

# USO DE TOMÓGRAFO RESISTIVO Y LA METODOLOGÍA PIV PARA DETERMINAR EL TRANSPORTE DE SEDIMENTO FINO O RELAVE MINERO EN UN LECHO DE GRAVA

Jorge Fuentes Barrera<sup>1</sup>, Fernando Camino Sánchez<sup>1</sup> y Yarko Niño Campos<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Civil.

<sup>2</sup>Advanced Mining Technology Center. Universidad de Chile, Chile.

E-mail: jorgfuen@ing.uchile.cl, fernando.camino@ing.uchile.cl, ynino@ing.uchile.cl

## Introducción

El presente estudio aborda la contaminación de ríos por sedimento fino o relave minero, donde se realizó un estudio experimental con el objetivo de caracterizar el gasto sólido de fondo y suspensión, a través del uso de un tomógrafo resistivo. La instalación experimental está compuesta por un sistema cerrado de tuberías por donde escurre una muestra sólido-líquida sobre un lecho de grava. Se utilizaron diferentes combinaciones de caudales y cantidad de sedimento, correspondiente a microesferas de vidrio o relave minero obtenido de un tranque de relave, empleándose la técnica Particle Image Velocimetry (PIV) para describir el perfil de velocidad del flujo y el tomógrafo resistivo para obtener las concentraciones dentro del flujo.

## Materiales y métodos

La instalación experimental está compuesta por un sistema cerrado de tuberías de diámetro 0.1 [m]. Dentro de su extensión, 8 [m] se encuentran compuestos de una tubería de PVC y 2 [m] por una tubería acrílica transparente. Como sistema de impulsión posee una bomba, 10 m de manguera de 0.05 [m] de diámetro, un tubo Venturi, y un estanque de PVC de 200 [l], tal como se observa en la Figura 1. Dentro de la tubería de acrílico se instala un tomógrafo resistivo ITS asociado a un sistema de adquisición de datos modelo P2+.

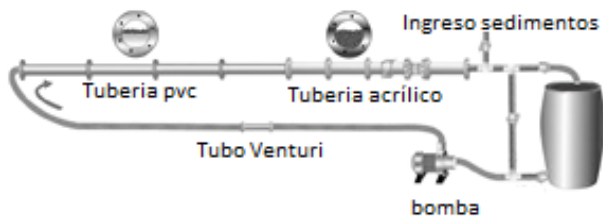


Figura 1.- Instalación experimental.

La tubería tiene en su interior un lecho de grava fijo, de diámetro  $D_{50}=0.01$ [m], de modo de dejar la mitad de arriba de la tubería de la tubería con flujo.

Para determinar las concentraciones de partículas de vidrio o relave minero se cuenta con un tomógrafo resistivo. Este dispositivo posee dos anillos de 16 electrodos cada uno ubicados en su periferia que están en contacto directo con el medio conductor en su interior. Mediante impulsos sucesivos de corriente, transmitidos a través de los electrodos al medio conductor, se mide la diferencia de potencial generada en los electrodos restantes. Mediante el algoritmo de reconstrucción de imagen Linear Back Projection (LBP), es posible reconstruir una imagen del proceso en estudio, que representa la

conductividad eléctrica que mejor reproduce la distribución de voltajes colectada en la periferia de cada anillo.

Se implementó la técnica PIV con el propósito de obtener los perfiles de velocidad y esfuerzos de corte de Reynolds al interior de la tubería. Partículas de resina mezclada con rodamina, de tamaño  $75 \mu\text{m}$ , fueron grabadas mediante una cámara de alta velocidad, utilizando un lente de distancia focal fija de 60 mm, durante 1.5 minutos a 1000 fps, en tres posiciones diferentes como se observa en la Figura 2, registrando un total de 84.000 imágenes. El procesamiento de datos se realizó con el software PivLab, cuyo algoritmo corresponde a la transformada de Fourier rápida, considerando como primer y segundo paso casillas de interrogación de  $64 \times 64$  [píxeles<sup>2</sup>] con un traslape de un 50% y de  $32 \times 32$  [píxeles<sup>2</sup>], respectivamente. La cantidad de partículas asociada a la casilla de  $64 \times 64$  [píxeles<sup>2</sup>] corresponde a 10 [unidades] y su tamaño promedio corresponde a 5 [píxeles]. El trazador es iluminado mediante un láser de tipo continuo y el plano de luz es generado mediante el uso de colimador. Efectos de curvatura de la luz emitida por el trazador al atravesar la tubería son corregidos. La diferencia entre el caudal obtenido con el tubo Venturi y el asociado la técnica PIV en la mitad superior de la tubería corresponde al caudal que circula a través de la grava, asociado al gasto sólido de fondo de las partículas de vidrio o relave.

