

Reología de suspensiones minerales.  
II. Comparación de sensores de  
medición en un reómetro

Rheology of mineral suspensions:  
II. Comparison of measure sensors  
in a rheometer

Casado Ulises <sup>1</sup>  
Lucia Garaventa<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup>INTEMA- UNMdP, Juan B. Justo 4302, Mar del Plata, Buenos Aires, 7600,  
Argentina.

ulisescasado@fi.mdp.edu.ar

<sup>2</sup>SEGEMAR-INTEMIN, Av. General Paz 5445-PTM INTI, San Martín, Buenos Aires,  
1650, Argentina.



## RESUMEN

**E**n la caracterización del comportamiento de suspensiones minerales es primordial tomar conocimiento de la reología de las mismas. Las pulpas de muy baja concentración se pueden comportar como fluidos newtonianos y a medida que los sistemas se hacen más complejos se vuelven no newtonianos. Debido a la posible sedimentación in situ o turbulencia a altas velocidades de corte se han estudiado diversos equipos y accesorios, sin embargo definir las condiciones adecuadas sigue siendo un desafío para la investigación.

El objetivo de este trabajo es obtener curvas de flujo de una suspensión mineral de concentración conocida comparando las distintas configuraciones de sensores de medición disponibles. Se observó que el comportamiento reológico del sistema estudiado varía significativamente con la concentración de sólidos, así como las respuestas obtenidas con los diferentes sensores al disminuir esta concentración, mostrando las limitaciones de los sistemas de medición en las determinaciones reológicas de estos sistemas bifásicos.

**Palabras claves:** Reología, suspensiones, sedimentación, viscosidad

## ABSTRACT

In the characterization of the behavior of mineral suspensions it is essential to take knowledge of its rheology. Very low concentration pulps can behave like newtonian fluids and as the systems become more complex they become non-newtonian. Due to the possible in situ sedimentation or turbulence at high shear rates, various equipment and accessories have been studied, although defining the right conditions remains a challenge for research.

The objective of this work is to obtain flow curves of a mineral suspension of known concentration by comparing the different configurations of available measurement sensors. It was observed that the

rheological behavior of the studied system varies significantly with the concentration of solids, as well as the responses obtained with the different sensors when decreasing this concentration, showing the limitations of the measurement systems in the rheological determinations of these biphasic systems.

**Keywords:** Rheology, suspension, sedimentation, viscosity

## INTRODUCCIÓN

Los parámetros reológicos son cruciales en la comprensión de la dinámica de fluidos. Su determinación en sistemas complejos es esencial para el diseño de procesos. Dentro de este grupo, se hallan las suspensiones minerales. Los relaves o cola de mina son de los ejemplos más complejos dentro de las suspensiones minerales, debido a la granulometría heterogénea y la variación de su concentración de sólidos durante la operación de la mina. Los relaves son comúnmente bombeados a diques de contención, pudiendo ocasionar problemas de no conocer el comportamiento del mismo en flujo. Estas suspensiones se pueden comportar como fluidos newtonianos cuando la concentración de sólidos es baja, y a medida que ésta aumenta pueden volverse no newtonianos. Por lo tanto, es esencial evaluar las propiedades reológicas y la influencia de la concentración de sólidos en las mismas.

Debido a la posible sedimentación *in situ*, turbulencia a altas velocidades de corte y problemas de pared, se han estudiado diversos equipos y accesorios. Los sistemas de cilindros concéntricos (o “couette”) se han usado para mediciones reológicas de lodos [1]. Sin embargo, se han observado efectos de deslizamientos en pared en ensayos con suspensiones de partículas. Este efecto se puede superar, en cierta medida, mediante el uso de configuraciones con rugosidad en el cilindro o en la copa [2]. En la geometría “vane”, se usa una paleta de álabes finos como rotor en lugar de un cilindro sólido, lo que elimina los efectos de deslizamiento [3], a su vez que mitigaría la sedimentación

del sistema debido al flujo generado entre estos álabes, aunque por otro lado, se debe analizar la formación de flujos secundarios debido a esta geometría.

El objetivo de este trabajo es obtener curvas de flujo de una suspensión mineral de concentraciones conocidas comparando las distintas configuraciones de sensores de medición disponibles, buscando detectar las limitaciones de cada sistema en distintos rangos de concentración de sólidos.

## PARTE EXPERIMENTAL

Para el estudio se elaboró una suspensión de características similares a una cola o relave 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.

