

Reología de suspensiones de caolín y alúmina: dispersante y calidad hídrica Rheology of kaolin and alumina suspensions: dispersant and water quality

A. Ríos-Ramos , H. Balmori-Ramírez 

Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Instituto Politécnico Nacional, 07738, Ciudad de México, CDMX, México.

Resumen

La reología de las suspensiones de caolín y alúmina ha sido poco estudiada. Sin embargo, se conocen factores influyentes como el contenido de sólidos, el tipo y la concentración de dispersante, y la calidad del agua utilizada. Los iones presentes en el agua interactúan con las cargas libres de las partículas, modificando el comportamiento reológico de las suspensiones. En este trabajo se analizaron suspensiones libres con diferentes contenidos de sólidos, preparadas con agua de la llave y agua desionizada, y con distintos contenidos de dispersante. Se concluyó que la viscosidad de suspensiones con 20% y 30% de sólidos alcanza 2,000,000 mPa·s a una $\dot{\gamma}$ de 10 s^{-1} , mientras que las muestras con 10% de sólidos tienen una viscosidad de 16,000 mPa·s en el mismo punto. Las muestras muestran un comportamiento pseudoplástico al inicio del análisis y se vuelven dilatantes a una $\dot{\gamma}$ de 100 s^{-1} . Además, la viscosidad de las suspensiones es mayor cuando se utiliza agua desionizada.

Palabras Clave: Reología, caolín, alúmina, dispersante, calidad del agua.

Abstract

Rheological behaviour of kaolin and alumina suspensions has been currently little studied. However, influential factors such as solids content, type and concentration of dispersant, and the quality of water used are known. The ions present in the water interact with the free charges of the particles, modifying the rheological behavior of the suspensions. In this study, suspensions with different solids contents were analyzed, prepared with tap water, and deionized water, and with varying dispersant contents. It was concluded that the viscosity of suspensions with 20% and 30% solids content reaches 2,000,000 mPa·s at a shear rate of 10 s^{-1} , while samples with 10% solids content have a viscosity of 16,000 mPa·s at the same point. The samples exhibit pseudoplastic behavior at the beginning of the analysis and become dilatant at a shear rate of 100 s^{-1} . Additionally, the viscosity of the suspensions is higher when deionized water is used.

Keywords: Rheology, kaolin, alumina, dispersant, water quality.

1. Introducción

Los cerámicos son sólidos conformados térmicamente integrados por dos o más elementos, siendo uno de ellos no metálico y el otro puede o no serlo (Barsoum, 1997). Estos materiales pueden ser encontrados en forma amorfa o vítrea, monocristalina policristalina, o una mezcla de ellas. Sus propiedades más importantes incluyen la alta resistencia a temperaturas extremas y al ataque químico gracias a la fortaleza de sus enlaces atómicos. Este tipo de materiales se pueden clasificar en dos grandes grupos como cerámica tradicional y cerámica avanzada.

1.1. Cerámica tradicional

La cerámica tradicional es el grupo del que se fabrican objetos de arcilla o barro que densifican mediante la aplicación de calor. Así mismo, son materiales que tienen como base silicatos y aluminosilicatos principalmente materiales arcillosos, cementos y vidrios, materias primas provenientes de yacimientos naturales. Con estas se producen objetos que, inicialmente se moldean a mano o mediante el uso de torno y que son finalmente decorados con incisiones, pinturas o esmaltes. (Vázquez, 2005)

La gran mayoría de estos cerámicos poseen una estructura con tamaño de grano grueso y una porosidad alta fácilmente visible. Estos han sido utilizados por diferentes culturas a lo

*Autor para la correspondencia: arr.260100@gmail.com

Correo electrónico: arr.260100@gmail.com (Andrea Ríos-Ramos), hbalmori@ipn.mx (Heberto Balmori-Ramírez)

largo del tiempo, empleándose en objetos como utensilios, vasijas y decoraciones.

1.2. Cerámica avanzada

Por otro lado, la cerámica avanzada es el campo de la cerámica dedicado a los materiales de alta tecnología, los cuales representan mejoras significativas tanto científicas como tecnológicas; Estos materiales se utilizan en los campos de ingeniería y aplicaciones funcionales que cumplen con requisitos específicos de rendimiento, resistencia y durabilidad en áreas como la fabricación de componentes electrónicos, aeroespaciales, médicos, biomateriales y herramientas de corte, entre otros. (Vázquez, 2005)

Estos materiales se fabrican a partir de materias primas artificiales que se someten a procesos químicos para proporcionarles alta pureza y mejoran sus características físicas. Microestructuralmente, se componen de granos finos que no pueden ser observados a simple vista.

Como métodos de fabricación se utilizan técnicas avanzadas de procesamiento avanzadas, tales como la sinterización a altas temperaturas, el uso de altas presiones, métodos de deposición y recubrimientos especializados, así como el uso de nanopartículas que mejoran las propiedades de los materiales y productos obtenidos.

