

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA**

**XVIII CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA DINAMICA DE  
SEDIMENTOS COHESIVOS EN SUSPENSION  
EN UN FLUJO TURBULENTO**

**NICOLÁS PUENTES P.<sup>1</sup>  
ALDO TAMBURRINO T.<sup>2</sup>  
YARKO NIÑO C.<sup>3</sup>**

**RESUMEN**

En este artículo se presentan resultados experimentales de un estudio realizado para investigar la dependencia que tiene el tamaño de los flóculos de sedimentos cohesivos con la turbulencia y concentración de sedimentos. Para ello se construyó una instalación especialmente diseñada para este estudio y se definió una metodología experimental y de análisis de datos que permiten determinar la evolución en el tiempo del tamaño de los flóculos, Esta evolución fue modelada de dos maneras: usando un modelo de desagregación propuesto por los autores y mediante el modelo de agregación-desagregación de Winterwerp. Ambos modelos representan satisfactoriamente el comportamiento de los flóculos. De este modo, fue posible definir los parámetros necesarios para caracterizar el sedimento cohesivo en los dos modelos.

---

<sup>1</sup> Ingeniero Civil, SKM Minmetal – e-mail: nikopuentes@gmail.com

<sup>2</sup> Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – e-mail: atamburr@ing.uchile.cl

<sup>3</sup> Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – e-mail: ynino@ing.uchile.cl

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Diversos problemas de calidad de aguas superficiales, estuarios, embalses, estabilidad de canales, obras de drenaje superficial, están relacionados al comportamiento y características de los sedimentos cohesivos o finos, siendo ellos responsables de, por ejemplo, la pérdida de capacidad en embalses, la formación de deltas, corrientes de turbidez en estuarios, la carga de demanda bioquímica de oxígeno, transporte de diversos contaminantes, disminución de capacidad de canales y obras de drenaje superficial, etc.

Los granos de los sedimentos cohesivos no se presentan separadamente como lo hacen, por ejemplo, las arenas, sino que en forma de agregados o aglomerados de partículas llamados flóculos, los que suelen estar compuestos por una gran cantidad de partículas de sólidos, y tener por lo tanto formas y densidades distintas a las partículas individuales.

La formación de flóculos depende de la concentración de los sólidos suspendidos, de la turbulencia del escurrimiento, de los distintos iones presentes en el agua, de la temperatura, así como de la presencia de materia orgánica coloidal, microbios y polímeros orgánicos segregados por algas y bacterias que son pegajosas y afectan significativamente los procesos de agregación.

Los procesos de agregación y rompimiento de flóculos en un flujo turbulento han sido descritos cualitativamente, pero su modelación es un tema que sólo en el último decenio ha comenzado a ser abordado. Una gran dificultad en la modelación de estos procesos radica en la necesidad de poder cuantificar ciertos parámetros, característicos de cada sedimento en particular, los que deben ser determinados empíricamente.

El objetivo de este artículo es estudiar la dependencia del tamaño de los flóculos presentes en una columna de agua con la concentración de sedimentos y el nivel de turbulencia de la columna.

## 2. MODELOS DEL PROCESO DE AGREGACIÓN Y DESAGREGACIÓN DE FLÓCULOS

En este estudio se utilizan dos modelos para caracterizar el proceso de agregación y/o desagregación de los flóculos. El primero corresponde a un modelo fenomenológico propuesto por los autores y el segundo al modelo de Winterwerp (1998).

### Modelo fenomenológico propuesto

Éste es un modelo de desagregación, en el que se considera que el tamaño de un flóculo depende sólo de su concentración en la columna de agua y el nivel de turbulencia a la cual está sometido. De este modo, los otros parámetros que influyen en el fenómeno se mantienen constantes.

