

## Fine material effect on kaolin suspensions rheology

Moisés Oswaldo Bustamante-Rua <sup>a</sup>, Néstor Ricardo Rojas-Reyes <sup>b</sup> & Gali Ronel Quitian-Chila <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Minerales CIMEX, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. [mobustam@unal.edu.co](mailto:mobustam@unal.edu.co)

<sup>b</sup> Instituto de Minerales CIMEX, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. [nrrojasr@unal.edu.co](mailto:nrrojasr@unal.edu.co)

<sup>c</sup> Instituto de Minerales CIMEX, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. [grquitiac@unal.edu.co](mailto:grquitiac@unal.edu.co)

Received: February 2nd, 2015. Received in revised form: April 9th, 2015. Accepted: Mayo 8th, 2015

### Abstract

A good rheological characterization can be used as a control parameter within the industrial processing of kaolin. The kaolin used was characterized by SEM, XRD, XRF and particle size. Also it was classified and separated in three sizes of fine material, which was introduced in suspensions with three different size distributions. The analysis was based on a rheological study of the fine particles influence, on the suspension viscosity. The results show that it is possible to modify the viscosity by altering the fines content without changing the solid fraction of the suspension. Suspensions of kaolin with 40% content of fines tend to decrease its viscosity value. Suspensions with quantities of fine greater than 60 %, increase the value of its viscosity. In the research are also presented the proposed mechanisms by which the presence of fine increases or decreases the value of the viscosity of a suspension.

*Keywords:* Kaolin, Rheology, Fine material, Viscosity.

## Efecto del material fino en la reología de suspensiones de caolín

### Resumen

Una buena caracterización reológica puede ser usada como parámetro de control dentro del procesamiento industrial del caolín. El caolín de trabajo se caracterizó mediante SEM, DRX, FRX y tamaño de partícula. Tres tamaños de material fino, clasificado y separado, se introdujeron en suspensiones con tres distribuciones de tamaño diferente; el análisis reológico se basó en estudiar la influencia del material fino sobre la viscosidad de la suspensión. Los resultados muestran que es posible la modificación de la viscosidad alterando el contenido de finos sin cambiar la concentración en peso de una suspensión. Suspensiones de caolín con contenidos de finos alrededor de 40% tienden a disminuir su valor de viscosidad. Suspensiones con cantidades de finos mayores a 60%, aumentan el valor de su viscosidad. En la investigación también se presentan los mecanismos propuestos por los cuales la presencia de finos aumenta o disminuye el valor de la viscosidad de una suspensión.

*Palabras clave:* Caolín, Reología, Material fino, Viscosidad.

### 1. Introducción

Pastas naturales, industriales y suspensiones son materiales granulares compuestos generalmente por un gran número de elementos como gotas, burbujas, minerales, polímeros o partículas de diferente clase, tamaños y formas, todas sumergidas en un medio líquido o gas. Una forma de estudiar el comportamiento de estas pastas y suspensiones es mediante la caracterización reológica, donde se analiza la deformación y el flujo, además de lo concerniente a la interacción entre esfuerzo de cizalla, tasa de cizalladura y tiempo de prueba [1]. Se esperaría que con esta gama de

factores y características de los materiales, existieran muchos comportamientos reológicos, sin embargo, estos sistemas compuestos exhiben características de flujo dentro de ciertos rangos, debido principalmente a la presencia de cualidades similares entre las interacciones que ocurren entre el medio continuo y el medio discreto [2]. El comportamiento reológico de suspensiones minerales indica el nivel de [interacción inter-partícula o agregación, y por lo tanto éste puede ser usado como parámetro de control dentro de su procesamiento industrial [3]. La caolinita  $[Al_4Si_4O_{10}(OH)_8]$ , corresponde estructuralmente a un mineral de la arcilla del tipo 1:1, es decir, formado por una capa de tetraedros de sílice

unida a otra capa de octaedros de alúmina a través de grupos hidroxilo que están compartidos entre las dos capas [4]. Las arcillas caoliníticas son valoradas comercialmente debido al uso directo en la industria, mientras que los caolines son procesados previamente para incrementar las propiedades deseadas que residen en las partículas [5]. 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 [6]. Esta variedad de usos derivan de sus propiedades fisicoquímicas entre las que destacan: blancura, poca reactividad ante agentes químicos, no toxicidad, poder cubriente, resistencia mecánica después de calcinación y elevada refractariedad [7]. Los procesos productivos para la fabricación de productos cerámicos por vía húmeda necesitan la preparación de suspensiones acuosas de arcillas con elevado contenido de sólidos y baja viscosidad [8].

