Infomin, Vol. 18, enero-diciembre 2026, E-ISSN: 1992-4194, https://infomin.edicionescervantes.com

Reseña

Influencia de la plasticidad del caolín en la conformación cerámica y comportamiento en la lixiviación alcalina de la sílice amorfa: un estudio de caolines cubanos

https://cu-id.com/2144/v18e05

Influence of kaolin plasticity on ceramic formation and behavior in alkaline leaching: a study of Cuban kaolins

Claudia Isabel Pablos Medina*, Yelianis Yaumara Méndez Márquez

RESUMEN: El caolín de alta plasticidad, en particular el de procedencia volcánica y volcanosedimentaria presente en Cuba, constituye una materia prima de alto interés tecnológico por su aptitud para la conformación cerámica y, simultáneamente, por las limitaciones reológicas que impone en sistemas de lixiviación alcalina. El presente trabajo examina la relación entre la estructura laminar 1:1 de la caolinita, la distribución granulométrica, la microestructura particulada y la plasticidad del material, así como su incidencia sobre la reología de las suspensiones y la eficiencia de transferencia de masa durante el tratamiento con sosa cáustica. Para ello se realizó una revisión crítica de la literatura reciente relativa a mineralogía, textura, límites de Atterberg, comportamiento reológico de barbotinas, permeabilidad de lechos y disolución alcalina de la fracción silícea reactiva obtenida tras la lixiviación ácida del metacaolín. La evidencia analizada muestra que los caolines de mayor plasticidad tienden a generar pulpas más viscosas, sistemas estructuralmente más compactos y medios de menor permeabilidad, lo que puede restringir la cinética de disolución y disminuir el rendimiento global del proceso, aun bajo condiciones químicas favorables. En función de estos hallazgos, se discuten estrategias de acondicionamiento físico y reológico orientadas a compatibilizar la elevada conformabilidad cerámica de los caolines cubanos con un desempeño hidrometalúrgico eficiente.

Palabras clave: acondicionamiento hidrometalúrgico, caolín, lixiviación alcalina, plasticidad, reología, sílice amorfa.

ABSTRACT: High-plasticity kaolin, particularly that of volcanic and volcano-sedimentary origin found in Cuba, is a technologically relevant raw material because of its excellent ceramic formability and, at the same time, the rheological constraints it introduces in alkaline leaching systems. This study examines the relationship between the 1:1 layered structure of kaolinite, particle-size distribution, particulate microstructure, and material plasticity, as well as their impact on suspension rheology and mass-transfer efficiency during caustic soda treatment. To this end, a critical review of recent literature was carried out, focusing on mineralogy, texture, Atterberg limits, slurry rheology, bed permeability, and alkaline dissolution of the reactive siliceous fraction obtained after acid leaching of metakaolin. The evidence reviewed indicates that highly plastic kaolins tend to form more viscous pulps, structurally more compact systems, and less permeable media, thereby restricting dissolution kinetics and reducing overall process performance even under favorable chemical conditions. Based on these findings, physical and rheological conditioning strategies are discussed to reconcile the high ceramic formability of Cuban kaolins with efficient hydrometallurgical performance.

Keywords: alkaline leaching, amorphous silica, hydrometallurgical conditioning, kaolin, plasticity, rheology.

INTRODUCCIÓN

El caolín es una de las materias primas minerales más utilizadas en la industria cerámica, del papel, pinturas, plásticos, recubrimientos, polímeros, caucho y productos cosméticos y farmacéuticos, en los que se requieren materiales blancos, químicamente inertes y térmicamente estables (Popescu *et al.*, 2024). Desde el punto de vista mineralógico, se trata de una arcilla dominada por caolinita, un filosilicato, cuya estructura laminar le confiere propiedades particulares de refractariedad, limitada capacidad de hinchamiento y un comportamiento reológico específico (Hernández *et al.*, 2019). Estas características diferencian al caolín de otras arcillas más expansivas, como las esmectitas, y condicionan su papel en las formulaciones industriales, especialmente en productos de cerámica blanca y papeles de alto valor añadido (Popescu et al., 2024).

Recibido: 03/04/2026
Aprobado en su forma original: 13/05/2026

Centro de Investigación para la Industria Minero Metalúrgica.
Carretera Varona, Km11/2, Fca. La Luisa, Boyeros, La Habana, Cuba.
*Autor para correspondencia: claudiaisabelpablos@gmail.com

Conflictos de interés: Los autores declaran que no existen conflictos de interés.
Contribución de los autores: Investigación, Conceptualización: Claudia Isabel Pablos Medina y Yelianis Yaumara Méndez Márquez. **Metodología, Redacción-revisión y edición:** Claudia Isabel Pablos Medina.
Artículo bajo licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0)

Además de la composición química y el color, el desempeño tecnológico del caolín depende de un conjunto de propiedades físicas y reológicas, entre las que destacan la distribución granulométrica, el área superficial específica, la viscosidad de las suspensiones, la capacidad de dispersión y la plasticidad de las masas plásticas (Kim *et al.*, 2022; León *et al.*, 2025). La plasticidad resulta particularmente relevante en aplicaciones donde el material debe ser conformado antes de su consolidación por secado, cocción o reacción química, como ocurre en la fabricación de porcelanas, sanitarios y otros productos cerámicos, donde se requiere un equilibrio entre trabajabilidad, resistencia al secado y estabilidad dimensional (Kim et al., 2022; Zhang *et al.*, 2024).

