

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**MIGRACIÓN DE LA FASE SÓLIDA DE PULPAS SEDIMENTABLES EN DUCTOS DE LARGA DISTANCIA**

**CONSUELO SALINAS M.<sup>1</sup>**  
**ÁLVARO OSSANDÓN A. <sup>2</sup>**  
**PAMELA GARRIDO R. <sup>3</sup>**

**RESUMEN**

En la industria minera, ante ciertas condiciones operacionales o emergencias externas se hace necesario detener el transporte de pulpa de concentrado de cobre con pulpa en el interior de la tubería. En este escenario, se genera una separación entre la fase sólida (o dispersa) y la fase líquida de la pulpa mineral, producto de la sedimentación de partículas, formando un lecho de sedimento en la parte inferior de la tubería. En el caso de que la pendiente de la tubería sea suficientemente grande, las partículas sólidas tienden a deslizar por efecto de la gravedad, migrando hacia zonas de baja pendiente y/o puntos bajos del trazado, lo que comúnmente se denomina migración de partículas sólidas. En este artículo se presenta una serie de 12 ensayos realizados a escala de laboratorio en una tubería inclinada, con una pulpa de concentrado de cobre, cuyos resultados permitieron estudiar la relación existente entre las propiedades de la pulpa y la pendiente máxima del trazado. A partir de los ensayos ejecutados se determinó que, tanto la pendiente del sistema como la concentración de sólidos, influyen en la morfología de la capa de sedimento formada al finalizar el proceso de sedimentación en pendiente inclinada.

---

<sup>1</sup> Ingeniero de Proyectos, Área Hidráulica, JRI Ingeniería - email: csalinas.monsalve@gmail.com

<sup>2</sup> Instructor Académico, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María – email: alvaro.ossandon@usm.cl

<sup>3</sup> Centro de Investigación en Minería Sustentable (CIMS JRI) – email: pgarrido@cimsjri.cl

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La ocurrencia del fenómeno migratorio genera problemas operacionales en el reinicio del sistema de transporte hidráulico de sólidos en tuberías, debido al aumento de densidad en puntos bajos y consecuentemente al aumento de resistencia de la masa de sólidos a ser dispersada y refluidizada, pudiendo ocasionar condiciones de embanque generalizado, lo que trae pérdidas de producción junto con riesgos a las personas, al ambiente y a las instalaciones, por eventuales roturas de la cañería ante condiciones de presurización mayores. Adicionalmente, el detener prolongadamente este tipo de sistemas trae consigo pérdidas económicas relevantes, incluso poniendo en riesgo la continuidad de la operación de la faena.

Actualmente, para el diseño de concentraductos, se utiliza una recomendación empírica, basada en experiencia de consultores y diseñadores, de no exceder un 15% de pendiente en longitudes acotadas (Muñoz, 2019). Por otra parte, en relaveductos o mineroductos la recomendación es no detenerlos, dada la rápida tendencia a la sedimentación que se produce en estos sistemas, generando embanques de las cañerías en forma casi inmediata.

Considerando lo anterior, y teniendo en cuenta la participación que posee Chile en la producción mundial de cobre, con más de 25 ductos para transporte de mineral, concentrado o relave, con distancias superiores a los 5 km (Minería chilena, 2014) y la relevancia que ello representa para el producto interno bruto del país (COCHILCO, 2019), es atingente la evaluación de mejoras en los criterios de diseño de estos sistemas.

El objetivo general de este trabajo es determinar, mediante experimentación, la relación entre las propiedades físicas de la pulpa y la pendiente máxima del trazado de la impulsión, que permita establecer una metodología de diseño para pendientes máximas en sistemas de transporte de concentrado de cobre a larga distancia; y, a través de análisis empírico, generar un mayor entendimiento del fenómeno, dando inicio a una investigación que, en el futuro, permita validar o refutar los criterios actualmente utilizados en diseños de este tipo de sistemas.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Los principales componentes de un concentraducto corresponden a: tubería, estanques de cabeza, estación de bombeo, estación disipadora, estación de válvulas, estación de monitoreo y estación de recepción. Siendo de mayor importancia conocer las características principales de dos de ellas: la estación de bombeo y la tubería. La primera, permite generar la energía hidráulica requerida para un sistema de transporte hidráulico en presión, mientras que la tubería permite el transporte de la pulpa a presión o en superficie libre a lo largo del trazado. Cabe mencionar que tanto la longitud como el diámetro y la rugosidad de la tubería son variables relevantes para este estudio enfocado en las características de la tubería.

Para caracterizar la fase dispersa de pulpas metalúrgicas se consideraron propiedades como la densidad ( $\rho_s$ ), peso específico ( $\gamma$ ), y peso específico relativo de los sólidos ( $S$ ) y tamaño y forma de partículas. Para definir dichas propiedades se utilizaron principalmente las definiciones de García & Maza (1998) para hidráulica fluvial y algunas particularidades señaladas por Fuentes (2011). Cabe mencionar que estas propiedades forman parte de los datos de entrada al momento de diseñar un concentraducto.

Para caracterizar pulpas metalúrgicas, se requiere incorporar variables como la concentración de sólidos en una pulpa, definida en términos del peso ( $C_p$ ) o volumen ( $C_v$ ).

$$C_v = \frac{\text{Volumen del sólido}}{\text{Volumen de la mezcla}} \quad (1)$$

$$C_p = \frac{\text{Peso del sólido}}{\text{Peso de la mezcla}} \quad (2)$$

A partir de estas definiciones, es posible introducir el concepto de concentración máxima de empaquetamiento ( $C_{v,máx}$ ), que como su nombre lo indica, corresponde a la máxima concentración volumétrica que puede alcanzar un sistema de partículas sólidas indeformables. Existen algunos estudios al respecto que señalan valores en torno al 60% (revisar Phillips et al., 1992; Krieger, 1972; Ihle, 2014). Luego, es relevante conocer el comportamiento reológico de una pulpa, comúnmente representado por el comportamiento de un fluido plástico ideal (Fuentes, 2011), que queda determinado por los valores de la tensión de fluencia ( $\tau_f$ ) y viscosidad ( $\mu$ ).

