

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ANÁLISIS DE VARIACIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS POST CIZALLE EN
RELAVES MINEROS.**

JUAN FRANCISCO SEPULVEDA P.¹
SEBASTIAN RAYO V.²³
PAMELA GARRIDO⁴

RESUMEN

La evidencia industrial indica que durante el transporte de relaves, en específico al ser sometidos a cizalle, éstos disminuyen sus valores reológicos (viscosidad y tensión de fluencia).

Para estudiar este fenómeno se cizallaron muestras de relaves de distintas faenas mineras, utilizando dos tipos de sensores para la generación del cizalle controlado (paletas y helicoidal) y midiendo sus parámetros reológicos antes y después de cizalle con reómetro rotacional Haake RS6000.

Para el desarrollo experimental se consideraron distintas velocidades de cizalle, concentraciones pulpas entre 70% y 74%, y muestras con y sin floculante, midiendo la variación en los valores de tensión de fluencia con un sensor de paletas (método vane).

Los resultados obtenidos permiten concluir una metodología de medición que logra cizallar y mantener la mezcla homogénea durante todo el período del ensayo (mayor a 15 minutos), es decir evita la sedimentación durante la medición. Se estima que se logra cizallar el 100% de la muestra, permitiendo un eventual trasvasije para la utilización de cualquier método de medición reológico, sin importar la porción de muestra a analizar. Dentro de los sensores evaluados el sensor de cinta helicoidal cumplió de mejor manera los requisitos planteados en el estudio.

¹ Alumno Memorista de Ingeniería Civil, Departamento de Obras Civiles, UTFSM – juan.sepulvedap@alumnos.usm.cl

² Profesor Part-time, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María – sebastian.rayo@usm.cl

³ Jefe de Área Hidráulica, JRI Ingeniería. jrayo@jri.cl

⁴ Centro de Investigación de JRI (CI-JRI), pgarrido@jri.cl

1. INTRODUCCION

Actualmente en la minería el transporte de pulpas y relaves resulta un desafío trascendente de resolver tanto por la necesidad de agua como fluido transportante, como energética para la impulsión con bombas. Los relaves son fluidos no-newtonianos que presentan tensión de fluencia que varía según la concentración de sólidos. Figura 1

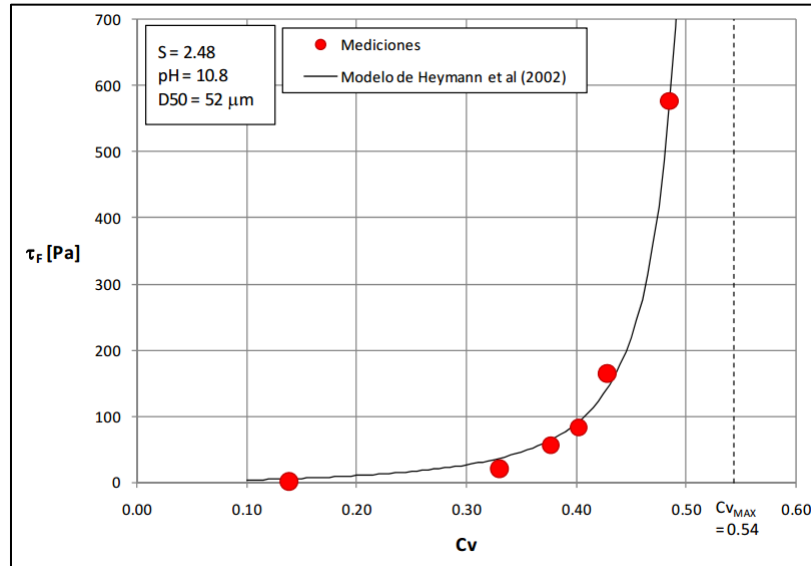


Figura 1 - Tensión de fluencia vs concentración volumétrica, relave de cobre. (Fuentes 2011)

Los reómetros vienen utilizándose hace más de 70 años, vía reogramas con cilindro y copa Figura 3 (Krieger 1953) o con métodos como el Vane (Nguyen & Boeger 1983). En particular el método Vane por su simpleza es uno de los más utilizados para la medición de tensión de fluencia en fluidos no newtonianos y pulpas mineras, Figura 2

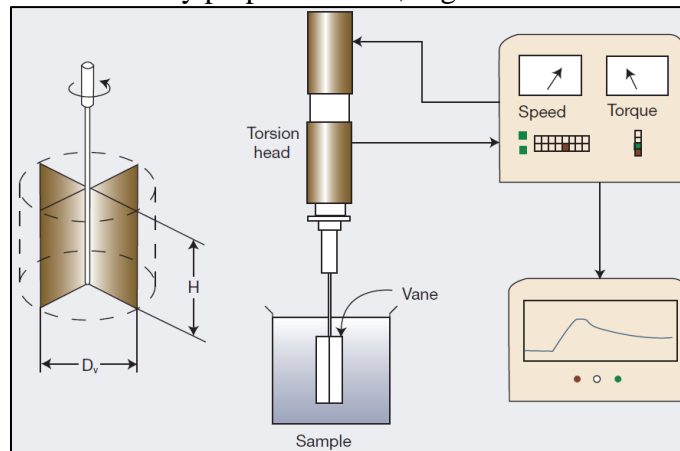


Figura 2 - Método Vane. (Boeger 2006)

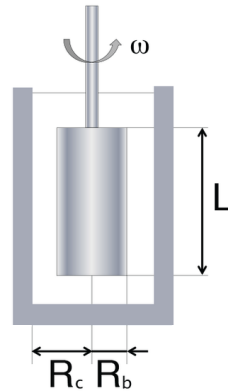


Figura 3 – Cilindro y Copa

Se ha observado que esta tensión de fluencia se ve modificada después de recibir cizalle de algún artefacto y se le atribuye a propiedades intrínsecas del mismo relave, tal como se observa en el experimento de Pornillos (2011).