Las propiedades específicas de este tipo de cerámica incluyen una alta resistencia a la temperatura, a la corrosión, alta dureza, conductividad térmica y eléctrica, así como biocompatibilidad.

1.3. Alúmina

La alúmina es un compuesto químico inorgánico oxidado que se encuentra en forma de polvo, con la fórmula Al_2O_3 . Se produce típicamente mediante el proceso Bayer para aplicaciones tanto en la industria cerámica como en la del aluminio (Reed, 1995), así como otros procesos químicos.

Entre los usos de la alúmina se encuentran el revestimiento de autopartes y de barreras térmicas, abrasivos utilizados para pulir, convertidores catalíticos y en el sector de producción de aluminio primario (Duan *et al.*, 2024). De igual forma, se utiliza en componentes que operan a temperaturas de trabajo significativamente, de aproximadamente 1650°C (Herrera *et al.*, 2012).

Las propiedades mecánicas que posee la alúmina son excepcionales, como una dureza de 9 en la escala de Mohs, una resistencia a la compresión de hasta 3000 MPa, alta conductividad, punto de fusión mayor a 2000°C, bajo coeficiente de dilatación y buena estabilidad química al encontrarse con una gran variedad de ácidos y álcalis fuertes a elevadas temperaturas. (Steelceram, 2021)

1.4. Caolín

El caolín es un mineral proveniente de transformaciones de feldespatos que se producen por la acción disgregante de la atmósfera y la humedad, la del agua rica en dióxido de carbono o por emanaciones volcánicas, formándose de manera lenta. Siendo la razón por la cual los yacimientos de caolín se encuentran dentro del grupo de los minerales abundantes en la

corteza terrestre, otros minerales dentro de este grupo son el cuarzo, las micas y la calcita (Bartolomé, 1997).

La estructura cristalina de la caolinita está formada por dos láminas de alúmina y sílice con agua intercalada, siendo partículas planas y hexagonales, las cuales, al estar suspendidas en agua, tienen cargas negativas en los bordes y cargas que pueden ser positivas o negativas en las caras de las partículas dependiendo del pH de la suspensión. Gracias a estas cargas, las suspensiones presentan una viscosidad superior cuando se tiene un empaquetamiento mayor de las partículas debido a que el espacio ocupado por el agua de la suspensión se reduce. (Molina, 2019)

Características como la plasticidad y la resistencia mecánica del caolín, así como las propiedades reológicas de este se encuentran relacionadas con el grado de empaquetamiento que tienen las partículas, siendo este mayor, cuanto más fina sea la distribución granulométrica de las partículas. (Bartolomé, 1997)

Algunas industrias en las que se utiliza el caolín son la cerámica, papel, plástico, cemento, industrias químicas y petroquímicas, medicina, cosmética, agricultura, alimenticia, entre otras.

1.5. Suspensión coloidal

Una suspensión coloidal es una suspensión formada por pequeñas partículas, estas son de tamaños menores a 1 μm , y se encuentran dispersas en un solvente líquido. Esta distribución y uniformidad de tamaños son las que hacen a estas suspensiones componentes idóneos para la cerámica. (Esquivel *et al.*, 2000)

La concentración de partículas sólidas en la suspensión presenta interacciones entre ellas, dichas interacciones se dan por la presencia de fuerzas de Van der Waals de atracción. El estudio de las propiedades reológicas de las suspensiones coloidales es de gran importancia ya que con este se pueden conocer las propiedades que se deriven de las fases presentes.

Además, al aplicar esfuerzos de corte a la suspensión, las partículas coloidales tienen a formar cadenas en dirección del flujo generado. Cuando se aumenta la tasa de rapidez de los esfuerzos se produce un adelgazamiento en la viscosidad, mostrando una disminución en los calores de la viscosidad por el reordenamiento de las partículas coloidales.

1.6. Comportamiento reológico

El comportamiento reológico de las suspensiones cerámicas está íntimamente ligada al contenido de sólidos. Las suspensiones con bajos contenidos de sólidos o que son muy diluidas, usualmente presentan un comportamiento newtoniano. Por otro lado, las suspensiones con altos contenidos de sólidos aumentan su viscosidad a altas tasas de cizallamiento, este fenómeno se conoce como engrosamiento por cizallamiento. (De Camargo *et al.*, 2021)

Cuando las suspensiones se encuentran constituidas por partículas menores de 1 μm , el comportamiento reológico es determinado por las fuerzas coloidales derivadas de las de Van der Waals y de las fuerzas de repulsión, que son generadas por fenómenos superficiales y dispersantes. Del mismo modo la forma y el área superficial de las partículas intervienen en la

reología de la muestra; ya que si se tienen partículas no esféricas se observa una viscosidad mayor de la suspensión.

