

Reología de suspensiones minerales.
I. Problemas de sedimentación
durante la medición

Rheology of mineral suspensions.
I. Sedimentation problems during
measurement

Lucia Garaventa¹

Casado Ulises²

¹SEGEMAR-INTEMIN, Av. General Paz 5445-PTM INTI, San Martín, Buenos Aires,
1650, Argentina

²INTEMA- UNMdP, Juan B. Justo 4302, Mar del Plata, Buenos Aires, 7600,
Argentina

156 lucia.garaventa@segemar.gov.ar



RESUMEN

Durante el procesamiento de minerales se genera una gran cantidad de desechos sólidos que se transportan en forma de suspensiones para su disposición final. El ahorro de agua y de costos energéticos promovió la tendencia de concentrar al máximo las pulpas hasta una condición, en algunos casos, de pasta. Es necesario comprender el comportamiento reológico de dichos sistemas para obtener parámetros de diseño precisos. La medición reológica de suspensiones es compleja por el fenómeno de sedimentación *in situ* (característico a velocidades de corte bajas). Se propone un método experimental complementario para ratificar la curva de flujo estándar para tres concentraciones distintas. Como resultado, el método permitió validar todos los puntos de viscosidad medidos en la curva de flujo para la muestra más concentrada. En el caso de las suspensiones más diluidas, se detectaron rangos de velocidad donde se observaron efectos de sedimentación o gradiente de concentración. Allí se puede observar la evolución de la viscosidad y en dicha zona los valores son inestables o no alcanzan un plateau para el tiempo asignado por escalón de velocidad.

Palabras claves: Reología, suspensiones, sedimentación, viscosidad

ABSTRACT

During minerals processing a large amount of solid waste is generated and transported in the form of suspensions for final disposal. Saving of water and energy costs promoted the trend to concentrate the pulps as much as possible, sometimes in a paste condition. It is necessary to assess the rheological behavior of these systems to get a suitable parameters design. The suspensions rheological measurements are complex especially at low shear rates due to *in situ* sedimentation phenomenon. An additional experimental method is proposed to ratify

the standard flow curve for three different concentrations. The method allowed validating all the flow curve points for the most concentrated sample. For the diluted suspensions, velocity intervals were detected with sedimentation effects or concentration gradient observed. Then we can observe the viscosity course and check that these values are unstable or do not reach a plateau for the time assigned by the speed step.

Keywords: Rheology, suspension, sedimentation, viscosity

INTRODUCCIÓN

En la industria minero metalífera, la recuperación en masa de la mena es muy baja, incluso para la obtención de oro alcanza el orden del 0.01 a 0.001%. De esta manera se generan grandes volúmenes de ganga que deben desecharse para su disposición final. Su transporte y bombeo a menudo se hace en forma de suspensión en un amplio rango de concentraciones. En las zonas desérticas o con grandes variaciones climáticas como Australia, el agua utilizada durante el procesamiento o acompañando el residuo se vuelve un *commodity* muy valorado. El ahorro de agua y la optimización en los costos energéticos promovieron una tendencia a nivel mundial de transportar las pulpas con la máxima concentración posible, y en algunos casos tan espesa como una pasta [1].

Las suspensiones de baja concentración a menudo tienen un comportamiento reológico de un fluido Newtoniano, sin embargo a medida que aumenta la cantidad de sólidos comienzan a desviarse de la idealidad hacia un comportamiento No Newtoniano, con esfuerzos de cedencia y dependencia con el tiempo (tixotropía). Los factores que más influyen en estas transformaciones han sido objeto de investigaciones tanto experimentales como teóricas [2, 3,4]. Los cambios en las propiedades reológicas son fuertemente dependientes de la concentración de sólidos, del tamaño y la distribución de tamaño

de partículas, del pH y la fuerza iónica. David Boger [5] presentó resultados comparativos de distintas colas de procesos mineros con alta concentración, aún en condiciones de pasta, donde los esfuerzos de corte de cedencia (τ_0) exhiben un incremento exponencial con la concentración. Dicha variable afecta tanto el transporte, la energía requerida para bombearla y el diseño estratégico de su disposición final.

