

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA**

**XIX CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA**

**EL EFECTO DEL TIEMPO EN LA DETERMINACIÓN DE LA REOLOGÍA DE  
CONCENTRADOS Y RELAVES**

**CHRISTIAN F. IHLE<sup>1</sup>  
ALDO TAMBURRINO<sup>2</sup>  
NARA ALTMANN<sup>3</sup>**

**RESUMEN**

En el presente trabajo se estudia el efecto del tiempo en la determinación de la reología de mezclas de concentrado y relave de cobre de la industria minera, empleando un reómetro de cilindros concéntricos como instrumento de medición. Ambas mezclas difieren en distribución de tamaño de partículas y propiedades físicas de los sólidos. De las pruebas realizadas, se detectó que la sedimentación altera los resultados de las mediciones para tiempos de ensayos superiores a aproximadamente un minuto, medido a partir del comienzo de la preparación de las muestras.

---

<sup>1</sup>BRASS Chile S.A. – mail: [cihle@brass.cl](mailto:cihle@brass.cl)

<sup>2</sup>Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – mail: [atamburr@ing.uchile.cl](mailto:atamburr@ing.uchile.cl)

<sup>3</sup>BRASS Chile S.A. – mail: [naltmann@brass.cl](mailto:naltmann@brass.cl)

## **1. INTRODUCCIÓN**

Los flujos de mezclas sólido-líquido son ampliamente encontrados en la naturaleza (Takahashi, 1991; Wan y Wang, 1994; Hampton et al., 1996) y en la industria (Bird et al., 1987; Shook y Roco, 1991). Cuando la fase sólida está constituida por partículas finas, son usualmente modeladas como un fluido equivalente con una reología particular dependiendo de las características del líquido (pH, propiedades químicas, etc.), la fase sólida (tamaño, composición, etc.) y su concentración (Huang y García, 1997, 1998; Rządkiwicz et al., 1997; Van Kessel y Blom, 1998; Whipple, 1997). Desde el trabajo seminal de Einstein (1906), es conocido el hecho que incluso bajas concentraciones de partículas finas en un líquido hacen que la mezcla se comporte como si tuviera una viscosidad más alta que la del fluido: el comportamiento reológico efectivamente cambia con la concentración de sólidos. Por ejemplo, Faddick (1985) reporta que mezclas de agua y un tipo específico de carbón a concentraciones de sólidos en volumen inferiores a un 15%, se comportan como Newtonianas. Sin embargo aumentando la concentración causa cambios en el tipo de reología, yendo desde fluidos pseudoplásticos (16-24%), hasta plásticos de Bingham, para concentraciones superiores a un 40%.

En el caso de la industria minera, los sólidos presentes en las mezclas sólido-líquido no Newtonianas mencionadas poseen gravedades específicas superiores a aquella de la fase líquida, lo que redundará en un proceso de segregación (o generación de un gradiente vertical de concentración) que depende del tiempo. Esto implica que las mediciones reológicas, realizadas frecuentemente en ausencia de procesos de resuspensión, se verán afectadas por el tiempo que dura el ensayo. En el presente trabajo se muestra, mediante un conjunto de mediciones de laboratorio, la importancia de este efecto en la medición reológica de una muestra de concentrado de cobre y otra de relave del mismo metal.

## **2. ESCALAS DE TIEMPO ASOCIADAS A LA SEDIMENTACIÓN**

Desde el punto de vista de la medición reológica, la sedimentación de muestras implica la aparición de inhomogeneidades en las muestras a medir, las que pueden afectar sensiblemente los resultados obtenidos con distintos tipos de instrumentos de medición (por ejemplo, reómetros de placas paralelas, cono y placa, paletas o cilindros concéntricos, por mencionar algunos). Teniendo en cuenta que en mezclas sólido-líquido la sedimentación es un proceso inevitable, posibles errores en mediciones reológicas de mezclas sólo pueden ser acotados conociendo en términos efectivos las escalas de tiempo en que dicho proceso tiene un impacto significativo. En el presente trabajo, se estudia el efecto del tiempo de sedimentación en las lecturas reológicas obtenidas de mezclas sólido-líquido encontradas frecuentemente en la industria minera, a saber, concentrados y relaves de cobre.