Johnson et al. [9] señalan que la relación entre la reología y la química superficial en suspensiones de caolín es complicada, principalmente por la presencia de caras y bordes heterogéneamente cargados en cada partícula además de la forma laminar en que se presentan todas las partículas. En las pruebas llevadas a cabo, ellos reportan un aumento en el esfuerzo de fluencia en relación directa con la fracción volumétrica; En el modelo experimental reológico, determinan que es necesario una cuantificación de las propiedades estructurales de la suspensión de caolín, con respecto a tamaño de partícula, forma, número de coordinación y orientación neta. Omland et al. [10] analizaron la gran influencia sobre la viscosidad al agregar partículas sólidas (arcillas y arenas) a un fluido estándar. Las partículas adicionadas presentaron un tamaño promedio de 63 a 75  $\mu\text{m}$  con una distribución de tamaño normal. Los autores cuantificaron el efecto en un diagrama ternario partículas finas - medianas - gruesas con una distribución de tamaño constante para todos los tamaños. El efecto de las partículas adicionadas sobre la viscosidad, aunque dependía de la cantidad, era más considerable con las partículas más finas y mayor aún si las partículas eran arcillosas. Genovese [11] escribió una revisión histórica de la reología de sistemas dispersos, analizando entre otros puntos, el efecto de la distribución de tamaño de partícula sobre la viscosidad. El autor determinó que las partículas finas ayudan a aumentar la fracción de empaquetamiento máximo, pues durante el flujo se colocan en los espacios que dejan las partículas grandes, y en el mismo sentido, esta localización preferencial ayuda a la disminución de la viscosidad pues debido a su tamaño pequeño hacen el papel de lubricante. Olhero y Ferreira [12] analizaron el tamaño de partícula, la distribución de tamaño y el tiempo de molienda de suspensiones de sílice y su efecto sobre su reología. Dentro del estudio, que se llevó a cabo con partículas gruesas (entre 1 y 100  $\mu\text{m}$ ) y partículas finas (entre 1 y 10  $\mu\text{m}$ ) el autor determinó que para partículas gruesas, el comportamiento reológico fue cizallo-adelgazante y para partículas finas, su comportamiento reológico cambió a cizallo-espesante. Luckham y Ukeje [13] trabajaron con partículas de poli-estireno (diámetros promedio de 400 nm), tres polidispersidades (0,085; 0,3 y 0,485), y fracciones

volumétricas entre 25 y 60%. Ellos determinaron que la viscosidad de la suspensión aumenta con el incremento en la fracción volumétrica con una relación exponencial y que los valores más altos de esfuerzo de fluencia se encontraron con las partículas menos poli-dispersas (0,085) para las mismas fracciones volumétricas. Un estudio hecho por Geldart [14] demuestra que suspensiones de partículas esféricas con un porcentaje óptimo (hallado experimentalmente) de los componentes de la suspensión y con finos de tamaño 22% del tamaño de los gruesos, producirá una reducción en la viscosidad.

El objetivo del presente estudio es determinar la relación entre el tamaño de partícula, el porcentaje de finos agregados y la concentración de sólido sobre el comportamiento la viscosidad aparente de las suspensiones de caolín fabricadas.

## 2. Experimental

El material usado en el presente trabajo proviene de una mina de caolín ubicada en el departamento de Antioquia – Colombia. Las partículas de caolín se clasificaron y separaron en diferentes tamaños, con las cuales se fabricaron suspensiones a diferentes fracciones de sólidos y diferentes porcentajes de fino, para posteriormente realizar la caracterización reológica de cada suspensión.

Se separaron seis tipos de tamaño de partícula, tres tamaños gruesos denominados: +20  $\mu\text{m}$ , +30  $\mu\text{m}$  y +40  $\mu\text{m}$  y tres de tamaño finos denominados: -20  $\mu\text{m}$ , -30  $\mu\text{m}$  y -40  $\mu\text{m}$ . Los tamaños gruesos se obtuvieron por un proceso de tamizado normal y los tamaños finos por un proceso de clasificación basado en la velocidad de sedimentación [15]. Cada material grueso se mezcló con su material fino [16], (ejemplo: +20  $\mu\text{m}$  con -20  $\mu\text{m}$ ), y los porcentajes agregados de fino fueron 0, 5, 10, 20, 40, 80 y 100%, con los cuales se fabricaron las suspensiones para obtener 3 concentraciones en peso ( $C_p$ ) que fueron 0,2; 0,3 y 0,4. Los valores de  $C_p$  elegidos para el estudio son valores similares a los que se trabajan en la industria del procesamiento de minerales arcillosos [17]. Las suspensiones se fabricaron con agua desionizada y microfiltrada, con aplicación de ultrasonido para disgregar las partículas y una agitación mínima de cinco minutos para homogenizar la mezcla preparada, luego cada suspensión fue caracterizada reométricamente.

Para analizar la morfología del mineral que compone el caolín se utilizó un microscopio electrónico de barrido marca Phenom Pro X. El análisis por difracción de rayos X (DRX) se realizó en un equipo Panalytical Xpert-Pro con una lámpara de cobre de longitud de onda 1,548 Å, a una velocidad de barrido de 2°/min, utilizando el método de polvo de Debye-Scherrer. Para la caracterización del tamaño de partícula se utilizó un equipo Mastersizer 2000 de la casa Malvern Instruments.