2. OBJETIVOS

A través de ensayos experimentales en el Centro de Investigación JRI (CI-JRI), se estudió el posible comportamiento tixotrópico de distintos tipos de relave ante la aplicación de cizalle variable en el tiempo.

Se estudió un protocolo de ensayo en laboratorio, que permite caracterizar las posibles propiedades tixotrópicas de relaves que necesiten ser analizados con y sin floculante, según las características del relave a ser ensayado con distintos sensores. Este protocolo entrega resultados reproducibles y comparables para distintas muestras.

3. ENSAYOS

Para todos los ensayos se utilizó un Reómetro rotacional HAAKE RheoStress 6000, un sensor FL22 de paletas y un sensor helicoidal. Con estos equipos el método más utilizado es el 3-ITT, 3 Interval Thixotropy Test, (Mezger 2014), el cual consiste en aplicar a la muestra 3 intervalos de corte constante (bajo-alto-bajo) y observar como sus propiedades reológicas se van modificando en cada uno de ellos. Este método fue programado en el equipo para que en forma automática, dentro de un mismo ensayo, el reómetro pudiera medir, cizallar y medir nuevamente.

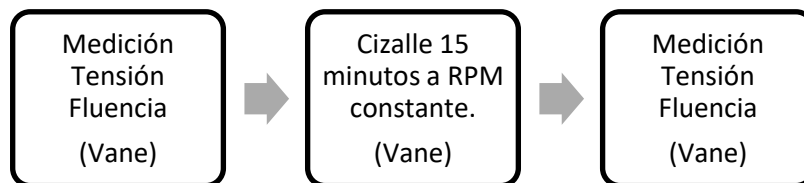


Figura 3 Esquema de procedimiento experimental

Para esto, se tomaron 2 muestras de relave de una minera del norte grande de Chile (de origen confidencial), con bajo contenido de arcilla. La muestra se encontraba en un barril de 200 litros y se tomó una muestra del fondo (denominada M8) y otra superficial (denominada M7). Cada una se dividió en 3 grupos según concentraciones (Baja, media y alta), y cada concentración en otras 12 muestras más (50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 y 600 rpm con el objetivo de distinguir el efecto de cada parámetro en el comportamiento ante el cizalle.

Los gráficos están contruidos para expresar la variación porcentual de la tensión de fluencia después de ser cizallada la muestra; valores negativos indican un posible comportamiento tixotrópico, valores positivos un posible comportamiento reopéctico.

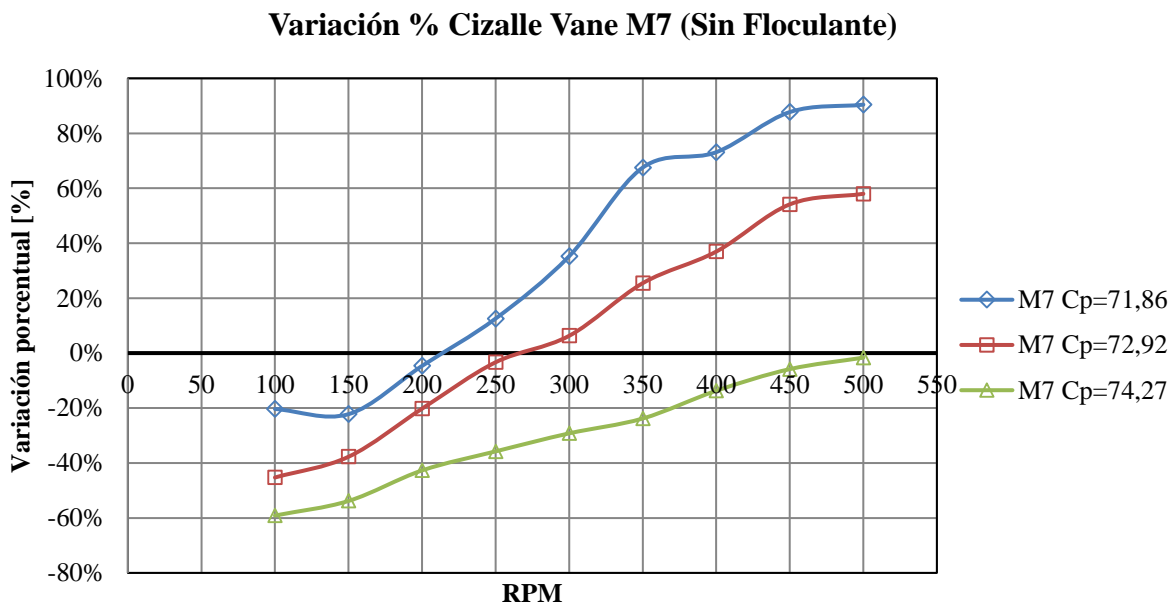


Gráfico 1 – Variación porcentual de tensión de fluencia al cizalle de muestra M7

Variación % Cizalle Vane M8 (Sin Floculante)