Las propiedades descritas anteriormente, son la base para comprender el comportamiento de una pulpa ante una detención. Dado que el fenómeno de migración está directamente ligado con la sedimentación y movimiento de partículas sólidas, se hace necesario revisar algunos estudios relacionados con este tema.

La sedimentación de partículas ha sido ampliamente investigada por varios autores, como un punto de partida se puede tomar la ecuación para la velocidad de sedimentación  $W$  de una partícula única en un medio ilimitado determinada por Stokes, a partir del cálculo de la fuerza de arrastre sobre una esfera cuando se desprecia el efecto de la inercia del fluido y solo actúan las fuerzas de presión y de origen viscoso.

$$W = \frac{gd^2(\rho_s - \rho_f)}{18\mu} \quad (3)$$

En la Ec. (3),  $g$  es la aceleración de gravedad,  $d$  es el diámetro de la partícula,  $\rho_s$  la densidad de la partícula,  $\rho_f$  la densidad del fluido y  $\mu$  la viscosidad dinámica del fluido. Esta ecuación es válida para números de Reynolds muy inferiores a 1. Para concentrado de cobre, su diámetro característico D50 (50% de material pasante) se encuentra en torno a 25  $[\mu m]$ .

Sin embargo, en la industria minera el transporte de pulpas se realiza a altas concentraciones de sólido. Específicamente para el concentrado de cobre, se encuentran valores de concentración en peso ( $C_p$ ) entre 49% y 65% (Base de datos JRI, 2020). En estas situaciones se habla de sedimentación retardada u obstaculizada.

Siguiendo el trabajo de Davis y Acrivos (1985), en este ámbito, para partículas no coloidales a bajos números de Reynolds, se puede hacer una separación en 3 casos: sedimentación de suspensiones monodispersas, sedimentación de suspensiones polidispersas y sedimentación mejorada en canales inclinados. El primer caso corresponde a una suspensión de partículas idénticas, el segundo a suspensiones que contienen más de un tipo de partícula (diferentes tamaños, formas y/o densidades), por lo que tienen diferentes velocidades de sedimentación, y el último caso se refiere al aumento de la tasa de clarificación simplemente por inclinar el vaso de sedimentación.

Si bien la sedimentación de suspensiones monodispersas no es directamente aplicable al caso de concentrados de cobre, donde se cuenta con una distribución granulométrica, es importante destacar que para este escenario ocurre que inicialmente una suspensión bien mezclada se separará en tres regiones cuando se someta a sedimentación en un recipiente con paredes laterales verticales: capa de fluido clarificado en la parte superior del asentamiento, por debajo de esta capa se ubicará la región de suspensión, a veces llamada zona de clarificación y en el fondo del recipiente se forma la capa de sedimento.

Si la suspensión está infinitamente diluida, las partículas se asientan con su velocidad de Stokes (Ec. (1)). Para fracciones volumétricas en torno a 1%, el promedio de la velocidad de sedimentación de las partículas es menor que la dada por la ley de Stokes. Este fenómeno puede ser representado por una función de sedimentación obstaculizada  $f(C_v)$ , de tal manera que la velocidad media de caída de una esfera ( $V$ ) en la suspensión corresponde a la Ec. (4).

$$V = Wf(C_v) \quad (4)$$

Generalmente, se considera que  $f(C_v)$  depende solo de la fracción volumétrica de sólidos y que es una función monótona decreciente con  $f(0) = 1$ . Para definir  $f(C_v)$  se emplean con frecuencia en la práctica, los resultados del estudio puramente empírico de Richardson y Zaki (1954).

$$f(C_v) = (1 - C_v)^n \quad (5)$$

Para el exponente  $n$  de la Ec. (5), en la literatura se encuentra típicamente el valor de  $n \approx 5$  (Davis y Acrivos, 1985; Guazzelli y Hinch, 2011) para bajos números de Reynolds.

En cuanto a sedimentación de suspensiones polidispersas, Davis y Acrivos (1985) se limitan al análisis de esferas rígidas que tienen valores muy pequeños de Reynolds de partícula y suponen que la suspensión no puede coagularse. Como se mencionó anteriormente, en este caso existe un rango de velocidades de sedimentación debido a las variaciones en tamaño, forma y densidad de las partículas. Por lo tanto, existe movimiento de una partícula con respecto a otra, consecuentemente, a medida que se desarrolla el asentamiento, las partículas de caída más rápida se alejan de las otras, creando así diferentes regiones en el interior de la suspensión.

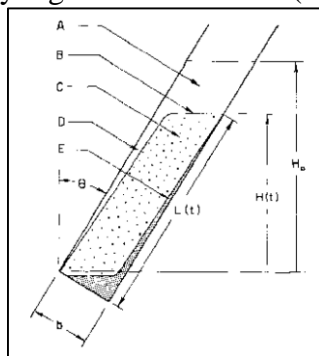
En este caso también ocurre que, si la fracción volumétrica de partículas total es superior a aproximadamente el 1%, el comportamiento difiere significativamente de la predicción de la ley de Stokes como consecuencia de las interacciones entre las partículas de las distintas especies. Si se toma en cuenta una partícula del tipo  $i$  que posee radio  $a_i$ , densidad  $\rho_{s,i}$ , concentración volumétrica  $C_{v,i}$ , y velocidad de sedimentación de Stokes  $w_i^{(0)}$ . Su velocidad promedio de caída  $v_i$  depende de la concentración local de todas las partículas presentes y se puede expresar como:

$$v_i = w_i^{(0)} f_i(\mathbf{c}) \quad (6)$$

En la Ec. (6)  $\mathbf{c}$  es un vector de las fracciones volumétricas de todos los tipos de partículas. En general,  $f_i$ , que corresponde a la función de sedimentación obstaculizada, será diferente para cada tipo de partícula y dependerá también de los efectos del movimiento browniano y las fuerzas interpartículas.

Generalmente, los ensayos de sedimentación de partículas se realizan en contenedores con paredes verticales. Sin embargo, la velocidad de sedimentación cambia al modificar la geometría o disposición del contenedor. En el transporte de larga distancia en Chile, este cambio se manifiesta en la pendiente de la tubería.