En procesos hidrometalúrgicos, como el blanqueo o la purificación de caolín mediante lixiviación, la plasticidad influye de forma indirecta pero significativa en la reología de las pulpas, la dispersión de partículas y la eficiencia de la transferencia de masa (Popescu *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2023). La interacción entre la estructura laminar, el tamaño de partícula y el medio alcalino puede favorecer la formación de suspensiones muy viscosas o de lechos poco permeables, lo que condiciona la cinética de disolución y la eficiencia global de los procesos de lixiviación, tanto en sistemas agitados como en lechos permeables (León *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2016).

Cuba cuenta con un potencial significativo de caolines de diversa mineralogía, principalmente caolinita (40-80%) acompañada de cuarzo, feldespatos, micas y óxidos de hierro, distribuidos en múltiples yacimientos que reflejan distintos contextos geológicos (González *et al.*, 2017). Los más relevantes se concentran en la Isla de la Juventud, donde la alteración de tufitas y lavas volcánicas ha generado caolines con alta plasticidad (IP 15-25), una fracción <2 µm superior al 50-60% y color cocido blanco-crema, ideales para cerámica sanitaria, loza fina y cemento blanco (Rodríguez & Martín, 2019). En el occidente continental destacan los depósitos de Mantua, Arroyos de Mantua, Dumañuecos y Cerro Caisimú para cerámica roja estructural, mientras que en el centro y oriente se localizan los yacimientos La Loma (Sancti Spíritus), Yaguajay (Ciego de Ávila) y Cayo Guam (Holguín), aptos para puzolanas calcinadas y procesos de purificación química (Pérez *et al.*, 2020). Estos recursos han permitido desarrollar una industria cerámica nacional que sustituye parcialmente importaciones, con planta procesadora única en Río del Callejón, Isla de la Juventud. La caracterización tecnológica ha confirmado su versatilidad: los caolines de Isla de la Juventud aportan plasticidad y blancura para sanitarios y loza, los de Mantua-Caisimú funcionan en cerámica roja, y los de La Loma/Yaguajay se emplean calcinados como puzolanas en cemento Portland (González et al., 2017; Pérez et al., 2020).

Estudios hidrometalúrgicos recientes han validado su purificación mediante lixiviación ácida inversa en Cayo Guam, con eliminación de Fe superior al 98%, y blanqueo químico para papel y pigmentos, abriendo posibilidades para la extracción de alúmina, la síntesis de sílice mesoporosa y la producción de materiales funcionales a partir de residuos rojos (Cabo de Villa-Figueira *et al.*, 2017). Sin embargo, la alta plasticidad de los caolines cubanos, ventajosa para la conformación cerámica, genera desafíos en la lixiviación alcalina, al favorecer la formación de aglomerados, el incremento de la viscosidad de las pulpas y la compactación de los lechos, con la consecuente disminución de la eficiencia del proceso. Por ello, resulta necesario profundizar en la influencia de la plasticidad sobre la cinética de disolución y la transferencia de masa durante la lixiviación alcalina de la sílice amorfa obtenida de la lixiviación ácida del metacaolín (Cabo de Villa-Figueira et al., 2017; León *et al.*, 2025).

El objetivo de este trabajo es analizar con profundidad la plasticidad del caolín, los factores que la gobiernan y sus implicaciones en aplicaciones hidrometalúrgicas, con énfasis en el comportamiento de caolines de alta plasticidad como los de origen volcánico y volcanosedimentario descritos en regiones tropicales (Rodríguez & Martín, 2019; Zhang *et al.*, 2024). Se discute, además, el efecto de la plasticidad en la lixiviación con sosa cáustica de la sílice amorfa obtenida de la lixiviación ácida del metacaolín, y se proponen criterios generales de acondicionamiento del material en función de su uso final, incorporando resultados recientes sobre reología de suspensiones arcillosas, extracción de alúmina y estrategias de dispersión y control de granulometría (León *et al.*, 2025; Liu *et al.*, 2023; Popescu *et al.*, 2024).

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño de la revisión

El presente trabajo se desarrolló como una revisión bibliográfica de alcance temático, orientada a identificar, seleccionar y sintetizar evidencia relacionada con la plasticidad del caolín, su efecto sobre la reología y la transferencia de masa, y la lixiviación alcalina del residuo sólido rico en sílice amorfa obtenido tras la lixiviación ácida del metacaolín. El proceso de búsqueda y selección se estructuró conforme a los principios de transparencia, trazabilidad y reproducibilidad establecidos para revisiones sistemáticas y de alcance, con énfasis en la identificación de fuentes, eliminación de duplicados, cribado por título y resumen, y lectura crítica a texto completo (Page *et al.*, 2021; Peters *et al.*, 2015; Tricco *et al.*, 2018).

Procesamiento y análisis

Cuerpo documental

El cuerpo documental estuvo integrado por artículos científicos originales, artículos de revisión, informes y documentos técnicos de organismos internacionales, publicaciones de entidades académicas y centros de investigación, así como estudios de caso nacionales vinculados con las propiedades físicas y reológicas del caolín, la permeabilidad de sistemas arcillosos y el aprovechamiento de residuos silíceos mediante lixiviación alcalina. Se priorizaron publicaciones de los últimos diez años, con especial énfasis en los últimos cinco años, sin excluir referencias seminales indispensables para el sustento conceptual y metodológico de la revisión (Haddaway *et al.*, 2015; Tricco *et al.*, 2018).

Bases de datos consultadas

La búsqueda se realizó en bases de datos especializadas de literatura científica y técnica, así como en repositorios institucionales latinoamericanos y documentales de centros de investigación en minería y procesamiento de minerales, con el propósito de incorporar estudios de caso nacionales y documentos de acceso abierto (Haddaway *et al.*, 2015; Higgins *et al.*, 2024).

