

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA  
VIII CONGRESO NACIONAL

MEDICION DEL COMPORTAMIENTO REOLOGICO DE  
MEZCLAS SOLIDO-LIQUIDAS USANDO UN  
VISCOSIMETRO CAPILAR MODIFICADO

BERNARDO DOMINGUEZ C. (\*)  
MIGUEL IRARRAZAVAL E. (\*\*)

RESUMEN

En este trabajo se presenta una análisis del uso de un viscosímetro capilar, convenientemente modificado, en la medición de las características reológicas de mezclas sólido-líquidas.

Se describe en forma somera las características del equipo construido para este efecto, y se entregan los resultados de las experiencias realizadas en él con relaves de cobre a distintas concentraciones y temperaturas, los que se compararon con los obtenidos en las mismas condiciones en un viscosímetro rotatorio.

Se concluyó que este equipo presenta ventajas de simplicidad, costo y fiabilidad en los resultados permitiendo solucionar la complejidad que presenta en general la medición del comportamiento reológico de las mezclas. Los resultados permitieron además verificar los modelos que existen para predecir la viscosidad de los relaves.

(\*) Ingeniero Civil U.C., Dr. Ing., Profesor Titular de la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile

(\*\*) Ingeniero Civil U.C.

## 1. INTRODUCCION

En muchos procesos mineros e industriales en los que intervienen las mezclas sólido-líquidas, o pulpas, uno de los factores de mayor importancia es su comportamiento reológico, y particularmente su viscosidad. En efecto, dicho comportamiento incide en diversos fenómenos particulares que se presentan en procesos tales como la flotación, el transporte, el bombeo y la separación de fases de las pulpas. Su conocimiento permite diseñar en forma más adecuada estos procesos.

Las mezclas bifásicas se comportan reológicamente tanto como fluidos newtonianos como también, bajo ciertas condiciones, en forma de fluidos no newtonianos. Esto, unido a la complejidad que representa la existencia conjunta de las fases sólida y líquida, ha hecho que no existan todavía modelos generales y completos para predecir con exactitud el comportamiento reológico de estas mezclas.

Por esta razón es particularmente importante tener sistemas adecuados y precisos para medir el comportamiento reológico de las pulpas. Sin embargo, los equipos y métodos comúnmente empleados en fluidos homogéneos no son apropiados en el caso de las pulpas, debido principalmente a la rápida sedimentación de los sólidos y a la distorsión en las mediciones que ello produce.

En este trabajo se presentan los resultados de la medición del comportamiento reológico de pulpas usando un viscosímetro de tubo capilar modificado, diseñado y construido especialmente para evitar problemas tales como la sedimentación de las partículas durante la medición. Las experiencias se realizaron en el Laboratorio de Hidráulica de la Pontificia Universidad Católica de Chile y la pulpa usada fue de relaves de cobre. Se analizó la influencia de parámetros tales como la concentración de los sólidos y la temperatura de la mezcla. Paralelamente se llevaron a cabo experiencias usando un viscosímetro rotatorio especialmente adaptado para mezclas sólido-líquidas.

## 2. ANTECEDENTES SOBRE LA REOLOGIA DE LAS MEZCLAS SOLIDO-LIQUIDAS

Existen numerosos modelos teóricos o empíricos que intentan explicar o predecir las propiedades reológicas de las mezclas. Sin embargo, la mayor parte de estos modelos se refieren a casos particulares de pulpas. Además se ha podido constatar que existe una gran dependencia entre los resultados de las

investigaciones y el tipo de material y procedimiento usado en ellas.

La mayoría de los modelos se basan exclusivamente en la concentración de sólidos de las mezclas, sin enfatizar ni estudiar la influencia de otras variables tales como el tamaño, la densidad y la forma de los sólidos.