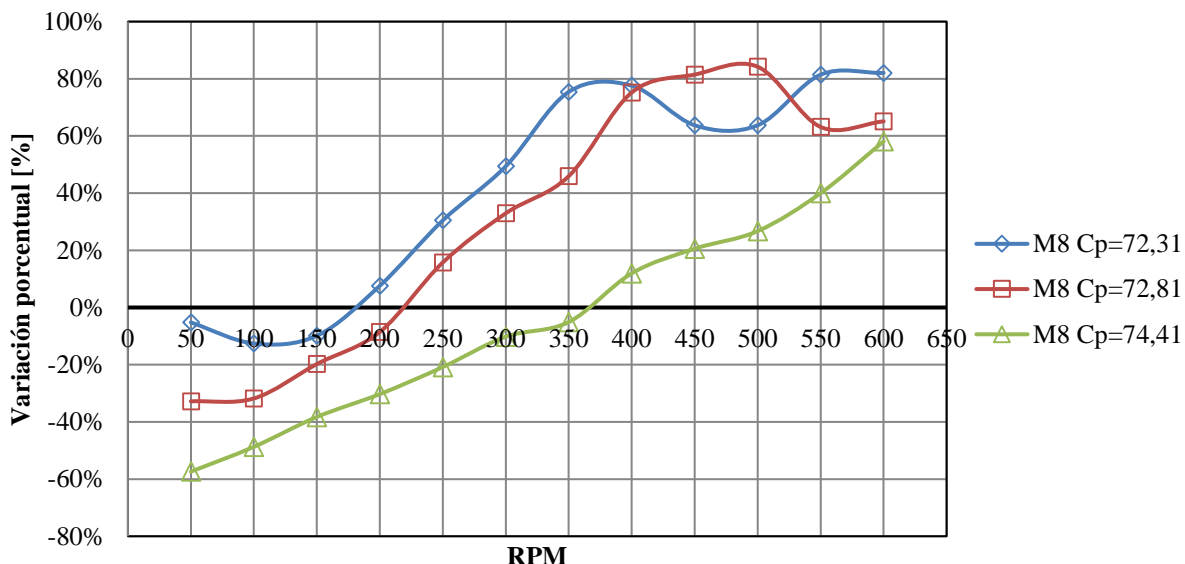


Gráfico 2 - Variación porcentual de tensión de fluencia al cizalle de muestra M7

Se observa inestabilidad en los resultados después de las 500rpm. En el Gráfico 3 se realiza un análisis comparativo del comportamiento de ambas muestras, considerando ensayos de cizalle en el rango de 50 a 500rpm.

Al aumentar la concentración de sólidos o velocidad de cizalle, la muestra pasa de una variación porcentual (de tensión de fluencia) negativa a una positiva

Variación % Cizalle Vane M7 & M8 (Sin Floculante)

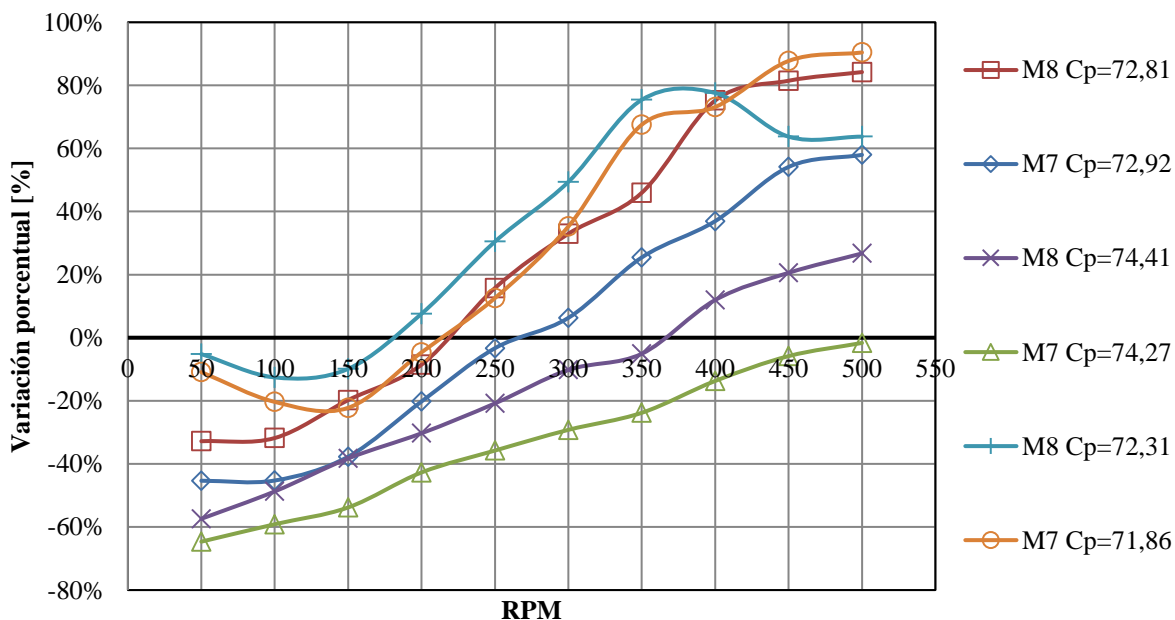


Gráfico 3 – Resumen de variaciones porcentuales de muestras post cizalle

Considerando la experiencia en industria y de investigaciones como la de Pornillos (2011) resulta inesperado un aumento de la tensión de fluencia al aplicar altas rpm a la muestra. Lo esperado es un comportamiento inverso es decir, a mayores rpm menores valores de tensión de fluencia. Para explicar estos resultados, se plantean dos posibles explicaciones: Sedimentación y efectos centrífugos.

La sedimentación afectaría principalmente en forma de variación de concentración de la pulpa en la zona de medición durante la ejecución del ensayo, a menor concentración en la zona de medición, menor tensión de fluencia Figura 4.