La primera observación del efecto de modificar la pendiente la realizó Boycott (1920), quien experimentando con sangre observó que la sedimentación de los corpúsculos de sangre era más rápida en tubos inclinados que en tubos verticales. Muchos científicos trabajaron en este fenómeno para suspensiones monodispersas, polidispersas y ligeramente polidispersas. Un interesante resumen de estos trabajos hasta 1977 se puede revisar en el documento “Sedimentación con bordes mejorados debido a la convección de asentamiento” (Hill et al., 1977). En dicho trabajo, se señala que Nakamura y Kuroda (1937) indican que este incremento aparente de la velocidad de sedimentación en contenedores con pared inclinada es atribuible al descenso de las partículas sólidas a lo largo de la superficie inclinada. Estos autores propusieron una expresión para calcular la altura de la interfase en sedimentadores rectangulares inclinados. Diferentes autores (Acrivos y Herbolzheimer, 1979; Herbolzheimer y Acrivos, 1981; Kapoor y Acrivos, 1995) sugieren que en sedimentación en contenedores inclinados se tienen tres regiones principalmente: región de líquido claro (A), región en suspensión (C) y región de sedimento (E) mostradas en Figura 1.



**Figura 1.** Diferentes regiones del campo de flujo durante la sedimentación en un canal inclinado definidas en el trabajo de Davis y Acrivos (1985).

Davis y Acrivos (1985) en un estudio posterior al de Nakamura y Kuroda (1937), señalan que el aumento de la tasa de sedimentación puede considerarse como resultado del hecho de que, mientras que las partículas solo pueden depositarse en el fondo de un canal con paredes verticales, también pueden depositarse en la pared inferior de un canal inclinado, como se observa en la Figura 1. Estas partículas forman una fina capa de sedimento que se desliza rápidamente hacia el fondo del contenedor bajo la acción de la gravedad. Así, se puede interpretar el aumento de la tasa de sedimentación como consecuencia del aumento de la superficie disponible para el asentamiento.

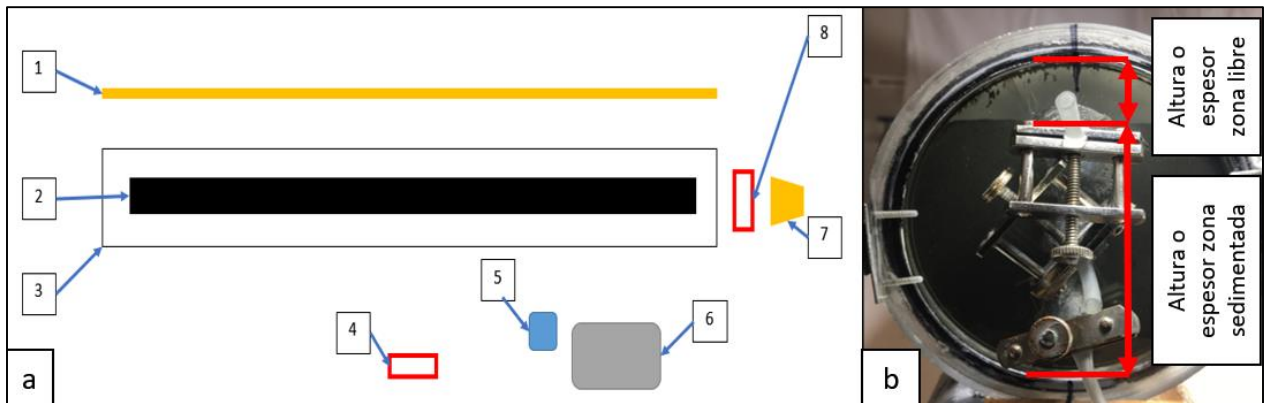
### 3. TRABAJO EXPERIMENTAL

Si bien existen varios estudios (Ihle, 2014; Sampaio y Brandao, 2004; Bragança y Silva, 2007; Valencia, 2017; Cotroneo, 2015; Palma et al., 2016 y Palma et al., 2018) que apuntan hacia objetivos similares a los del trabajo que se presenta en este documento, esta investigación tiene la particularidad de que se utilizó una muestra de concentrado de cobre producido por una planta concentradora en operación actualmente, facilitada por el Centro de Investigación en Minería Sustentable (CIMS JRI) mientras que en los estudios antes citados, en algunos se utilizó pulpa de concentrado de hierro y en otros datos operacionales o muestras idealizadas.

El procedimiento de ensayo fue adaptado a partir de la metodología empleada en CIMS JRI (Centro de Investigación en Minería Sustentable JRI S. A., 2019), basada en el estudio de Sampaio & Brandao (2004), desarrollando inicialmente algunos ensayos exploratorios, a partir de los que fue

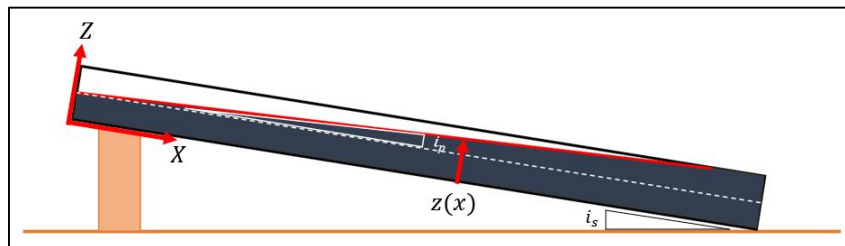
posible definir las variables que se podían considerar y la factibilidad de su modificación. También permitieron modificar el tiempo de ejecución de cada ensayo e implementar un método de extracción de muestras para granulometría. Además, se implementó un código en el software MATLAB R2019a con el objetivo de poder realizar un seguimiento en el tiempo de la interfaz sólido-líquido dentro del tubo de ensayo.