Dentro del procesamiento normal de un material cerámico, las suspensiones de caolín están sometidas a una serie de etapas tales como mezclado, agitación y bombeo, por lo que a menudo es importante combinar adecuadamente las propiedades reológicas del sistema en valores muy dispares de velocidad de cizalla [18], por esta razón se seleccionó un barrido de la tasa de cizalladura, para cubrir diferentes escenarios de flujo. La evaluación reológica se realizó en un

*reómetro* rotacional Bohlin Instruments *C-VOR* 200, con la geometría plato-plato de 40 mm de diámetro, fabricado en titanio, con un gap de 1000  $\mu\text{m}$ , en la celda Peltier a temperatura controlada de 25°C ( $\pm$  0,1) y a una tasa de cizalladura desde 0,1 a 1000 1/s en 300 s [19, 20].

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Caracterización morfológica

Los diferentes análisis hechos a las partículas de caolín en estudio mostraron que es un material para uso industrial, lo que significa que no es esférico, ni coloidal, ni posee un monotamaño. La Fig.1a muestra una vista general del caolín como se recibe de la mina, en donde se observa la gran heterogeneidad tanto en el tamaño como en forma de las partículas de mineral. En las Figs. 1b y 1c, se observa el detalle de la zona que se señala en la Fig.1a, estas figuras muestran la estructura típica laminar que presenta el caolín. En la Fig.1d se muestran las partículas luego de ser mezcladas con agua, de aplicarle ultrasonido y secarlas, donde se observa la disgregación de las partículas de caolín en forma de láminas y además, que estas partículas poseen áreas basales irregulares.

El análisis de las anteriores figuras demuestra que las partículas gruesas se componen de partículas laminares ordenadas en forma de “libros”, las cuales al tener contacto con el agua, y con ayuda del ultrasonido, se disgregarán para formar suspensiones de partículas individuales de forma laminar, como es normal en materiales arcillosos. Se puede suponer que la reología de estas suspensiones tenderá a cambiar en función de la tasa de cizalladura, desde un sistema

desordenado con alta viscosidad, hasta un sistema ordenado donde todas las partículas tengan una dirección preferencial de flujo.

#### 3.2. Caracterización mineralógica

La Fig.2 muestra los 3 difractogramas para el material de partida (– 40 micras), para el material de tamaño intermedio (– 30 micras), para el material con tamaño más pequeño (– 20 micras). Un análisis por FRX reportó 89% de caolinita, 8% de moscovita y 3% de sílice para el material de partida (– 40 micras). A medida que el tamaño de partícula disminuye van desapareciendo los picos representativos de la moscovita y de la sílice, de tal forma que el proceso de tamizado puede ser utilizado también como un tipo de concentración física de caolín.

#### 3.3. Caracterización granulométrica.

En la Fig.3 se observa la distribución del tamaño de partícula (DTP) para el caolín de partida (proveniente de mina) y para los 6 tipos de tamaño clasificado y separado. El caolín de partida posee una distribución 80% menor a 42  $\mu\text{m}$ , 70% menor a 30  $\mu\text{m}$  y 50% menor a 18  $\mu\text{m}$ . Los tamaños de partícula denominados + 40  $\mu\text{m}$ , + 30  $\mu\text{m}$  y + 20  $\mu\text{m}$  reportan un  $d(10)$  = 40, 30 y 20  $\mu\text{m}$  respectivamente, mientras que los tamaños – 40  $\mu\text{m}$ , – 30  $\mu\text{m}$  y – 20  $\mu\text{m}$  reportan un  $d(90)$  = 40, 30 y 20  $\mu\text{m}$  respectivamente, lo cual demuestra el grado de confiabilidad en la separación de cada fracción de tamaño.

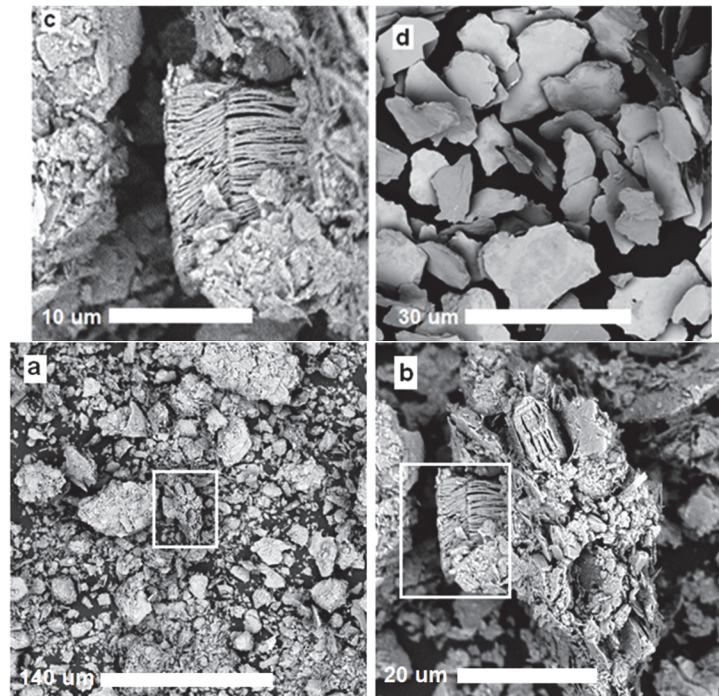


Figura 1. Micrografías por SEM de: a) Caolín como llega de la mina sin clasificar, 920X. b) Área seleccionada en la Fig.1a, 5200X c) Área seleccionada en la Fig.1b, 11000X. d) Caolín luego de ser mezclado con agua, sonicado, probado y secado, 4000X  
Fuente: Los autores.