De igual forma, en la literatura se encuentra reportado que las transiciones de adelgazamiento a engrosamiento por

Tabla 1. Contenidos de dispersante utilizados en las suspensiones.

| % sólidos | Concentración de dispersante [$\text{g}_{\text{dispersante}}/\text{g}_{\text{polvo}}$] | | | | | | | $\text{g}_{\text{dispersante}}$ usado |
|-----------|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|
| | 0 | 1×10^{-4} | 2×10^{-3} | 1×10^{-2} | 3×10^{-2} | 4×10^{-2} | 5×10^{-2} | |
| 10 | 0 | 0.001 | 0.02 | 0.1 | 0.3 | No | 0.5 | |
| 20 | 0 | 0.002 | 0.04 | 0.2 | 0.6 | 0.8 | 1 | |
| 30 | 0 | 0.003 | 0.06 | 0.3 | 0.9 | 1.2 | 1.5 | |

Existen materiales conocidos como tixotrópicos, que son aquellos en los que la viscosidad disminuye con el tiempo a una tasa constante de cizallamiento.

La temperatura es otro factor considerable en la viscosidad de las suspensiones cerámicas, siendo menor cuando la temperatura de la suspensión es mayor.

1.7. Dispersantes

El uso de dispersantes en la preparación de suspensiones es relevante debido a que, con este, se minimiza la atracción entre partículas dentro de la suspensión, manteniendo así la estabilidad. Recordando que la carga de sólidos se relaciona con la viscosidad de la suspensión, existen bajas concentraciones de sólidos, incrementando la distancia entre partículas y, aumentando por consecuencia la viscosidad de la muestra.

Una propiedad a considerar en la dispersión de las partículas que interactúan en una suspensión es la afinidad con el dispersante utilizado y con el medio solvente simultáneamente.

Los dispersantes más utilizados en el procesamiento de suspensiones acuosas son el poliácido de amonio, el poliácido de sodio, polivinilpirrolidona y el ácido poliacrílico. (De Camargo *et al.*, 2021)

2. Metodología

Los materiales utilizados en este trabajo fueron polvos de alúmina y caolín, así como dispersante comercialmente conocido como Darvan C. De igual forma, como medios de dispersión se utilizaron agua desionizada y agua de la llave con la finalidad de observar la influencia de estas en el comportamiento reológico de las suspensiones.

2.1. Caracterización de los polvos cerámicos

Los polvos a utilizar se analizaron mediante difracción de rayos X en el equipo D8 Focus marca Bruker, utilizando un voltaje de 35 kV, una corriente de 25 mA, una velocidad de escaneo de $3^\circ/\text{min}$ y un incremento de 0.02° .

De igual forma se analizaron a través de microscopía electrónica de barrido en un microscopio de alta resolución JEOL JSM-6701F, con una aceleración de voltaje de 10 kV, utilizando magnificaciones de 3000x, 10000x y 30000x, así como cinta de grafito para adherir las muestras a la base de latón.

El análisis de superficie específica basado en el método de Brunauer, Emmett y Teller (B.E.T.) se realizó en el analizador

de fisisorción y quimisorción, Anton Paar modelo Autosorb iQ MP con una temperatura del baño de 77.35 K, una densidad del líquido de 0.808 g/cc y una celda de 9 mm.

Finalmente se analizó el tamaño de las partículas en el equipo Sympatec Helos BR utilizando una presión de 2bar utilizando un rango de 0.25 a 87.5 μm .

El equipo antes mencionado utiliza una técnica desarrollada en 1960, conocida como la difracción de rayos láser, se emplea para medir la distribución de tamaño de partículas de una muestra. Su principio de funcionamiento se basa en la emisión del láser monocromático hacia una muestra de partículas suspendidas, ya sea en aire o en un líquido. El rayo incide sobre las partículas, generando una dispersión de la luz en diferentes direcciones. La forma en que la luz se dispersa es el factor determinante del tamaño de la partícula. Esta dispersión de la luz es captada por detectores que se encuentran colocados en diferentes ángulos.

Dado que las partículas más pequeñas dispersan la luz en ángulos más amplios, se utilizan diferentes métodos matemáticos para calcular la distribución del tamaño de partícula a partir de la intensidad y el ángulo de esta dispersión. (De Luxan *et al.*, 1988)

2.2. Preparación de las suspensiones

Las suspensiones se prepararon con 10%, 20% y 30% en peso de sólidos. Utilizando una relación de 70 alúmina y 30 caolín y con diferentes concentraciones del dispersante Darvan C, las cuales se muestran en la Tabla 1; de igual forma las muestras se prepararon para los dos tipos de agua mencionados previamente. Es importante mencionar que las suspensiones con una concentración de $0.04 \text{ g}_{\text{dispersante}}/\text{g}_{\text{polvo}}$ únicamente se realizaron con contenidos de sólidos de 20% y 30%.