Por otro lado, A. Shah [6], clasifica las suspensiones en dos tipos: I) las que no sedimentan: estables, compuestas por partículas finas de alta concentración suspendidas en líquido, tienen la ventaja de poder ser transportadas y bombeadas en cañerías tanto en régimen laminar como turbulento; II) aquellas suspensiones que sedimentan; contienen partículas sólidas grandes, baja concentración de sólidos y se pueden describir como una mezcla de dos fases heterogéneas. Estas últimas no se pueden bombear en flujo laminar a menos que el líquido sea No Newtoniano; por lo tanto debe existir turbulencia para prevenir la sedimentación.

En las suspensiones de baja concentración, las mediciones en reómetros o viscosímetros rotacionales se ven afectadas por la sedimentación de las partículas durante el análisis, interfiriendo en los resultados. Nascimento y Calado [7] aseguran que en muchos casos la sedimentación *in situ* no permite alcanzar la condición de *steady state* en cada punto medido. Ellos estudiaron la influencia en las propiedades reológicas de suspensiones de bauxita de diferentes concentraciones utilizando distintos rotores como el cilindro concéntrico o *vane*. Las diversas configuraciones y superficies de los rotores afectan el arrastre de las partículas y en algunos casos retardan la sedimentación durante la medición. Observaron que para el cilindro concéntrico no hay evidencia de que la sedimentación de partículas influya en los resultados; sin embargo, esperan viscosidades menores que la real al final del ensayo causado por el gradiente de concentración generado.

Dado que los procesos de sedimentación son apreciables a bajas velocidades de corte, la inestabilidad de los sistemas sólido-líquido no genera datos experimentales robustos en dichas condiciones. Una práctica habitual en la industria es extrapolar los datos de baja velocidad de corte a partir de mediciones a altas velocidades. De esta manera se obtiene el “esfuerzo de cedencia Bingham”, que es parámetro muy utilizado para diseño de cañerías; sin embargo, dicho valor presenta un error significativo por exceso. En operaciones que requieren más precisión en la estimación de parámetros surge la necesidad de evaluar el efecto de la sedimentación *in situ* en los valores de la viscosidad obtenidos.

A nivel experimental, en mediciones reológicas mediante un reómetro de esfuerzo controlado, se puede someter la muestra a distintas rampas de velocidad de corte para obtener una curva de flujo característica. La diferencia en las metodologías utilizadas radica en el tiempo que se le asigna a cada velocidad aplicada durante la rampa. La mejor condición es alcanzar el estado estacionario en cada punto medido, sin embargo estos ensayos demandan mucho tiempo y la sedimentación se acentúa. Por lo tanto, en estos sistemas complejos, la opción más viable es que el operador del equipo estime un tiempo de medición por punto. El inconveniente de este procedimiento estándar es que los resultados obtenidos en la curva de flujo (en especial a bajas velocidades) son una especie de “caja negra” debido a la incertidumbre de la evolución o estabilidad en los valores de viscosidad medidos.

El objetivo de este trabajo es diseñar un procedimiento experimental complementario al estándar previamente mencionado, que permita detectar posibles efectos de sedimentación y validar de esta manera, cada punto que compone una curva de flujo.

PARTE EXPERIMENTAL

Equipos utilizados

Se empleó un Reómetro de esfuerzo controlado marca TA

Instruments modelo AR-G2 con un sistema control de temperatura, y un sistema “Couette” con una geometría DIN *Sandblasted* de 28mm de diámetro y acero inoxidable.

Muestras estudiadas

Para el estudio se elaboró una suspensión de características similares a una cola de un proceso minero. La fase sólida está compuesta principalmente por cuarzo; feldespato, mica y clorita como minoritarios, con una granulometría menor a 2000 micrones y un $D_{80\%}$ de 125 micrones. La fase líquida es agua destilada. Las concentraciones de las suspensiones fueron de 15, 25 y 45% masa en masa.