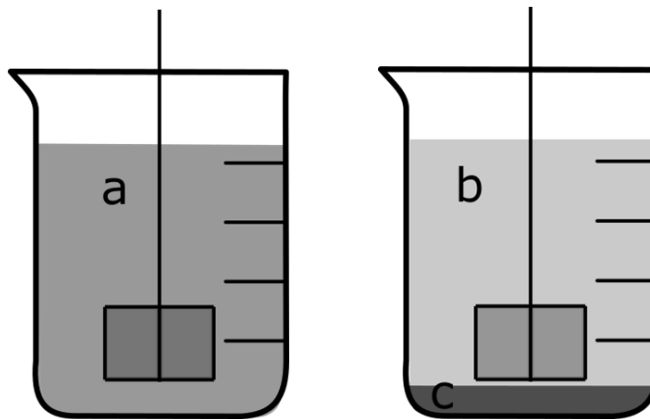


Figura 4 - Posible Efecto de sedimentación

Donde

$$\tau_{fc} > \tau_{fa} > \tau_{fb}$$

Con respecto a los Efectos Centrífugos, se supone un efecto similar al de un hidrociclón: desplazamientos de partículas gruesas a zonas radiales distales, manteniendo partículas finas cercanas a zona de medición. Las partículas finas generan una mayor tensión de fluencia que sus equivalentes gruesas (Fuentes 2011).

En el Gráfico 3 se observa un umbral límite de velocidad que divide ambos fenómenos. A bajas velocidades la energía no sería suficiente para resuspender la muestra, depositándose material en el fondo del recipiente y disminuyendo la concentración, ergo, la tensión de fluencia en la zona de medición del sensor. Al aumentar la velocidad, aumentaría la resuspensión hasta superar el umbral de “tixotropía”. En pulpas menos concentradas la zona tixotrópica sería menor debido a la mayor facilidad de régimen turbulento y resuspensión de la muestra. En pulpas con altas concentraciones de sólidos el sensor Vane no podría resuspender la muestra, registrando variaciones “tixotrópicas”. Al aumentar la velocidad posibles efectos centrífugos y turbulentos comienzan a ocurrir: segregación radial de partículas gruesas aumentarían la tensión de fluencia. En pulpas menos concentradas domina el fenómeno “reopéctico”.

Debido al alcance de este estudio, a futuro sería interesante desarrollar experimentos específicos que expliquen estos comportamientos observados.

Estas observaciones plantearían un problema de artefactos con el método en sí mismo. Además, debido a que la esencia misma del método Vane es la nula interacción con las paredes del recipiente (Sofra et al. (2007)), siempre existirá una porción de la muestra sin cizalle que al momento de homogenizar para evaluar con algún otro método (cilindro y copa por ejemplo), la porción no cizallada ponderaría valores erróneos en la medición de los parámetros en estudio (tensión fluencia o viscosidad).

4. NUEVO MÉTODO PROPUESTO

Con el objetivo de subsanar los artefactos del cizalle con sensor Vane FL22, se propone el uso de un sensor que permita un cizalle convectivo al 100% de la muestra. Este sensor sólo se utilizará para generar el cizalle, debido a la efectividad comprobada en medición de tensión de fluencia del sensor Vane.

Fasano (2015) menciona que la mayoría de los fluidos de alta viscosidad son reológicamente complejos y requieren impulsores especiales para una mezcla o cizalle eficaz. Estos impulsores se refieren a menudo como impulsores de funcionamiento estrecho, porque operan con un pequeño espacio entre el impulsor y la pared del recipiente.

Un tipo de impulsor es el de cinta helicoidal que pueden presentar o no un tornillo central. Figura 5 y Figura 6.

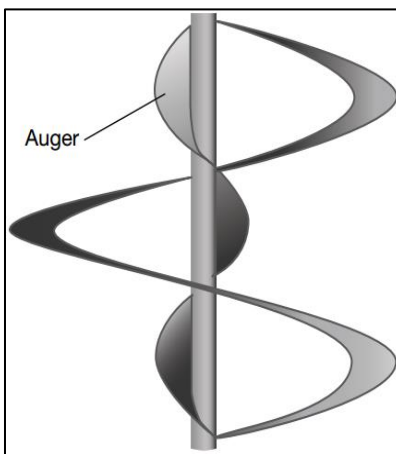


Figura 5 – Sensor de Cinta Helicoidal – Fasano 2015

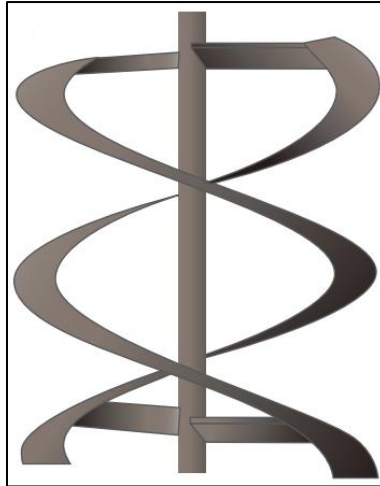


Figura 6 – Sensor con eje liso - Fasano 2015

Considerando los antecedentes recién señalados, se realizaron ensayos a 5 velocidades distintas con la siguiente rutina:

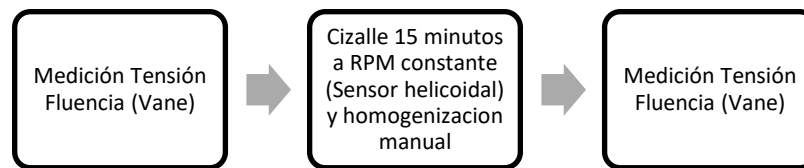


Figura 7 Esquema procedimiento experimental con sensor helicoidal

Se ensayó la muestra a 100, 200, 300, 400 y 500 rpm, de las cuales ninguna mostró comportamiento tixotrópico y todas aumentaron levemente su tensión de fluencia hasta un constante cercano al 20%.