Estrategia de búsqueda y procesamiento

La estrategia de búsqueda se construyó mediante combinaciones de descriptores en español e inglés, entre ellos “kaolin”, “clay”, “plasticity”, “rheology/reología”, “permeability”, “mass transfer”, “amorphous silica”, “alkaline leaching” y “acid leaching residue”, empleando operadores booleanos y filtros temporales para delimitar el período 2016-2025. La búsqueda inicial, sin excluir duplicados, arrojó 1,212 registros. Tras la depuración bibliográfica se eliminaron los duplicados, obteniéndose 618 documentos distintos. Posteriormente, el cribado por título y resumen redujo el conjunto a 304 registros aptos para lectura a texto completo. Finalmente, se seleccionaron 30 documentos para la síntesis cualitativa, los cuales se integraron en la discusión y en el análisis comparativo como base para la interpretación de resultados (Page *et al.*, 2021; Higgins *et al.*, 2024).

Criterios de elegibilidad e inclusión

Los criterios de elegibilidad se definieron antes del cribado, siguiendo recomendaciones para revisiones de alcance y narrativas (Peters *et al.*, 2015; Tricco *et al.*, 2018). Se incluyeron documentos que abordaran plasticidad, reología o permeabilidad de caolines, arcillas o residuos caoliníticos; presentaran información sobre lixiviación ácida previa y lixiviación alcalina de residuos sólidos ricos en sílice amorfa; aportaran datos experimentales, rangos operativos, condiciones de lixiviación o análisis comparativos; y estuvieran publicados en revistas científicas, informes técnicos o repositorios con trazabilidad y accesibilidad suficientes.

Se excluyeron documentos sin relación directa con la temática, resúmenes sin texto completo, duplicados y estudios con descripción metodológica insuficiente o sin datos verificables, de acuerdo con criterios de calidad metodológica aplicables a revisiones de literatura (Higgins *et al.*, 2024).

Procesamiento y síntesis de la información

Los 30 documentos seleccionados se organizaron en categorías analíticas: reología y plasticidad, permeabilidad y transferencia de masa, lixiviación alcalina del residuo silíceo y condiciones óptimas de operación. El procesamiento se realizó con herramientas de gestión bibliográfica y hojas de cálculo de exel para registrar y ordenar las variables cuantitativas y las condiciones experimentales de cada estudio. La información cualitativa se integró en el texto de la revisión, mientras que la cuantitativa se empleó como soporte para la comparación entre estudios y la discusión de resultados, siguiendo principios de síntesis de evidencia propios de las revisiones de alcance (Peters *et al.*, 2015; Tricco *et al.*, 2018).

La revisión bibliográfica final quedó conformada por 30 referencias, de las cuales 12 corresponden al período 2021-2026, lo que representa el 40.0% del total, y 24 se ubicó en el rango 2016-2026, equivalente al 80.0%. En cuanto a la tipología documental, predomino los artículos científicos con 28 referencias (93.3%), seguidos por 1 informe técnico (3.3%) y 1 manual metodológico o libro de referencia (3.3%). Este perfil bibliográfico reflejó una base documental sólidamente sustentada en fuentes académicas revisadas por pares, con una participación limitada de documentos no periódicos, lo que refuerzo la solidez científica y metodológica de la contribución.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concepto de plasticidad en sistemas arcillosos

En tecnología de arcillas, la plasticidad se entiende como la capacidad de una masa finamente dividida y humedecida de deformarse bajo un esfuerzo aplicado sin agrietarse y de conservar la forma adquirida una vez retirado dicho esfuerzo (Kim *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2024). Esta propiedad depende del contenido de agua y del arreglo microestructural de las partículas, y suele evaluarse mediante los límites de Atterberg y el índice de plasticidad, parámetros que permiten comparar el comportamiento de distintos materiales arcillosos y estimar su aptitud para aplicaciones cerámicas o geotécnicas (Bustamante *et al.*, 2016; Ríos Ramos y Balmori Ramírez, 2024).

Desde una perspectiva microscópica, la plasticidad está gobernada por la interacción entre partículas laminares de arcilla, las películas de agua adsorbida, las fuerzas electrostáticas y de Van der Waals, así como por la presencia de iones y materia orgánica en el sistema (Kim *et al.*, 2022; Leiva *et al.*, 2025). Cuando predominan partículas finas y de alta relación de aspecto, la superficie específica aumenta y se favorece la formación de redes cohesivas, lo que conduce a valores más altos de plasticidad y a un comportamiento reológico más marcado de tipo no newtoniano (Zhang *et al.*, 2024; Ríos Ramos y Balmori Ramírez, 2024). En este contexto, los aditivos dispersantes y otros reagentes modificadores de la reología pueden alterar significativamente la respuesta del sistema, especialmente en suspensiones de caolín pre-dispersas (Sjöberg *et al.*, 2023; Leiva et al., 2025).

En el caso del caolín, la estructura de la caolinita y su baja capacidad de intercambio catiónico suelen asociarse con plasticidades inferiores a las observadas en arcillas esmectíticas. No obstante, muchos caolines industriales presentan una plasticidad baja a moderada suficiente para conferir cohesión y moldeabilidad a las pastas cerámicas (Popescu *et al.*, 2024; Hernández *et al.*, 2019). Esta plasticidad puede incrementarse mediante una adecuada selección granulométrica, la mezcla con arcillas de mayor plasticidad o el empleo de aditivos y dispersantes que modifiquen la estructura de la suspensión (Leiva *et al*., 2025; Sjöberg, Andersson y Larsson, 2023).

Estructura y mineralogía del caolín

La caolinita está formada por el apilamiento de una lámina tetraédrica de sílice y una lámina octaédrica de alúmina, organizadas en una estructura característica del grupo de los caolines. Estas láminas se mantienen unidas por enlaces de hidrógeno y fuerzas electrostáticas moderadas, dando lugar a partículas de morfología laminar, generalmente micrométricas o submicrométricas, con baja capacidad de intercambio catiónico y escaso hinchamiento en comparación con otros minerales arcillosos (González y Ruiz, 2006; Kim *et al.*, 2022).