Los resultados de investigaciones anteriores muestran una amplia gama de diferentes comportamientos según el fluido considerado. Algunas suspensiones serían newtonianas hasta concentraciones en volumen del 45% (Gadala-Maria, 1979). En otras mezclas se ha encontrado comportamiento de plástico de Bingham para concentraciones en volumen inferiores a 40% (Grönfors, 1965; Serova et al., 1978). Algunas pulpas a altas concentraciones, y aquellas que tienen partículas coloidales, han mostrado seguir un modelo pseudoplástico de comportamiento (Klimpel, 1982; Serova et al., 1978; Tucker, 1982). También se han estudiado pulpas con comportamiento dilatante (Umeya, 1970) y dilatante con esfuerzo de corte inicial (Boger et al., 1978). Se ha encontrado, también, comportamiento de plástico de Bingham en pulpas de carbón con concentraciones en volumen del 40% (Faddick, 1985) y en mezclas de arcilla en agua (Babitt y Caldwell, 1939).

Muchos autores han tratado de correlacionar los parámetros reológicos (especialmente la viscosidad aparente) con las características de las partículas y la concentración de la mezcla. Según algunos investigadores (Rao, 1970) la viscosidad aparente depende del tamaño de las partículas sólo si la concentración en peso de la pulpa es superior al 40%, y es sólo función de la concentración en caso contrario. Hansford (1975) estudió algunas pulpas de mineral de oro y comprobó que en ese caso la viscosidad es afectada por su concentración, temperatura y pH. Komorniczuk et al. (1976) encontraron que algunas suspensiones concentradas tienen mayores viscosidades al aumentar la concentración y disminuir el tamaño de las partículas. Según Klimpel (1982), la viscosidad de las pulpas de carbón está controlada por su concentración, el tamaño y la forma de sus partículas y el entorno químico.

Grönfors (1965) y Serova et al. (1978) encontraron que la viscosidad y el esfuerzo de corte inicial de pulpas con comportamiento de plásticos de Bingham depende de la concentración de las partículas y, dentro de cierto rango, también de su tamaño.

La mayoría de los modelos de comportamiento reológico se reducen a relacionar la viscosidad, o el coeficiente de viscosidad dinámico, con la concentración de la mezcla.



Entre los modelos exclusivamente teóricos puede mencionarse el de Einstein (1906), que supone que las partículas son esféricas y rígidas, que su concentración es muy baja y que el flujo ocurre alrededor de ellas y puede describirse mediante la ecuación de Stokes, despreciando la inercia. La relación que él obtuvo es:

$$\frac{\mu_m}{\mu_0} = 1 + 2,5 C_v \quad (C_v < 1\%) \quad (1)$$

donde:

$\mu_m$ : viscosidad dinámica de la mezcla [Pa.s]  
 $\mu_0$ : viscosidad dinámica del medio líquido [Pa.s]  
 $C_v$ : concentración en volumen de la mezcla

Se han intentado diversas modificaciones de la ecuación (1), con el fin de incluir en ella el efecto de la interacción hidrodinámica producida por las partículas. Una de estas ecuaciones es la propuesta por Thomas (Wasp et al., 1977):

$$\frac{\mu_m}{\mu_0} = 1 + 2,5 C_v + 10,05 C_v^2 + 0,00273 e^{(16,6 C_v)} \quad (2)$$

Un modelo más completo y semi-empírico es el de Shaheen (1972), en el cual  $H_1$ ,  $H_2$  y  $k$  son constantes experimentales:

$$\frac{\mu_m}{\mu_0} = e^{\left( \frac{H_1 C_v}{1 - H_2 C_v^k} \right)} \quad (3)$$