Se empleó un reómetro de esfuerzo controlado marca TA Instruments, modelo AR-G2 con un sistema control de temperatura peltier. Se realizaron mediciones similares utilizando distintas geometrías de medición del tipo “couette” o de cilindros concéntricos (figura 1): con émbolos de superficie lisa (L), arenada (A) y de paleta o “vane” (V), y copas de superficie lisa (CL) y ranurada (CR). La temperatura de los ensayos fue 20°C.

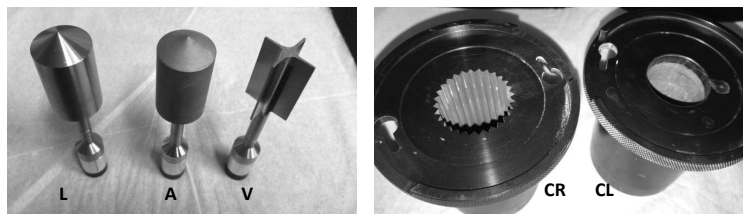


Figura 1. Geometrías de medición utilizadas: émbolos liso (L), arenado (A) y “vane” (V); copas ranurada (CR) y lisa (CL)

Se hicieron ensayos aplicando dos métodos con las distintas geometrías de medición: el primero es el procedimiento *estándar* de obtención de curva de flujo donde se aplica una rampa de velocidad de corte ascendente asignando 15 segundos por punto a partir del cual se mide la viscosidad. En el segundo método se propone un procedimiento para visualizar la evolución de la viscosidad en cada escalón de velocidad de corte (*“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. También se hicieron ensayos a corte estacionario para la geometría de cilindros concéntricos tradicional.

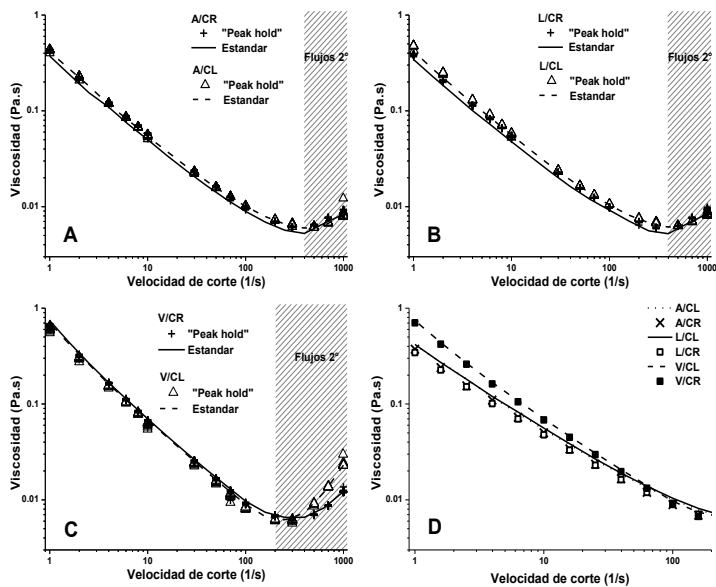


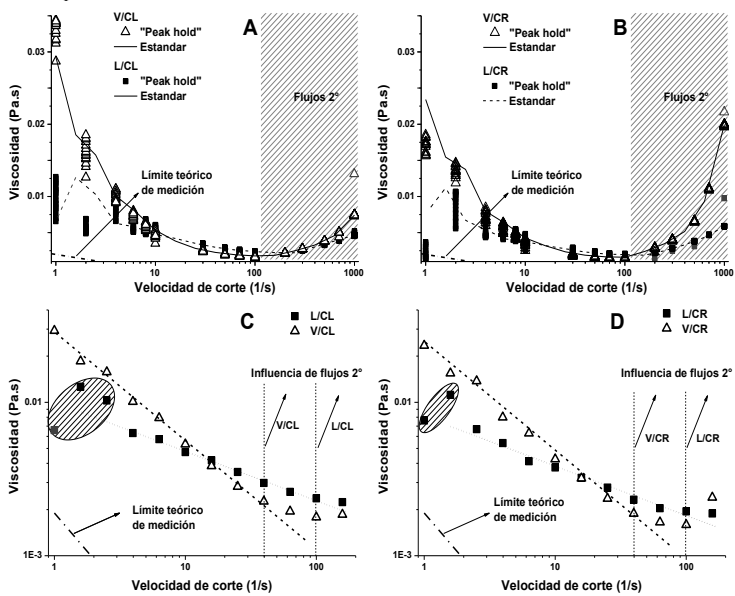
Figura 2. A, B y C: gráficos comparativos para muestras de 45% m/m de resultados obtenidos por ambos métodos para las distintas combinaciones embolo – copa; D: curvas estándar para todas las combinaciones embolo – copa.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 2 se muestran los resultados para la muestra de mayor concentración. En los gráficos A, B y C se observa que existe buena correlación entre los resultados de los métodos, indicando estabilidad de la suspensión durante la medición y buenos niveles de torque medido.