Tareas realizadas

La medición de las propiedades reológicas se realizaron a 20°C en régimen de fluencia mediante dos métodos que se detallan en la Tabla 1. El primero (método I) es un procedimiento estándar de obtención de curva de flujo donde se aplica una rampa de velocidad de corte ascendente (*Shear Rate*) asignando 15 segundos por punto a partir del cual se mide la viscosidad. En el segundo (método II) se propone un procedimiento para visualizar la evolución de la viscosidad en cada escalón de velocidad de corte (sucesivos *Peak Hold*). Para que la comparación sea válida, el tiempo total de la medición de la rampa y el de cada escalón fue el mismo para ambos métodos.

Método I. Curva de flujo	Método II. Flujo escalonado- Peak Hold
Shear Rate: 1000 - 1 s ⁻¹	Escalones de Shear Rate: 1000- 700- 500- 300- 200- 100- 70- 50- 30- 10- 8- 6- 4- 2- 1 s ⁻¹
Cantidad de puntos medidos: 15	Cantidad de escalones: 15
Tiempo de medición por punto: 15 segundos	Tiempo de medición por escalón: 15 segundos
Tiempo total de medición: 225 segundos	Tiempo total de medición: 225 segundos

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 a, b y c se muestran los resultados para el método II de la evolución de la viscosidad en función del tiempo en cada escalón de velocidad de corte aplicada para 45, 25 y 15% m/m respectivamente.

Se observan grandes diferencias en la estabilidad de la viscosidad de las muestras durante la medición experimental, siendo la diluida la menos estable. Este efecto se acentúa a velocidades de corte bajas donde, dependiendo de la concentración, pueden formarse gradientes de concentración por sedimentación de las partículas.

En la muestra más concentrada con 45% la viscosidad alcanza valores estables en cada escalón de velocidad aplicado y de modo casi instantáneo (1a). Para las muestras de 25 y 15% (1 b y c) se observan rangos de velocidad donde los valores de viscosidad son fluctuantes y no alcanzan un plateau durante el tiempo de medición. Para 15% la inestabilidad en la viscosidad se presenta a velocidades de corte menores a 50 s⁻¹ y para la de 25% por debajo de 30 s⁻¹.

En la Figura 1d se graficó en forma comparativa los resultados de los dos métodos estudiados para las tres concentraciones. Las muestras de 45% y 25% tienen un comportamiento reológico pseudoplástico donde la viscosidad disminuye con el aumento de la velocidad de

corte. Para la suspensión de 15%, el comportamiento es de un fluido Newtoniano (en la zona de valores estables).

Para la muestra de 45% la viscosidad obtenida por ambos métodos se superpone por lo cual se podrían validar todos los puntos de la curva de flujo.

En el caso de la muestra de 25% para velocidades menores a 30 s^{-1} los resultados obtenidos por ambos métodos difieren. En el método II se observa una evolución creciente de la viscosidad con el tiempo, siendo su valor final (en cada escalón de velocidad) mayor respecto al obtenido por el método I. Por lo tanto para esta muestra, los puntos válidos en la curva de flujo son los correspondientes a velocidades de corte mayores a 30 s^{-1} . Se debe tener en cuenta este resultado cuando se aplican modelos reológicos para determinar parámetros de diseño.

En la muestra de 15% las diferencias son aún mayores. Las inestabilidades se dan a velocidades menores a 50 s^{-1} y los valores son más dispersos comparados con la muestra de 25%. En este caso, la curva de flujo obtenida por el método I no es representativa del sistema.

Finalmente, las tres muestras presentan una velocidad de corte crítica a partir de la cual predomina el flujo secundario y la viscosidad aumenta; se estima en 400 , 250 y 50 s^{-1} para 45, 25 y 15% respectivamente. Este efecto fue discutido por algunos investigadores, es característico en todas las dispersiones y está asociado al cambio orden-desorden espacial de las partículas en movimiento [2,6].

