importante en muchas aplicaciones al reducir la abrasión de los equipos de procesos.

El caolín, tal como se obtiene en una explotación mineral posee un contenido variable de caolinita y/o halloysita que, a veces no llega al 20 %, además suele tener cuarzo, feldespatos, micas, y, dependiendo de la roca madre otro tipo de minerales accesorios. Para concentrar el mineral es preciso someterlo a procesos como: tamizado, separación magnética, hidrociclado, centrifugado, deslaminación, etc., que eleven el contenido en filosilicatos por encima del 80 %. El producto final, generalmente, recibe el nombre de caolín lavado. (Bartolomé, 1997; Chandrasekhar & Ramaswamy, 2002; de Mesquita et al., 1996; García & Suárez, 2013; González & Ruiz, 2006; De Pablo, 1964; Olvera et al., 2013; Raghavan et al., 1997).

Los yacimientos de caolín en México son muy irregulares, se presentan en diversas calidades, tamaños muy heterogéneos y con impurezas como óxidos de hierro, cuarzo y sílice. Se canaliza principalmente a las industrias del cemento, la pintura, la cerámica, el papel y el hule. La mayor parte de los yacimientos de caolín se encuentran en terrenos ejidales, como el caso de la zona de estudio, Agua Blanca, donde el caolín encontrado tiene un origen hidrotermal (Galicia et al., 1963).

La industria del caolín en México tiene amplias posibilidades de desarrollarse aún más y aprovechar la demanda existente. Entre las acciones que tendrían que emprenderse para hacer esto posible son: la realización de un inventario del mineral, lo cual permitiría identificar su vocación y consolidar la oferta hacia las industrias; por otro, la modernización de la cadena productiva garantizaría la elevación de la producción al nivel que requiere la demanda. De acuerdo a la Secretaría de Economía, las aplicaciones a nivel industria que puede tener el caolín y las características que debe cumplir el caolín para cada aplicación industrial se concentran en la Tabla 1, donde se observa que los caolines de más alta calidad tienen bajas impurezas como minerales de hierro, titanio y metales alcalinos y alcalinotérreos que ocasionan coloración indeseable en algunas aplicaciones industriales y deben presentar baja abrasión, al tener un bajo contenido de SiO_2 (Murray, 2007).

Tabla 1. Especificaciones para el uso industrial del caolín en México.

	Recubrimiento para papel	Relleno de papel	Cerámico	Pinturas	Refractarios	Cemento	Plástico
Blancura*	78-100%	n.a.	n.a.	>83%	n.a.	Se requiere que al quemar de color blanco, el caolín se usa	n.a.
Tamaño de partícula	80-100% < 2 μm	50-70% < 2 μm	n.a.	100% pasando la malla 325 70-80% < 2 μm	n.a.		0.8-1.4

Viscosidad	<7000 cpe	<4000 cpe	n.a.	n.a.	n.a.	tal cual es extraído y simplemente molido.	n.a.
% Caolinita	90-100%	90% o más	75-85%	n.a.	n.a.		n.a.
Fe ₂ O ₃	0.5-1.8%	<1%	<0.9%	n.a.	0.7-3%		0.5-0.8%
TiO ₂	0.4-1.6%	<1%	n.a.	n.a.	n.a.		1.7-1.9%
SiO ₂	0	1-2 %	n.a.	n.a.	Alto contenido		52.3%
Cu	n.a.	n.a.	Afecta n color del cerámico	n.a.	n.a.		n.a.
Cr	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.		n.a.
Mn	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.		n.a.
Compuestos alcalinos	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.07-0.2%		Na 0.1-0.2 K ₂ O 0.1-0.2
Compuestos alcalinotérreos	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.		CaO 0.03 MgO 0.04
Al ₂ O ₃	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	29-70.1%		44.6%

Adaptado del perfil de mercado del caolín de la Secretaría de Economía, México 2019 (*Perfil de Mercado del Caolín*. (2019).

2. Desarrollo experimental

2.1 Técnicas de caracterización para el caolín blanco y beige

2.1.1 Potencial Z

El potencial Z, se determinó en un equipo Acoustosizer ZIIS Colloidal de Dynamics. Las suspensiones caolín-agua desionizada se ajustaron en pH con soluciones de HCl e NaOH grado analítico de concentraciones 1 y 0.1 M.