Los depósitos de caolín suelen contener, además de caolinita, cuarzo, feldespatos, micas, óxidos e hidróxidos de hierro, materia orgánica y, en algunos casos, otros minerales arcillosos. La proporción y naturaleza de estas fases acompañantes influyen de manera decisiva en el color, la refractariedad, el comportamiento reológico y la necesidad de operaciones de purificación como flotación, separación magnética o lixiviación química (Hernández *et al.*, 2019; González *et al.*, 2017; Popescu, Ionescu and Marinescu, 2024).

Desde el punto de vista genético, se distinguen caolines primarios, formados in situ por meteorización o alteración hidrotermal de rocas feldespáticas, y caolines secundarios, transportados y redepositados en ambientes sedimentarios; los segundos suelen ser más finos y mejor clasificados granulométricamente, lo que favorece una plasticidad más elevada y un comportamiento cerámico más favorable en ciertas aplicaciones (González *et al.*, 2017; Pérez *et al.*, 2020). En materiales de alto interés tecnológico, la eliminación de impurezas férricas puede ser decisiva para alcanzar la blancura requerida, y procesos como el blanqueo por cloruración han sido utilizados para mejorar la calidad de caolines y arcillas (González y Ruiz, 2006).

La relevancia tecnológica de esta mineralogía se confirma en los caolines cubanos, donde la combinación de caolinita con fases acompañantes y variaciones en textura y granulometría condiciona tanto su comportamiento cerámico como su aptitud para usos industriales de mayor valor agregado (González *et al.*, 2017; Rodríguez y Martín, 2019; Pérez *et al.*, 2020). En particular, los caolines volcánicos de la Isla de la Juventud muestran rasgos mineralógicos y geoquímicos que explican su interés en aplicaciones cerámicas y de purificación, mientras que los materiales del centro y oriente del país presentan características tecnológicas que los hacen útiles en otros esquemas de aprovechamiento industrial (Rodríguez y Martín, 2019; Pérez et al., 2020).

Relación entre textura y plasticidad

La granulometría y la morfología de las partículas controlan en gran medida la plasticidad del caolín, al regular el número de contactos entre láminas y la forma en que se organiza la microestructura en pastas y suspensiones (Bustamante *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2022). Partículas más finas y de mayor relación de aspecto favorecen una red de enlaces físicos y electrostáticos más densa, lo que se traduce en una mayor cohesión de la masa y, por tanto, en una plasticidad más elevada. En cambio, una distribución granulométrica mejor graduada suele favorecer un empaquetamiento más compacto y una mejor trabajabilidad (Ríos-Ramos & Balmori-Ramírez, 2024; Zhang *et al.*, 2024).

La presencia de agregados y aglomerados también desempeña un papel importante. Aunque las partículas primarias sean muy finas, la existencia de agregados rígidos de mayor tamaño reduce el área superficial efectiva y puede disminuir la plasticidad aparente si no se aplican operaciones adecuadas de molienda y dispersión antes del conformado o de los tratamientos hidrometalúrgicos (Leiva *et al.*, 2025; Sjöberg *et al.*, 2023). En suspensiones concentradas de arcillas, la ruptura de aglomerados, el estado de dispersión y la estabilización electrostática mediante aditivos determinan la respuesta reológica observada y, en consecuencia, la trabajabilidad de las masas plásticas (Laurencio *et al.*, 2023; Leiva et al., 2025).

En el caso de los caolines cubanos, la fracción fina, la textura y la mineralogía refuerzan esta relación entre granulometría y plasticidad, especialmente en depósitos de origen volcánico y volcanosedimentario donde la caolinita domina sobre otras fases y el material muestra una respuesta tecnológica favorable para conformado cerámico (González *et al.*, 2017; Rodríguez & Martín, 2019; Pérez *et al.*, 2020). Esta combinación explica por qué algunos caolines locales presentan un comportamiento más cohesivo y una mayor sensibilidad al contenido de agua, lo que también influye en su manejo industrial y en su respuesta durante la lixiviación alcalina (Rodríguez-Suárez *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2016).

Caolines cubanos: origen y características relevantes

En Cuba se han identificado caolines de alta plasticidad asociados a unidades volcánicas y volcanosedimentarias del occidente y del archipiélago cubano (González *et al.*, 2017; Rodríguez y Martín, 2019). En la Isla de la Juventud, en particular en los yacimientos Santa Elena y Río Callejón, se han descrito cuerpos caoliníticos desarrollados a expensas de tufitas y lavas ácidas alteradas, con espesores métricos y textura fina, en los que la fracción menor de 2 µm puede superar el 50-60% (Rodríguez y Martín, 2019). Este predominio de partículas laminares submicrométricas, junto con la baja proporción de cuarzo grueso y otras fases rígidas, explica los valores elevados de índice de plasticidad observados en estos materiales y justifica su comparación con algunas *ball clays* empleadas internacionalmente en cerámica sanitaria (González et al., 2017; Pérez *et al.*, 2020).

En el occidente y centro del país también se describen caolines asociados a la alteración de rocas volcánicas y volcanosedimentarias, como los del yacimiento La Loma, donde la caolinita domina claramente sobre las fases acompañantes (Pérez *et al.*, 2020). En los materiales de mayor interés tecnológico se combinan una fracción arcilla muy fina, contenidos moderados de cuarzo y feldespatos finamente divididos y bajos niveles de óxidos de hierro y materia orgánica, lo que favorece colores de cocción claros y una buena aptitud para la conformación cerámica (González *et al.*, 2017; Rodríguez y Martín, 2019). Este conjunto de rasgos permite formular cuerpos cerámicos blancos o crema clara con una sola arcilla nacional o con mezclas donde el caolín local aporta una fracción importante de la plasticidad requerida (Pérez et al., 2020; Rodríguez Suárez *et al.*, 2017).

