

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

**INSTALACIÓN EXPERIMENTAL E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE  
MEDICIÓN ÓPTICO NO INTRUSIVO PARA EL ESTUDIO DE FORMAS DE  
FONDO EN DUCTOS A PRESIÓN**

**ALEX GARCES C.<sup>1</sup>**  
**ALDO TAMBURRINO T.<sup>2</sup>**

**RESUMEN**

En el presente trabajo se detalla la fabricación y puesta en marcha de una instalación experimental diseñada para estudiar la generación y evolución de las formas de fondo. Su tramo de estudio es una tubería cuadrada de 10 m de largo y sección 52x52 mm<sup>2</sup>. Con esto se podrá estudiar la respuesta de un lecho granular frente a distintos tipos de fluido (soluciones de agua y carboximetilcelulosa), condiciones de flujo, partículas que constituyen el lecho y pendientes.

Para la caracterización de las formas de fondo se implementa un sistema óptico de medición no intrusivo basado en un algoritmo conocido como perfilometría por transformada de Fourier, el cual debió ser corregido dada la refracción del haz de luz al entrar en la tubería. El método es capaz de medir características geométricas de la onda, su celeridad y con esto el gasto sólido de fondo. Gracias a este sistema se podrá estudiar la formación y crecimiento de las formas de fondo a partir de un lecho plano.

Se exponen resultados de experimentos preliminares, los cuales fueron necesarios para la calibración y comprobación de los valores registrados por los equipos utilizados. Se analizan el esfuerzo de corte sobre el lecho y condiciones de arrastre incipiente para arena. Los resultados son complementados con modelos numéricos de los casos estudiados.

---

<sup>1</sup>Estudiante Magister, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – [agarces@ing.uchile.cl](mailto:agarces@ing.uchile.cl)

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

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

Las formas de fondo son ondas sedimentarias con una cierta periodicidad espacial y geometría definida. Su presencia condiciona la resistencia hidráulica y el transporte de sedimentos, por lo que resulta importante ser capaces de conocer bajo qué condiciones se forman y cuantificar sus características.

Actualmente Chile figura como una potencia en la industria minera. Una técnica de transporte de los recursos extraídos utiliza tuberías para impulsar una mezcla con agua llamada comúnmente concentrado o pulpa. Estos minerales, resultado de un proceso de molienda, presentan una granulometría extendida. A pesar de que el agua tiene un comportamiento reológico newtoniano, en presencia de sólidos en suspensión, el comportamiento reológico de la mezcla puede ser distinto. Las partículas finas interactúan con el agua y esta mezcla se modela como un fluido aparente con características no newtonianas. El modelo empírico de Krieger y Dougherty (1959) por ejemplo, relaciona la viscosidad aparente con la viscosidad del agua y la concentración de sólidos en suspensión.

Las condiciones de transporte hoy en minería evitan el gasto sólido de fondo o partículas estáticas (lecho de partículas). Sin embargo, el transporte de material grueso es atractivo para la industria. Sus principales ventajas son la reducción en costos de molienda y secado del material (Miscoe y Faddick, 1980; Shook et al, 1981). En consecuencia también se reduce el consumo de agua, un recurso escaso en el norte del país. El principal problema del transporte de material grueso es que no se puede trabajar como un fluido equivalente y un modelo de dos fases es necesario (Ouriemi et al, 2010). Esto se debe a que la fuerza gravitacional obliga a los sedimentos más gruesos a transportarse en la parte baja de la tubería (Takahashi, 1989).

Si bien muchos autores han estudiado la generación de formas de fondo, todavía falta para entender sobre cómo estas ondas inciden en las pérdidas de energía (Einstein y Barbarossa, 1952; Engelund, 1966). La literatura existente se reduce aún más cuando el estudio se hace en tuberías o con un fluido de reología no newtoniana (Graf y Acaroglu, 1968; Kuru et al, 1995; Coleman et al, 2003; Admiraal, 2003).

El problema se puede estudiar en una tubería circular o de sección cuadrada, teniendo cada una de ellas ventajas y desventajas. Graf y Acaroglu (1968) trabajaron en una tubería circular de diámetro 76 mm, cuya sección de observación mide 1.85 m de largo. Se usó una grava prácticamente uniforme con gravedad específica  $s = 2.67$  y diámetros característicos de 2 y 2.78 mm. Coleman et al (2003) utilizaron una tubería rectangular con sección de estudio 6m x 0.3m x 0.1m, donde la última medida es el alto de la sección transversal. El lecho posee una altura inicial de 5 mm y largo de 4-5 m. Está compuesto por partículas de  $d_{50}=0.11$  mm y en otros experimentos por  $d_{50}=0.87$  mm, en ambos casos se trata de arena de cuarzo. Admiraal (2003) utiliza una tubería circular de 10.2 cm de diámetro y 9.5 m de largo con un pivote central que le permite inclinaciones de  $-20^\circ$  a  $20^\circ$ . El diámetro de partículas usado es  $d_p=0.53$  mm.