2.1.2 Viscosidad

Se evaluó el efecto de la concentración en la viscosidad de las suspensiones de caolín beige y el efecto de la variación del pH de las suspensiones de caolín a pH 3, 6 y 9 a 6, 12, 30 y 60 rpm en un viscosímetro rotativo digital NDJ-5S.

3. Resultados y discusión

Con anterioridad, se ha publicado la caracterización química y mineralógica, área superficial específica y tamaño de partícula promedio de las arcillas caoliníticas que se analizaron para este trabajo (Chávez 2020), esta caracterización se muestra en la Tabla 2: Composición química y mineralógica.

Tabla 2. Composición química y mineralógica (% en masa)

	Arcilla caolinítica A		Arcilla caolinítica B	
	Química	Mineralógica	Química	Mineralógica
SiO ₂	46.65	Caolinita = 21 (±2)	46.38	Caolinita = 46 (±3)
Al ₂ O ₃	44.27	Cuarzo = 7 (±1)	36.86	Cuarzo = 12 (±2)

Fe ₂ O ₃	0.14	Cristobalita = 26 (±3)	0.81	Cristobalita = 4 (±2)
K ₂ O	0.1	Tridimita = 39 (±2)	1.34	Tridimita = 24 (±3)
TiO ₂	0.09	Alunita = 7 (±1)	0.66	Alunita = 14 (±2)
LOI at 1000 °C	8.75		13.95	
Tamaño de partícula promedio (µm)	6.207		13.3	
Área superficial específica (m ² g ⁻¹)	22.019		13.162	

3.1 Potencial Z

Se determinó el Potencial Z al variar el pH de las arcillas caoliníticas en suspensión con concentración del 10 % en peso y pudo observarse el carácter catiónico de las partículas en suspensión. La Zona de Potencial Cero se observó a pH de 4 para el caolín blanco y a pH de 4.2 para el caolín beige como se presenta en la figura 1.

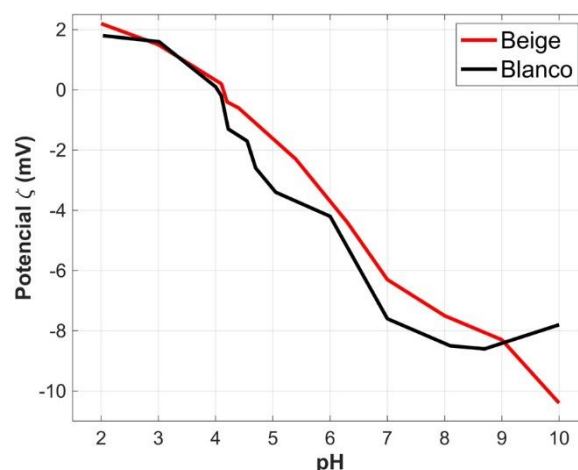


Figura 1. Variación del potencial zeta en función del pH para suspensiones al 10% en peso de caolín blanco y beige en agua desionizada. Se utilizaron soluciones 1 y 0.1 M de HCl e NaOH para la variación del pH.

Las lecturas de potencial zeta indican la carga superficial neta del mineral, mostrando exceso de carga positiva, negativa o neutra al variar el pH. Cuando la carga neta es negativa, permite la atracción entre partículas, dando como resultado una floculación, si es positiva hay una repulsión entre partículas, dando una excesiva dispersión, y si está en el punto cero, la carga neta es neutral. En el caso de ambas muestras de caolín, la Zona de Potencial Cero indica un carácter predominantemente catiónico (Moreno, 2005). Por lo que, en cuanto a propiedades reológicas, tanto el caolín blanco como el beige podrían

presentar una baja viscosidad a muy alto contenido de sólidos, aproximadamente del 70% tal como lo indica Murray (Murray, 2007) y Pruett y Pickering (Pruett & Pickering, 2006) respectivamente.