El agua desionizada utilizada fue la comercializada por la empresa Hycel, mientras que el dispersante, vendido por R. T. Vanderbilt Company, tiene una densidad de $1.1 \text{ g}/\text{cm}^3$ a 25°C , un pH entre 7.5 y 9, es completamente soluble en medios acuosos y tiene un 25% de parte activa. Mientras que el agua de la llave presentó una conductividad iónica específica de $993.6 \mu\text{m}/\text{cm}$ a una temperatura de 25°C .

El primer paso para realizar las suspensiones fue realizar el pesaje de los polvos de alúmina y caolín, así como el dispersante a utilizar en la báscula Sartorius modelo Entris II. Posteriormente, las bolas de alúmina destinadas a la molienda y al envejecimiento de la suspensión, usadas en una relación aproximada de 1:10 respecto a la cantidad de polvo, se pesaron en una báscula Ohaus precision standard. Estas bolas tenían un diámetro de 0.2 cm y pesos entre 0.221 g y 0.246 g.

Una vez que se tuvo todo pesado, los materiales se colocaron en los frascos con las dimensiones según se muestran en la Figura 1, el orden para colocar los materiales dentro del frasco fue: primero los polvos, luego las bolas y el agua con o sin dispersante según la muestra a preparar.

Finalmente, el frasco se cerró colocando cinta teflón alrededor de la rosca, se colocó la tapa y luego se aseguró con cinta Diurex para evitar que se abriera durante el movimiento y que la solución se derramara.

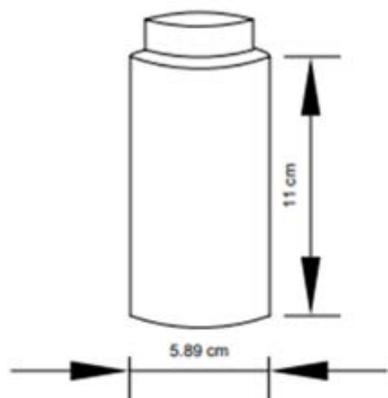


Figura 1: Dimensiones de los frascos utilizados en el envejecimiento.

Después de homogeneizar la suspensión con una ligera agitación manual, el envejecimiento se realizó en el equipo Pascall L9fs, engrasando primero los rodillos que giran a una velocidad promedio de 532 RPM. Es de importancia mencionar que el proceso estuvo en constante revisión evitando la presencia de algún fallo, sin embargo, este se realizó de forma adecuada todo el tiempo. Se engrasaron los rodillos una o dos veces más durante las 24 horas evitando el daño del equipo. Una vez terminado el tiempo de molienda, se le quitó la cinta envolvente al frasco y se procedió a la medición de su reometría.

2.3. Análisis reológico

Se llevó a cabo un análisis reológico de la viscosidad de las muestras utilizando el equipo Anton Paar Standard Measuring System, Modular Compact Rheometer MCR 502, con una frecuencia de 10 Hz, un ángulo de desviación de 10 mrad, una temperatura de 25°C y un rango de velocidad de corte de 0.01 a 1000 s⁻¹, mediante la geometría de cilindros concéntricos y de platos paralelos de la misma marca, la primera geometría se puede observar en la Figura 2, donde L mide 39.997 mm, r_1 13.322 mm y r_2 14.462 mm; el cono se encuentra a 120° y la capacidad es de 19 mL aproximadamente.

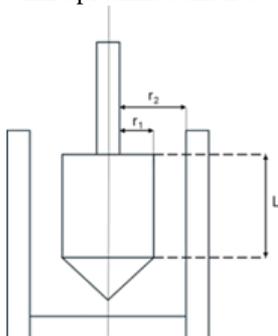


Figura 2: Esquema de la geometría de cilindros concéntricos utilizada. Basado en el esquema del manual de la geometría. (ISO 3219-2:2023) 2021)

3. Resultados y Discusión

Se obtuvieron resultados diversos derivados de los diferentes métodos de caracterización llevados a cabo, así como de los diferentes contenidos de sólidos, de dispersante y para los dos tipos de agua utilizados, los cuales se describen a continuación.

3.1. Análisis estructural

A partir de la difracción de rayos X, se obtuvieron los difractogramas correspondientes de cada polvo. Después de un proceso de refinamiento en el programa HighScore Plus y al graficado en Origin, se logró identificar que, en el caso de la alúmina se trata de 100% de alúmina Alpha, presente en forma de Corindón que tiene una estructura hexagonal, mientras que el caolín se determinó que, es una mezcla de 96.8% de caolinita y 3.2% de cuarzo. Estos resultados se pueden observar en la Figura 3.

La carta utilizada en el caso de la alúmina fue la identificada con el código 98-003-1546. Las cartas utilizadas para la identificación del caolín fueron, para el caso de la caolinita la carta con el código 98-006-8697, mientras que la del cuarzo tiene el código de referencia 98-007-4529.