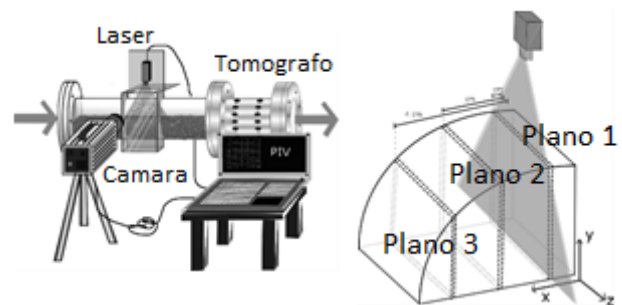


Figura 2.- Instalación experimental PIV y planos de medición respectivamente.

Para obtener la concentración, el tomógrafo es previamente calibrado, ya que la carga de sedimentos la subestima en hasta un 50-60%. La concentración es extraída del tomógrafo mediante el uso de dos referencias distintas. Una considera sólo el agua, mientras que la otra además incluye la grava. Si se usa solo el agua como referencia, es posible obtener la concentración en conjunto de la grava y sedimento fino. Mientras que la otra referencia solo permite observar la concentración de sedimento fino. Ambos enfoques fueron realizados. Diferentes volúmenes de sedimentos asociados a microesferas de vidrio y relave son incorporados al montaje a distintos caudales. El tomógrafo colecta un tomograma por segundo por anillo durante 2 horas, aproximadamente, que es la condición de equilibrio. Los tomogramas de ambos anillos son promediados. La concentración asociada al gasto sólido de fondo es obtenida mediante el promedio de la concentración de la última línea de sedimento que es observada en el tomograma

promediado durante los últimos 5 minutos del experimento. Esta línea representa la porción de sedimento que interactúa directamente con el flujo.

## Evaluación de resultados

Las expresiones semiteóricas de la intensidad de la turbulencia propuestas por Nezu y Nakagawa (1993) se ajustan bien a las intensidades turbulentas  $u'/u^*$  a partir de  $y/h=0.15$  en todos los planos de estudio, mientras que la expresión de Kironoto y Graf (1994) aproxima la intensidad turbulenta  $v'/u^*$  a partir de  $y/h=0.1$  en todos los planos, donde  $u^*$  corresponde a la velocidad de corte sobre el lecho y  $h$  a la mitad del radio de la tubería.

El esfuerzo de corte total está compuesto casi en su totalidad por el esfuerzo de corte de Reynolds, siendo la componente viscosa no significativa. La componente espacial es significativa en torno las cercanías de la grava, alcanzando el máximo justo en la rugosidad del lecho. A pesar que el esfuerzo espacial corrige parte del momentum extraído en torno al lecho, la suma del esfuerzo de corte de Reynolds y espacial es un 10% menor al esfuerzo de corte Reynolds proyectado linealmente al lecho. El esfuerzo de corte logarítmico determinado a partir de la distribución logarítmica de velocidades es en promedio un 7% más grande que el esfuerzo de Reynolds proyectado al lecho.

El gasto sólido de fondo adimensional en función del esfuerzo de corte adimensional  $\tau^*$  y el parámetro  $e/D_g$ , que representa el grado de exposición del sedimento al flujo, asociado al relave y las partículas de vidrio muestra que se acoplan de buena manera con respecto a los datos reportados por Niño et al. (2018) (Figura 3). El esfuerzo de corte calculado mediante la técnica PIV no considera la influencia del sedimento al interior del lecho, ya que fue obtenido sólo con la grava. De esta forma, los datos asociados a valores de  $e/D_g$  cada vez más cercanos al lecho están expuestos a una modificación del esfuerzo de corte, y por ende, del gasto sólido de fondo ya que depende del caudal interior que circula a través del interior del lecho.