Variación % Cizalle Helicoidal M7 (Sin Floculante)

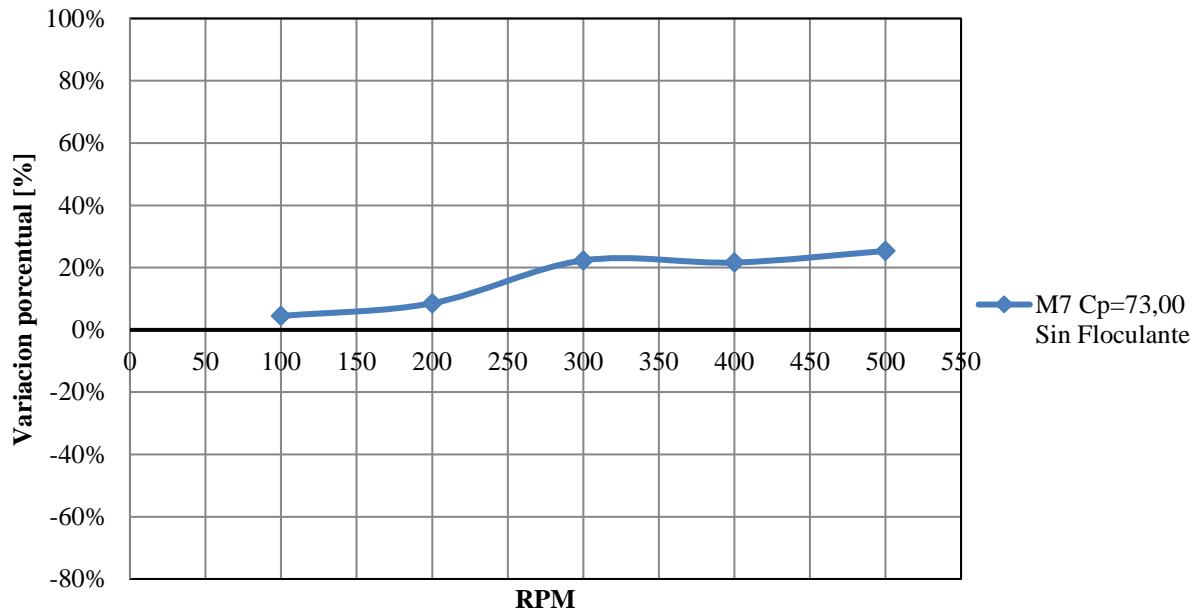


Gráfico 4 – Variación porcentual de tensión de fluencia con cizalle helicoidal

Tabla 1: Variación de Tensión de fluencia post cizalle con sensor helicoidal

M7 Cp=73,00 Sin Floculante				
Muestra [rpm]	1er Tauf [Pa]	Cizalle[min]	2do Tauf [Pa]	Variación [%]
100	35,9	15	37,5	4,46%
200	33,9		36,8	8,55%
300	33,6		41,1	22,32%
400	33,3		40,5	21,62%
500	36,7		46,0	25,34%