La sedimentación de sólidos en medios líquidos está afectada fuertemente por la concentración, cuando ésta es suficientemente alta. El tamaño de las partículas, su densidad relativa a la del líquido y la concentración de las mismas determinan su velocidad de

sedimentación. Usualmente se estima el efecto de la concentración en la velocidad de sedimentación ( $v$ ) empleando el siguiente modelo:

$$v = v_{\infty}(1 - \phi)^m, \quad (1)$$

en que  $v_{\infty}$  es la velocidad de sedimentación de una esfera individual de densidad conocida en un medio infinito en régimen de Stokes y  $\phi$  la concentración de sólidos en volumen. Típicamente  $m$  toma valores entre 4 y 5 para esferas de diámetro menor a  $100 \mu\text{m}$  (Richardson y Zaki, 1954). La falta de esfericidad presente en granos no esféricos hace que las velocidades de sedimentación sean más bajas. En el caso de arenas, estas últimas pueden sedimentar a velocidades cercanas a un 70% de aquellas calculadas usando (1) considerando diámetros de esfera equivalente (Baldock et al. 2004). Considerando las dimensiones típicas de un instrumento de medición de tipo cilindros concéntricos, donde la distancia media recorrida por una partícula es del orden de la mitad de la altura del rotor, del orden de  $H = 25 \text{ mm}$ , se puede obtener una idea de escalas de tiempo de sedimentación en la figura 1 como  $L/v$ . En el caso que se determine la reología empleando otros métodos, como por ejemplo, reómetros de cono y placa o gravitacionales, las escalas de longitud asociadas a la sedimentación son menores.

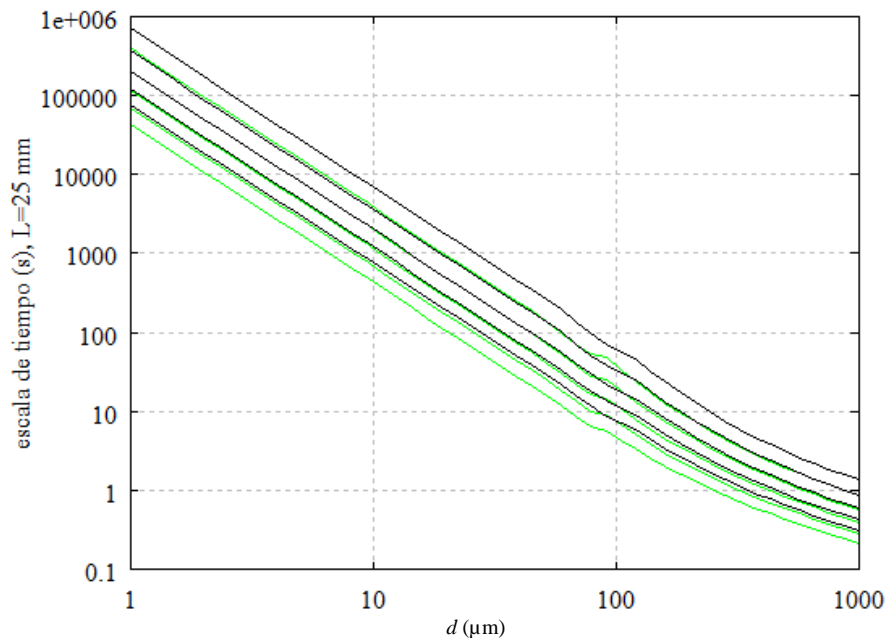


Figura 1: Escalas de tiempo de sedimentación para densidades de sólidos de  $4000 \text{ kg/m}^3$  (líneas verdes) y  $2700 \text{ kg/m}^3$  (líneas negras) y concentraciones de sólidos en volumen desde un 20% (líneas superiores) hasta un 50% (líneas inferiores). Se considera que el líquido es agua, con propiedades físicas a  $15^\circ\text{C}$  y que las suspensiones están caracterizadas por un único tamaño de partícula  $d$ .

### 3. METODOLOGÍA

#### Caracterización física de mezclas empleadas

En el presente trabajo se consideró algunas muestras de concentrado y relave de cobre obtenidas de faenas mineras ubicadas en el norte grande de Chile y Perú. La característica no Newtoniana de estas mezclas se debe esencialmente a la presencia de suspensiones concentradas y, en el caso de los relaves se debe también a la presencia de floclulantes, empleados en la etapa de flotación (Davenport et al., 2002). Estos últimos son típicamente soluciones poliméricas. Un factor que también altera la reología de este tipo de mezcla es la existencia de distribuciones de partículas (en algunos casos relativamente extendidas). Este último efecto provoca que se produzcan campos de flujo complejos debido a la sedimentación relativamente más rápida de partículas más gruesas.