Kuru et al (1995) trabajaron con una solución de agua y glicerina y un rango de Reynolds de 1000 a 10000. Un problema que abordan los autores es la falta de correlación entre los

datos experimentales y los modelos comúnmente utilizados para analizar el fenómeno. Cada experiencia se repitió cien veces bajo las mismas condiciones. En su trabajo muestran la distribución de las longitudes de onda registradas, donde la dispersión de datos es del orden de la longitud de onda promedio. Esto puede representar un problema para los objetivos de la presente investigación. Ellos concluyen si bien la iniciación de las ondas sedimentarias puede ser resultado de la inestabilidad del flujo de dos fases, sus características geométricas en régimen permanente no se explican correctamente por dicha inestabilidad. Finalmente se menciona que los resultados en los casos donde hay poca saltación son predichos de mejor manera. Lo anterior es probablemente consecuencia de la naturaleza aleatoria de los esfuerzos turbulentos que influyen en el fenómeno de saltación.

Ouriemi et al (2010) grabaron la evolución de las formas de fondo en función del tiempo usando un láser, para un caudal constante. Ellos concluyen que si bien el arrastre incipiente está determinado por el número de Shields, el aspecto de las dunas parece estar mejor descrito por el número de Reynolds. El desarrollo de la técnica de medición por FTP, permitirá hacer un análisis 3D de la evolución y movimiento de las formas de fondo que se generen.

En el laboratorio Francisco Javier Dominguez de la Universidad de Chile se ha utilizado como fluido no newtoniano soluciones en agua de carboximetilcelulosa (CMC) y carbopol para el estudio de la dinámica del transporte de sedimentos por flujos de fluidos no newtonianos (Montserrat et al, 2014; Tamburrino et al, 2014,2015).

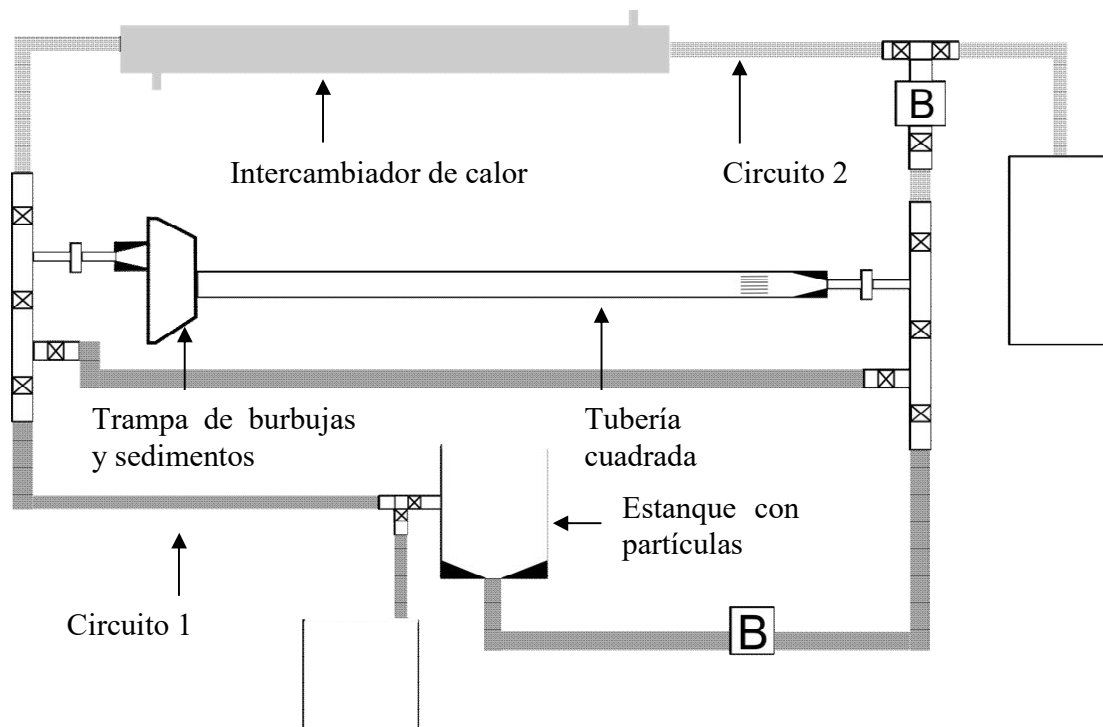
El objetivo de este artículo es presentar una instalación especialmente diseñada para caracterizar la deformación del lecho formado por material granular no cohesivo en un ducto a presión, incluyendo un sistema óptico de medición no intrusivo que permite cuantificar las propiedades de las formas de fondo generadas.

## **2. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL**

### **Tubería**

Para estudiar experimentalmente la generación de formas de fondo, se fabricó una tubería cuadrada de 10 m de largo y sección 52x52 mm<sup>2</sup>. El circuito es constituido por dos sistemas cerrados de recirculación de fluidos (donde el fluido es una solución agua-CMC que puede transportar partículas sólidas). Su tramo de estudio, en presión y capaz de variar su pendiente, es la única sección común de ambos sistemas. La pendiente puede ajustarse entre -17.5% y 17.5%. El primer circuito, encargado de generar el lecho plano en la sección de interés, transporta la solución con una alta concentración de partículas. El caudal al que se opera este circuito es tal, que las partículas se mueven a través de la sección de estudio como un lecho deslizante, mientras que en el resto del sistema las partículas se transportan en suspensión. Tales características se logran con ductos de menor diámetro. Una vez que las partículas cubren el tramo deseado, el sistema se detiene. En caso de ser necesario, existe un bypass para reanudar el movimiento y extraer las partículas del circuito excepto aquellas que se encuentran en la tubería cuadrada.