En la Figura 2 (A) se presenta el montaje utilizado visto en planta, con sus componentes, que corresponden a: 1: tubo de iluminación LED fría orientado en el mismo ángulo que el tubo de ensayo, 2: tubo de ensayo con sistema de extracción de muestras incorporado, 3: soporte, 4: cámara para detección de interfaz sólido-líquido en vista longitudinal, 5: wifi móvil, 6: computador portátil, 7: lámpara de iluminación LED fría ajustada para detección de interfaz, 8: cámara para detección de interfaz sólido-líquido en vista transversal. Y en la Figura 2 (B) una vista transversal desde la base del tubo. La conexión entre las cámaras y el computador portátil se realizó mediante *wifi* y *bluetooth*.



**Figura 2.**(A) Vista en planta del montaje utilizado para el ensayo ángulo de reposo-resuspensión. (B) Vista transversal incluyendo definiciones de Altura material sedimentado y Altura libre.

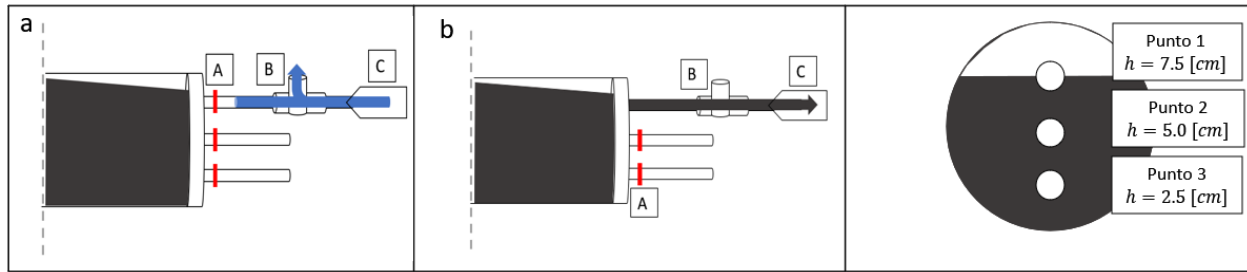
Además de la altura libre, esquematizada en la Figura 2 (B), es necesario definir otras variables que fueron medidas y analizadas, como la pendiente del sistema ( $i_s$ ) y la pendiente de la interfaz sólido-líquido ( $i_p$ ), las cuales se muestran en Figura 3. El tubo de acrílico empleado en el montaje experimental poseía diámetro interno de 10 [cm], espesor de 0,5 [cm] y longitud de 110,7 [cm].



**Figura 3.** Definición geométrica de la pendiente del sistema ( $i_s$ ) y de la pendiente de la interfaz sólido-líquido ( $i_p$ ). Además del sistema coordenado empleado en las mediciones.

Con el fin de realizar mediciones de la interfaz sólido-líquido en su vista longitudinal, se utilizó el *Camera Calibration Toolbox for Matlab* (Bouquet, 2013) basado en el modelo de Zhang (Zhang, 2000). Para las mediciones en la vista transversal, se utilizaron las herramientas gráficas de Excel

para poder medir la altura libre en el tubo. En cuanto al método de extracción de muestras granulométricas aplicado, se puede esquematizar como se muestra en la Figura 4.



**Figura 4.** Esquematización de la operación del sistema de extracción de muestras. a) ingreso de agua y b) extracción de muestra de pulpa. A) pinza cerrada, B) pieza T, C) jeringa.

Es importante aclarar que durante la ejecución de cada ensayo (desde la agitación) estas mangueras se encuentran bloqueadas por fuera de la tapa con pinzas, y al finalizar el ensayo a cada manguera se le conecta una pieza T de salida bilateral que se opera de dos formas, a) y b) secuencialmente, como se esquematiza en la Figura 4. Esta operación compuesta por a) y b) se realizó de forma análoga y también secuencial para los orificios 1, 2 y 3, respectivamente. Ubicados a 7,5 [cm], 5 [cm] y 2,5 [cm] de la base de la cara transversal del tubo.

Los valores de las variables consideradas en los ensayos fueron:  $C_p = \{55\%, 60\%, 65\%\}$  e  $i_s = \{5\%, 10\%, 15\%, 20\%\}$ , resultando un total de 12 combinaciones entre ellas.

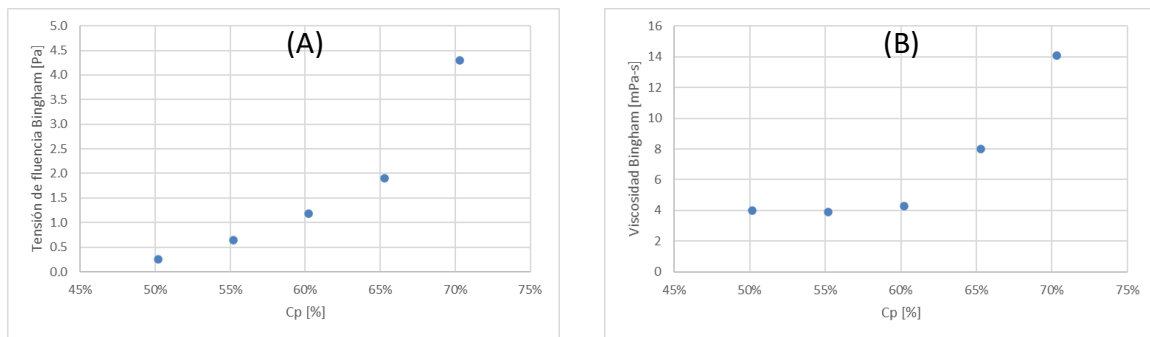
El procedimiento de ensayo se puede simplificar a través de los siguientes pasos:

1. Medición de puntos de referencia en coordenadas reales para implementación del *Camera Calibration Toolbox for Matlab* (Bouguet, 2013).
2. Preparación de muestra de pulpa a  $C_p$  nominal requerido.
3. Ajuste de la maqueta de ensayo en ángulo requerido y verificación de las conexiones mediante aplicaciones DroidCam e iVCam de los celulares, empleados como cámaras al notebook.
4. Captura de imágenes del patrón plano utilizado para calibración y rectificación de la cámara dispuesta para capturar la vista longitudinal del ensayo (*Camera Calibration Toolbox for Matlab* (Bouguet, 2013).
5. Carga de la muestra de pulpa preparada en el tubo de ensayo, homogenización mediante agitación manual del tubo.
6. Ejecución del código de captura y almacenamiento de imágenes durante 15 [h] almacenando fotos cada 15 [min].
7. Extracción de muestras granulométricas desde la cara transversal aguas abajo del tubo.
8. Descarga del tubo y medición de  $C_p$ .