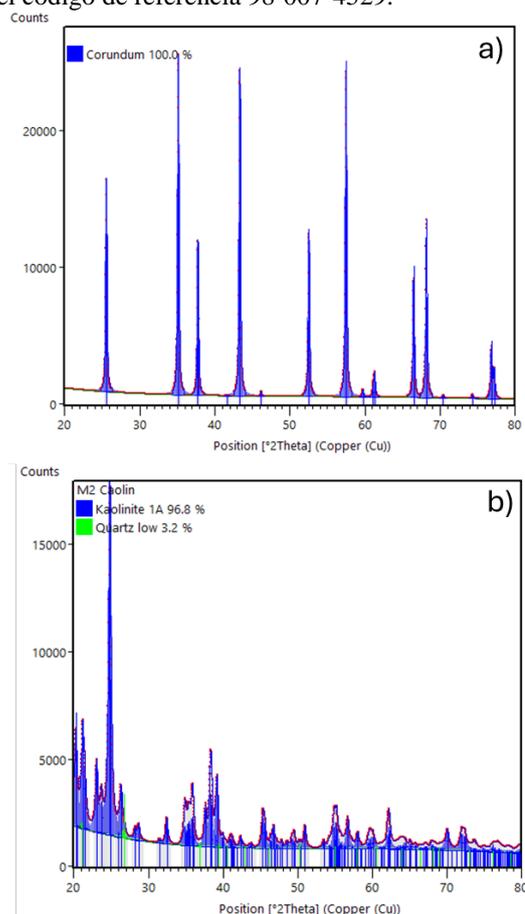


Figura 3: Difractogramas indexados de los polvos, a) alúmina y b) caolín.

3.2. Microscopía Electrónica de Barrido

Las imágenes obtenidas a través del microscopio se pueden observar en la Figura 4, las cuales fueron dimensionadas mediante el programa ImageJ, con la finalidad de obtener la longitud más larga de las partículas de ambos polvos, pudiendo

observarse que las partículas de alúmina son de tamaños entre 0.05 y 0.7 μm con una morfología ovalada, mientras que las del caolín son partículas de entre 0.1 y 5 μm con morfología alargada y plana parecidas a hojuelas hexagonales.

El tamaño de las partículas influye en la viscosidad de las suspensiones debido a la superficie específica de las partículas que interactúan con el medio. Con lo anterior se dice que las partículas que tienen un menor tamaño tienden a aumentar la viscosidad de la suspensión.

Dicho de otra forma, la forma y el tamaño de las partículas que se encuentran en suspensión, es decir, su distribución, determina la fracción máxima del empaquetamiento de estas, lo que determina la red estructural de estas.

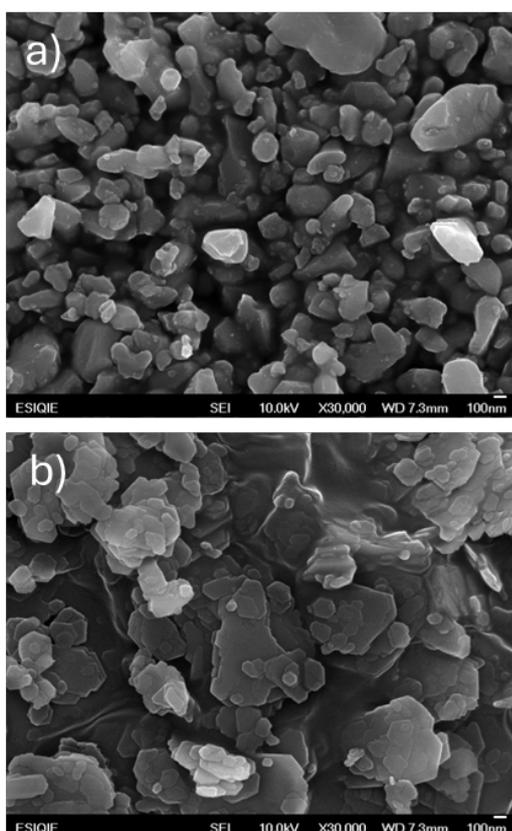


Figura 4: Micrografías tomadas para la caracterización de los polvos, a) alúmina y b) caolín.

3.3. Análisis de Superficie Específica B.E.T.

En la Figura 5 se pueden observar las gráficas realizadas a partir de los datos obtenidos del análisis B.E.T., donde se puede percibir que ambos polvos poseen una Isoterma de tipo III, la cual es correspondiente a polvos macroporosos o densos (Alafnan *et al.*, 2021), representando una adsorción irregular, con grupos de partículas adsorbidas y partes superficiales libres.

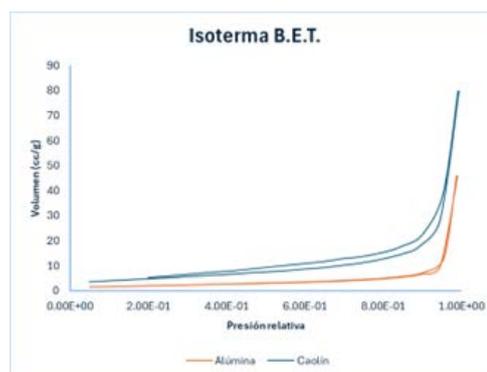


Figura 5: Isotermas B.E.T. de los polvos analizados.