También puede citarse el modelo propuesto por Purohit y Roy (1965), que permite su adaptación a diversas pulpas a través del ajuste de las constantes  $E_1$ ,  $E_2$  y  $B$ ; y que incluye el valor del tamaño medio,  $d_{50}$  [mm]

$$\frac{\mu_m}{\mu_0 - \mu_0} = E_1 + E_2 \frac{d_{50}^B}{C_v} \quad (4)$$

Dentro de las investigaciones realizadas en diferentes lugares para medir y estimar los parámetros reológicos de las pulpas sólido-líquidas (especialmente minerales) sobresale el estudio de Laapas (1983), referido a mezclas de cuarzo, cromita, flogopita y sulfuros, con densidades de los sólidos de

entre 2460 y 4270 kg/m<sup>3</sup> y concentraciones en peso  $C_p$  de hasta 59%. Las granulometrias usadas fueron diferentes, aunque más bien finas ( $d_{50}$  variables entre 10 y 83 micrones). También se midió la superficie específica de las partículas, como una manera de cuantificar su forma, al relacionarla con la superficie de una esfera de igual volumen. Dentro de las conclusiones de este estudio, pueden citarse:

- la viscosidad depende de la concentración y de la esfericidad de las partículas. Dentro del rango estudiado, en cambio, la distribución de tamaños no parece ser importante. Se propone la siguiente expresión para la viscosidad:

$$\mu_m = \mu_0 + \frac{\Gamma C_v}{1.000 (1 - C_v)^{4,8}} \quad (5)$$

$$\Gamma = 1,8 + 0,0167 \frac{(1 - \Psi)^{1,91}}{\Psi^{1,91}} \quad (6)$$

- para bajas concentraciones, las pulpas se comportan como newtonianas y, para concentraciones mayores de un cierto valor crítico, las mezclas muestran un comportamiento de plásticos de Bingham con un esfuerzo de corte inicial  $\tau_y$  cuyo valor depende de la concentración de la pulpa y de la forma, el tamaño y la densidad de las partículas:

$$\tau_y = A (C_v - C_{v0})^B \quad (7)$$

en la cual:  $A = 0,49 d_{50}^{-0,00048 D}$   
 $B = 0,000079 d_{50}^{-0,51} \rho_s^{2,05} \Psi^{-2,84}$   
 $D = \rho_s^{1,89} \Psi^{-2,7}$   
 $C_{v0} = 38,03 d_{50}^{0,39} \rho_s^{-2,23} \Psi^{0,87}$

donde:

- $C_{v0}$ : concentración en volumen crítica, por sobre la cual el comportamiento de la pulpa deja de ser newtoniano.
- $d_{50}$ : mediana de la distribución granulométrica de las partículas (tamaño de la malla por el cual pasa el 50 % de ellas) [mm]
- $\Psi$ : esfericidad de las partículas sólidas

En Chile diversos investigadores han estudiado las pulpas y relaves minerales. Wellmann (1977) presenta la siguiente expresión para la viscosidad en función de la concentración en volumen:

$$\frac{\mu_m}{\mu_0} = \frac{e^{-10,4 C_v}}{(1-1,61 C_v)^8} \quad (8)$$

Un segundo estudio disponible en Chile (Zúñiga, 1977) fue realizado usando mineral procedente de Andacollo y relaves de El Teniente. En esta investigación se recomienda la siguiente expresión:

$$\frac{\mu_m}{\mu_0} = e^{[7,1 C_v / (1-0,6 C_v)]} \quad (9)$$

### 3. FASE EXPERIMENTAL

#### 3.1. Descripción del Viscosímetro Capilar Modificado

##### 3.1.1. Esquema General

Irarrázaval (1987) diseñó y construyó un viscosímetro de tubo capilar, adaptado especialmente para medir el comportamiento de mezclas sólido-líquidas. El instrumento es relativamente simple, pero incluye ciertos elementos adicionales que se requieren debido a la presencia de una alta concentración de sólidos.

El sistema consta de un estanque de carga, de un tubo capilar de vidrio de 2,77 mm. de diámetro y 1,165 mts. de longitud, de un estanque aforador y de control del gasto, de una bomba de impulsión, de un sistema de control de temperatura y de un sistema de medición de la pérdida de carga basado en dos tubos piezométricos.

Las principales modificaciones de este viscosímetro respecto a los viscosímetros capilares usuales se refieren precisamente a la utilización de esos tubos piezométricos especiales para medir la pérdida de carga, y también al empleo de elementos particularmente adaptados a la presencia de sólidos, tales como estanques cónicos, bomba recubierta en goma, sistemas de control de presión y temperatura y de agitación en los estanques.