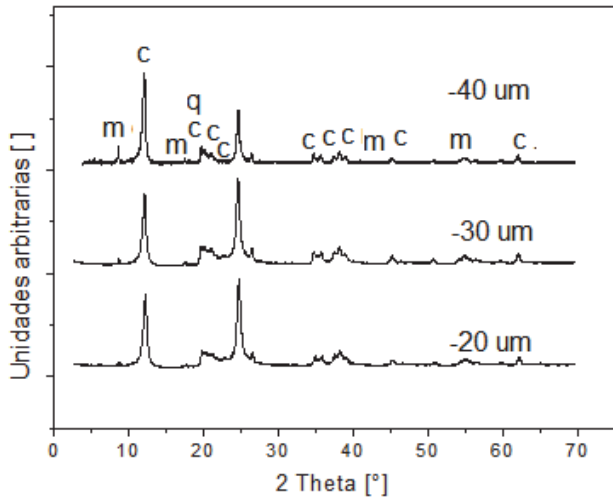


Figura 2. Difractogramas para los tres tipos de tamaños analizados; caolín (c), moscovita (m) y cuarzo (q). Fuente: Los autores.

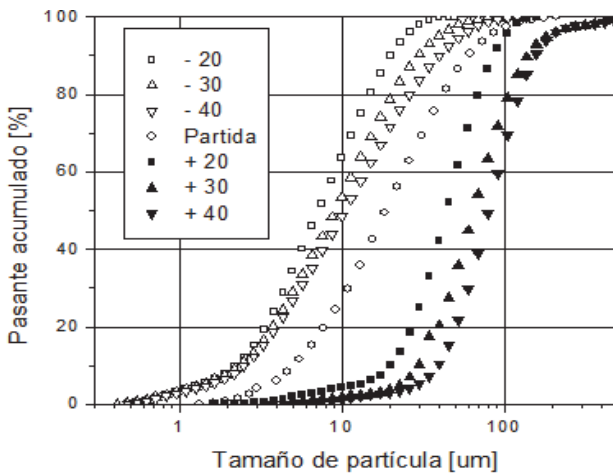


Figura 3. DTP para el caolín de partida y los 6 tamaños clasificados. Fuente: Los autores.

### 3.4. Caracterización reológica

En la Fig.4 se presentan 9 superficies de respuesta, donde se analiza la tasa de cizalladura en el eje  $x$ , el porcentaje de finos en el eje  $y$ , y la viscosidad en el eje  $z$ , que son el resumen de 54 reogramas realizados. La primera fila (Figs. 4 a, b y c) muestra los resultados del material más fino ( $\pm 20 \mu\text{m}$ ) a las tres concentraciones en peso analizadas (0,1; 0,2 y 0,3), la segunda fila (Figs. 4 d, e y f) para el material intermedio ( $\pm 30 \mu\text{m}$ ) y la tercera fila (Figs. 4 g, h e i) para el material más grueso estudiado ( $\pm 40 \mu\text{m}$ ).

- Análisis de las superficies de respuesta (Fig. 4): a) Influencia del contenido de finos sobre la viscosidad: en general se observa que los mayores valores de viscosidad se presentan para suspensiones con altos

contenidos de finos, superiores al 60%. Las suspensiones con contenidos de finos entre 20 y 60% entregan valores de viscosidad relativamente más bajos, y para suspensiones con contenidos de finos menores a 20% se observan valores de viscosidad intermedios. Rangos intermedios de porcentaje de finos disminuyen la viscosidad, tal vez debido a una organización en grupos o paquetes, donde las partículas más pequeñas se colocan entre las medianas y grandes y todas fluyen como familias en una dirección y con velocidad similar. b) Influencia de la tasa de cizalladura sobre el comportamiento reológico: todas las suspensiones mostraron un comportamiento cizallo-adelgazante, lo cual es típico en suspensiones arcillosas, sin embargo, este comportamiento cizallo-adelgazante es más evidente en suspensiones con altos contenidos de finos ( $> 60\%$ ), y menos evidente en suspensiones con contenidos de finos entre 20 y 60%, lo cual es un fenómeno que coincide en los mismos rangos con respecto a la influencia del contenido de finos sobre la viscosidad.