Considerando que un flóculo de tamaño  $D_0$  se encuentra en una columna de agua, con un nivel de turbulencia definido por la energía cinética turbulenta,  $k$ , y que contiene una concentración  $c$  de sedimentos cohesivos, el flóculo tenderá a variar su tamaño en el tiempo de manera tal que a mayor energía cinética turbulenta, la tasa de disminución de tamaño será mayor y, a mayor concentración, la tasa será menor. De este modo, se propone:

$$\frac{D - D_{eq}}{D_0 - D_{eq}} = \exp\left(-\frac{A(k - k_{min})}{B + c}t\right) \quad (1)$$

donde  $D$  es el tamaño del flóculo en un tiempo  $t$ ,  $D_0$  es el tamaño inicial,  $D_{eq}$  es el tamaño de equilibrio al cual tiende el flóculo, para una energía cinética turbulenta,  $k$ , y una concentración,  $c$ ,  $k_{min}$  es el valor mínimo de energía cinética para que exista desagregación.  $A$  y  $B$  son parámetros empíricos, característicos de cada sedimento cohesivo, del mismo modo que  $D_{eq}$  y  $k_{min}$ .

Considerando que el diámetro de equilibrio es muy pequeño y que el nivel de turbulencia es mucho mayor que el mínimo requerido para producir desagregación, la relación anterior se reduce a:

$$\frac{D}{D_0} = \exp\left(-\frac{Ak}{B + c}t\right) \quad (2)$$

### Modelo de Winterwerp (1998)

Winterwerp propuso un modelo de floculación en el que combina linealmente los procesos de agregación y desagregación de las partículas. Los flóculos son tratados como entidades fractales cuyo tamaño es alterado por efecto de la turbulencia y de la concentración. La turbulencia es cuantificada a través del parámetro de disipación  $G$ , el cual está relacionado con la microescala de Kolmogorov y la tasa de disipación por unidad de masa,  $e$  y está dado por  $G = \sqrt{\frac{e}{\nu}}$ , donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática del agua. El proceso es modelado por la ecuación diferencial:

$$\frac{dd_f}{dt} = K_A c G d_f^{(4-n_f)} - K_B G^{(q+1)} d_f^{(2q+1)} (d_f - d_p)^p \quad (3)$$

donde  $d_p$  y  $d_f$  son el diámetro medio de la partícula individual de sedimento y el diámetro medio de los flóculos respectivamente,  $K_A$  es un parámetro de agregación y  $K_B$  uno de desagregación de flóculos,  $p$  y  $q$  son constantes empíricas determinados en laboratorio. El término  $n_f$  corresponde a la dimensión fractal y tiene valores típicos entre 1.7 y 2.2 con un valor promedio de 2 (Kranenburg, 1994; Winterwerp, 1998). Para partículas esféricas y valores de Reynolds menores a 1,  $n_f$  puede tomar un valor de 3 (Winterwerp, 2002).

## 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

### Instalación experimental

La columna de agua estaba contenida en un estanque de acrílico (5 mm espesor), de 50×24 cm<sup>2</sup> de base y 50 cm de alto. Dentro del estanque se encuentran ubicados dos agitadores laterales, cada uno de ellos activados por un motor y controlados por un potenciómetro. Cada agitador está compuesto por dos paletas rectangulares de 7×4 cm<sup>2</sup> de acrílico, de eje vertical. El cuerpo central

de la columna de agua se encuentra separado de los agitadores mediante dos mallas de acero inoxidable, con el objeto de disminuir las corrientes inducidas por el giro de las paletas. En las Figs. 1 y 2 se muestran fotografías de la instalación y de los agitadores.