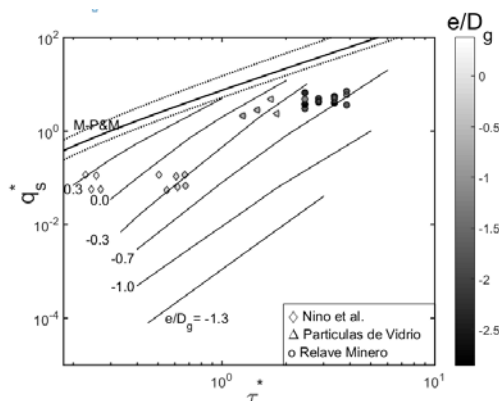


Figura 3.-Gasto sólido de fondo en función del esfuerzo de corte y el parámetro  $e/D_g$ .

Algunos tomogramas finales asociados a un volumen de 3 litros de microsferas de vidrio en base a la referencia agua y agua-grava para distintos caudales en el tiempo son presentados en la Figura 4. Los tomogramas representan de manera satisfactoria la posición del sedimento en el lecho al interior de la tubería, por lo que es posible estudiar de buena manera que es lo que ocurre de manera no intrusiva con el sedimento fino. Una de las dificultades asociadas al uso del instrumento recae en la

estimación de la concentración cuando existe más de un tipo de sedimento y su baja resolución espacial. No necesariamente la concentración conjunta de grava y microsferas o relave es la suma de las concentraciones individuales. Sin embargo, el uso de la referencia agua-grava demuestra ser más adecuada para caracterizar cuantitativamente y cualitativamente el sedimento que la referencia agua.

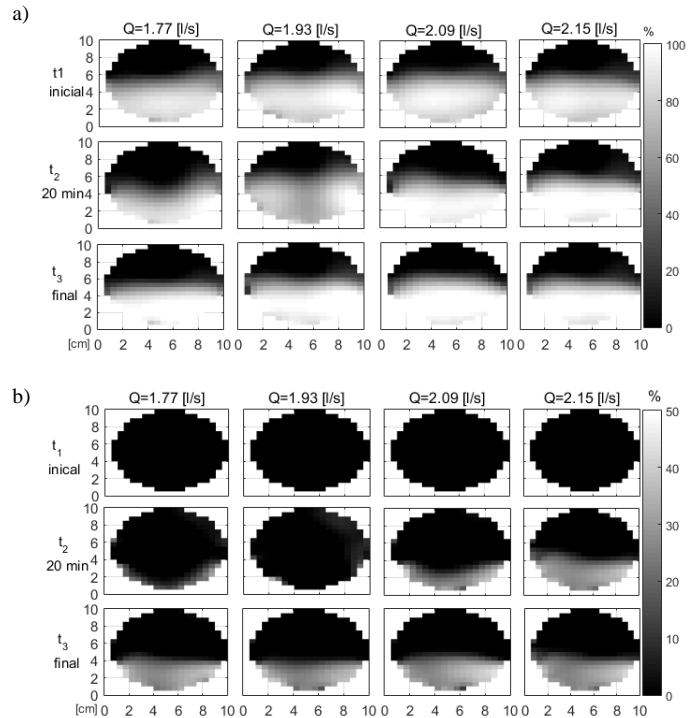


Figura 4.-Tomogramas en el tiempo. a) referencia agua.  
b) referencia agua-grava.

## Conclusiones y recomendaciones

El uso de la técnica PIV y el tomógrafo resistivo resultaron ser satisfactorios en la evaluación del gasto sólido de fondo, debido a que los resultados obtenidos se acoplan de buena manera a los datos reportados por Niño et al (2017). Además, se observan que los datos experimentales asociados a este estudio se encuentran por debajo de las predicciones tradicionales de gasto sólido de fondo tales como Meter-Peter y Müller (M-P&M), Ashida y Michihue (A&M) y Engelund y Fredsøe (E&F), debido a que el esfuerzo de corte sobre el sedimento es menor a mayor profundidad del mismo dentro de la grava.

Dentro del desarrollo de este estudio se contempla el análisis de gasto sólido en suspensión para relave minero y las correcciones de esfuerzo de corte debido a la presencia de sedimento, las que se encuentran aún en etapa preliminar de análisis.

## Referencias bibliográficas

- Kironoto, B. A., & Graf, Walter H. (1994, Dec). Turbulence characteristics in rough uniform open-channel flow. Proc. Instn. Civ. Engrs. Wat., Marit. & Energy, 106, 333-344.
- Nezu, I., & Nakagawa, H. (1993). Turbulence in open-channel flows. IAHR Monograph series, A.A. Balkema, Rotterdam.
- Niño, Y., Licanqueo, W., & Tamburrino, A. (2018). Front of sand moving as bedload through immobile coarse gravel. Journal of Hydraulic Research.