3.2 Efecto de la viscosidad en suspensiones de caolín a diversas concentraciones y pH

En la figura 2 se muestra la variación de la viscosidad de las soluciones acuosas de caolín (3, 12, 16, 26, 31 y 39 g) con respecto al porcentaje en peso del mismo en agua desionizada (97, 88, 84, 74, 69 y 61 mL respectivamente); donde se observa que, al aumentar la concentración del caolín en el solvente, aumenta la viscosidad de la misma. En todas las suspensiones de caolín se presenta el mismo comportamiento.

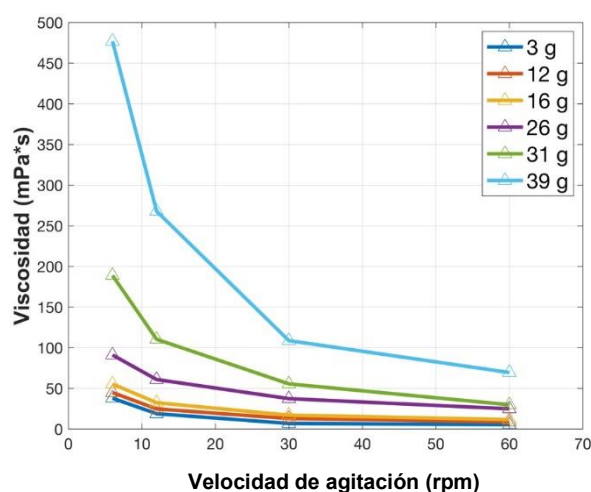


Figura 2. Viscosidad con respecto a la concentración de caolín en solución (3, 12, 16, 26, 31 y 39 % p/p en agua desionizada).

Se observa un comportamiento cizalle-adelgazante, ya que la viscosidad disminuye con el aumento de las rpm.

La adición de la base (NaOH), causa cambios más importantes en la viscosidad de la suspensión de caolín, que en el caso de pH's ácidos, donde también disminuye la viscosidad con respecto a la viscosidad al pH natural del caolín beige (pH natural=5). Para pH's altos existe un fenómeno de defloculación muy alto debido a la repulsión extrema entre partículas. En la figura 3 se observa este efecto al medir la viscosidad de las diferentes concentraciones de suspensiones de caolín a pH ácido, natural y básico a 6, 12, 30 y 60 rpm, modificando el pH con HCl y NaOH de concentraciones 1 y 0.1 M.

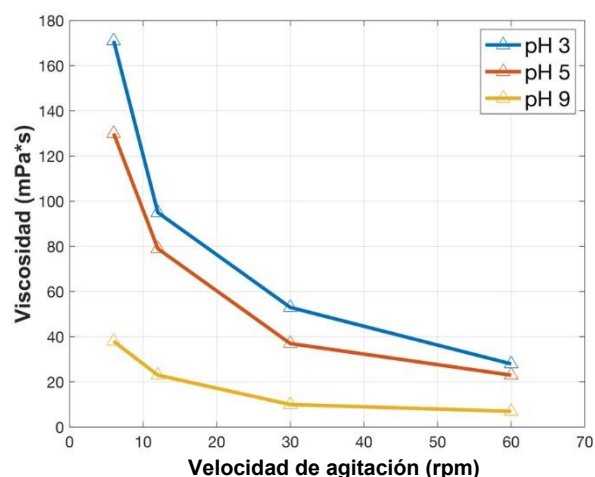


Figura 3. Efecto del pH en la viscosidad de las suspensiones de caolín a 6, 12, 30 y 60 rpm.

Se observan 2 regiones en las mediciones de viscosidad al variar el pH a diferentes concentraciones de caolín: la región que va desde pH 3 y hasta pH natural de 5. Es esta región se observa que la viscosidad disminuye cuando el pH empieza a descender, hasta acercarse a la Zona de Potencial Cero (ZPC). La segunda región se observa desde pH natural de 5 hasta pH 9, donde la viscosidad disminuye cuando el pH empieza a aumentar, hasta llegar a un mínimo de viscosidad.