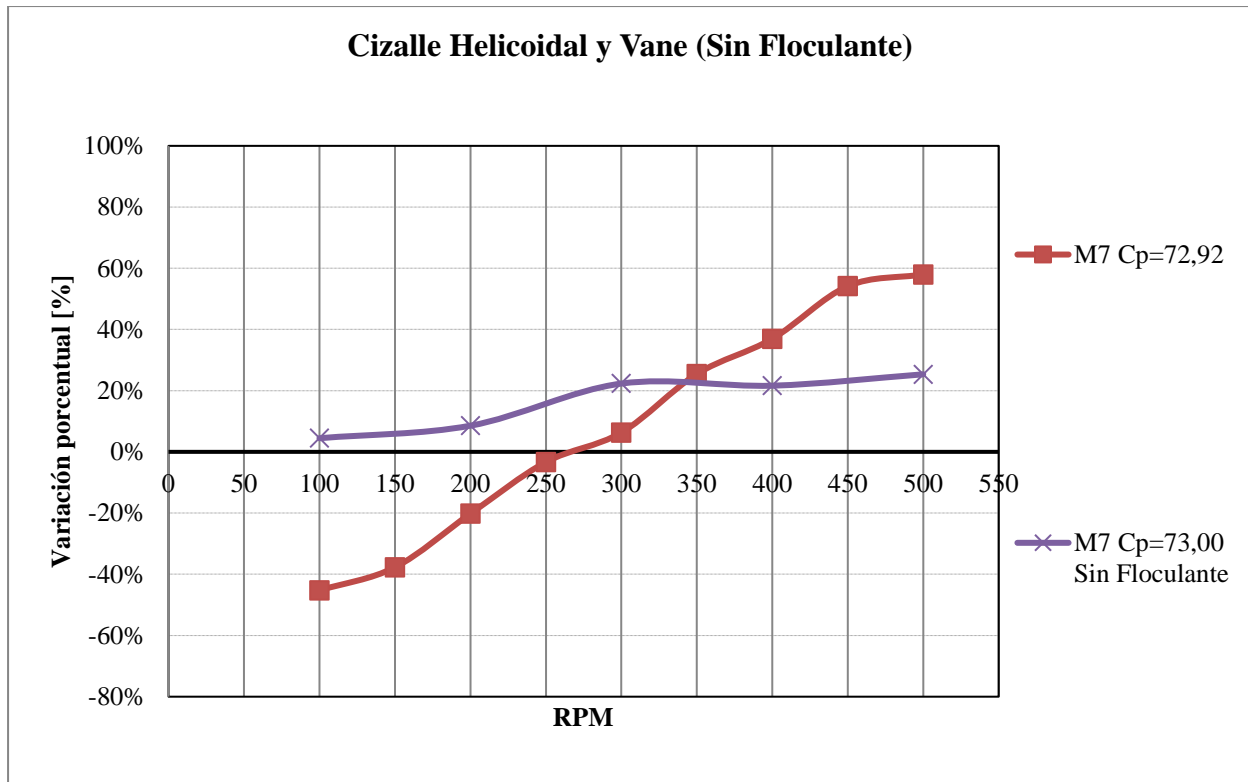


Gráfico 5 - Comparativa entre cizalle Vane y cizalle con sensor experimental, muestra de 73% de sólidos, sin floculante.

En el gráfico Gráfico 5 se observa, para la muestra M7 Cp 73%, que el comportamiento es muy diferente al obtenido en la muestra cizallada con paleta vane.

Pruebas con Floculante

Debido a que en la industria los relaves son tratados con floculante como método de recuperación de agua, es menester realizar los ensayos bajo esta condición industrial. Se procede a realizar una verificación del sensor helicoidal versus Vane en condiciones de pulpa con floculante. Para esto se consideró una dosis única de 15 [g/ton] de floculante. Los resultados se muestran en la

Tabla 2 y el Gráfico 6

Sensor Vane

Se utilizó la técnica definida anteriormente (Figura 3) considerando 5 velocidades: 100, 200, 300, 400 y 500 [rpm]. Los resultados se exponen en la Tabla 2

Tabla 2 – Variación de tensión de fluencia post cizalle sensor Vane

M7 Vane Cp=70,70				
Muestra [rpm]	1er Tauf [Pa]	Cizalle[min]	2do Tauf [Pa]	Variación [%]
100	25,3	15	20,3	-19,76%
200	27,3		20,4	-25,27%
300	28,5		26,7	-6,32%
400	26,0		37,8	45,38%
500	25,3		33,5	32,41%

Variación % Cizalle Vane (Con Floculante)

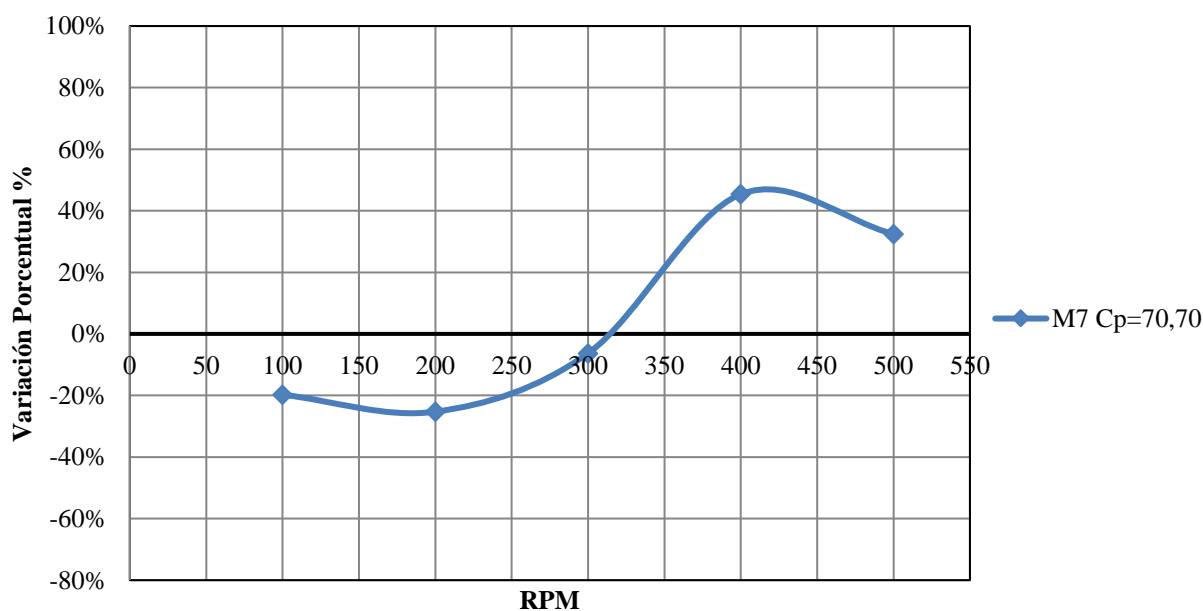


Gráfico 6 – Variación porcentual de tensión de fluencia con sensor Vane, muestra M7, Cp 70,00%, floculante en dosis 15 [g/t].

Se observa que en muestras con floculante, el cizalle con el sensor Vane, mantiene el comportamiento de zonas tixotrópicas y reopécticas.

Se concluye que para medición de tensión de fluencia el sensor Vane es idóneo y para generar cizalle se recomienda el uso de sensores helicoidales.