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Caracterización pulpa

En cuanto a la caracterización de la pulpa, utilizando el método del picnómetro se determinó que la densidad de sólidos  $\rho_s = 3,99 \pm 0,17 [g/cm^3]$ . A partir de un ensayo de granulometría láser, se construyó la curva granulométrica de la pulpa, de la cual se pudieron extraer los diámetros característicos  $D_{10} = 3,74 [\mu m]$ ,  $D_{50} = 25,33 [\mu m]$ ,  $D_{80} = 66,08 [\mu m]$ . Por último, la tensión de fluencia y viscosidad de la pulpa se obtuvieron empleando un Reómetro modelo Haake RheoStress RS600, los valores de estas propiedades se presentan en la Figura 5 en función de la concentración de sólidos.



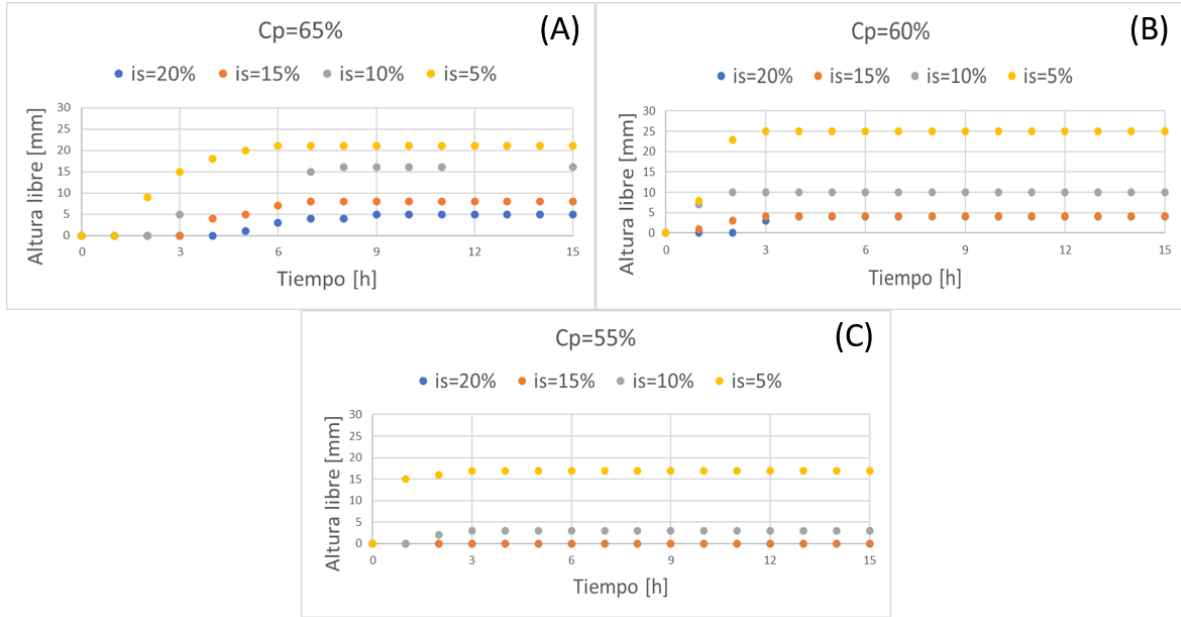
**Figura 5.** (A) Tensión de fluencia Bingham  $\tau_f$  y (B) Viscosidad Bingham  $\mu$  de la muestra para diferentes concentraciones en peso.

Además, se optó por realizar el ensayo de penetrometría para definir si la pulpa se considera repulpeable o refluidizable. Este ensayo se efectuó según el procedimiento con que cuenta el CIMS JRI (2020). Los resultados de los ensayos efectuado a las tres concentraciones de interés ( $C_p = \{55\%, 60\%, 65\%\}$ ) indicaron que la pulpa era repulpeable según el criterio utilizado en el trabajo de Bragança y Silva (2007).

### 4.2 Estudio de segregación

En la Figura 6 se presentan los resultados de la medición de altura libre en función del tiempo realizada en la cara transversal del tubo aguas abajo, tal como se indicó en la Figura 2. Se consideraron distintas pendientes (5,10,15 y 20%) y tres concentraciones de sólido.



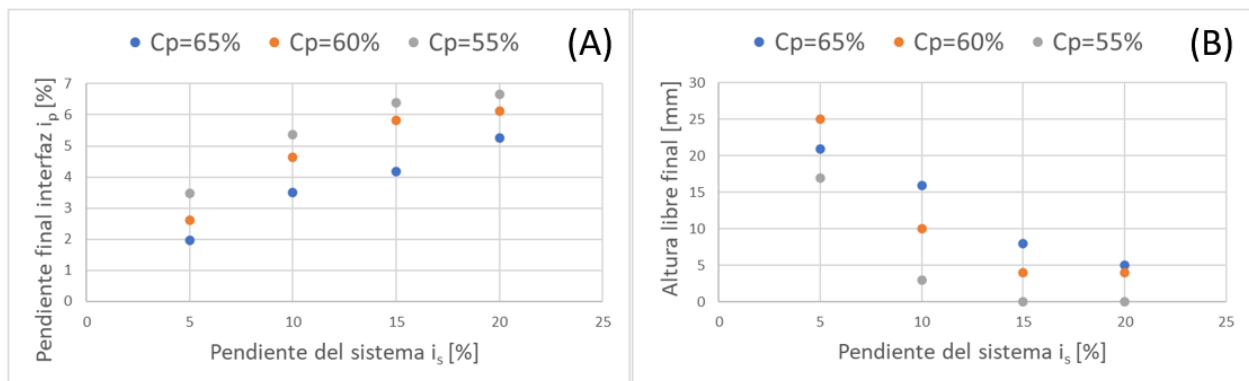


**Figura 6.** Registros de altura libre en función del tiempo para los ensayos realizados con (A)  $C_p=65\%$ , (B)  $C_p=60\%$ , y (C)  $C_p=55\%$ .