Un esquema de este viscosímetro se presenta en la Figura 1:

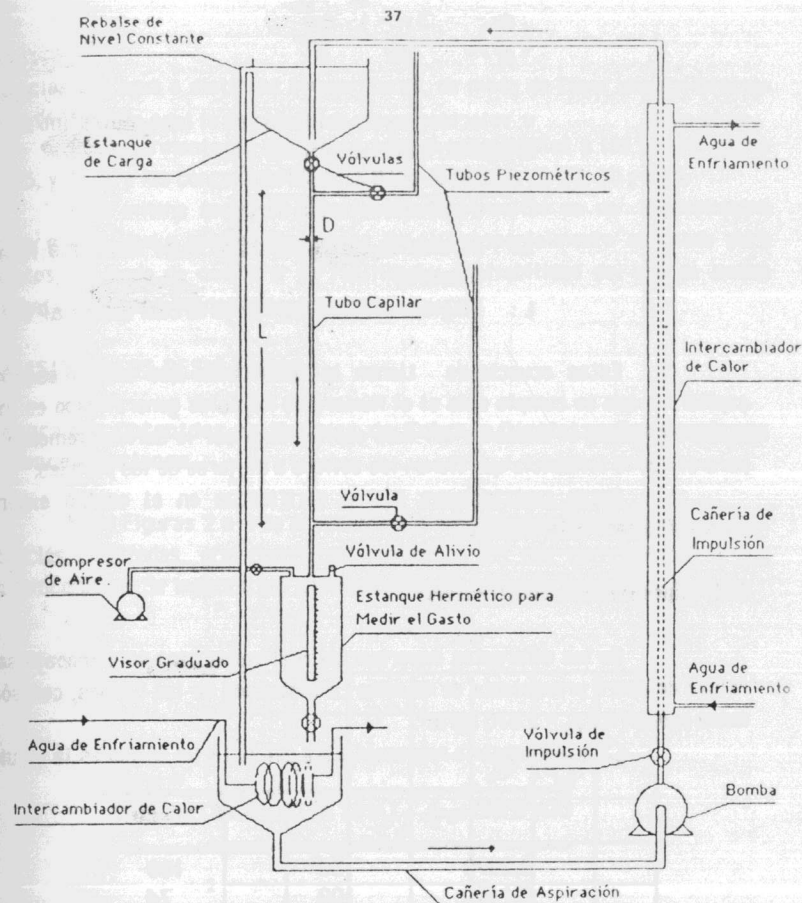


FIGURA 1. Esquema del Viscosímetro Capilar

##### 3.1.2. Ecuaciones de Funcionamiento del Viscosímetro

Metzner y Reed (1955) desarrollaron las siguientes expresiones para describir la relación entre el esfuerzo de corte,  $\tau_w$ , y el gradiente de velocidad en las paredes del tubo,  $(dv/dr)_w$ :



$$\left(\frac{dv}{dr}\right)_w = \frac{3n' + 1}{4n'} \frac{8v}{D} \quad (10)$$

en la cual

v: velocidad media del fluido en el tubo capilar [m/s]

D: diámetro del tubo capilar [m]

$$n' = \frac{d \ln(D \Delta P / 4L)}{d \ln \tau_w} = \frac{d \ln 8v/D}{d \ln 8v/D} \quad (11)$$

$\Delta P$ : pérdida de carga debida al flujo laminar a lo largo del tubo [Pa]

L: longitud del tubo capilar en la cual ocurre  $\Delta P$  [m]

Estas ecuaciones tienen la restricción que exista escurrimiento capilar, lo que se cumple sólo si el Número de Reynolds generalizado es inferior a 2.100. Además, el diámetro del tubo capilar debe ser lo suficientemente pequeño para evitar la tendencia que tienen los sólidos a alejarse de las paredes.