La forma de las curvas son similares y presentan una inconsistencia desde el punto de vista físico: combinan un comportamiento “shear-thinning” (disminución de la viscosidad con la sollicitación), común en este tipo de sistemas, que se observa a velocidad de corte baja; y un comportamiento “shear-thickening” (aumento de la viscosidad con la sollicitación), a altas velocidades de corte. Esto último en realidad se debe a la formación de flujos secundarios que inciden sobre la medición, debiéndose descartar esta zona de medición. Debido a las sollicitaciones elevadas, el flujo dentro del sistema deja de ser laminar, cambiando toda la dinámica de flujo dentro del mismo. Esto ocurre a velocidades de corte críticas levemente menores para las combinaciones con el embolo “vane”, lo que puede deberse a los flujos formados entre los álabes del émbolo. Las suspensiones tienen un comportamiento pseudoplástico o “shear-thinning”, pudiendo ampliarse el rango de medición a menores valores de velocidad de corte con cualquier combinación de sensor, no pudiéndose obtener el valor de viscosidad a corte infinito debido a los flujos secundarios.

En la figuras 2D, se observa que los resultados entre las combinaciones con el embolo arenado y el liso se solapan casi perfectamente pero que difieren de aquellos obtenidos con el émbolo “vane”, sin importar la copa usada, pudiendo ver que las diferencias más notables entre configuraciones se van a observar entre émbolos liso y arenado respecto al “vane”, por lo que se decidió a modo de simplificar el análisis trabajar solo con émbolos liso y “vane” para el resto de las suspensiones a analizar.



**Figura 3. A y B:** gráficos comparativos para muestras de 25% m/m de resultados obtenidos por ambos métodos para las distintas combinaciones embolo – copa; **C y D:** curvas estándar para todas las combinaciones embolo – copa.

En la figura 3 se muestran los resultados de los ensayos con la suspensión de 25% m/m. La muestra al 25% m/m tiene un comportamiento pseudoplástico también. En las figuras 3A y 3B fácilmente se notan que las mediciones muestran discrepancias entre métodos y combinaciones embolo - copa utilizadas, sobre todo a velocidades de corte bajas. Esto puede ser producto de inestabilidades de la suspensión a partir de gradientes de concentración por sedimentación de las partículas al disminuir la sollicitación de la misma. A su vez se debe tener en cuenta que la señal obtenida durante de la medición no esté cerca de los niveles de ruido del equipo. Esto se verifica a partir del cálculo de viscosidad mínima en función de la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ), lo cual se hizo a partir de la siguiente relación para la geometría de

cilindros concéntricos [4]:

$$\eta_{min}(\dot{\gamma}) > F_{\tau} \cdot T_{min} / \dot{\gamma} \quad F_{\tau} = (2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot L)^{-1}$$

Ambos émbolos tienen igual radio R (14mm) y longitud L (42mm) y el torque mínimo de medición del equipo (0.1μN.m). Este nivel de medición es el mínimo teórico, pero este umbral puede tomar valores más altos en la práctica (por ej. por tensión superficial que produce torque [4]). Cabe recordar que en la industria minera está muy difundido el uso de viscosímetros Brookfield: estos tienen valores de torque mínimo mucho más altos que los reómetros.

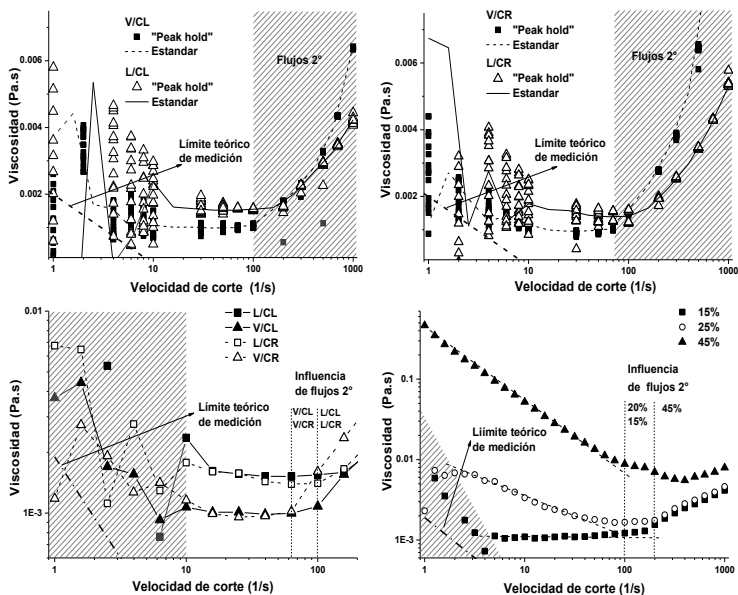


Figura 4. A y B: gráficos comparativos para muestras de 15% m/m de resultados obtenidos por ambos métodos para las distintas combinaciones embolo – copa; C: curvas estándar para todas las combinaciones émbolo – copa; D: curvas en estado estacionario de las tres suspensiones con la configuración embolo liso- copa lisa