Cabe mencionar que la curva para  $i_s = 20\%$  y  $C_p = 55\%$  es idéntica a la curva para  $i_s = 15\%$  y la misma concentración.

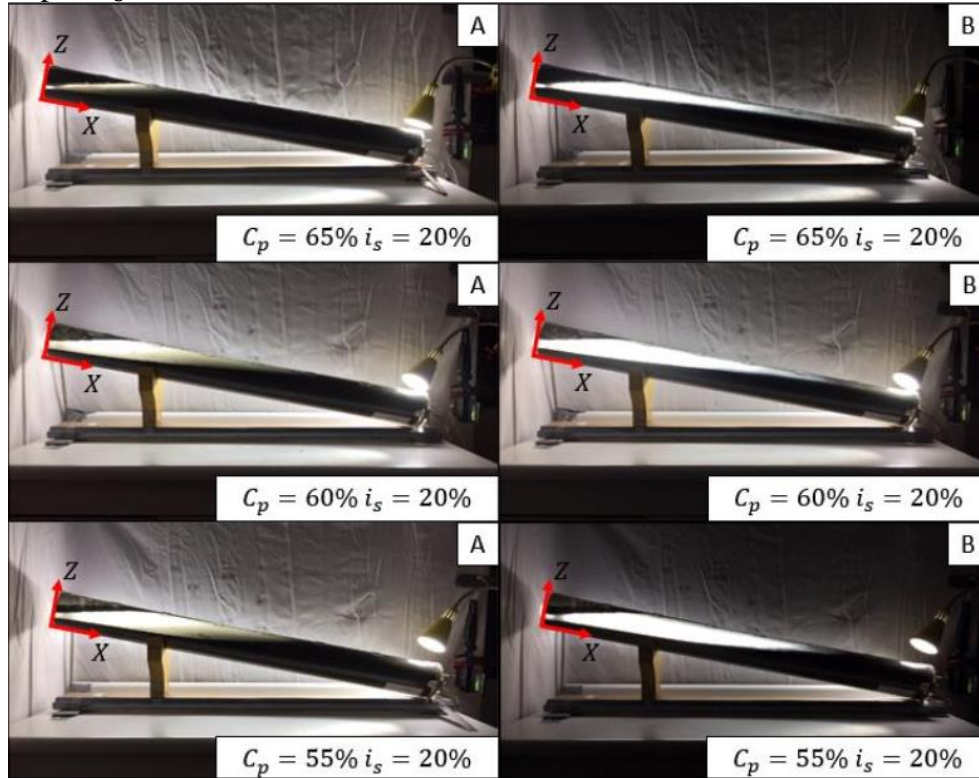
Es importante agregar que estos gráficos permitieron determinar el tiempo de estabilización de la interfaz (tiempo a partir del cual la altura libre se mantiene constante).

El seguimiento de la interfaz en el tiempo permitió visualizar la dinámica del fenómeno migratorio y calcular la pendiente final de la interfase sólido-líquido a través de la extracción de 12 puntos de la interfaz y el cálculo del promedio de las pendientes entre dichos puntos, sin considerar el tramo obstruido, en caso de que se presentara. Para resumir el estado final de los ensayos, respecto de la altura libre registrada y pendiente de la interfaz calculada, se construyeron los gráficos de la Figura 7.



**Figura 7.** (A) Pendiente final de la interfaz  $i_p$  y (B) Altura libre final en función de la pendiente del sistema  $i_s$  para las concentraciones analizadas.

A modo de ejemplo, en la Figura 8 se presentan imágenes de los ensayos luego de 1 [h] y 15 [h] de ejecución para  $i_s = 20\%$ .



**Figura 8.** Imágenes tomadas luego de 1 [h] de ejecución de cada ensayo (A) y al final de cada ensayo (B), para  $i_s = 20\%$ .

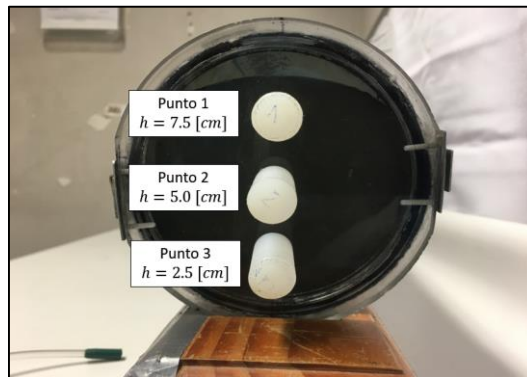
## 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La primera observación es que existe una tendencia a la disminución del tiempo de estabilización de los ensayos a medida que se disminuye la concentración. Específicamente, comparando el tiempo promedio de estabilización de los ensayos a  $C_p = 65\%$  con el de los ensayos a  $C_p = 55\%$  se encontró un 65% de reducción. Teóricamente, existen dos parámetros que afectan el tiempo de sedimentación de mezclas concentradas: en primer lugar, la concentración de sólidos de la pulpa y por otra parte la viscosidad, que en este caso se modifica producto de modificar la concentración. En cuanto a la viscosidad, un estudio anterior dice que ésta controla la escala de tiempo sobre la cual se establece la morfología de la interfaz (Palma et al., 2016): una menor viscosidad va a provocar que el ensayo llegue más rápido a su condición estacionaria. En cuanto a la concentración de sólidos, está comprobado que una concentración de partículas más baja produce una sedimentación más rápida, dado que las partículas tienen más libertad para moverse. Además, al disminuir la concentración la viscosidad de la pulpa disminuye, por lo que el tiempo de estabilización de los ensayos también disminuye.

El análisis granulométrico de las 3 muestras extraídas aguas abajo del tubo al final de cada ensayo, es decir, luego de 15 [h] transcurridas (ver Figura 9), no permitió detectar claramente cuáles eran las características del material que estaba migrando a esta zona, pero sí se pudieron apreciar algunas características. Tomando como referencia la granulometría de la muestra completa, es fácil ver que

a medida que la concentración de sólido disminuye, la granulometría de las muestras, en general, se hace más gruesa debido al fenómeno de migración.