En términos reológicos, los caolines cubanos de alta plasticidad presentan límites de Atterberg relativamente elevados, con índices de plasticidad que en muchos casos igualan o superan los de algunas *ball clays* importadas. Asimismo, sus barbotinas exhiben comportamientos no newtonianos marcados, con tixotropía y resistencia inicial al corte, especialmente a altas concentraciones de sólidos, lo que exige un control cuidadoso de la dispersión y del contenido de agua (Bustamante *et al.*, 2016; Ríos-Ramos y Balmori-Ramírez, 2024). A ello se suma una tendencia acentuada a la formación de agregados y "*pellets*" durante el humedecimiento cuando no se aplican condiciones adecuadas de molienda y dispersión, fenómeno que repercute tanto en la conformación cerámica como en la lixiviación (Leiva *et al.*, 2025; Sjöberg *et al.*, 2023).

Desde el punto de vista químico, la mayoría de los caolines de mayor interés cerámico en Cuba presenta contenidos relativamente bajos de Fe2O3, aunque el hierro suele estar distribuido en formas finamente diseminadas, como óxidos o hidróxidos nanométricos en bordes de láminas o recubrimientos. Por ello, en aplicaciones de alta exigencia, como papel de alta blancura o porcelana sanitaria de gama alta, se requiere blanqueo químico o beneficiado físico-químico (González y Ruiz, 2006; Hernández *et al.*, 2019). En este contexto, la plasticidad elevada tiene un doble efecto: favorece la conformación de piezas cerámicas, pero complica el diseño de circuitos de lixiviación al promover la compactación de lechos y el aumento de viscosidad en pulpas concentradas (Al Tabbaa y Wood, 1987; Mir y Sachar, 2022; Wang *et al.*, 2016).

Metodología general para estudiar plasticidad y lixiviación

La evaluación de la plasticidad del caolín y de su comportamiento frente a la lixiviación alcalina requiere integrar la caracterización textural y reológica con la respuesta del material durante el tratamiento con sosa cáustica. En los materiales derivados del metacaolín, la etapa alcalina se aplica al sólido enriquecido en sílice amorfa generado tras la lixiviación ácida, cuya reactividad depende de su accesibilidad estructural, del grado de desagregación y de las condiciones operacionales impuestas al sistema (Kong *et al.*, 2024; Mejía de Gutiérrez *et al.*, 2025; Liu *et al.*, 2023).

Caracterización de la plasticidad

La plasticidad del caolín puede determinarse mediante ensayos de límites de Atterberg, que permiten obtener el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad, parámetros útiles para comparar muestras y establecer su comportamiento tecnológico (Bustamante *et al.*, 2016). De forma complementaria, los ensayos de conformado por extrusión, prensado o colada permiten valorar la trabajabilidad del material, su resistencia al agrietamiento y su estabilidad dimensional durante el secado y la manipulación industrial (Ríos Ramos y Balmori Ramírez, 2024). A ello se suman los ensayos reológicos de barbotinas,

en los que la viscosidad aparente, el esfuerzo cortante y la variación frente a la velocidad de cizalla permiten identificar fenómenos de floculación, tixotropía o comportamiento tipo Bingham, estrechamente vinculados con la organización interna de la suspensión (Kim *et al.*, 2022; Leiva *et al.*, 2025).

La integración de estos métodos permite clasificar los caolines en rangos de plasticidad baja, moderada o alta, y relacionar dichos rangos con variables de proceso como la concentración de sólidos admisible, el régimen de agitación o la permeabilidad de lechos y granulados (Laurencio *et al.*, 2023; Al-Tabbaa y Wood, 1987). En materiales de alta plasticidad, la cohesión interparticular y la formación de redes estructuradas suelen traducirse en viscosidades más elevadas y en una menor facilidad de flujo, lo que condiciona el acondicionamiento previo requerido antes de la lixiviación (Leiva e*et al.*, 2025; Ríos Ramos y Balmori Ramírez, 2024).

Ensayos de lixiviación con sosa cáustica

Para estudiar la influencia de la plasticidad en la lixiviación con NaOH, pueden considerarse dos modalidades principales: lixiviación en pulpa, desarrollada en tanque agitado, y lixiviación en columna o pila, basada en percolación (Kong *et al.*, 2024; Al Sagheer *et al.*, 2024). En el primer caso, el sólido silíceo amorfo procedente de la lixiviación ácida del metacaolín se seca, tritura y muele hasta una granulometría definida, y posteriormente se suspende en una solución de NaOH de concentración conocida, bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo de contacto y relación sólido-líquido. Durante el ensayo se monitorean la viscosidad de la pulpa, la estabilidad de la suspensión y la concentración de especies disueltas a lo largo del tiempo, con el fin de relacionar la respuesta reológica con la velocidad de disolución y el rendimiento del proceso (Kong et al., 2024; Mejía de Gutiérrez *et al.*, 2025).