Una vez sedimentadas las partículas, por el segundo circuito transita la misma solución pero sin partículas para generar las formas de fondo. El fluido pasa además por un intercambiador de calor que consta de cuatro tuberías de cobre y una pulgada de diámetro, inmersas en una tubería de cuatro pulgadas por las que fluye agua de menor temperatura. El agua refrigerante circula constantemente desde un estanque de grandes dimensiones para no aumentar su temperatura de manera significativa. En la parte superior de la tubería de acrílico se encuentran los sensores de presión para estimar las pérdidas de carga.



**Figura 1.** Circuitos 1 y 2

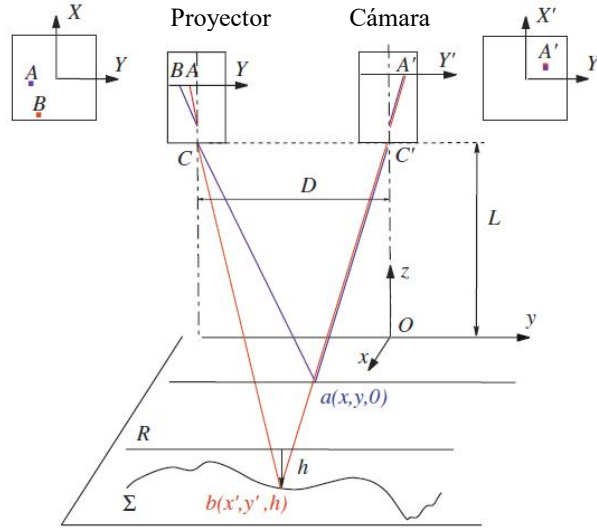
### Sistema de medición

En experimentos preliminares con arena como sedimento, se registraron formas de fondo cuya amplitud es del orden de los milímetros. Adicionalmente, la condición de no resbalamiento en las fronteras laterales disminuye la velocidad cercana a las paredes. Esto impide que la totalidad de ondas sedimentarias puedan ser medidas por medio de fotografías laterales del perfil longitudinal.

Para resolver este problema se decidió registrar las formas de fondo mediante un sistema óptico no invasivo conocido como perfilometría por transformada de Fourier (FTP, por su nombre en inglés, *Fourier transform profilometry*) introducido por primera vez por Takeda et al (1982) y mejorado por Cobelli et al (2009). Para su implementación se utilizan un proyector y una cámara digital.

En la Figura 3 se muestra la distribución geométrica de los equipos utilizados. Ambos deben estar a la misma altura y sus ejes de colimación deben ser paralelos y verticales (Takeda y Mutoh, 1983). Las variables importantes para caracterizar la posición de ambos

aparatos son la altura  $L$  por sobre la superficie a medir y la distancia entre el lente del proyector y la pupila de la cámara fotográfica  $D$ .



**Figura 3.** Esquema y variables del sistema FTP. Fuente: (Cobelli et al, 2009)

El plano de referencia  $a(x,y,0)$  es la superficie previa a la deformación que se quiere medir. Esta debe ser perpendicular a los ejes de colimación de los aparatos. La pupila del proyector  $C$  proyecta un patrón de franjas arbitrario. Un patrón de franjas sinusoidal incrementa considerablemente el desempeño de esta técnica y la calidad de la reconstrucción comparado al patrón Ronchi (Cobelli et al, 2009). De manera simplificada, el fenómeno óptico es que un pixel proyectado  $B$ , es capturado en un pixel de la cámara  $A'$ . Una vez realizada la perturbación de la zona a medir,  $A'$  observa ahora el pixel proyectado por  $A$ . Gracias a la escala de grises, se define una fase a cada matiz de gris proyectado  $\phi(A)$ . Con esto obtiene un mapa de desfase entre los pixeles "B" y "A" tal que

$$\Delta\phi = \phi(B) - \phi(A) \quad (1)$$

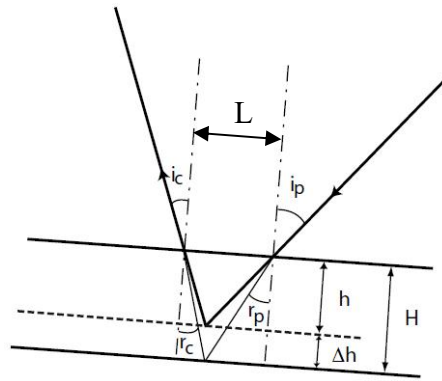
Se entiende por desfase, la diferencia entre el gris registrado en una posición en el caso de referencia y el gris en esa misma posición para el caso deformado. Como se trabaja con fotos monocromáticas y el patrón varía del blanco al negro sinusoidalmente, este desfase de color es identificable directamente. Finalmente para obtener la relación entre el desfase y la altura correspondiente se utiliza la conversión fase-altura de Cobelli et al (2009):

$$h = \frac{\Delta\phi L}{\Delta\phi - 2\frac{\pi}{p}D} \quad (2)$$

Donde  $p$  es el periodo del patrón sinusoidal. Para la eliminación del ruido en las mediciones se usó un filtro de Gauss que suaviza los datos resultantes. En la Figura 4 se muestra la estructura metálica de soporte para la tubería y para los equipos utilizados en el sistema de medición.