Estas restricciones fueron verificadas en el equipo experimental construido para este trabajo.

### 3.2. Experiencias Realizadas

En las diferentes experiencias realizadas para este trabajo se utilizó relave de cobre proveniente de la mina La Disputada de las Condes, con sólidos de masa específica  $\rho_s = 2.870 \text{ kg/m}^3$ .

La granulometría representativa del material sólido es la siguiente:

DIAMETRO (mm)	TAMIZ ASTM (#)	% MAS FINO
0,2970	50	100
0,1490	100	74
0,0890	170	51
0,0740	200	46
0,0554		43
0,0283		32
0,0131		26
0,0074		22
0,0015		16

El funcionamiento del viscosímetro fue verificado realizando

experiencias con agua a distintas temperaturas, de modo de tener una calibración correcta del equipo.

Posteriormente se llevaron a cabo 9 experiencias a las temperaturas de 15, 25, y 35 °C y las concentraciones en peso de sólidos de 20, 30 y 40%.

Esta misma serie de experiencias se realizó en un viscosímetro rotatorio marca Haake modelo Rotovisco RV 12, especialmente adaptado para sedimentos, de modo de comparar la facilidad y confiabilidad del uso de ambos instrumentos y los resultados obtenidos con cada uno.

## 4. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

### 4.1. Reogramas Obtenidos en Relaves de Cobre a Distintas Temperaturas y Concentraciones

En las Figuras 2 a 4 se presentan los reogramas correspondientes a las experiencias realizadas, graficados conjuntamente los que corresponden a una misma temperatura. Se indica a qué concentración en peso corresponde cada curva:

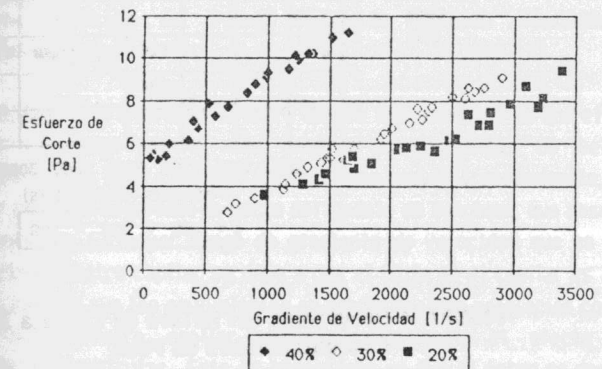


FIGURA 2 Reogramas del Relave de Cobre a 15 °C y Diferentes Concentraciones en Peso.

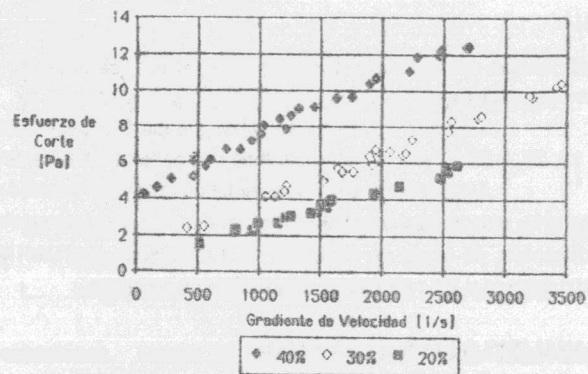


FIGURA 3 Reogramas del Relave de Cobre a 25 °C y Diferentes Concentraciones en Peso.

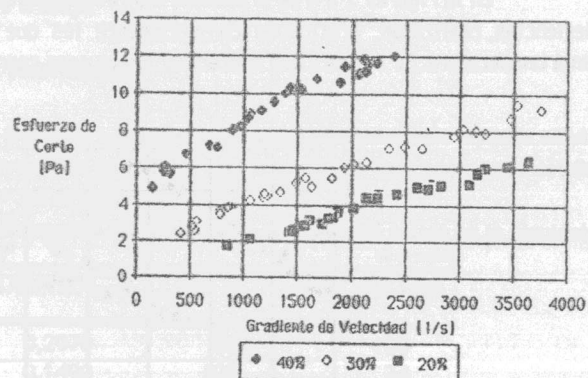


FIGURA 4 Reogramas del Relave de Cobre a 35 °C y Diferentes Concentraciones en Peso.