En el cuadro 1 se muestra las características físicas de las muestras empleadas. En la figura 2 se muestra gráficamente las distribuciones granulométricas de las partículas correspondientes a las muestras consideradas en el presente estudio.

Cuadro 1: Características físicas del concentrado y el relave usado en el presente trabajo.  $C_p$  es la concentración en peso (media) de sólidos y  $\rho_s$  la densidad de sólidos.

Nº	Tipo	Designación	$C_p$ (%)	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	concentrado de cobre	$C_1$	56.5	4170
2	relave de cobre (concentración 1)	$R_1$	48	2970
3	relave de cobre (concentración 2)	$R_2$	56	2970

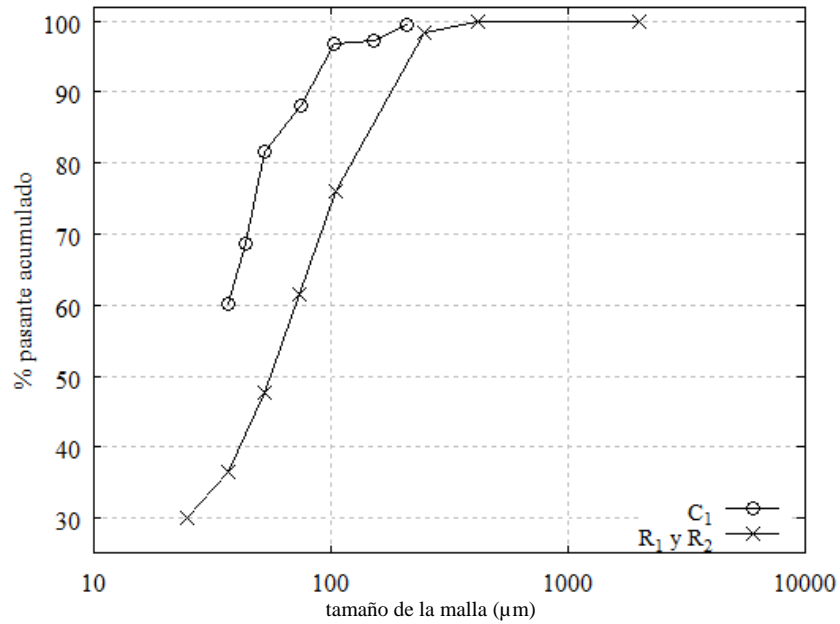


Figura 2: Granulometría de muestras consideradas.

### Mediciones reológicas

Se realizó un conjunto de mediciones reológicas. Para ello, en el presente trabajo se empleó un reómetro de cilindros concéntricos Anton Paar Rheolab QC. Este tipo de configuración, combinada con el uso de accesorio de tipo paleta se emplea con frecuencia en la medición de parámetros reológicos tanto para el espesamiento como para el transporte de pulpas. En la figura 3 se muestra un esquema del aparato de medición empleado.

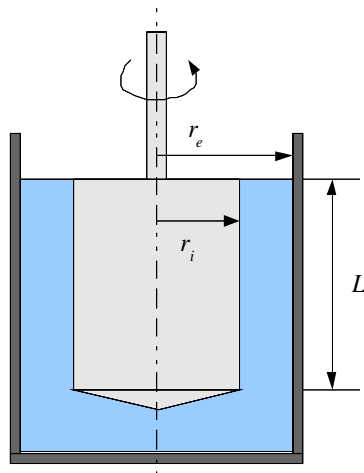


Figura 3: Configuración empleada para la medición de tasa de deformación y esfuerzo de corte a partir de geometría del reómetro. Para el accesorio empleado,  $r_e = 21$  mm,  $r_i = 19.5$  mm y  $L = 45$  mm.

Con el fin de validar las mediciones realizadas, se ejecutó una secuencia de toma de datos con un reómetro Rheomat RM180. En pruebas preliminares, empleando un aceite automotriz con una viscosidad cercana a 184 cP (a 21 °C), ambos equipos entregaron valores de viscosidad distintos entre sí en menos de un 5%.