### Corrección por refracción

La teoría anteriormente explicada ha mostrado un error pequeño cuando se miden deformaciones de superficies libres (Maurel et al., 2009). Sin embargo, en el caso de este estudio y antes de llegar al fondo móvil, el haz de luz proveniente del proyector y la línea de visión de la cámara deben atravesar la pared superior del acrílico y el volumen de fluido, siendo refractado en su trayectoria. Una de las principales razones para usar acrílico en las paredes del ducto es que su índice de refracción es igual al del agua. Para la corrección de esta desviación, se usa el razonamiento expuesto en la Figura 4, donde  $h$  es la ubicación aparente del punto medido por el algoritmo de Cobelli et al (2009) y  $H$  la altura real del plano a medir.



**Figura 4.** Corrección por refracción al atravesar un medio

Denominando  $L$  la distancia entre los puntos de incidencia. Se tiene que

$$L = h \tan(i_p) + h \tan(i_c) \quad (3)$$

Donde  $i_p$  e  $i_c$  son los ángulos de incidencia del proyector y la cámara respectivamente. Del mismo modo

$$L = h \tan(r_p) + h \tan(r_c) + \Delta h \tan(r_p) + \Delta h \tan(r_c) \quad (4)$$

Donde  $r_p$  y  $r_c$  son los ángulos de refracción. Igualando ambas expresiones se obtiene que

$$H = \frac{\tan(i_p) + \tan(i_c)}{\tan(r_p) + \tan(r_c)} h \quad (5)$$

### Calibración para fluido pseudoplástico

La solución agua-CMC se comporta como un fluido de reología pseudoplástica. El comportamiento de esta solución está definido por una ley de potencia  $\tau_{yx} = K \dot{\gamma}^n$ . Donde  $K$  es el índice de consistencia,  $n$  el índice de flujo y  $\dot{\gamma}$  la tasa de deformación angular. El valor de las constantes es determinado mediante un reómetro rotativo Anton Paar modelo Rheolab QC de cilindros concéntricos. Para la calibración del sistema de medición, se realizaron ensayos con una solución al 0.25% de concentración peso-peso peso de agua-

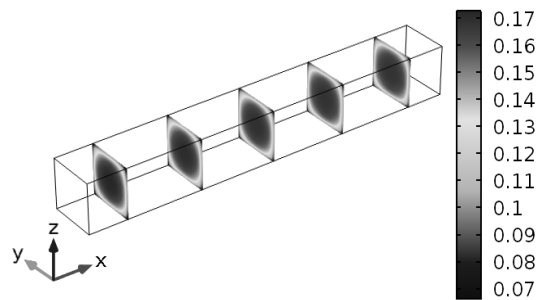
CMC. Los coeficientes obtenidos son  $K = 0.023 \text{ Pa s}^m$  y  $n = 0.84$ . El índice de refracción  $n$  fue medido a través de fotografías de un rayo láser que atraviesa ambos medios (placa de acrílico y solución). De estas se obtuvo que el índice de refracción es igual para el agua y para la solución.

$$\frac{\sin(i_{\text{agua}})}{\sin(r_{\text{agua}})} = \frac{\sin(i_{\text{solucion}})}{\sin(r_{\text{solucion}})} = n = 1.335 \quad (6)$$

## Modelación numérica del flujo

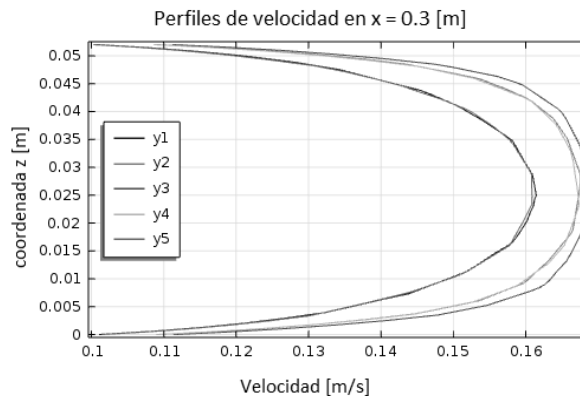
### *Sin lecho*

Con el objeto de ayudar en el diseño, se resolvió numéricamente el escurrimiento en el ducto mediante un modelo k-epsilon para el cierre de la turbulencia. Para ello se utilizó el software comercial Comsol. Se determinó las características del flujo estacionario de agua en un ducto de sección cuadrada de  $5.2 \times 5.2 \text{ cm}^2$  y 40 cm de largo. Considerando caudales entre 0.2 y 1.4 L/s, lo que corresponde a flujos con números de Reynolds entre 3840 y 26840. Las condiciones de borde empleadas corresponden a un caudal en la sección de entrada y a una cota piezométrica de 1mca en la sección de salida. En la Figura 5 se presenta un esquema de la distribución de velocidades para  $Q = 0.4 \text{ L/s}$ . Un análisis de los resultados indica que para este caso en  $x = 15 \text{ cm}$  el perfil de velocidad se encuentra plenamente desarrollado.