#### 4.2. Comparación entre el Viscosímetro Capilar y el Viscosímetro Rotatorio

Los resultados obtenidos usando ambos tipos de viscosímetros dieron

valores equivalentes y complementarios. En efecto, al analizar la Figura 5 (y otras análogas que es posible construir), puede observarse que el viscosímetro capilar abarca un rango de gradientes de velocidad superior al que es posible lograr con el viscosímetro rotatorio utilizado, pero entrega un resultado similar en cuanto a la forma y el modelo de reograma más apropiado.

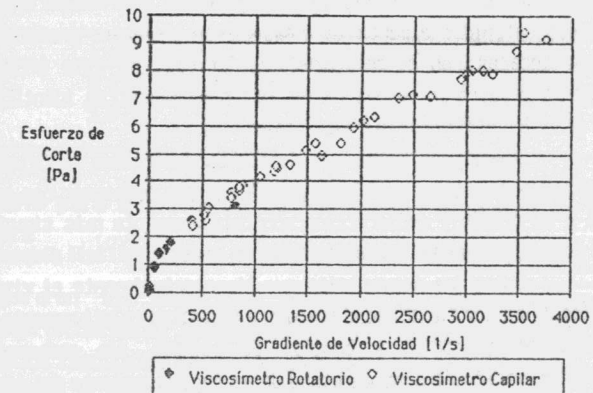


FIGURA 5 Reograma para Relave de Cobre a 35°C y 30% de Concentración en Peso, Obtenido Usando Viscosímetros Capilar y Rotatorio.

Así, la primera diferencia entre ambos instrumentos es que el capilar permite cubrir un rango mucho más amplio de gradientes de velocidad, precisamente los que en este caso particular tienen mayor trascendencia, ya que permiten trazar con más seguridad la recta del Modelo de Bingham, que resulta ser el más representativo. El mayor rango de gradiente de velocidad que es posible alcanzar en el viscosímetro capilar se debe a que el flujo en el capilar es laminar hasta más altos valores que los equivalentes en viscosímetros rotatorios comunes.

El viscosímetro capilar, además, disminuye el efecto de la sedimentación de las partículas. Esto es importante ya que si éstas se depositan, la pulpa deja de ser homogénea y la medición no es representativa de la muestra original. En el viscosímetro capilar se previene la sedimentación dentro del tubo debido al corto espacio de tiempo que cada partícula está dentro de él o bien, dicho de otra manera, a que la velocidad media del relave es bastante mayor que la velocidad de sedimentación de sus partículas. En el caso del rotatorio, para usarlo



con mezclas sólido-líquidas está provisto de un rotor ranurado que evita la sedimentación y mantiene la homogeneidad de la muestra, pero introduce modificaciones a la forma del flujo en el instrumento, que atentan contra la condición de que sea laminar.

También pudo verificarse que las mediciones realizadas con el viscosímetro capilar, son más simples y menos imprecisas. En consecuencia, los resultados obtenidos a partir de ellas tienen un mayor grado de reproducibilidad que las logradas con el rotatorio. En el caso de este último se obtuvo una importante dispersión en los resultados para muestras idénticas, especialmente las de granulometría gruesa y altas concentraciones.

Por último, deben destacarse también como ventajas del viscosímetro capilar sobre el rotatorio el hecho de que puede funcionar con granulometría más gruesa y su diseño y construcción son relativamente más simples (y por ello de menor costo), ya que se usan materiales en general de fácil disponibilidad.

Entre las desventajas que tiene actualmente el viscosímetro capilar están las de menor flexibilidad (requiere muestras relativamente grandes) y mayor dificultad de operación y control. Es posible, sin embargo, superar estos inconvenientes, en una segunda etapa de perfeccionamiento del equipo.