Luego del proceso de mezcla necesario para homogeneizar la suspensión, se dejó la decaer la turbulencia inducida en la muestra por espacio de 30 s. Acto seguido, se procedió a la medición reológica de las muestras, ejecutando una secuencia de medición previamente programada en el software que controla el reómetro. Para el presente conjunto de mediciones, se consideró como variable el tiempo total de ejecución de secuencias. La frecuencia de muestreo de datos es fija e igual a 1 kHz, obteniéndose valores promediados de acuerdo al tiempo empleado en las mediciones con cada velocidad. En todos los casos se encontró que los datos recogidos resultaron en curvas suaves, consistentes entre sí y con mediciones de validación efectuadas con el equipo Rheomat RM180, mencionado en la sección anterior.

### Procesamiento de datos

Las mediciones reológicas consisten en encontrar la relación entre esfuerzo de corte ( $\tau$ ) y tasa de deformación ( $\dot{\gamma}$ ). Si se emplea un reómetro de cilindros concéntricos, la tasa de deformación y el esfuerzo de corte se pueden estimar a partir de la velocidad de rotación angular ( $\omega$ ) del cilindro interior y el torque medido por el instrumento,  $T$ . En el presente trabajo, se considera un procedimiento estándar para relacionarlas (ISO, 1993):

$$\dot{\gamma} = \frac{2\pi\omega(1+\delta^2)}{\delta^2-1} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{(1+\delta^2)T}{2\pi L\delta^2 r_i C} \quad (3)$$

$$\delta = \frac{r_e}{r_i} \quad (4)$$

La definición de las variables geométricas ( $r_e$ ,  $r_i$  y  $L$ ) se presentan en la figura 3. En (3), la constante  $C$  es un factor de corrección que da cuenta de los efectos de borde relativos a la geometría del cilindro, la reología y su confinamiento en la copa de medición.

Una forma directa de conocer el impacto de sedimentación en las mediciones reológicas es, en consecuencia, analizar el esfuerzo de corte (o el torque) registrado por el instrumento de medición, en función del tiempo. Además del registro de las curvas de reología en el tiempo se determinó el efecto del tiempo total de las mediciones en las curvas reológicas (reogramas) y, en definitiva, los valores de los parámetros reológicos correspondientes. Estos resultados se presentan en la sección siguiente.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 4 se puede apreciar algunos reogramas obtenidos de las muestras.

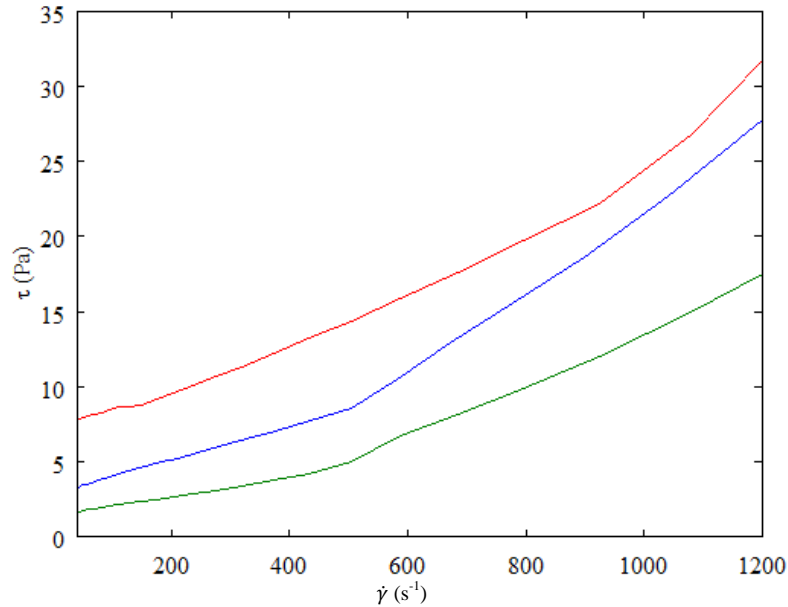
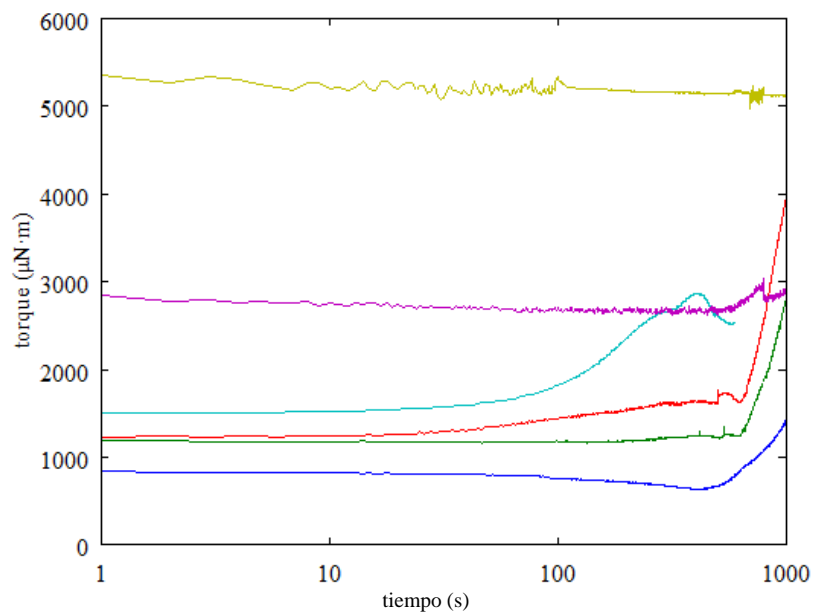