- Análisis entre gráficas (Fig. 4): a) Influencia del contenido de sólidos ( $C_p$ ) sobre la viscosidad: se observa que el aumento en el valor de viscosidad de cada suspensión es proporcional con el aumento del  $C_p$  e independiente del tamaño de partícula, lo cual, en este caso, puede ser debido al corto intervalo entre los tamaños, pues éstos varían desde  $20 \mu\text{m}$  hasta  $40 \mu\text{m}$ . b) Influencia del contenido de sólidos ( $C_p$ ) sobre la estabilidad de las gráficas: suspensiones con un  $C_p = 0,1$  muestran inestabilidad en las curvas de flujo. Lo anterior se comprobó al evaluar la muestra a una sola tasa de cizalladura, la cual entregó el mismo comportamiento inestable en la curva de flujo. Las pequeñas ondulaciones de estas curvas desaparecen con el aumento en el  $C_p$ , posiblemente porque aumentando la cantidad de partículas disminuyen los fenómenos de desequilibrio entre la fase continua y la fase discreta, como por ejemplo la sedimentación. c) Influencia del tamaño de partícula sobre la viscosidad: es de notar que a medida que aumenta el tamaño de partícula disminuyen los valores promedio de viscosidad. Si se tiene en cuenta que para el mismo peso de sólidos existe mayor cantidad de partículas pequeñas en comparación con las grandes, entonces es posible que la mayor viscosidad se vea reflejada por el mayor gasto energético requerido para mover éstas partículas pequeñas.

Aunque ya se observó que el valor de la viscosidad aumenta con el valor de  $C_p$ , la Fig.5 muestra una proporción de aumento logarítmica, efecto posiblemente debido a 3 elementos: a) reducción de la distancia entre las partículas a introducir nuevas partículas; b) aumento de las interacciones inter-partículas y c) mayor demanda de energía para mover mayor cantidad de material. También se observa que la estabilidad reológica de las curvas (fenómenos de desequilibrio entre la fase continua y la fase discreta) mejora a medida que aumenta el valor de  $C_p$ .

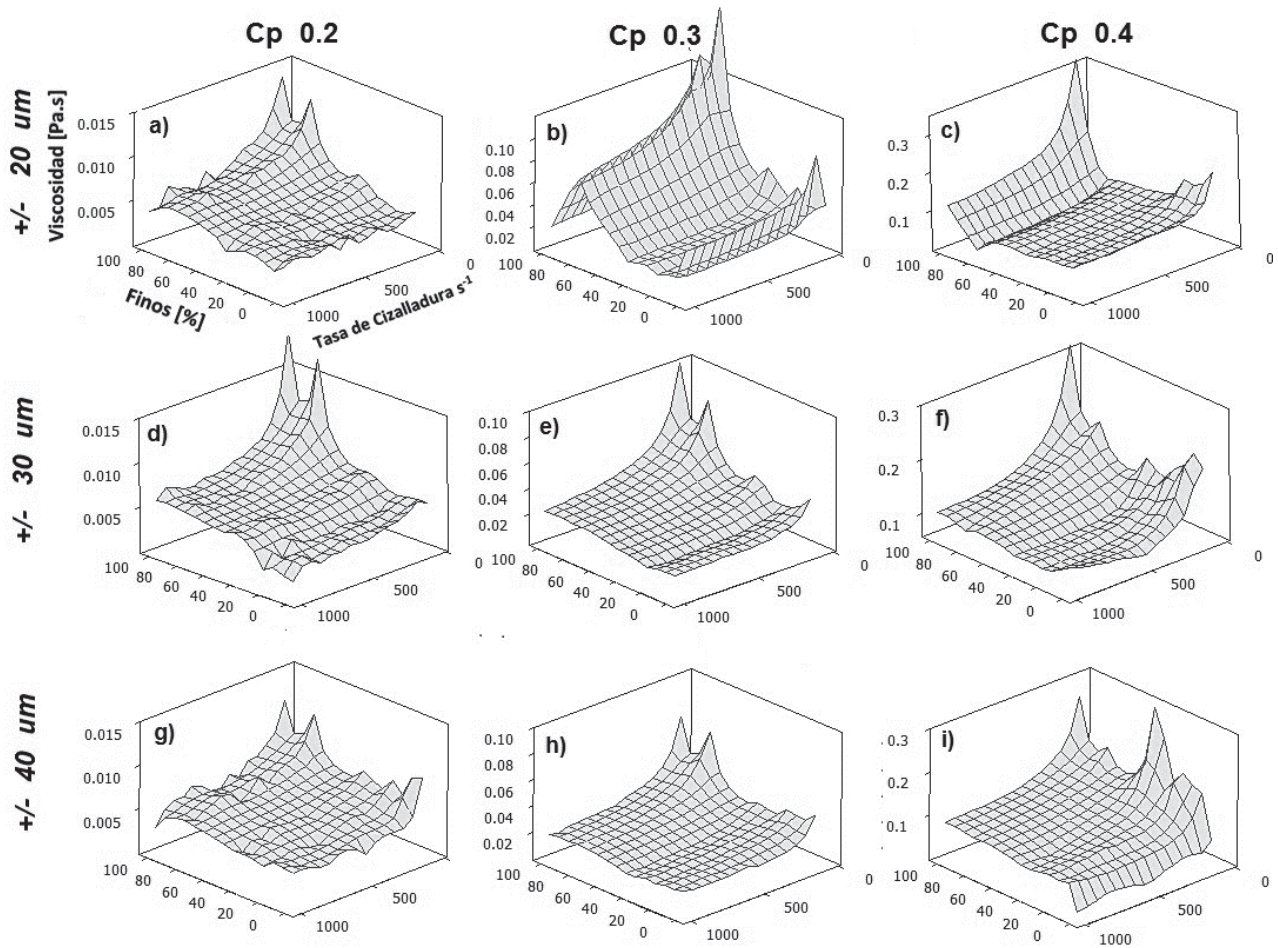


Figura 4. Superficies de flujo para cada una de las suspensiones fabricadas.  
Fuente: Los autores.