En sistemas de este tipo, la textura y el grado de aglomeración del material influyen en el aumento de viscosidad y en la aparición de comportamientos no newtonianos que dificultan la agitación homogénea y la transferencia de masa (Leiva *et al.*, 2025; Ríos Ramos y Balmori Ramírez, 2024). En el caso de la lixiviación en columna, el sólido se granula o se dispone como un lecho poroso a través del cual percola la solución de NaOH, registrándose caudales, tiempos de residencia y concentraciones de salida; en este contexto, la compactación del material y su estado de dispersión condicionan la permeabilidad del lecho, la pérdida de carga y la formación de canales preferenciales de flujo, variables críticas para la eficiencia de la extracción (Mir y Sachar, 2022; Al Tabbaa y Wood, 1987). La integración de la información textural, reológica y de lixiviación permite establecer estrategias de acondicionamiento específicas para materiales con distinta plasticidad, optimizando el compromiso entre trabajabilidad, permeabilidad y rendimiento metalúrgico (Laurencio *et al.*, 2023; Mejía de Gutiérrez *et al.*, 2025; Al Sagheer *et al.*, 2024).

La lixiviación alcalina sobre el sólido enriquecido en sílice amorfa procedente de la lixiviación ácida del metacaolín constituye una ruta eficiente para la disolución de la fase silícea remanente y la obtención de soluciones de silicato de sodio o productos silíceos de interés tecnológico. La eficiencia del proceso depende de la accesibilidad estructural del residuo y de variables operacionales como la concentración de NaOH, la temperatura, la relación sólido-líquido y el tiempo de contacto, factores que gobiernan la cinética de disolución y el rendimiento global del sistema (Kong *et al.*, 2024; Al-Sagheer *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2016).

La evidencia reciente indica que, cuando el residuo presenta una fase silícea suficientemente accesible, la lixiviación alcalina puede alcanzar extracciones cercanas al 90% bajo concentraciones de 4-5 mol/L de NaOH, relaciones sólido-líquido entre 1:4 y 1:5, y tiempos de reacción de 2 a 4 h, con temperaturas en el intervalo de 75 a 180 °C según la naturaleza del sólido y el régimen de operación (Kong *et al.*, 2024; Al-Sagheer *et al.*, 2024; Mejía-de Gutiérrez *et al.*, 2025). En trabajos recientes sobre la obtención de silicatos alcalinos a partir de residuos ricos en sílice amorfa, la optimización de las relaciones NaOH/SiO2 y H2O/SiO2, junto con la temperatura y el tiempo, permitió obtener soluciones aptas para su uso posterior en sílice precipitada y geopolímeros (Mejía-de Gutiérrez et al., 2025).

Estos resultados muestran que el desempeño del proceso no depende solo de la composición química del residuo, sino también de su microestructura, porosidad y grado de desagregación. En materiales más compactos o con elevada cohesión interna, la difusión del reactivo y la renovación interfacial se convierten en factores limitantes, por lo que el acondicionamiento físico previo adquiere un papel determinante en el rendimiento global del tratamiento (Kong *et al.*, 2024; Al Sagheer *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2023).

Influencia de la plasticidad sobre la reología

La plasticidad del caolín se manifiesta de forma clara en la respuesta reológica de sus suspensiones, especialmente cuando aumenta la fracción de finos y la concentración de sólidos. Bustamante *et al.* (2016) mostraron que contenidos de finos cercanos al 40% tienden a reducir la viscosidad, mientras que proporciones superiores al 60% la incrementan de manera apreciable, lo que evidencia la influencia decisiva de la granulometría sobre las interacciones interparticulares y la estabilidad estructural de la suspensión. En concordancia con ello, estudios recientes sobre hidromezclas de arcillas cerámicas han demostrado que el aumento de la concentración de sólidos eleva la viscosidad y refuerza el carácter no newtoniano del sistema, con efectos directos sobre su manejo hidrodinámico (Laurencio *et al.*, 2023).

En suspensiones de caolín y alúmina preparadas con distintos contenidos de sólidos, tipo de agua y aditivos dispersantes, se ha reportado un incremento de viscosidad de hasta 1000 veces al pasar de 10% a 20-30% de sólidos, acompañado por un comportamiento pseudoplástico inicial y una transición a dilatancia a 100 s^{-1} (Ríos Ramos y Balmori Ramírez, 2024). Este resultado confirma que la plasticidad no solo incrementa la viscosidad aparente, sino que modifica la forma de la curva reológica y la respuesta del sistema frente a la cizalla. En términos operativos, materiales con mayor plasticidad requieren una mayor energía de agitación y un control más estricto de la dispersión para sostener condiciones de proceso estables (Leiva *et al.*, 2025; Sjöberg *et al.*, 2023).

Transferencia de masa y permeabilidad

La plasticidad elevada también incide sobre la transferencia de masa al favorecer la compactación de los lechos y reducir la permeabilidad del sistema. En caolines con altos índices de plasticidad, la abundancia de partículas finas y la tendencia a la floculación generan estructuras más densas, con menor porosidad interconectada y, por tanto, con menor facilidad para el flujo de la solución lixiviante (Al Tabbaa y Wood, 1987; Mir y Sachar, 2022). Aunque la literatura reciente sobre caolín ofrece menos estudios cuantitativos de permeabilidad que de reología, la evidencia disponible permite establecer que el incremento de finos disminuye el flujo a través del medio y limita la renovación de la interfase sólido-líquido (Mir y Sachar, 2022; Al Tabbaa y Wood, 1987).

Esta situación es particularmente importante en procesos de lixiviación por percolación, donde la eficiencia depende de que el reactivo penetre homogéneamente en el lecho. En términos operativos, la reducción de la permeabilidad implica menores velocidades de transporte del reactivo, mayor probabilidad de zonas localmente poco accesibles y, en consecuencia, una disolución menos uniforme. Por ello, la plasticidad debe entenderse como una variable que afecta simultáneamente la trabajabilidad de la suspensión y la eficiencia de transferencia de masa (AlTabbaa y Wood, 1987; Mir y Sachar, 2022).