**Figura 5.** Modelo Comsol

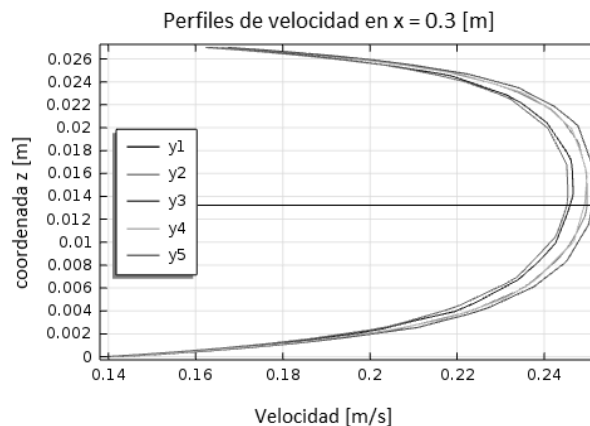
En la Figura 6 se muestran distintos cortes del perfil de velocidades a 30 cm del ingreso del agua para 5 valores de la coordenada  $y$ , tal que  $y_i = 0.052 \text{ i}/6 \text{ cm}$ , con  $i=1-5$ .



**Figura 6.** Perfiles de Velocidad sin lecho

### Con lecho plano

Usando el mismo esquema en Comsol, se modeló numéricamente la rugosidad del fondo para un lecho plano y  $d_p = 0.8$  mm. Asumiendo que el ducto posee arena en el fondo, la altura de la sección de escurrimiento se reduce a 2.7 cm. Con el objeto de determinar el esfuerzo de corte actuando sobre el lecho, es necesario separar los esfuerzos de corte asociados a las tres paredes de acrílico y al lecho. Para esto se definen un área de influencia del lecho y otra del acrílico. Las áreas de influencia se definen basándose en la deformación del perfil de velocidades obtenida en el modelo numérico. El aumento de la rugosidad en el fondo respecto a las paredes de acrílico hace que la velocidad máxima registrada en el perfil de velocidades de la sección transversal se encuentre desplazada hacia arriba como se muestra en la Figura 7. En base a la ubicación de la velocidad máxima, se determinó el área de influencia del lecho generando trapecios. Cuando se investiguen los casos con fluidos pseudoplásticos se deberá modelar considerando este tipo de reología para el fluido aparente.

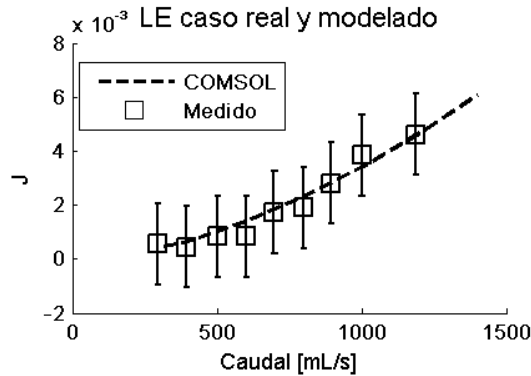


**Figura 7.** Efecto de la rugosidad del fondo en la ubicación de la velocidad máxima para  $Q = 0.3$  L/s

### Medición de la presión

La presión se mide en cuatro puntos a lo largo del ducto con transductores de presión diferencial Omega Modelo PX409-015DWUV. Estos sensores entregan la presión en mV, por lo que para su calibración se midieron distintas alturas de columnas de agua y se obtuvo un coeficiente de conversión. Su comprobación se llevó a cabo registrando las pérdidas de energía en la tubería haciendo fluir agua y sin partículas por ella. En la Figura 8 se compara las pendientes de la línea de energía J obtenidas con la modelación numérica y las medidas en la tubería. Estas se grafican en función del caudal.





**Figura 8.** Comparación de la pérdida unitaria de energía para distintos caudales

### 3. RESULTADOS PRELIMINARES

Con el objeto de verificar el funcionamiento de la instalación experimental para un lecho granular, se hicieron experimentos con agua y una solución agua-CMC.

#### Experimentos con agua

Las condiciones experimentales para el caso de agua se presentan en la Tabla 1. Las pendientes negativas corresponden pendiente adversa. En dicha tabla se incluye el rango de los principales parámetros adimensionales representativos del fenómeno estudiado: Número de Reynolds  $Re = 4 R_h U / \nu$ , donde  $R_h$  es el radio hidráulico y  $U$  la velocidad media. Número de Reynolds asociado a la partícula  $Re_p^* = u_*' d_p / \nu$ , donde  $u_*'$  es la velocidad friccional asociada al grano y  $d_p$  el diámetro representativo de las partículas. Número de Shields  $\theta = \tau / (\rho_s - \rho) g d_p$ , donde  $\tau$  es el esfuerzo de corte sobre el lecho móvil,  $\rho_s$  la densidad del material no cohesivo,  $\rho$  la densidad del fluido y  $g$  la aceleración de gravedad.