La Fig. 6 presenta el comportamiento general de la viscosidad de las suspensiones de caolín a una tasa de cizalla constante de 500 1/s, el cual es el valor medio del barrido que se analizó. En general para todas las gráficas se observa una disminución del valor de viscosidad a medida que aumenta el porcentaje de finos, hasta un valor alrededor de 40% de finos. En la literatura se reporta que la adición de cantidades relativamente pequeñas de finos reducirá la viscosidad de la suspensión sustancialmente [21], lo anterior se observa solamente para las suspensiones con tamaño de +/- 20  $\mu\text{m}$ . Para los otros 2 tamaños donde no se cumple lo anterior, una posible explicación es que la fricción entre las partículas es la principal causa de la variación de la viscosidad de una suspensión con altas fracciones de sólidos; la adición de material fino reducirá la fricción entre las partículas gruesas por medio de mecanismos de lubricación, donde las partículas finas recubren cada partícula gruesa [22]. La cantidad de finos depende de la relación de diámetros característicos, ya que al presentar diámetros grandes, como sucede en las suspensiones +/- 40  $\mu\text{m}$ , se tendrá un área superficial mayor que se deberá recubrir con partículas pequeñas, lo cual cambia para partículas +/- 20  $\mu\text{m}$ , pues el

área para recubrir será menor, haciendo entonces que varíen los porcentajes necesarios para reducción de viscosidad por agregación de finos para un tamaño u otro.

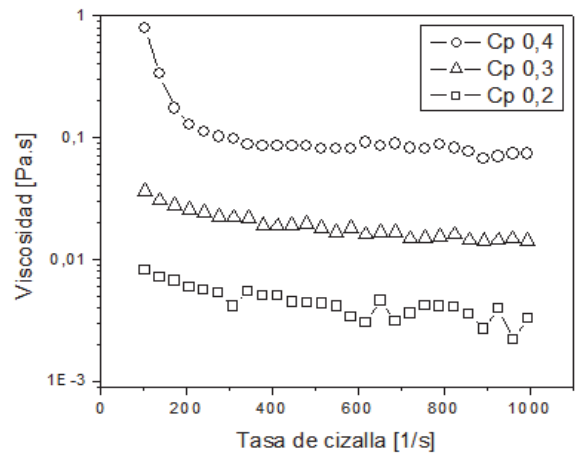


Figura 5. Curva de viscosidad en función de la tasa de cizalla para caolín + 40  $\mu\text{m}$  con 20% de finos - 40  $\mu\text{m}$ , para los tres Cp analizados.  
Fuente: Los autores.

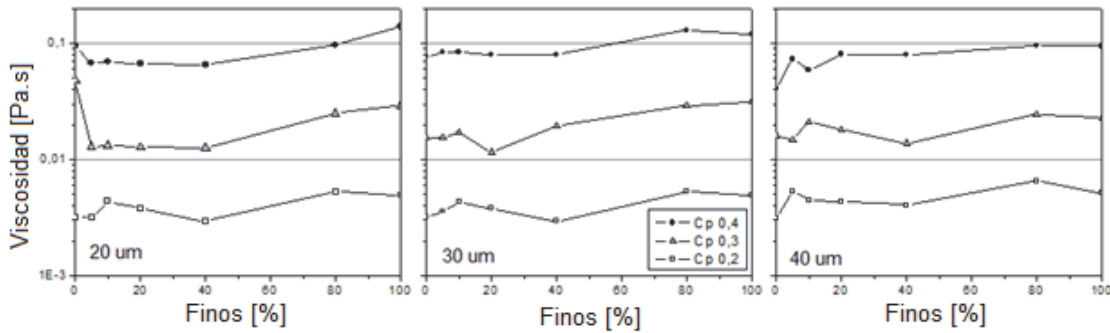


Figura 6. Viscosidad en función de los finos agregados para  $C_p$  de 0,2; 0,3 y 0,4; y tamaños +/- 20, 30 y 40  $\mu\text{m}$ , a una tasa de cizalla constante de 500 1/s. Fuente: Los autores.