4. Conclusiones

La caracterización física, química, mineralógica y fisicoquímica realizada al caolín beige y blanco, así como las mediciones de potencial Z a diferentes pH (2-12) de las suspensiones en medio acuoso al 10 % en peso, permiten concluir sobre la aplicación que se le puede dar a este material de acuerdo con las especificaciones de la Secretaría de Economía de México para su uso como recubrimiento para papel, relleno de papel, cerámico, pinturas, refractarios, cemento y plástico, donde las concentraciones de las suspensiones de caolín dependerán de las características de los equipos utilizados en cada proceso industrial donde se aplique. Ambos caolines, beige y blanco, tienen la restricción para su uso a nivel industrial por el tamaño de partícula mayoritariamente menor a 2 μm , sin embargo, para su uso en cemento, refractarios y cerámicos no aplica el tamaño de partícula. Considerando el contenido de caolinita, ambos caolines cumplen para todas las aplicaciones industriales. La presencia de minerales de hierro en el caolín, disminuye su calidad y limita sus usos a nivel industrial, ya que dan como resultado en el caolín coloraciones beige, disminuyendo su blancura, por lo que es importante eliminar el contenido de hierro para su aplicación en la industria cerámica y del plástico para el caso del caolín beige. En el caso del contenido de SiO_2 y siendo este abrasivo para los procesos industriales relacionados a la industria del papel, se restringe su uso para ambos caolines debido a su alto contenido. Para lograr que el caolín de la zona de estudio sea más competitivo

a nivel industrial, es necesario mejorar los métodos de molienda, y someterlo a procesos de beneficio y de separación por tamaño de partícula para tener en general un tamaño de partícula previo a su comercialización menor a 2 μm . Es importante someter al caolín beige a procesos que disminuyan su contenido de Fe_2O_3 , TiO_2 , K_2O , ya que las impurezas presentes, disminuyen su valor comercial. Actualmente en México, sólo extraen y muelen el caolín sin realizarle ningún tratamiento previo a su comercialización. Pudo constatar que es posible modificar las condiciones reológicas en las suspensiones de caolín mediante el control de carga superficial modificando el medio alrededor de las suspensiones, por variación del pH. Se tienen dos comportamientos dependientes del pH, donde el punto de inflexión lo tiene el pH natural de la suspensión de caolín considerando el carácter predominantemente catiónico del caolín. Esa información es valiosa, ya que en la industria que utiliza caolín como materia prima, es muy importante que la concentración de sólidos en suspensión sea lo más alta posible y la viscosidad sea lo más baja posible, esto sin utilizar aditivos químicos defloculantes, porque la modificación de la doble capa eléctrica por adición de ácido (HCl) o base (NaOH), de acuerdo con el proceso industrial, es suficiente para reducir la viscosidad, mejorando las condiciones de transporte.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) por el apoyo económico recibido a través del Proyecto SIP-20251120.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Referencias