**Tabla 1.** Condiciones experimentales con agua como fluido

Partículas de arena	$d_{50} = 0.38$ y $0.75$ mm
Pendientes	$-10^\circ, -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$
Caudal	0.2 a 0.75 L/s
Re	5000 - 19000
$Re_p^*$	4 - 15
Shields	0.005 - 0.26

#### Separación de los esfuerzos de corte

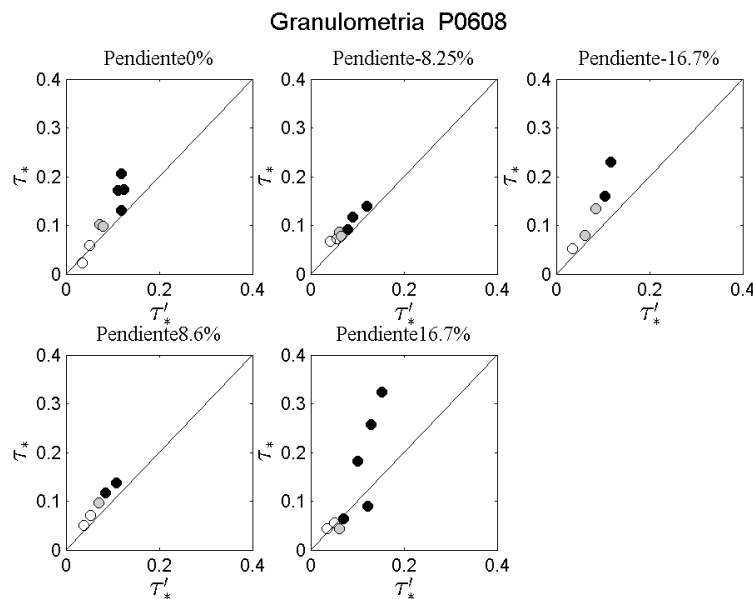
Conocidas las áreas de influencia por medio del modelo numérico, análogo a lo discutido en Chow (1959) para el efecto de una capa de hielo cubriendo la superficie libre en un cauce natural, se consideran velocidades iguales en ambas áreas. La rugosidad del lecho está compuesta por dos factores: el diámetro de las partículas y las formas de fondo (Engelund, 1966; Einstein y Barbarossa, 1952).

La descomposición del esfuerzo de corte actuando sobre el fondo se divide en un término asociado al grano y otro a la forma de fondo de manera análoga al método empírico de Einstein y Barbarossa (1952),  $\tau = \tau' + \tau'' = \rho(u'_s)^2 + \rho(u''_s)^2$ . Donde la resistencia asociada a los granos puede ser estimada con una relación tipo Keulegan (1938).

$$\frac{U}{u'_s} = 2.5 \ln \left( 12.3 x \frac{R'_h}{d_s} \right) \quad (6)$$

Donde x es una función de  $Re_{sp} = \frac{u'_s d_s}{\nu}$ . Dada la relación  $u''_s{}^2 = gR'_h J$ , el cálculo de  $u'_s$  es recursivo y se debe iterar hasta lograr la precisión deseada. Una vez conocido  $u'_s$ , se despeja  $u''_s$ .

En la Figura 9, los círculos blancos representan casos donde no hay movimiento de partículas, los círculos grises corresponden al arrastre incipiente y los círculos negros a casos con arrastre de sedimento. En esta figura se presentan los esfuerzos de corte adimensionales total y asociado a los granos,  $\tau_*$  y  $\tau'_*$ , respectivamente. La línea muestra el caso  $\tau'_* = \tau_*$ . Para dicha situación se tiene que no existe esfuerzo adicional por forma del lecho, es decir se está en presencia de un lecho plano. En los casos de pendiente 0%, -16.7% y 16.7%, se generan formas de fondo. Notar que en los casos sin movimiento se cumple  $\tau'_* = \tau_*$ .



**Figura 9.** Esfuerzos de corte adimensional asociado a los granos y total

### Arrastre incipiente

Desde el punto de vista dinámico, el arrastre incipiente es una condición crítica, donde las fuerzas hidrodinámicas que promueven el movimiento de la partícula se encuentran en equilibrio con las fuerzas que se oponen a dicho movimiento. Desde un punto de vista práctico, el arrastre incipiente puede ser determinado visualmente como el momento donde

las partículas comienzan a moverse pero encuentran el reposo rápidamente. Este movimiento aleatorio e intermitente se debe a la naturaleza estocástica de los esfuerzos turbulentos y el entramamiento dada la granulometría de las partículas. Definir esta condición visualmente no es una tarea sencilla debido a su carácter subjetivo.

En la Figura 10 se presenta el esfuerzo de corte crítico de Shields  $\tau_{*c}$  que se define como el esfuerzo de corte para el cual se inicia el movimiento.

$$\tau_{*c} = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho)gd_p} \quad (7)$$

Distintos autores han propuesto valores en el rango  $0.03 < \tau_{*c} < 0.06$  para el rango de  $Re_p^*$  2 a 20.