Otro mecanismo de variación de la viscosidad será la disminución de área de contacto entre partículas gruesas, ya que al agregar un porcentaje de finos adecuado, éstos cumplirán la función de mantener cada partícula gruesa separada de las demás generando así que sólo interactúen por la pequeña área superficial de los finos, con base en lo anterior se pueden observar disminuciones de viscosidad en las suspensiones nuevamente en determinados rangos. El aumento inicial de la viscosidad en las suspensiones de caolín con 5 a 10% de finos se podría explicar indicando que para éstos porcentajes de finos no existe cantidad suficiente para formar completamente un recubrimiento sobre las partículas gruesas y que por el contrario los finos actuarían como “trabas mecánicas” entre las partículas de mayor tamaño, produciendo dificultad para su flujo. Otra posible causa es que cierta cantidad de finos agregados comenzarán a ocupar los intersticios entre las partículas grandes, es decir, el conjunto de partículas gruesas y finas pueden fluir como paquetes ordenados [23], disminuyendo el esfuerzo necesario para su flujo y por lo tanto la viscosidad que presenta la suspensión. Este empaquetamiento no se puede producir ni con

0% ni con 100 % de finos. Esta última teoría se ve respaldada por la Fig.7, donde se puede observar que las suspensiones tendientes a distribuciones mono-modales (5% finos) poseen menor viscosidad que las suspensiones con distribuciones poli-modales (80% finos).

#### 4. Conclusiones

Los resultados presentados y discutidos en este estudio muestran que es posible la modificación de la viscosidad alterando el contenido de finos sin cambiar la concentración en peso de la suspensión. Suspensiones de caolín con contenidos de finos alrededor de 40% tienden a disminuir su viscosidad. Los posibles mecanismos para la disminución de la viscosidad son los siguientes: a) las partículas finas recubren cada partícula gruesa lo que permitirá una disminución de la fricción entre éstas. b) disminuye el área de contacto entre partículas gruesas, ya que al agregar un porcentaje de finos adecuado, éstos cumplirán la función de mantener cada partícula gruesa separada de las demás. c) el conjunto de partículas gruesas y finas pueden fluir como paquetes ordenados, disminuyendo la energía necesaria para su flujo y por lo tanto la viscosidad que presenta la suspensión.

La viscosidad de una suspensión aumenta en una proporción logarítmica al aumentar el contenido de sólidos de la suspensión, lo cual es un comportamiento esperado, sin embargo, para suspensiones con contenidos de sólidos mayores a 60%, también aumenta el valor de su viscosidad sin importar el contenido de sólidos. La posible explicación de este aumento es debido a que los espacios disponibles entre las partículas gruesas se sobresaturan de partículas finas entregando como resultado: a) reducción de la distancia entre las partículas a introducir nuevas partículas; b) aumento de las interacciones inter-partículas y c) mayor demanda de energía para mover mayor cantidad de material.

#### Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a COLCIENCIAS por la financiación del proyecto con código 1118-479-22017, a la Universidad Nacional sede Medellín y a la empresa CECOLTEC S.A.S por el apoyo recibido.

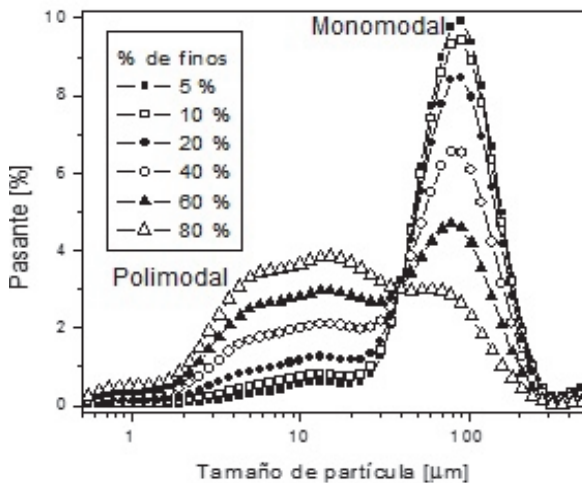


Figura 7. DTP para las mezclas de material grueso +40  $\mu\text{m}$  con finos -40  $\mu\text{m}$ . Fuente: Los autores.