Las curvas obtenidas con la geometría “vane” muestran mayores valores de viscosidad a solicitaciones bajas, una mejor correlación entre los datos del método estándar y “peak hold” y se encuentran por encima del umbral de medición mínima, pero aun así muestran una dispersión significativa, por lo que rango de medición de estas combinaciones no puede ampliarse menores velocidades de corte. Las combinaciones con el embolo liso dan curvas muy cerca del límite teórico de medición, y muestran inconsistencias a valores de velocidad de corte menores a  $5s^{-1}$ . Se observa en las figuras 3C y 3D que los puntos obtenidos a menores solicitaciones se desvían del comportamiento pseudoplástico (línea punteada sobre las curvas) para las curvas obtenidas con embolo liso. El rango de medición de estas combinaciones debe limitarse a valores por encima de velocidades de corte de  $5s^{-1}$ .

También se debe indicar que la velocidad de corte crítica por flujos secundarios aparece a menor velocidad de corte para esta suspensión: se puede analizar esto desde el número de Reynolds. Tomando a la densidad del sistema como una regla de mezclas entre la fase solida y la fase liquida, se observa que la densidad disminuye a la mitad casi para esta suspensión respecto de la 45% m/m pero la viscosidad medida es un orden de magnitud menor, con lo que se llega a valores de régimen turbulento a menores velocidades de flujo (o corte). La influencia de flujos secundarios se da a menores valores de velocidad de corte para la geometría “vane”, confirmando la influencia de los flujos entre los álabes.

Las curvas obtenidas para la suspensión al 15% m/m muestra las limitaciones de los equipos de reología para la medición de estos sistemas complejos (figuras 4A, 4B y 4C). Esta suspensión tiene un comportamiento reológico newtoniano, que se determina a partir del “plateau” observado en el rango medio de velocidad de corte. La influencia de flujos secundarios aparece a valores similares a los de la suspensión al 25% m/m y también se observa que aparece primero para la configuración “vane”. A bajas solicitaciones, todas las medi-

ciones se hallan muy cerca del límite teórico de medición, lo que las vuelve muy erráticas. Esto reduce el rango de mediciones confiables a velocidades de corte mayores a  $10s^{-1}$ . En el rango valido de medición, el ajuste entre ambos métodos permite ver que la configuración “vane” tiene una mejor correlación de datos. Todas las observaciones son también validas para curvas en estado estacionario, que es el modo de medición convencionalmente utilizado en reometría (figura 4D).

## CONCLUSIONES

Las mediciones de las distintas suspensiones indican que las mayores dificultades sobre las determinaciones reológicas se encuentran en las los sistemas diluidos debido a las limitaciones de los equipos para la medición de bajos torques y la inestabilidad temporal de estos a bajas solicitaciones. Los viscosímetros usados comúnmente tienen rangos validos de medición muchos menores a los logrados con reómetros por lo que sus resultados son menos confiables. La configuración “vane” muestra mayor sensibilidad a bajas solicitaciones pero genera turbulencias a menores velocidades de corte. El análisis de los resultados reológicos obtenidos no solo depende del equipo usado, también dependen fuertemente de los criterios aplicados en el mismo.

## 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. J. Major, T. Pierson. “Debris flow rheology: experimental analysis of fine-grained slurries”. *Water Resources Research* 28: 841-857.1992.
2. H. Barnes. “A review of the slip (wall depletion) of polymer solutions, emulsions and particle suspensions in viscometers: its

- cause, character, and cure”. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 56: 221-251. 1995.
3. H. Duan, H. Sun. “New method of measuring rheologic parameters of high-density slurry”. *Journal of China University of Mining & Technology* 30(4): 371-374. 2001.
  4. R. Ewoldt, M. Johnston, L.Caretta. “Experimental Challenges of Shear Rheology: How to Avoid Bad Data” in *Complex Fluids in Biological Systems* (Springer,NY) 207-240. 2015.