Otra característica compartida en los resultados granulométricos de las 3 concentraciones en peso analizadas es que no se observó mayor segregación del diámetro característico D10 en toda la altura del lecho de sólidos. Como ya se mencionó, esta observación concuerda con el mecanismo de sedimentación de partículas polidispersas investigado por Cotroneo, (2015), donde el fenómeno de percolación de finos se encuentra presente y es más claro en pendientes inclinadas. Si se piensa en sedimentación de partículas en contenedores verticales, se esperaría encontrar una distribución de partículas más finas en la zona superior del estrato sedimentado y más gruesas en la zona inferior. Esto ocurrió aproximadamente para todos los diámetros característicos a  $C_p = 65\%$  y a  $C_p = 55\%$  en  $i_s = 5\%$ . Sin embargo, a  $C_p = 55\%$  y pendientes altas se ve que el material más grueso se encuentra en los puntos 2 y 3 del lecho de sólidos (Ver Figura 9), es decir en la zona central y/o inferior. Una hipótesis respecto de esta distribución es que el aporte de material sólido desde aguas arriba del tubo generó una alteración en esta distribución y al poseer mayor energía para moverse desde aguas arriba a aguas abajo que las partículas finas, llegó primero aguas abajo y generó esta particularidad.



**Figura 9.** Puntos de extracción de muestras para granulometría.

Las dos tendencias principalmente detectadas respecto de la variación de la pendiente del sistema y de la concentración son:

**Pendiente del sistema  $i_s$ :** en todos los ensayos al aumentar la pendiente del sistema  $i_s$  también aumentó la pendiente de la interfaz sólido-líquido con respecto al fondo del tubo. Por lo tanto, aumentar la pendiente del sistema genera una situación más desfavorable en concentraductos ante detenciones, como la pendiente final de la interfaz corresponde a un promedio, es conveniente analizar lo que ocurrió con las alturas libres finales medidas directamente al finalizar cada ensayo. Estas mediciones mantienen la tendencia señalada, dado que para todas las concentraciones al aumentar  $i_s$  la altura libre, en términos generales, disminuye. Por otra parte, en Figura 7 se aprecia un aumento más rápido de  $i_p$  para  $i_s$  entre 5% y 15% y más suave entre 15% y 20%. La tendencia general encontrada se debe a que al imponer una pendiente más alta al sistema, se provee de mayor energía potencial a las partículas en la zona aguas arriba del tubo, que posteriormente se transformará en la energía cinética que les permite transportarse hacia aguas abajo (migración). Por otra parte, la disminución de la tasa de aumento de la pendiente de la interfaz puede ser debida a que cuando aguas abajo del tubo se registra nula o casi nula altura libre, producto de las

limitaciones físicas que imponen las paredes del tubo, se genera una cuña que tiene cada vez menos capacidad de recibir aporte de material sólido desde aguas arriba.

**Concentración de sólidos en peso  $C_p$ :** respecto de este parámetro la tendencia detectada fue que al aumentar el  $C_p$ ,  $i_p$  disminuyó y la altura libre medida al final de cada ensayo aumentó. En consecuencia, aumentar la concentración en peso de la pulpa, genera una situación más favorable en concentraductos, desde el punto de vista de la migración de partículas. Los resultados obtenidos concuerdan con lo informado por diversos autores referente al fenómeno de sedimentación obstruida que se presentó en el capítulo de Revisión Bibliográfica, donde se expuso que la teoría indica que una concentración de sólidos más baja genera sedimentaciones más rápidas. Es decir, es más fácil para las partículas sedimentar y por lo visto en los resultados de estas experimentaciones también migrar. Una particularidad detectada en la variación de la altura final con la pendiente del sistema, es que para  $i_s = 5\%$  no se respeta por completo la tendencia descrita respecto de la concentración de sólidos. En sedimentación de partículas en conductos verticales ocurre que se genera mayor altura libre a concentraciones de sólidos más bajas, dado que hay menos partículas sólidas, para la pendiente del sistema más baja ( $i_s = 5\%$ ) se podría esperar un comportamiento parecido al descrito, dado que el valor de la pendiente es casi nulo y no se pensaría que ocurriera migración. No obstante, los resultados muestran que no es así, esto queda comprobado con la pendiente que toma la interfaz al finalizar el ensayo con  $C_p = 55\%$  e  $i_s = 5\%$  que fue  $i_p = 3.48\%$ , es decir, hubo una leve acumulación de material sólido hacia aguas abajo del tubo.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se estudió experimentalmente el fenómeno de migración de partículas sólidas, utilizando concentrado de cobre de un yacimiento minero. Específicamente se analizó el efecto de variar la concentración de la pulpa y la pendiente del sistema en la disposición final de las partículas sólidas de la pulpa.

A partir de los 12 ensayos ejecutados se determinó que, tanto la pendiente del sistema como la concentración de sólidos, influyen en la morfología de la capa de sedimento formada al finalizar el proceso de sedimentación en pendiente inclinada, tal como ya se había vislumbrado en trabajos anteriores. Dentro de las características de ensayo estudiadas, considerando como parámetro de control la altura libre final, se encontró que la condición más desfavorable (menor altura libre) se encuentra dominada por la concentración de sólidos más baja, mientras que la condición más favorable (mayor altura libre) por la pendiente del sistema más baja.

Las posibilidades de modificar estas dos variables en un concentraducto son limitadas, dado que la concentración de sólidos es una variable operacional que busca ser maximizada para manejar el recurso agua, pero que si permite hacer ajustes con el fin de limitar la concentración mínima. En cuanto a la pendiente del sistema, por ser una variable de diseño, una vez que el concentraducto está construido es muy difícil de modificar, principalmente por el tiempo y costo que eso conllevaría. En consecuencia, a la hora de diseñar concentraductos se debe tener especial cuidado con la pendiente del trazado como variable de diseño.