## Referencias

- [1] Macosko, C., *Rheology. Principles, measurements and applications.* Wiley-VCH. United States of America. 1994.
- [2] Coussot, P., *Rheometria of pastes, suspensions, and granular materials.* A John Wiley & Sons, United States of America. 2005.
- [3] Farrokhpay, S., The importance of rheology in mineral flotation: A review. *Minerals Engineering*, (36-38), pp. 272-278. doi:10.1016/j.mineng.2012.05.009, 2012.
- [4] Bartolomé, J.F., El Caolín: Composición, estructura, génesis y aplicaciones. *Boletín Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 36(20). 1997.
- [5] Torres, J., Gutierrez, R., Castello, R. y Viscayno, C., Análisis comparativo de caolines de diferentes fuentes para la producción de metacaolín. *Rev. LatinAm. Metal. Mater.*, 31, pp. 35-43, 2011.
- [6] Teh, E., Leong, Y., Lui, Y., Fourie, A. and Fahey, M., Differences in the rheology and surface chemistry of kaolin clay slurries: The source of the variations. *Chem. Eng. Sci.* 64, pp. 3817-3825, 2009.
- [7] Murray, H., Traditional and new applications for kaolin, smectite and palygorskite: A general overview. *Applied Clay Science*, 17, pp 207-221, 2000.
- [8] Acevedo, P., Carreño, A., Macias, J. y Pedraza. Preparación de suspensiones acuosas coloidales dispersas de arcillas montmorilloníticas. *Rev. LatinAm. Metal. Mater.* S1 (2), pp. 859-868. 2009.
- [9] Stephen, B., Johnson, A. and Russell, P., Volume fraction effects in shear rheology and electroacoustic studies of concentrated alumina and kaolin suspensions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 141, pp. 119-130. 1998.
- [10] Tor, H., Arild, S, Svanes, and Amundsen, P., The influence of particle type and size distribution on viscosity in a non-Newtonian drilling fluid. *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, 13, pp. 107-110, 2005.
- [11] Genovese, D., Shear rheology of hard-spheres, dispersed, and aggregated suspensions, and filler-matrix composites. *Advances in Colloid and Interface Science*, (171-172), pp. 1-16, 2012.
- [12] Olhero, S.M. and Ferreira, J.M., Influence of particle size distribution on rheology and particle packing of silica-based suspensions. *Powder Technology* 139, pp. 69-7, 2004.
- [13] Luckham, P. and Ukeje, M., Effect of particle size distribution on the rheology of dispersed systems. *Journal of Colloid and Interface Science* 220, pp. 347-356, 1999.
- [14] Geldart, D., The effect of particle size and size distribution on the behavior of gas-fluidized beds. *Powder Technol.*, 6, pp. 201-205, 1972.
- [15] Webb, P. and Orr, C., *Analytical methods in fine particle technology.* micromeritics instruments corporation, Norcross, GAUSA, 1997.
- [16] Rojas, N., Garrido, P. y Bustamante, O., Metodología para el diseño del transporte hidráulico de suspensiones de relaves de cobre. VI Congreso Internacional de Materiales. Bogotá – Colombia, Noviembre de 2011.
- [17] Redd, J., *Principes of ceramics processing.* John Wiley & Sons. Second Edition. Canada, 1995.
- [18] Murray, H.H., *Applied clay mineralogy. Occurrences, processing and application of kaolins, bentonites, palygorskite-sepiolite, and common clays.* Developments in Clay Science, 2. Elsevier. First Edition. 2007.
- [19] Gebhard, S., *A practical approach to rheology and rheometry.* Second Edition. Thermo Haake Rheology. Gebrueder HAAKE GmbH, Karlsruhe, Federal Republic of Germany, 1998.
- [20] Rojas, N., Modelación de la ecuación constitutiva de suspensiones de caolín en función de la energía libre superficial del mineral. Tesis Dr., Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2013.
- [21] Matheson, G.L., Herbst, W.A. and Holt, P.H., *Ind. Eng. Chem. Characteristics of fluid-solid systems*, 41, pp. 1099-1104, 1949.
- [22] Murray, H. and Kogel, J., Engineering clay products for the paper industry. *Applied Clay Science*, 29, pp. 199-206, 2005.
- [23] Bustamante, O., Modelación matemática del tensor de esfuerzo y de la viscosidad de una suspensión mineral. Tesis Dr., Universidad de Concepción, Concepción, Chile, 2002.

**N.R. Rojas-Reyes**, es Ing. en Metalurgia en 1999 de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia, MSc. en Ingeniería en 2003 en la Universidad de Concepción, Concepción, Chile, y Dr. en Ingeniería en 2014 en la Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Entre 2004 y 2006 trabajó en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia en el área de la metalurgia extractiva y modelado de procesos y SICE 2007 para la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente, es profesor titular de la Facultad de Minas, de la Universidad Nacional de Colombia. Sus intereses de investigación incluyen: la metalurgia extractiva, reología de minerales y físico-química de los minerales.

ORCID: 0000-0002-1644-471X

**M.O. Bustamante-Rúa**, es Ingeniero de Minas y Metalurgia de la Universidad Nacional de Colombia, MSc. en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Metalurgia Extractiva - Mención - Mineralurgia de la Universidad de Concepción, Chile, Dr. en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Metalurgia Extractiva - Minería, de la Universidad de Concepción, Chile. Es profesor titular de la Universidad Nacional de Colombia, director e investigador del Instituto de Minerales CIMEX, de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia, ha dirigido e integrado proyectos de investigación en las áreas de concentración y beneficio de minerales, modelación y optimización matemática de procesos y operaciones mineras, reología de suspensiones y pastas, ha publicado artículos en revistas científicas y participado como expositor en congresos y simposios nacionales e internacionales. Además ha sido director de diversas tesis de Maestría y Doctorado.

ORCID: 0000-0002-1692-991X

**G.R. Quitian-Chila**, es Ing. Mecánico y estudiante de maestría en ingeniería de materiales y procesos de la Universidad Nacional de Colombia, investigador del Instituto de Minerales CIMEX-Facultad de Minas, integrante del grupo de investigación de micro y nanoanálisis-CEMMI-ASOCM, labora en la industria como soporte científico en laboratorios de I+D de diferentes industrias. Sus investigaciones las ha desarrollado en áreas de modelamiento por método de elementos finitos, reología de suspensiones y pastas, elaboración de nanofibras y nanoencapsulado por técnicas de electrospinning y electrospray. Sus intereses incluyen: Nanotecnología y materiales inteligentes (Smart materials)

ORCID: 0000-0001-6833-4777