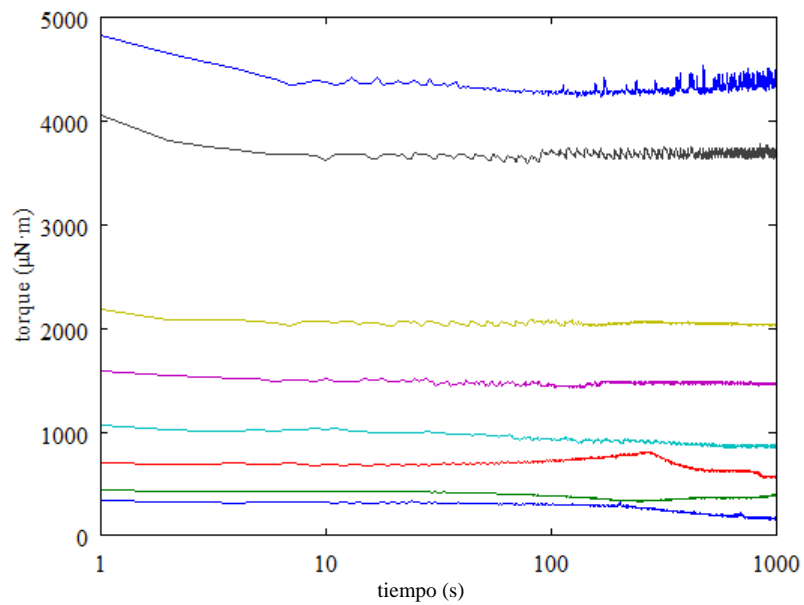
Figura 4: reogramas para tiempos de residencia de 40 s. De arriba hacia abajo, los resultados corresponden a las muestras  $R_2$ ,  $C_1$  y  $R_1$ .

Los reogramas mostrados en la figura 4 obedecen a los valores de esfuerzo de corte determinados a partir de las lecturas de torque. En la figura 5(a-c) se puede apreciar la evolución del esfuerzo de torque medido por el sensor en términos del tiempo, para distintas velocidades de rotación. En la figura 5a, las curvas corresponden (de abajo hacia arriba) a velocidades angulares de rotación van de  $14.8$  a  $88.6$   $s^{-1}$ , respectivamente. En las figuras 5b y c, las curvas mostradas corresponden van de  $3.7$  a  $125.7$   $s^{-1}$ , respectivamente. A mayor velocidad, mayores valores de torque fueron registrados por el instrumento, como era de esperar.

(a)



(b)