#### 4.3. Modelo de Comportamiento Reológico de Relaves

Del análisis de cualquiera de los reogramas obtenidos para diferentes condiciones de concentración y temperatura del relave, puede concluirse que en general el modelo de comportamiento más apropiado de esta mezcla es el del plástico de Bingham, que está representado por la ecuación:

$$\tau = \tau_y + \mu_m \frac{dv}{dy} \quad (12)$$

donde  $\tau_y$  es el "esfuerzo de corte crítico o inicial" y  $\mu_m$  es la "viscosidad plástica".

Irrázaval (1987), mostró que para este tipo de mezcla los parámetros más importantes para determinar el esfuerzo de corte inicial y la viscosidad son la concentración y la temperatura de la pulpa; en cambio, la influencia del tamaño de los sólidos resultó ser prácticamente despreciable.

Los resultados para el esfuerzo de corte inicial  $\tau_y$  [Pa] y la viscosidad dinámica plástica  $\mu$  [Pa s], obtenidos a partir de los reogramas correspondientes se presentan en la Tabla siguiente:

CONCENTRACION EN PESO [%]	TEMPERATURA [°C]					
	15	25		35		
	$\tau_y$ [Pa]	$\mu_m$ [Pa.s]	$\tau_y$ [Pa]	$\mu_m$ [Pa.s]	$\tau_y$ [Pa]	$\mu_m$ [Pa.s]
20	1,225	0,0022	0,523	0,0019	0,215	0,0017
30	0,938	0,0028	1,055	0,0027	1,940	0,0020
40	5,074	0,0039	4,258	0,0032	5,098	0,0031

#### 4.4. Ajuste de Modelo para Representar la Viscosidad Dinámica de los Relaves de Cobre

Se compararon los resultados obtenidos con las expresiones presentadas por Wellman (ecuación 8) Zuñiga (ecuación 9) y Laapas (ecuación 5). La mejor correlación con los resultados experimentales se logró con la expresión de Zuñiga, que a su vez sigue el modelo de Shaheen (ecuación 3). A partir de esta ecuación, se obtuvo la siguiente expresión, similar a la de Zuñiga, pero más representativa de los resultados:

$$\frac{\mu_m}{\mu_0} = e^{\left( \frac{7,01 C_v}{1 - 0,74 C_v} \right)} \quad (13)$$

#### 5. CONCLUSION

Los resultados de este trabajo permiten concluir que es factible conocer con buena aproximación el comportamiento reológico de las mezclas sólido-líquidas usando un viscosímetro de tubo capilar modificado, instrumento de fácil construcción y de buena fiabilidad.

Por otra parte, las experiencias realizadas para pulpas de cobre mostraron que su comportamiento reológico sigue en forma bastante precisa el modelo plástico ideal o de Bingham, y que las relaciones existentes para determinar la viscosidad plástica de los relaves chilenos se ajustan bastante bien a los datos obtenidos, variando levemente el valor de algunos coeficientes.

### AGRADECIMIENTOS

Este estudio se encuentra inserto dentro de un proyecto de Investigación conjunto entre la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile y el Centro de Investigación Minera y Metalúrgica en el área del transporte hidráulico de sólidos.

Este proyecto ha recibido el apoyo y financiamiento de la Organización de los Estados Americanos, como también del Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología que coordina CONICYT.

Los autores agradecen a estas instituciones su colaboración, como también a la Compañía Minera Disputada de Las Condes, que proporcionó el material sólido empleado en las experiencias.