De igual forma, de este estudio se obtuvo que la alúmina presenta un área superficial de 7.351 m^2/g , mientras que el caolín presenta una de 18.071 m^2/g ; ambos polvos presentan un radio de poro de 17.098 \AA .

3.4. Tamaño de partícula

Los resultados obtenidos del estudio de la distribución del tamaño de partículas de los polvos utilizados se realizaron las gráficas presentadas en la Figura 6, donde se puede observar que la alúmina tiene un tamaño promedio de 0.7 μm , mientras que el caolín tiene partículas de 2.74 μm , aunque ambos polvos tienen partículas dentro del rango analizado.

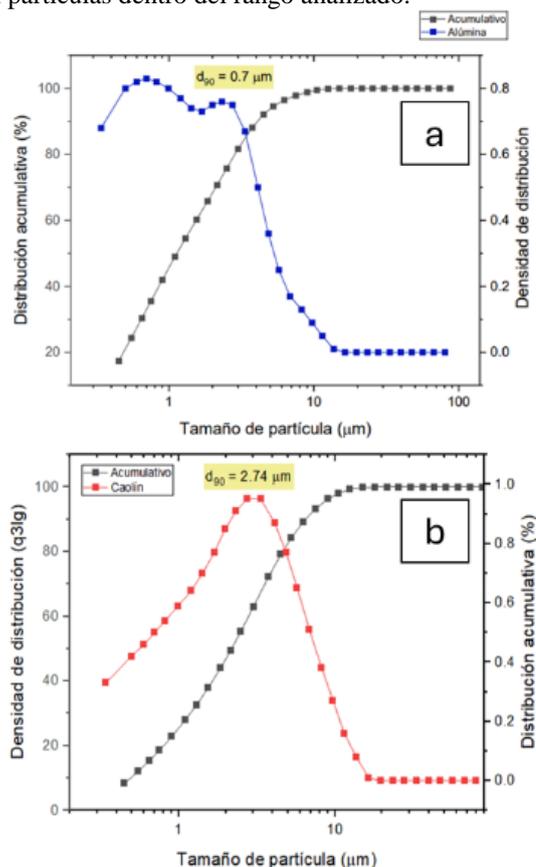


Figura 6: Distribución del tamaño de partícula de los polvos, a) alúmina y b) caolín

3.5. Reometría

Dentro del estudio reométrico, la propiedad buscada en este caso fue la viscosidad de las suspensiones cerámicas

fabricadas con la finalidad de observar la influencia que tiene la calidad del agua con la que estas fueron producidas, obteniendo las diferentes gráficas observadas en la Figura 7, donde se observa el comportamiento reológico de las suspensiones en función del contenido de sólidos y de dispersante.

En la Figura 7a se puede observar que algunas suspensiones realizadas con agua desionizada cuentan con viscosidades menores en comparación con realizadas con agua de la llave. Por ejemplo, lo anterior sucede con una concentración de dispersante de 0, 0.0001, 0.002, 0.01 y 0.03 g_{dispersante}/g_{sólido}, mientras que con una concentración de 0.05 g_{dispersante}/g_{sólido} la viscosidad con agua desionizada es mayor. Para el caso de la Figura 7b, en la que se describe la gráfica de 20% sólidos se observa que las suspensiones a base de agua desionizada tienen valores superiores para concentraciones de dispersante de 0, 0.0001, 0.002, 0.01, 0.03 y 0.05 g_{dispersante}/g_{sólido}, siendo el caso contrario a una concentración de 0.04 g_{dispersante}/g_{sólido}.

En la Figura 7c, la que representa la gráfica de 30% sólidos se observa que los valores de viscosidad con agua desionizada son mayores en contenidos de dispersante de 0, 0.0001, 0.03, 0.04 y 0.05 g_{dispersante}/g_{sólido}, mientras que las suspensiones que presentan una viscosidad mayor con agua de la llave son las que tienen 0.002 y 0.01 g_{dispersante}/g_{sólido}.