Sensor helicoidal

La esencia de este sensor es la capacidad de poder aplicar un cizalle controlado y homogéneo a toda la muestra. Los resultados de medición de tensión de fluencia se muestran en la Tabla 3 y en el Gráfico 7

Tabla 3 - Variación de tensión de fluencia cizalle sensor helicoidal

M7 Helicoidal Cp=70,7				
Muestra [rpm]	1er Tauf [Pa]	Cizalle[min]	2do Tauf [Pa]	Variación [%]
100	25,9	15	18,4	-28,96%
200	26,0		15,3	-41,15%
300	25,2		15,0	-40,48%
400	27,6		18,0	-34,78%
500	25,9		16,6	-35,91%

Variación % Cizalle Helicoidal (Con Floculante)

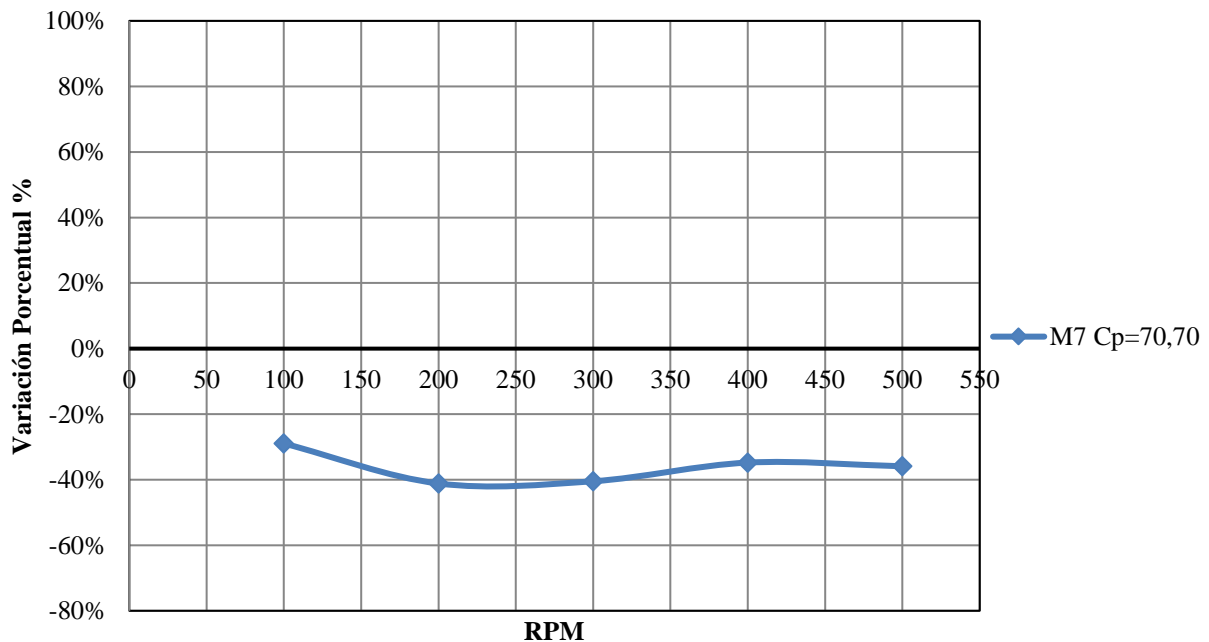


Gráfico 7 - Variación porcentual de tensión de fluencia en pulpa con uso de sensor experimental

Los datos obtenidos resultan consistentes con lo esperado en otros estudios (Pornillos 2011), donde se aplica cizalle a una muestra con floculante y ésta reduce su tensión de fluencia de manera proporcional a la cantidad de energía inyectada a la muestra con un umbral tope. Este fenómeno se explica por la destrucción de los enlaces generados por la adición del floculante. Químicamente los floculantes son cadenas de polímeros de longitud variable que enlazan coloides y partículas suspendidas, realizando madejas de la sustancia que aumentan su capacidad

de decantación (y su evidente uso para recuperación de agua industrial en minería, así como en tratamiento de agua potable para clarificación y remoción de partículas en suspensión). La longitud de estas cadenas es definida por el fabricante, asociado al proceso químico de producción del mismo.

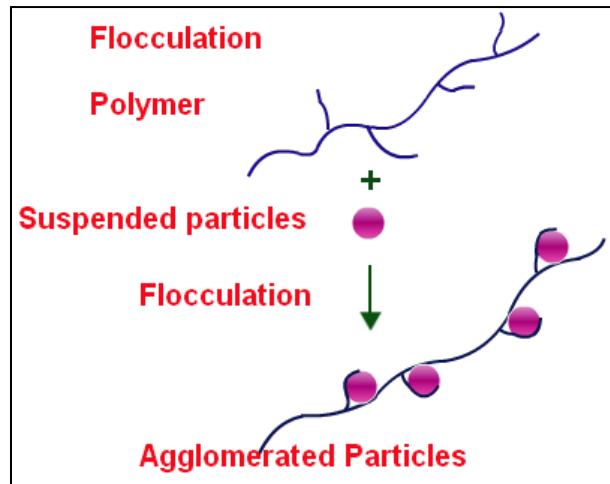


Figura 7 - Cadenas de flóculos - Fitzpatrick (2004)

Según Fitzpatrick (2004), una vez que esta cadena se rompe es imposible que vuelva a aglomerar las partículas del relave en flóculos largos, imposibilitando el aumento nuevamente de la tensión de fluencia. Los floculantes no poseerían capacidades de regeneración.

Sin embargo, es recomendable a futuro realizar ensayos específicos que registren cómo varía la tensión de fluencia en muestras floculadas en el tiempo después de haber sido cizalladas.