### REFERENCIAS

- 1.- BABITT, H.E. y CALDWELL, D.H. (1939) Laminar Flow of Sludges In Pipes with Special Reference to Sewage Sludge. **Bull. University of Illinois**, Vol. 37, Nº 12.
- 2.- BOGER, D.V., et al. (1978) Flow of Mineral Slurries. **North Queensland Conference, The Austral-Asian Institute of Mining and Metallurgy**, Parkville, Australia, 291-298.
- 3.- EINSTEIN, A. (1906) **Ann. Physik**, Vol. 19, Nº 286.
- 4.- FADDICK, R.R. (1985) Slurry Rheology. En **Hidrotransporte de Concentrados y Relaves Minerales**, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- 5.- GADALA-MARIA, F.A. (1979) **The Rheology of Concentrated Suspensions**. Tesis de Doctorado, Universidad de Stanford, EE.UU.
- 6.- GRONFORS, T.T. (1965) **The Determination of Rheological Constants with a New Type of Capillary Viscometer**. Tesis de Licenciado en Tecnología. Universidad Tecnológica de Helsinki, Finlandia.
- 7.- HANSFORD, G.S. et al. (1976) Rheological Measurement on Pulp from South African Gold Mines. **Journal of the SAIMM**, Vol. 76, Nº 8, 363-369.
- 8.- IRARRAZAVAL, M. (1987) **Estudio Experimental del Comportamiento Reológico de Relaves de Cobre Mediante el Uso de Viscosímetros Capilar y Rotatorio**. Tesis de Título de Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- 9.- KLIMPEL, R. (1982) Laboratory Studies of the Grinding and Rheology of Coal-Water Slurries. **Powder Technology**, Vol. 32, 267-277.
- 10.- KOMORNICZYK, K. et al. (1976) Viskositäts, Stabilitäts und Korrosionsverhalten von Ferromagnetischen Schwertrüben für die Sink-Schwimm-Aufbereitung **Erzmetall**, Vol. 26, Nº 6, 300-304.
- 11.- LAAPAS, H. (1983) **Measurement and Estimation of the Rheological Parameters of Some Mineral Slurries**. Thesis for the degree of Doctor of Technology, Helsinki University of Technology, Otaniemi, Finlandia.
- 12.- METZNER, A.B. y REED, J.C. (1955) Flow of Non-Newtonian Fluids - Correlation of the Laminar, Transition and Turbulent Flow Regions. **A.I.Ch.E. Journal**, Vol. 1, Nº 4, 434-440.
- 13.- PUROHIT, N.K. y ROY, A.N. (1965) Studies on the Rheological Properties of Rapidly Settling Suspensions Including Minerals. **Proceedings VIII Commonwealth Mining and Metallurgical Congress**, Vol. 6. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, Australia.
- 14.- RAO, T.C. (1970) Effects of Particles Characteristics on Apparent Viscosities of Solid Suspensions. **Chem. Age. India**, Vol 21, Nº 1, 76-77.
- 15.- SEROVA, N.V., et al. (1978) Rheological Properties of Pulps and Features Connected with Oxidation Autoclave Leaching of Pyrrhotite Concentrates. **The Soviet Journal of Non Ferrous Metals**, Vol. 19, Nº 2, 1-4.
- 16.- SHAHEEN, I. (1972) Rheological Study of Viscosities and Pipeline Flow of Concentrated Slurries. **Powder Technology** 5, 245-256.
- 17.- TUCKER, P. (1982) Rheological Factors that Affects the Wet Grinding of Ores. **Transactions IMM, Section C91**, Nº 9, 107-112.
- 18.- UMEYA, K. (1970) On the Dilatant Behaviour of Some Suspensions. **Proceedings, the 5th International Congress on Rheology**, University of Tokyo, Vol. 2, 295-308.
- 19.- WASP, E.J., KENNY, J.P., GANDHI, R.L. (1977) **Solid-Liquid Flow. Slurry Pipeline Transportation**. Trans Tech Publications, San Francisco.
- 20.- WELLMANN, P. (1977) Influencia de la Concentración de Sólidos en la Viscosidad de una Pulpa de Relaves Minerales. **Revista del Instituto de Ingenieros de Minas de Chile**, Vol. 32, Nº 137, 23-27.
- 21.- ZUÑIGA, P. (1977) **Reología Aplicada al Transporte de Suspensiones por Tuberías**. Memoria de Ingeniero Civil de Minas con mención en Metalurgia Extractiva, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.