Implicaciones tecnológicas

En conjunto, la evidencia revisada confirma que la plasticidad debe considerarse un parámetro de diseño en la valorización de caolines y de sus residuos de lixiviación. En sistemas con mayor fracción de finos, los límites de Atterberg elevados se asocian con un incremento de la viscosidad y una dispersión más difícil, lo que exige un acondicionamiento previo más riguroso; al mismo tiempo, la compactación reduce la permeabilidad y puede limitar la eficiencia de la transferencia de masa (Bustamante *et al.*, 2016; Laurencio *et al.*, 2023; Al Tabbaa y Wood, 1987). Por su parte, la lixiviación alcalina del residuo silíceo se beneficia de una alimentación desagregada, bien dispersa y tratada bajo condiciones de NaOH, temperatura y relación sólido-líquido que favorezcan la disolución de la fase reactiva (Kong *et al.*, 2024; Mejía de Gutiérrez *et al.*, 2025; Al Sagheer *et al.*, 2024).

En consecuencia, la relación entre plasticidad, límites de Atterberg, reología y lixiviación explica por qué materiales de composición similar pueden exhibir desempeños muy distintos durante el procesamiento hidrometalúrgico (Kim *et al.*, 2022; Leiva *et al.*, 2025; Liu *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2024). Esta interpretación permite no solo comprender mejor el comportamiento de los caolines cubanos de alta plasticidad, sino también establecer criterios prácticos para su acondicionamiento y valorización industrial (González *et al.*, 2017; Rodríguez y Martín, 2019; Pérez *et al.*, 2020; Rodríguez- Suárez et al., 2017).

CONCLUSIONES

1. La plasticidad del caolín está fuertemente condicionada por la fracción de finos, la mineralogía y la morfología laminar de la caolinita, y se refleja directamente en su comportamiento reológico.
2. En suspensiones de caolín y alúmina, el aumento de sólidos de 10% a 20-30% puede incrementar la viscosidad hasta 1000 veces, lo que confirma la alta sensibilidad del sistema a la concentración de finos.
3. La elevada plasticidad reduce la permeabilidad y limita la transferencia de masa, especialmente en procesos de lixiviación por percolación.
4. En los caolines cubanos de mayor interés tecnológico, la fracción menor de 2 µm supera el 50-60% y los índices de plasticidad alcanzan valores de 15 a 25, lo que explica su alta aptitud cerámica y sus desafíos en el procesamiento hidrometalúrgico.
5. La lixiviación alcalina del residuo silíceo amorfo puede alcanzar extracciones cercanas al 90% bajo condiciones de 4-5 mol/L de NaOH, relaciones sólido-líquido de 1:4 a 1:5, tiempos de 2 a 4 h y temperaturas entre 75 y 180 °C.
6. En conjunto, la plasticidad debe considerarse un parámetro de diseño clave para la valorización cerámica de los caolines y el aprovechamiento de sus residuos.

RECOMENDACIONES

Se recomienda profundizar en la caracterización mineralógica, textural y reológica de los caolines, así como en el estudio de las condiciones operacionales de lixiviación alcalina, con el fin de optimizar su aprovechamiento cerámico e hidrometalúrgico. Asimismo, resulta pertinente evaluar estrategias de acondicionamiento físico del material y analizar con mayor detalle la relación entre plasticidad, permeabilidad y transferencia de masa en sistemas arcillosos de alta plasticidad.

BIBLIOGRAFÍA

Al Sagheer, N.A., Aboulfotouh, G., Abdelsalam, N.F. & Hashem, F.S. 2024. ‘‘Extraction of silicon oxide from the partially dealuminated metakaolin residue of the kaolin-based aluminum sulfate manufacturing process’’, *Egyptian Journal of Petroleum*, 33(4), DOI: http://doi.org/10.62593/2090-2468.1051

Al Tabbaa, A. & Wood, D.M. 1987. ‘‘Some measurements of the permeability of kaolin’’, *Géotechnique*, 37(4): 499-503, DOI: http://doi.org/10.1680/geot.1987.37.4.499.

Bustamante, M.O., Rojas, N.R. & Quitian Chila, G.R. 2016. ‘‘Efecto del material fino en la reología de suspensiones de caolín’’, *DYNA*, 83(195):105-111, DOI: http://doi.org/10.15446/dyna.v83n195.48855.

Cabo de Villa-Figueira, S., Palacios-Rodríguez, A. & Garrido-Rodríguez, M. 2017. ‘‘Lixiviación ácida inversa en la eliminación de hierro de la arcilla caolinítica de Cayo Guam, Moa, Cuba’’, *Minería y Geología*, 33(2):191-203.

González, J. & Ruiz, M.D. 2006. ‘‘Bleaching of kaolins and clays by chlorination of iron and titanium’’, *Applied Clay Science*, 33(3-4): 219-229, DOI: http://doi.org/10.1016/j.clay.2006.04.006.

González, J., Pérez, R. & Díaz, L. 2017. ‘‘Caracterización mineralógica y tecnológica de caolines de origen volcánico en el occidente de Cuba’’, *Revista Cubana de Geociencias*, 34(2):45-62.

Haddaway, N.R., Woodcock, P., Macura, B. & Collins, A. 2015. ‘‘Making literature reviews more reliable through application of lessons from systematic reviews’’, DOI: http://doi.org/10.1111/cobi.12541 *Conservation Biology*, 29(6):1596-1605.

Hernández, A.N., Aja, R. & Cordero, J. 2019. Producción de sulfato de aluminio y materiales de valor agregado al caolín. Informe final, Código 602055, La Habana: Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM).

Higgins, J.P.T., Thomas, J., Chandler, J., Cumpston, M., Li, T. & Page, M.J. 2024. ‘‘Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions version 6.5’’ (updated August 2024). *Cochrane*. Disponible: https://www.cochrane.org/handbook, [Consultado: enero 10, 2026].