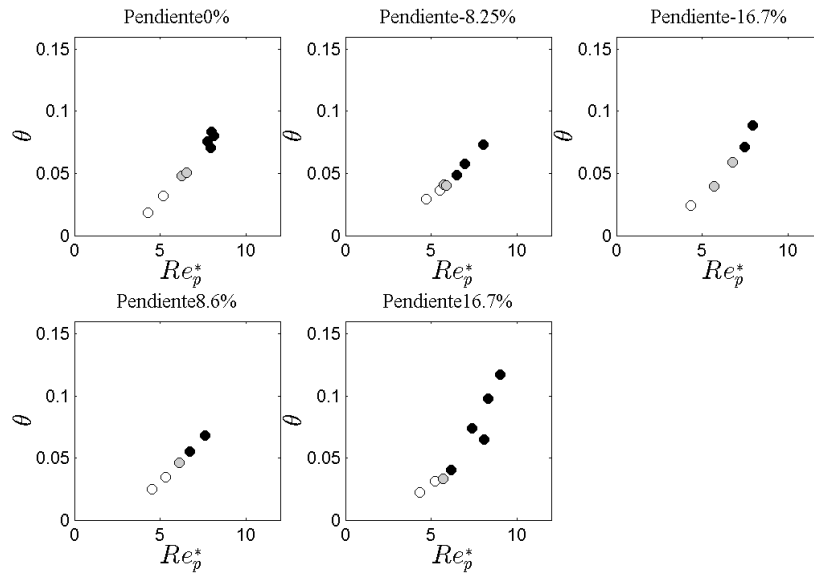
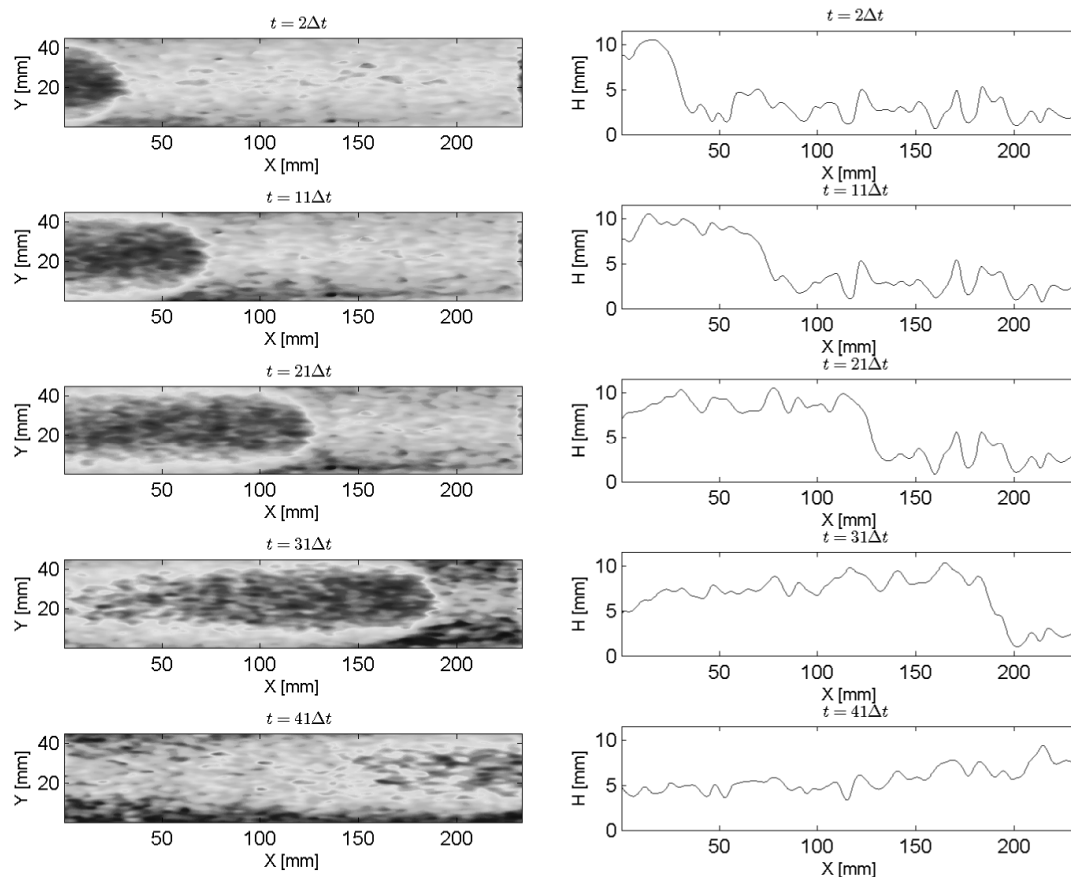


Figura 10. Condición de arrastre incipiente para distintas pendientes del ducto.

### Experimentos con fluido pseudoplástico

Con el objetivo de verificar el buen funcionamiento de la técnica para registrar las formas de fondo, se llevó a cabo un experimento considerando una solución de agua-CMC ( $K=0.023 \text{ Pa s}^n$  y  $n=0.84$ ) sobre un lecho de arena de tamaño en el rango  $0.6 \leq d_p \leq 0.8$  mm. La técnica de perfilometría por transformada de Fourier permite tener registros continuos de la evolución espacio-temporal de las formas de fondo. En la Figura 11 se presentan algunas de las imágenes obtenidas y un perfil de la forma de fondo a lo largo del eje de la tubería. A modo de ejemplo de la información que puede obtenerse del análisis de estas imágenes, se tiene la amplitud y largo de la duna de 8 y 200 mm respectivamente y la celeridad de la onda de 2.3 mm/s. El flujo que generó esta forma de fondo se caracteriza por un número de Reynolds equivalente

$$Re_K = \frac{\rho U^{2-n} h^n}{K} = 500 \quad (8)$$



**Figura 11.** Registro de las formas de fondo obtenidas mediante FTP

#### 4. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado una instalación experimental especialmente diseñada para el estudio de las formas de fondo que pueden generarse en un lecho de material granular no cohesivo bajo la acción de un fluido.