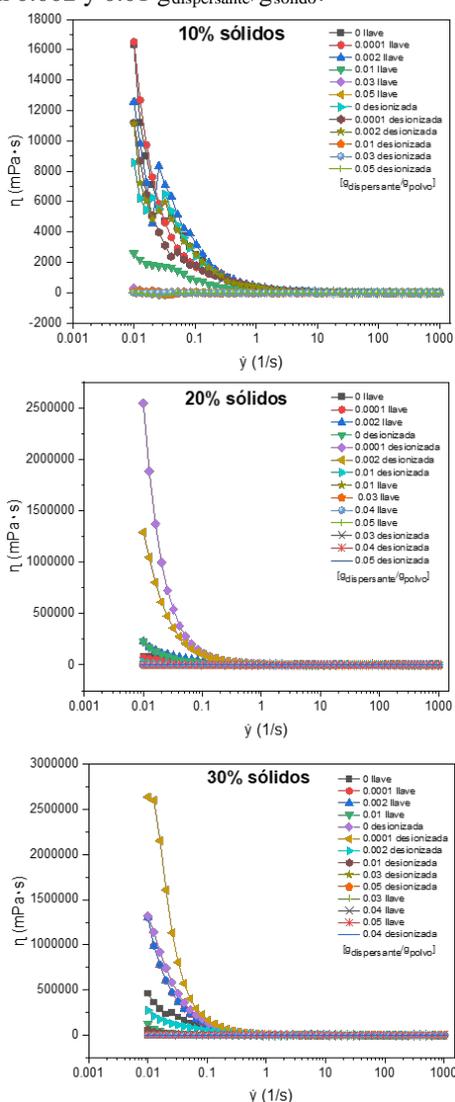


Figura 7: Gráficas de velocidad de corte vs. Viscosidad.

Lo anterior describe que, a concentraciones bajas de sólidos, predominan los valores de viscosidad de suspensiones preparadas con agua de la llave, sin embargo, con concentraciones mayores de sólidos, la viscosidad tiene valores más grandes cuando las suspensiones se preparan con agua desionizada.

La Figura 8 representa el comportamiento de la viscosidad a las diferentes concentraciones de dispersante para los diferentes contenidos de sólidos; donde se observa que las suspensiones a una velocidad de corte de 10 s⁻¹ se tiene una viscosidad máxima de aproximadamente 3900 mPa·s, para una velocidad de corte de 100 s⁻¹ el valor máximo obtenido de viscosidad es 550 mPa·s aproximadamente y para una velocidad de corte de 1000 s⁻¹ la viscosidad máxima es de alrededor 90 mPa·s.

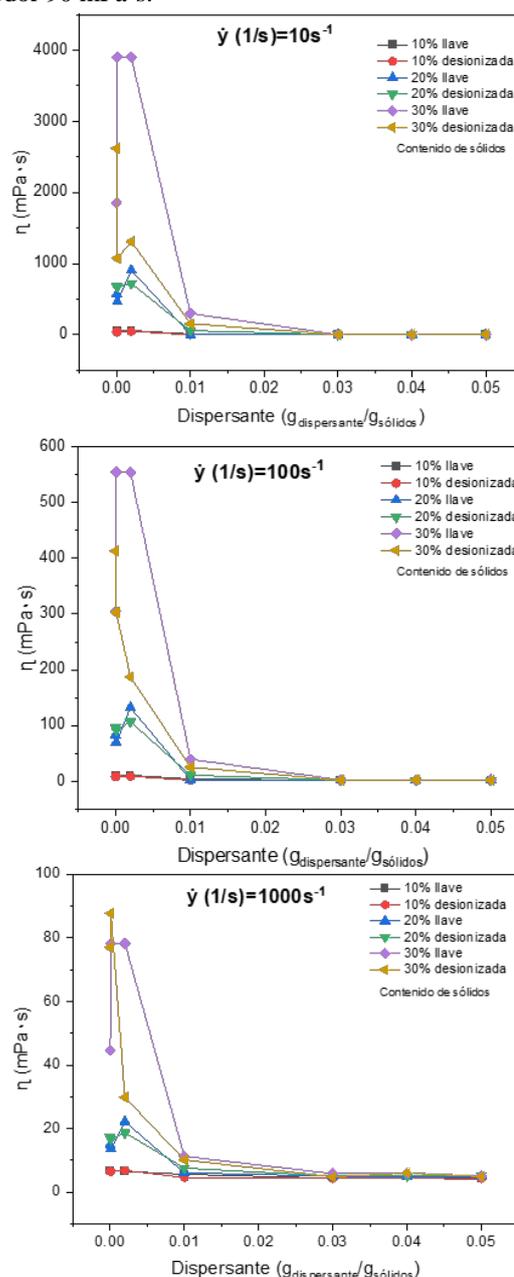


Figura 8: Gráficas de contenido de dispersante vs. Viscosidad a velocidad de corte constante.

En la Figura 8a se puede observar la suspensión de 30% de sólidos preparada con agua de la llave presenta una viscosidad

mayor y que a un contenido de dispersante de 0.002 $\text{g}_{\text{dispersante}}/\text{g}_{\text{sólido}}$ las muestras aumentan su viscosidad a excepción de las muestras de 10% de sólidos.

En el caso de la Figura 8b se observa que la muestra de mayor viscosidad es la de 30% de sólidos preparada con agua de la llave y en este caso las únicas suspensiones que aumentan su viscosidad a 0.002 $\text{g}_{\text{dispersante}}/\text{g}_{\text{sólido}}$ son las dos de 20% de sólidos y 30% de sólidos preparada con agua de la llave; y a un contenido de 0.03 $\text{g}_{\text{dispersante}}/\text{g}_{\text{sólido}}$ se observa como la viscosidad de las suspensiones se estabiliza.