- Acevedo, P., Carreño, A., Macías, J., & Pedraza. (2009). reparación de suspensiones acuosas coloidales dispersas de arcillas montmorilloníticas. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, S1(2).
- Bartolomé, J. F. (1997). El Caolín: composición, estructura, génesis y aplicaciones. *Boletín Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 36(20).
- Botella, R. M. (2005). *Reología de suspensiones cerámicas*. Editorial CSIC - CSIC Press.
- British Geological Survey. (s. f.). *Industrial Minerals Laboratory Manual: Kaolin* - NERC Open Research Archive. <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/9016>
- Chandrasekhar, S., & Ramaswamy, S. (2002). Influence of mineral impurities on the properties of kaolin and its thermally treated products. *Applied Clay Science*, 21(3-4), 133-142. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(01\)00083-7](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(01)00083-7)
- Chávez, M. H., Ramírez, M. V., González, A. H., Serrano, J. G., Ramírez, A. C., Serrano, J. R., & Alvarado, R. S. (2020). Thermodynamic analysis of the influence of potassium on the thermal behavior of kaolin raw material. *Physicochemical Problems Of Mineral Processing*, 57(1), 39-52. <https://doi.org/10.37190/ppmp/128393>
- De Mesquita, L., Rodrigues, T., & Gomes, S. (1996). Bleaching of Brazilian kaolins using organic acids and fermented medium. *Minerals Engineering*, 9(9), 965-971. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(96\)00087-8](https://doi.org/10.1016/0892-6875(96)00087-8)
- De Pablo, L. (1964). Las arcillas: I. Clasificación, identificación, usos y especificaciones industriales. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 27(2). <https://doi.org/10.18268/bsgm1964v27n2a1>
- Galicia, J., & Bautista, O. (1963). Los Yacimientos de caolín en Agua Blanca, Hgo. México. Consejo de Recursos No Renovables.
- García Romero, E., & Suárez Barrios, M. (2012). *Arcillas: propiedades y usos*. Universidad de Salamanca.
- Gonzalez, J., & Delcruiz, M. (2006). Bleaching of kaolins and clays by chlorination of iron and titanium. *Applied Clay Science*, 33(3-4), 219-229. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2006.05.001>
- Horn, R. G. (1990). Surface Forces and Their Action in Ceramic Materials. *Journal Of The American Ceramic Society*, 73(5), 1117-1135. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb05168.x>
- Kogel, J. E. (2006). *Industrial Minerals & Rocks: Commodities, Markets, and Uses*. SME.
- Lewis, J. A. (2000). Colloidal Processing of Ceramics. *Journal Of The American Ceramic Society*, 83(10), 2341-2359. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01560.x>
- Luckham, P. F., & Ukeje, M. A. (1999). Effect of Particle Size Distribution on the Rheology of Dispersed Systems. *Journal Of Colloid And Interface Science*, 220(2), 347-356. <https://doi.org/10.1006/jcis.1999.6515>
- Mooney, M. (1951). The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles. *Journal Of Colloid Science*, 6(2), 162-170. [https://doi.org/10.1016/0095-8522\(51\)90036-0](https://doi.org/10.1016/0095-8522(51)90036-0)
- Mueller, S., Llewellyn, E. W., & Mader, H. M. (2009). The rheology of suspensions of solid particles. *Proceedings Of The Royal Society A Mathematical Physical And Engineering Sciences*, 466(2116), 1201-1228. <https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0445>
- Murray, H. H. (2000). Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview. *Applied Clay Science*, 17(5-6), 207-221. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(00\)00016-8](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(00)00016-8)
- Murray, H. H. (2006). *Applied clay mineralogy: Occurrences, Processing and Applications of Kaolins, Bentonites, Palygorskites, Sepiolite, and Common Clays*. Elsevier.
- Olvera Venegas, P. N., Hernández Cruz, L. E., & Lapidus, G. T. (Eds.). (2012, 16 mayo). Estudio de la remoción de hierro de una arcilla caolinítica por medio de lixiviación reductiva. XXI Congreso Internacional de Metalurgia Extractiva "Innovación y Retos En la Metalurgia Extractiva".
- Perfil de Mercado del Caolín. (2014). Dirección General de Desarrollo Minero, Secretaría de Economía.
- Prasad, Reid, K., & Murray, H. (1991). Kaolin: processing, properties and applications. *Applied Clay Science*, 6(2), 87-119. [https://doi.org/10.1016/0169-1317\(91\)90001-p](https://doi.org/10.1016/0169-1317(91)90001-p)
- Raghavan, P., Chandrasekhar, S., & Damodaran, A. (1997). Value addition of paper coating grade kaolins by the removal of ultrafine coloring impurities. *International Journal Of Mineral Processing*, 50(4), 307-316. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(97\)00040-9](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(97)00040-9)
- Repositorio de Tesis DGBSDI: Caracterización mineralógica y geoquímica de caolines del área de Huayacocotla, Veracruz, (México) para uso industrial. (s. f.). <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000758950>
- Servicio Geológico Mexicano. (2016). *Anuario estadístico de la Minería Mexicana 2016* (N.o 45). https://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2015_Edicion_2016.pdf
- Velde, B. (1992). *Introduction to Clay Minerals*. En Springer eBooks. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-2368-6>
- Zhou, Z., Scales, P. J., & Boger, D. V. (2001). Chemical and physical control of the rheology of concentrated metal oxide suspensions. *Chemical Engineering Science*, 56(9), 2901-2920. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00473-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00473-5)