Las mediciones preliminares fueron comparadas con un modelo numérico, lo que permitió complementar los resultados obtenidos experimentalmente. Se obtuvieron buenos resultados para la pérdida de carga medida y, especialmente, permitió separar el esfuerzo de corte actuando sobre el fondo respecto del valor total medido. De este modo se determinó el esfuerzo crítico de Shields para el sedimento ensayado.

Se implementó un sistema de medición no intrusivo para caracterizar las formas de fondo que se generan en el lecho. La técnica de perfilometría por transformada de Fourier fue modificada con éxito para tener en cuenta el índice de refracción del medio que debe atravesar el haz de luz al llegar al lecho dentro de la tubería. Esta técnica permitió determinar las dimensiones más importantes de las formas de fondo generadas por un flujo de un fluido pseudoplástico.

La instalación experimental aquí presentada y la técnica de registro de la deformación del lecho se muestran promisorias en el estudio de formas de fondo generadas por flujos en presión de fluidos no newtonianos cuya única restricción es que deben ser transparentes.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por Fondecyt a través del proyecto de investigación N°1130910.

El primer autor agradece además la beca de Magister en Chile. CONICYT-PCHA/MagisterNacional/2014 - 22141496.

## **REFERENCIAS**

Admiraal, D. 2003. Influence of pipe angle on bedload transport in an inclined pipe. *International Journal of Sediment Research*, Vol. 18, No. 2, 122-129.

Bagnold, R. A. 1941. *The physics of blown sand and desert dunes*. Chapman and Hall, London.

Chow, V. T. 1959. *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York.

Cobelli, P.J., A. Maurel, V. Pagneux, y P. Petitjeans. 2009. Global measurement of water waves by Fourier transform profilometry. *Experiments in fluids*, 46(6), 1037-1047.

Coleman, S., J. Fedele, y M. García. 2003. Closed-Conduit Bed-Form Initiation and Development. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 956 – 965.

Einstein, H.A. 1950. The Bedload function for bedload transportation in open channel flows. *Technical Bull. No. 1026, USDA, Soil Conservation Service*, 1-71.

Einstein, H. A., y N. L. Barbarossa. 1952. River channel roughness. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. Vol. 117, No. 1, 1121-1146.

Engelund, F. 1966. Hydraulic resistance of alluvial streams. *Journal of Hydraulics Division, (HY2) 92(2)*, 315-326, y closure *93(4)*, 287-296.

Graf, W. H., y E. R. Acaroglu. 1968. Sediment transport in conveyance systems (part 1). A physical model for sediment transport in conveyance systems. *Hydrological Sciences Journal*, 13(2), 20-39.

Keulegan, G.H. 1938. Laws of turbulent flow in open channel. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 21, pp. 707-741.

Krieger, I. M., y T. J. Dougherty. 1959. A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid particles. *Transaction of the Society of Rheology* 3, 137.

Kuru, W. C., D. T. Leighton, y M. J. Mc Cready. 1995. Formation of waves on a horizontal erodible bed of particles. *International Journal of Multiphase Flow*, 21(6), 1123–1140.

Maurel, A., P. Cobelli, V. Pagneux, y P. Petitjeans. 2009. Experimental and theoretical inspection of the phase-to-height relation in Fourier transform profilometry. *Applied optics*, 48(2), 380-392.

Maurel, A., P. Cobelli, V. Pagneux, y P. Petitjeans. 2009. Experimental and theoretical inspection of the phase-to-height relation in Fourier transform profilometry. *Applied Optics*, 48(2), 380-392.

Montserrat G., A. Tamburrino y C. Ihle (2014) “Estudio Experimental Del Transporte en Régimen Laminar de Mezclas Sólidos-Líquido en Fluidos No-Newtonianos”, XXVI Congreso Latinoamericano de Ingeniería Hidráulica, Santiago, Chile, Agosto 25-30.

Negrete, F. 2014. Estudio experimental de formas de fondo en flujos laminares con superficie libre de fluidos pseudoplásticos. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil.

Ouriemi, M., J. Chauchat, P. Aussillous, M. Médale, y E. Guazzelli. 2010. Sediment transport and dunes in pipe flow. In *7th International Conference on Multiphase Flow*, 1-6.

Shields, A. 1936. Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. *Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau*, 26. (English translation by Ott, W.C. & van Uchelon, J.C., "Application of similarity principles and turbulence research to bed load movement", Soil Conservation Service, Cooperative Laboratory, Institute of Technology, Pasadena, California).

Takahashi, H., y T. Masuyama, K. Noda. 1989. Unstable flow of a solid-liquid mixture in a horizontal pipe. *International Journal of Multiphase Flow*, 15(5), 831–841.

Takeda M., H. Ina, y S. Kobayashi. 1982. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *Journal of the Optical Society of America* (1917–1983) 72:156.

Takeda, M., y K. Mutoh. 1983. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Applied Optics*, 22(24), 3977-3982.

Tamburrino, A., D. Carrillo, F. Negrete, and C. Ihle. 2014. “Critical shear stress for incipient motion of non-cohesive particles in open channel flows of pseudoplastic fluids”, 19 International Conference on Hydrotransport, Golden, Colorado, USA, Sept. 24-26.

Tamburrino, A., F. Negrete, and C. Ihle. 2015. “Sedimentary waves in laminar non-Newtonian fluid flows”, 2nd International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow (HTFF’15), Barcelona, España, Julio 20-21.