La Figura 8c es la que representa mejor que a bajos contenidos de sólidos, la suspensión que predomina en la viscosidad es la de la llave; mientras que, a altos contenidos de sólidos, en este caso 20 y 30%, la viscosidad más alta la presenta la suspensión preparada con agua desionizada.

4. Conclusiones

El estudio de las suspensiones cerámicas mixtas de caolín y alúmina es un campo poco estudiado que es de importancia debido a que el desarrollo tecnológico de las mismas se basa en la preparación en conjunto de estos. Factores como el contenido de sólidos y de dispersante, así como la calidad del agua utilizada durante la preparación de la suspensión y el tipo de dispersante son influyentes en el comportamiento de estas, sobre todo en el comportamiento reológico.

El punto clave de este trabajo fue demostrar la existencia de la influencia los factores mencionados con anterioridad en la viscosidad de las suspensiones cerámicas mixtas de caolín y alúmina, siendo observado que con un contenido de sólidos de 10% en peso, la viscosidad predomina en suspensiones preparadas con agua de la llave, mientras que en suspensiones con 20 y 30% de sólidos, los valores mayores de viscosidad se observan en las preparadas con agua desionizada. Siendo de importancia mencionar que, a bajas velocidades de corte, los valores más altos de viscosidad los presentan las suspensiones preparadas con agua de la llave, mientras que, a velocidades de corte más altas, la mayor viscosidad se presenta en las suspensiones preparadas con agua desionizada.

Sin embargo, como se pudo observar en este trabajo, las propiedades reológicas se encuentran estrechamente relacionadas con las características propias del material, como el tamaño y la morfología de sus partículas, incluida la estructura cristalina de la materia prima.

El conocimiento de las propiedades reológicas de las suspensiones es de importancia industrial debido a que de ella depende el desarrollo y el uso de diversos materiales que pueden ser utilizados en pastas cerámicas, esmaltes, tintas digitales, e incluso materiales utilizados en la construcción, por mencionar algunos.

Lo anterior se hace con la finalidad de controlar la calidad, mejorar y optimizar el comportamiento durante el procesamiento, así como el comportamiento a largo plazo en los productos finales.

Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento al Instituto Politécnico Nacional (IPN), en particular a la Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP) y a la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE), por su inestimable apoyo y colaboración en este proyecto.

Referencias

- Alafnan, S., Awotunde, A., Glatz, G., Adjei, S., Alrumaih, I., & Gowida, A. (2021). Langmuir adsorption isotherm in unconventional resources: Applicability and limitations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 207, 109172.
- Barsoum, M. (1997). *Fundamentals of Ceramics*. Philadelphia: Institute of Physics Publishing.
- Bartolomé, J. (1997). El caolín: composición, estructura, génesis y aplicaciones. *Cerámica y vidrio*, 7-19.
- De Camargo, I. L., Erbereli, R., Taylor, H., & Fortulan, C. A. (2021). 3Y-TZP DLP Additive Manufacturing: Solvent-free Slurry Development and Characterization. *Materials Research*, 24(2).
- De Camargo, I., Mota, M., Fortulan, C., & Branciforti, M. (2021). A review on the rheological behavior and formulations of ceramic suspensions for VAT photopolymerization. *Ceramics International*, 47.
- De Luxan, M., Frias, M., Sánchez, M. (1988) La difracción de rayos láser en el análisis de la granulometría de partículas. *Química Hoy*.
- Duan, H., Ran, J., Zhao, J., Li, S., Chen, Y., & Yin, S. y. (2024). Removal routes of hazardous sodium oxalate in the alumina industry based on Bayer process: A review. *Chemical Engineering Research and Design*, 13-27.
- Esquivel, R., Ramírez, G., & Noguez, C. (2000). Propiedades viscoelásticas de suspensiones coloidales. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 14-22.
- Herrera, A., Álvarez, O., Escobar, J., Moreno, V., A. O. J. & Hotza, D. (2012). Fabricación y caracterización de espumas de alúmina para aplicación en quemadores porosos radiantes. *Revista Materia*, 973-987.
- Molina, A. (2019). Efecto de la calidad del agua del proceso de beneficio en la reología de las suspensiones de caolín cerámico. *Ingeniería y Competitividad*, 117-126.
- Organización Internacional de Normalización. (2023). Reología: Métodos de medición de la viscosidad utilizando viscosímetros rotacionales: Parte 2: Métodos de medición de la viscosidad utilizando viscosímetros rotacionales (ISO 3219-2:2023). ISO.
- Reed, J. (1995). *Principles of Ceramics Processing*. Nueva York: Wiley Interscience.
- Steelceram. (27 de julio de 2021). Obtenido de Steelceram: <https://www.steelceram.com/>
- Vázquez, E. (2005) *Materiales Cerámicos. Propiedades, Aplicaciones y Elaboración*. UNAM, México, primera edición.