El seguimiento de los ensayos con captura de imágenes y su posterior procesamiento, permitieron realizar una descripción del mecanismo de migración. Se pudo apreciar que, luego de agitar la pulpa de concentrado de cobre dentro del tubo de ensayo, en la zona aguas arriba del tubo es donde primero se ve producción de líquido claro, ya que mientras las partículas sedimentan verticalmente, una parte de ellas se desplaza en forma paralela por la interfaz sólido-líquido hacia aguas abajo producto de la pendiente del sistema. Debido al aporte de material sólido que existe desde aguas arriba hacia aguas abajo, la producción de líquido claro aguas abajo del tubo comienza en forma retardada.

El análisis granulométrico no permitió detectar una tendencia clara respecto de qué tipo de material es el que se desplaza hacia aguas abajo de la tubería. Sin embargo, permitió visualizar 2 aspectos: el primero, que la granulometría se va haciendo más gruesa a medida que disminuye la concentración de sólidos; y el segundo corresponde a la alteración de la granulometría que se esperaría en sedimentación en contenedores verticales, producto del aporte de material desde aguas arriba del tubo.

Finalmente, como conclusión general, este estudio más que responder a los cuestionamientos que había en torno a la migración de partículas, entrega herramientas para comprender mejor el fenómeno y abre nuevas interrogantes interesantes de estudiar, relevantes para la operación minera. Tales como la importancia de la definición de una concentración crítica para la pendiente máxima del trazado y la necesidad de estudiar el escalamiento de estos resultados a nivel industrial.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos principalmente a JRI Ingeniería y al Centro de Investigación en Minería Sustentable (CIMS JRI) por su confianza y excelente disposición durante este trabajo.

## REFERENCIAS

- Acrivos, A., & Herbolzheimer, E. (1979). Enhanced sedimentation in settling tanks with inclined walls. *Journal of Fluid Mechanics*, 92(3), 435–457.
- Bouguet, J.-Y. (2013). *Camera calibration toolbox for Matlab (Computer software)*. [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/index.html](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html)
- Boycott, A. E. (1920). Sedimentation of Blood Corpuscles. *Nature*, 532.
- Bragança, A. C., & Silva, T. A. (2007). Alternative to Lime as a Rheology Modifier in the Transport of Iron Ore Slurry by the Samarco Pipeline. *HYDROTRANSPORT 17 - The 17th International Conference on the Hydraulic Transport of Solids*, 29–38.
- Centro de Investigación en Minería Sustentable JRI S. A. (2019). *Ensayo Ángulo de Reposo-Re Suspensión*. Sistema de Gestión.
- Centro de Investigación JRI S. A. (2020). *Procedimiento de Ensayo Penetrometría*.
- COCHILCO. (2019). *Producto Interno Bruto por Clase de Actividad Económica*. <http://www.cochilco.cl:4040/boletin-web/pages/tabla13/buscar.jsf>
- Cotroneo, J. (2015). *Estudio experimental de la sedimentación de mezclas sólidos-líquida polidispersas en planos inclinados*. Universidad de Chile.
- Davis, R. H., & Acrivos, A. (1985). Sedimentation of noncolloidal particles at low Reynolds numbers. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 17, 91–118.
- Fuentes, R. (2011). *Curso Reología de Pulpas*.
- García, M., & Maza, J. A. (1998). Origen y Propiedades de los Sedimentos. En *Manual de Ingeniería de Ríos*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería.
- Guazzelli, É., & Hinch, J. (2011). Fluctuations and instability in sedimentation. *Annual Review of Fluid Mechanics*,

43, 97–116.

- Herbolzheimer, E., & Acrivos, A. (1981). Enhanced sedimentation in narrow tilted channels. *Journal of Fluid Mechanics*, 108, 485–499.
- Hill, W. D., Rothfus, R. R., & Li, K. (1977). Boundary-enhanced sedimentation due to settling convection. *International Journal of Multiphase Flow*, 3(6), 561–583.
- Ihle, C. F. (2014). Should Maximum Pressures in Ore Pipelines be Computed Out of System Startups or Power Outages? *Minerals Engineering*, 55, 57–59. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.09.006>
- Kapoor, B., & Acrivos, A. (1995). Sedimentation and sediment flow in settling tanks with inclined walls. *Journal of Fluid Mechanics*, 290, 39–66.
- Krieger, I. M. (1972). Rheology of Monodisperse Latices. *Advances in Colloid and Interface Science*, 3(2), 111–136.
- Minería chilena. (2014). *Transporte de fluidos: la confiabilidad es clave*. <https://www.mch.cl/informes-tecnicos/transporte-de-fluidos-la-confiabilidad-es-clave/>
- Muñoz, J. (2019). *Clase 3: Hidráulica de Transporte de Pulpas*. “Proyecto Hidráulico”.
- Nakamura, N., & Kuroda, K. (1937). La cause de l'accélération de la vitesse de sédimentation des suspensions dans les récipients inclinés. *Keijo J. Med*, 8, 256–296.
- Palma, S., Ihle, C. F., & Tamburrino, A. (2018). Characterization of a sediment layer of concentrated fluid-solid mixtures in tilted ducts at low Reynolds numbers. *Powder Technology*, 325, 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.10.053>
- Palma, S., Ihle, C. F., Tamburrino, A., & Dalziel, S. B. (2016). Particle organization after viscous sedimentation in tilted containers. *Physics of Fluids*, 28(7).
- Phillips, R. J., Armstrong, R. C., Brown, R. A., Graham, A. L., & Abbott, J. R. (1992). A Constitutive Equation for Concentrated Suspensions that Accounts for Shear-Induced Particle Migration. *Physics of Fluids A*, 4(1), 30–40.
- Richardson, J. F., & Zaki, W. N. (1954). *Sedimentation and Fluidisation: Part I*. [http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8762\(97\)80006-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8762(97)80006-8)
- Sampaio, D. A., & Brandao, P. R. G. (2004). Rheological Properties of Iron Ore Concentrates Produced by Samarco Mineração S.A. (Samarco) and their Effect on the Potential of Plug Formation of the Pipeline. *HYDROTRANSPORT 16 - The 16th International Conference on the Hydraulic Transport of Solids*, 231–243.
- Valencia, P. (2017). *Efecto del Tiempo de Detención en la Seguridad Operacional en Concentraductos: Hacia la Determinación de un Tiempo Máximo*. Universidad de Chile.
- Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11), 1330–1334.