Cizalle con Sensor Helicoidal Para Muestras con y Sin Floculante

En el gráfico 8 se muestra la comparación del efecto en el cizalle con sensor helicoidal para muestras con y sin floculante

Variación % Cizalle Helicoidal (Con y Sin Floculante)

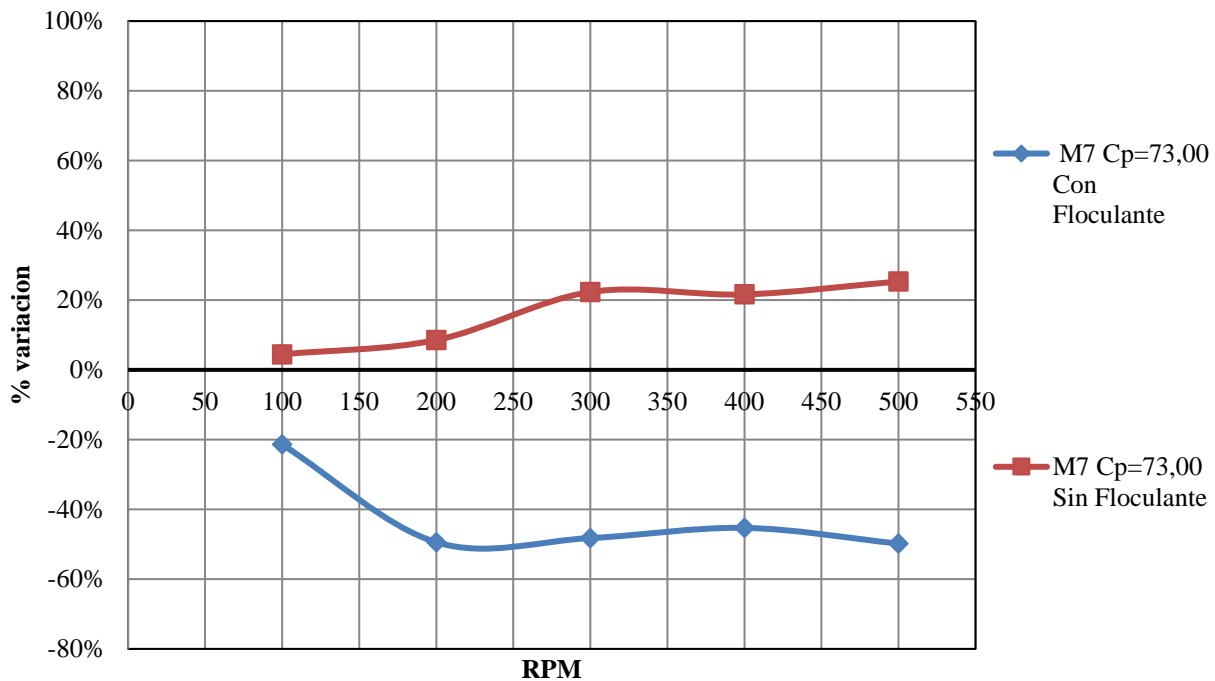


Gráfico 8 – Comparación de cizalle sensor helicoidal con y sin floculante

5. CONCLUSIONES

Se realizaron ensayos con relaves de la minería chilena a distintas concentraciones para analizar su variación de tensión de fluencia después de aplicar un cizalle. El cizalle fue aplicado utilizando un sensor de paletas y un sensor helicoidal para comparar ambos métodos. El sensor helicoidal presentó mejores resultados, resolviendo posibles problemas de sedimentación o segregación radial.

Se observó que sólo las muestras de relave con floculante presentan sensibilidad al cizalle, y que este corresponde únicamente a la destrucción de cadenas de polímeros (flóculos).

Dentro del contexto minero, los relaves siempre pasan por un proceso de floculación, muy útil para la recuperación de agua, pero contraproducente para el bombeo debido al aumento de tensión de fluencia, siendo necesarios ensayos utilizando floculante.

El sensor helicoidal aparece como un nuevo método para cizallar pulpas o relaves sedimentables que permite el trasvase a otros métodos de medición, como el método cilindro y copa que permite obtener un reograma y determinar no solo tensión de fluencia sino que también viscosidad.

A futuro quedan abiertos varios temas a desarrollar: analizar la recuperación de tensión de fluencia post cizalle de las muestras, comparación de cizalle Vane y helicoidal en muestras no sedimentables y analizar nuevos diseños de sensores helicoidales que mejoren comportamiento de resuspensión y cizalle.

AGRADECIMIENTOS

A Sebastián Rayo por guiarme sabiamente en este trabajo que representa una parte de mi tesis de pregrado. Al CI-JRI por facilitar sus instalaciones para el desarrollo del trabajo experimental y a todo su personal por la paciencia en enseñarme y dirigirme en los distintos ensayos necesarios para la confección de este trabajo, un mundo desconocido para mí. A mi profesora Vivan Aranda por la confianza de animarme a participar en este congreso.

BIBLIOGRAFÍA

Boger, D. (2004). Rheological Concepts. Paste and Thickened Tailings - A Guide, 2nd Edition. (R. Jewell, & A. Fourie, Eds.) Australia.

Fitzpatrick, C., & Fradin, E. (2004). Temperature effects on flocculation, using different coagulants. *Water Science and Technology*, Vol 50(Nº 12), 171-175

Fuentes Aguilar, R. (2011). *Curso de Reología de Pulpas*. Santiago: JRI Ingeniería.

Krieger, I., & Elrod, H. (1953). Direct Determination of the Flow Curves of NonNewtonian Fluids. II. Shearing Rate in the Concentric Cylinder Viscometer. *Journal of Applied Physics*.

Mezger, T. (2014). *The Rheology Handbook* (4th ed.). (V. Network, Ed.) Hanover, Germany.

Nguyen Quoc Dzuy, & Boeger, D. (1983). Yield Stress Measurement for Concentrated Suspensions. *Journal of Rheology*.

Pornillos, E. (2011). A technique for measuring the reduction of yield stress of thickened tailings. *14th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*. Perth, Australia.

Sofra, Fisher, & Boeger. (2007). The Bucket Rheometer for Thickened Tailings and Paste Flow Curve Determination. *Paste 2007*.