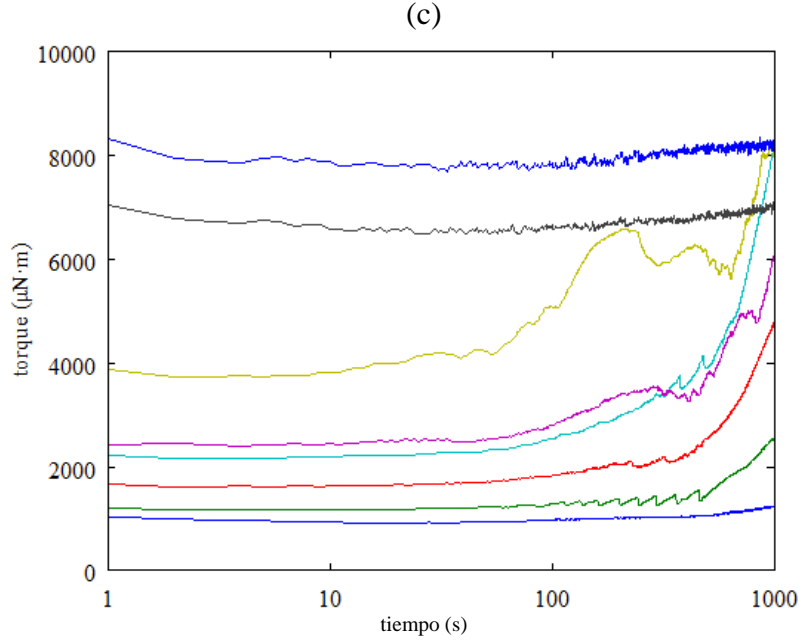


Figura 5: Evolución del torque registrado por el instrumento en función del tiempo de medición. (a) muestra  $C_1$  para  $\omega = 14.8, 22.2, 29.5, 37, 59.1$  y  $88.6 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente. (b) muestra  $R_1$  y (c) muestra  $R_2$  para  $\omega = 3.7, 14.8, 29.5, 44.3, 59.1, 73.8, 111$  y  $125.7 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente.

El comportamiento de concentrados y relaves en la minería es no Newtoniano (Wasp et al. 1977; Abulnaga, 2002). Típicamente se modela su comportamiento reológico siguiendo el modelo de Herschel-Bulkley:

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n, \quad (5)$$

en que  $\tau$  es el esfuerzo de corte,  $\tau_0$  es el esfuerzo de fluencia,  $k$  se denomina *índice de consistencia* y  $n$ , *índice de comportamiento de flujo*. Cuando  $n = 1$ ,  $k$  tiene dimensiones de viscosidad. El modelo de Bingham corresponde a este último caso, donde  $k \equiv \eta$  se denomina comúnmente *viscosidad Bingham*. En el presente trabajo se ha empleado este último modelo para caracterizar las muestras analizadas. Identificando el cambio de pendiente en las curvas de la figura 4 (cerca de  $500 \text{ s}^{-1}$  para las muestras  $C_1$  y  $R_1$  y del orden de  $900 \text{ s}^{-1}$  para la muestra  $R_2$ , que es la más concentrada) con la aparición de vórtices de Taylor (Drazin y Reid, 1981) y, por lo tanto, el efecto de transición a la turbulencia, se descarta este tramo, así como la zona curva del principio, que obedece a un flujo laminar con una capa estática, donde el esfuerzo de corte es inferior a  $\tau_0$ .

De la figura 5 (a,b), para velocidades de rotación bajas, se observa un decrecimiento sostenido de las curvas de torque. En este régimen de flujo, esencialmente laminar, las partículas, producto del proceso de sedimentación, disminuyen progresivamente su concentración frente al mano del cilindro, acumulándose en el fondo del recipiente. Para velocidades un poco más altas, se observa incrementos del torque registrado en el tiempo. Una posible explicación para este fenómeno es la formación de puentes de partículas en la zona inferior del cilindro, facilitada por procesos de resuspensión en el fondo debido al

flujos secundarios (Fewell y Hellmus, 1977; Sdougos et al., 1984) bajo el cono del rotor. Esto se ha observado para el caso de distancias pequeñas entre cilindros (Akroyd, 2004 y referencias citadas en dicho trabajo).

El hecho que existen distintos estados de flujo bajo el cono y que, por otro lado, haya simplemente sedimentación sin resuspensión, implica que existen tiempos límite para las mediciones de torque en un instrumento de cilindros concéntricos. En el cuadro 2 se muestra los resultados de los parámetros reológicos  $\eta$  y  $\tau_0$ . en términos de la duración de los ensayos. En el caso de la muestra de concentrado, los resultados sugieren tiempos no superiores a 40 s para la ejecución de las secuencias completas de los ensayos reológicos. La sedimentación de los relaves resultó ser manifiesta después de 60 s iniciadas las mediciones.