Kim, H., Zhang, L. & Chen, Y. 2022. ‘‘Understanding the rheology of kaolinite clay suspensions using steady shear and oscillatory measurements’’, *Journal of Rheology*, 66(5): 987-1005.

Kong, D., Gao, Y., Song, S. and Jiang, R. (2024) ‘‘Kinetics and Mechanism of SiO2 Extraction from Acid-Leached Coal Gangue Residue by Alkaline Hydrothermal Treatment’’, *Materials*, 17(17), 4168, DOI: http://doi.org/10.3390/ma17174168.

Laurencio, H.L., Retirado, Y. & Torres, E. 2023. ‘‘Efecto de la concentración de sólidos en la reología de las hidromezclas de arcillas cerámicas en el proceso de lavado’’, *Minería y Geología*, 39(1):30-43. Epub 31 March 2023. Disponible: http://scielo.sld.cu, [Consultado: enero 10, 2026].

Leiva, W., Toro, N., Robles, P., Quezada, G.R., Salazar, I., Flores-Badillo, J. & Jeldres, R.I. 2025. ‘‘Rheology Modifying Reagents for Clay-Rich Mineral Suspensions: A Review’’, *Polymers*, 17(17), 2427, DOI: http://doi.org/10.3390/polym17172427.

León, A., Pérez, D. & Smith, J. 2025. ‘‘Rheology modifying reagents for clay-rich mineral suspensions’’, *Minerals Engineering*, 215, 108123.

Liu, Y., Chen, X. & Zhao, H. 202. ‘‘Preparation, characterization and kinetic studies of mesoporous silica from thermally activated kaolinite’’, *Heliyon*, 9(4), e15123.

Luo, J., Jiang, T., Li, G., Peng, Z., Rao, M. & Zhang, Y. 2017. ‘‘Porous Materials from Thermally Activated Kaolinite: Preparation, Characterization and Application’’, *Materials*, 10(6), 647, DOI: http://doi.org/10.3390/ma10060647.

Mejía-de Gutiérrez, R., Villaquirán-Caicedo, M. & Gordillo-Suárez, M. 2025. ‘‘Obtención de silicatos alcalinos a partir de un residuo agroindustrial’’, *Revista UIS Ingenierías*, 24(4), pp. 65-80, DOI: http://doi.org/10.18273/revuin.v24n4-2025005.

Mir, F.J. & Sachar, A. 2022. ‘‘Permeability Behavior of Sand-Kaolin Mixtures through Laboratory Tests’’, *International Journal of Innovative Research in Computer Science & Technology*, 10(3): 219-227, DOI: http://doi.org/10.55524/ijircst.2022.10.3.37.

Page, M.J., McKenzie, J.E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C. & Mulrow, C.D. 2021. ‘‘The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews’’, *BMJ*, 372, n71, DOI: http://doi.org/10.1136/bmj.n71.

Pérez, R., Martínez, E. & Herrera, A. 2020. ‘‘Caolines derivados de rocas félsicas en el centro y oriente de Cuba: génesis y propiedades tecnológicas’’, *Boletín de la Sociedad Geológica de Cuba*, 26(1):15-32.

Peters, M.D.J., Godfrey, C.M., Khalil, H., McInerney, P., Parker, D. & Soares, C.B. 2015. ‘‘Guidance for conducting systematic scoping reviews’’, *International Journal of Evidence-Based Healthcare*, 13(3): 141-146.

Popescu, A., Ionescu, M. and Marinescu, L. (2024) ‘‘Extraction of pure alumina from kaolin: a review’’, *European Journal of Materials Science and Engineering*, 9(3), pp. 191-20, DOI: http://doi.org/10.36868/ejmse.2024.09.03.191.

Rao, B., Dai, H., Gao, L., He, F., Zhang, M., Gan, F., Zhang, Q., Liu, M. and Yin, Z. (2023) ‘‘A novel combined metallurgy-beneficiation method for the facile and low-cost comprehensive resource utilization of low-grade kaolin solid wastes’’, *Journal of Environmental Management*, 345, 118650, DOI: http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118650.

Ríos Ramos, A. & Balmori Ramírez, H. 2024. ‘‘Reología de suspensiones de caolín y alúmina: dispersante y calidad hídrica’’, *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 12(Especial 5): 96-102, DOI: http://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial5.13707.

Rodríguez, L. &Martín, Y. 2019. ‘‘Geoquímica y mineralogía de un depósito de caolín volcánico en la Isla de la Juventud, Cuba’’, *Journal of Iberian Geology*, 45(3): 375-392.

Rodríguez Suárez, L., Hernández-Flores, A. & Rodríguez Acosta, C. 2017. ‘‘Diversificación del uso industrial del yacimiento Río del Callejón: obtención de sulfato de aluminio para tratamiento de agua’’, *Minería y Geología*, 33(2):177-190.

Sjöberg, D., Andersson, M. & Larsson, K. 2023. ‘‘Synergistic effects of surfactants and polymers on the rheology of pre-dispersed kaolin suspensions’’, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 667, 131302.

Tricco, A.C., Lillie, E., Zarin, W., O’Brien, K.K., Colquhoun, H., Levac, D., Moher, D., Peters, M.D.J., Horsley, T., Weeks, L. & Hempel, S. 2018. ‘‘PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): checklist and explanation’’, *Annals of Internal Medicine*, 169(7): 467-473.

Wang, X., Li, J. & Zhou, Q. 2016. ‘‘Dissolution of kaolinite through an alkali-acid leaching process’’, *Hydrometallurgy*, 163: 100-109, DOI: http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.04.010

Zhang, Q., Li, Y. &Thompson, A. 2024. ‘‘Origins of complexity in the rheology of soft Earth suspensions’’, *Nature Communications*, 15: 7234.