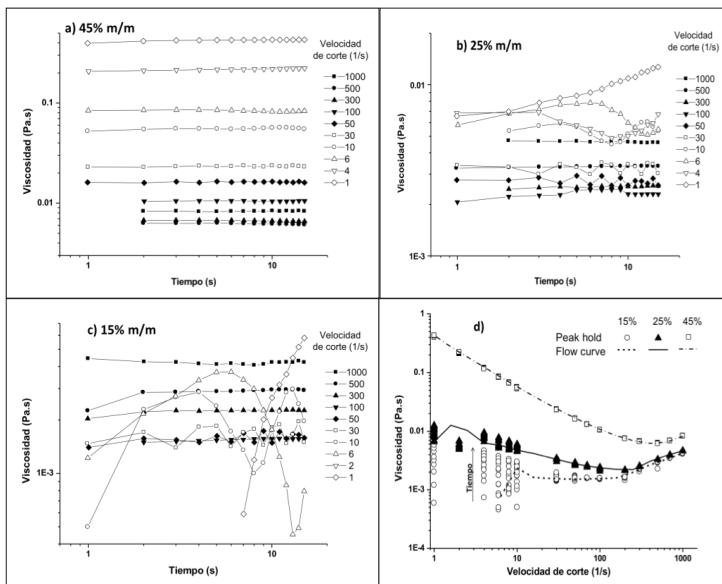


Figura 1. a, b y c: resultados obtenidos por el método II de flujo escalonado-Peak Hold para 45, 25 y 15 % m/m respectivamente. Figura 1.d) gráfico comparativo de ambos métodos (Peak Hold y curva de flujo o “flow curve”) para las tres concentraciones.

CONCLUSIONES

Mediante este trabajo se propone un método experimental complementario (método II) para evaluar la validez de cada punto que compone la clásica curva de flujo (método I). Se puso a prueba la metodología para tres concentraciones distintas, siendo la de menor valor la que sedimenta más rápido y la de mayor concentración la más estable. Se observó que en ésta última ambos procedimientos dan el mismo resultado, por lo tanto se verifica que para el tiempo de medición establecido, cada punto de viscosidad es estable y la curva de flujo no presenta efectos de sedimentación o gradiente de concentración.

En las otras dos muestras más diluidas, el método propuesto permitió detectar rangos de aceptación en la curva de flujo. En el caso

de la suspensión de 25% se debe tomar como rango válido de 30 a 250 s⁻¹.

En el caso de la muestra del 15%, la medición no es aceptable en todo el rango medido. A través del método aplicado se observan efectos inestables por sedimentación o gradientes de concentración para velocidades menores a 50 s⁻¹; y a su vez a partir de dicha velocidad predominan efectos de aumento de viscosidad por flujo secundario en el dispositivo.

En conclusión, el método propuesto puede ser una herramienta útil para validar curvas de flujo medidas a corto plazo en suspensiones que presentan problemas de sedimentación durante la medición.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración de laboratorio Químico y al Centro de investigación de geología aplicada del INTEMIN-SEGEMAR para la caracterización mineralógica de la muestra estudiada.

REFERENCIAS

1. Q. Nguyen, D. Boger. "Application of rheology to solving tailings disposal problems". International Journal of Mineral Processing. 54; 217-233. 1998.
2. H. A. Barnes. "A Handbook of Elementary Rheology". University of Wales. Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics. Aberstwyth. England. 2000.
3. S. Khelifi, D. Funfschilling, H. Li, F. Lapique. "Rheology and sedimentation velocity of alkaline suspensions of hematite particles at elevated temperature". Chemical engineering and processing: Process intensification. 70; 233-240. 2013
4. S. Mizani. "Rheology of thickened gold tailings for surface deposition". Thesis of Master Applied Science ISBN: 978-0-494-71570-3. Canadá. 2010
5. D. Boger. "Rheological Concepts. Paste and thickened tailings-

- A guide". Australian Centre for Geomechanics. 25-37. 2015
6. A. Shah. "Rheology of shear thickening mineral slurries". Thesis of Master of Engineering, Melbourne, Australia. School of Civil, Environmental and Chemical Engineering Science. 1-113. 2007.
 7. C. Nascimento, V. Calado. The concentration effect on the rheological behavior of Bauxite slurry. The XVth International Congress on Rheology- The society of Rheology 80th Annual Meeting. Monterrey. 2-5. 2008.