Cuadro 2: valores de  $\eta$  y  $\tau_0$  obtenidos para distintas duraciones de ensayo, excluyendo el lapso inicial de configuración de la muestra.  $C_1$ ,  $R_1$  y  $R_2$  corresponden a las muestras de concentrado de cobre a un 56.5% en peso, relave de cobre a un 48% y 56% de concentración en peso, respectivamente.

$t$ (s)	$\eta$ (mPa·s)		
	$C_1$	$R_1$	$R_2$
30	10.7	6.4	16.9
35	10.5	6.1	16.8
40	10.6	6.1	16.8
60	9.4	6.0	16.8
90	9.0	5.9	16.1
120	9.2	6.0	16.0

## 5. CONCLUSIONES

La determinación de la reología de pulpas provistas con sólidos está afectada por la sedimentación de las mismas. Este efecto se hace sensible en escalas de tiempo que dependen de la concentración de sólidos y las propiedades reológicas de la mezcla. En el presente trabajo se ha explorado esta última variable empleando muestras de concentrado y relave de faenas mineras. Para estas mezclas sólido-líquido se realizó mediciones de reología con un equipo de cilindros concéntricos, encontrando que el efecto de la sedimentación en las mediciones de reología es sensible después de cerca de un minuto a partir del comienzo del proceso de sedimentación. En el caso de esta configuración geométrica para la medición de reología, se encontró a partir de cierto tiempo, variaciones significativas en la señal de torque medida, posiblemente debido a procesos de formación de puentes derivados de procesos de resuspensión de partículas desde el fondo del recipiente de medición.

## REFERENCIAS

- Abulnaga, B. 2002. *Slurry systems handbook*, McGraw-Hill.
- Akroyd, T. 2004. Continuous flow rheometry for settling slurries. PhD thesis, University of Adelaide.
- Baldock, T. E., Tomkins, M. R., Nielsen, P. y Hughes, M. G. 2004. Settling velocities of sediments at high concentrations. *Coast. Eng.*, **51**, 91-100.
- Bird, R. B., Armstrong, R. C. y Hassager, O. 1987. *Dynamics of polymeric liquids, vol. 1, Fluid Mechanics*. John Wiley Sons, New York.
- Davenport, W. G., King, M., Schlesinger, M. y Biswas, A. K. 2002. *Extractive metallurgy of copper*, Pergamon.
- Drazin, P. G. 1981. *Hydrodynamic stability*. Cambridge University Press.
- Faddick, R. R. 1985. Hydrotransport of concentrated slurries and tailings. Class notes of the course dictated at the School of Engineering, Catholic University of Chile, sponsored by the United Nations.
- Fewell, M. E. y Hellums, J. D. 1977. The Secondary Flow of Newtonian Fluids in Cone-and-Plate Viscometers. *J. Rheol.*, **21**, 535--565.
- Hampton, M. A., Lee, H. J. y Locat, J. 1996. Submarine landslides. *Rev. Geophysics*, **34**, 33-59.
- Huang, X. y García, M. H. 1997. A perturbation solution for Bingham-Plastic mudflows. *J. Hydr. Eng., ASCE*, **123**, 986-994.
- ISO, 1993. Determination of viscosity using a rotational viscometer with defined shear rate. Standard ISO 3219:1993'.
- Richardson, J. F. y Zaki, W. N. 1954. Sedimentation and fluidisation; part 1. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **32**, 35-53.
- Rzadkiewicz, S. A., Mariotti, C. y Heinrich, P. 1997. Numerical Simulation of Submarine Landslides and Their Hydraulic Effects. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, **123**(4), 149-157.
- Sdougos, H. P., Bussolari, S. R. y Dewey, C. F. 1984. Secondary flow and turbulence in a cone-and-plate device. *J. Fluid Mech.*, **138**, 379--404.
- Shook, C. A. y Roco, M. C. 1991. *Slurry Flow*. Butterworth-Heinemann.

Takahashi, T. 1981. Debris flow. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **13**, 57--77.

Van Kessel, T. y Blom, C. 1998. Rheology of cohesive sediments: comparison between a natural and an artificial mud. *J. Hydr. Res.*, **36**(4), 591-612.

Wan, Z. y Wang, Z. 1994. *Hyperconcentrated Flow*. A.A. Balkema.

Wasp, E. J., Kenny, J. P. y Gandhi, R. L. 1977. *Solid-Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation*. Trans Tech Publications.

Whipple, K. X. 1997. Open-channel flow in Bingham fluids: Applications in debris-flow research. *J. Geology*, **105**, 243-262.