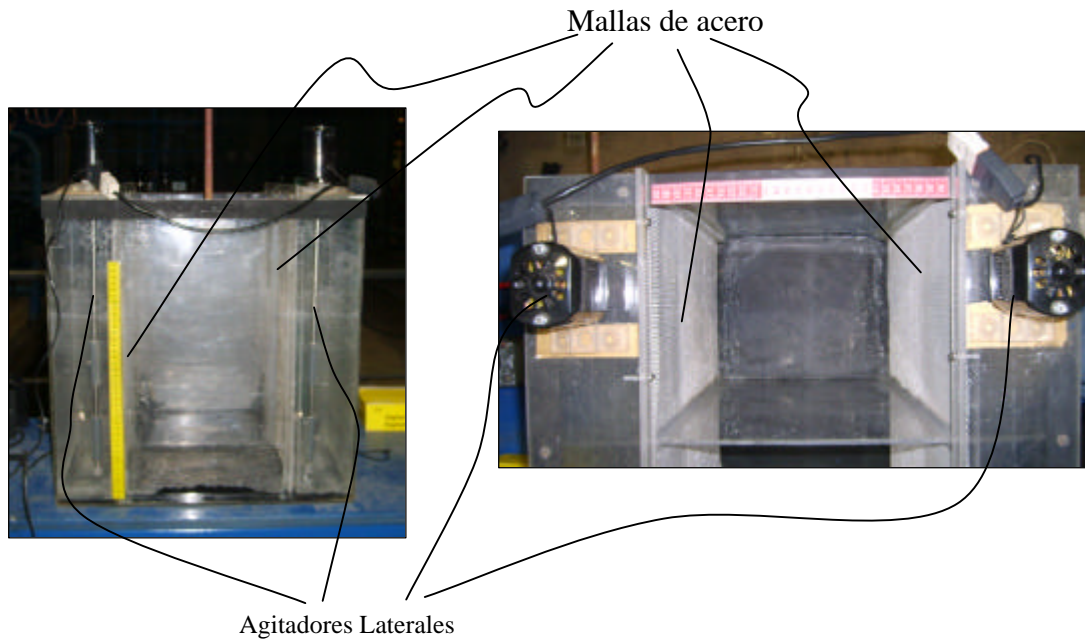


Fig. 1. Fotografía de la instalación experimental

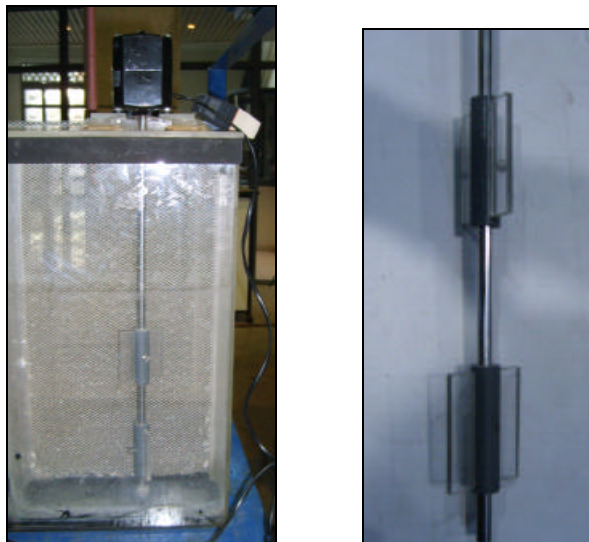


Fig. 2. Detalle de uno de los agitadores

Las velocidades se midieron con un anemómetro Doppler acústico de tres componentes, el que permite tomar datos a una tasa de 50 Hz, suficiente para caracterizar la turbulencia de los flujos

ensayados. Una cámara digital de alta velocidad (300 cuadros por segundo) permitió registrar el movimiento y tamaño de los flóculos en la columna de agua. El material utilizado en las experiencias fue bentonita, cuya distribución granulométrica (partículas individuales) fue determinada al microscopio, obteniéndose los siguientes tamaños representativos:  $d_{10} = 0,95 \mu\text{m}$ ,  $d_{20} = 1,2 \mu\text{m}$ ,  $d_{50} = 2,2 \mu\text{m}$ ,  $d_{80} = 65 \mu\text{m}$ ,  $d_{90} = 10 \mu\text{m}$ .

### Metodología experimental

Las características del flujo se definieron a partir de las mediciones del vector velocidad en tres planos verticales en la columna de agua. En nueve puntos de cada uno de estos planos se registró la velocidad. En cada punto se determinó la velocidad promedio, las correlaciones cruzadas (que son una medida de los esfuerzos de Reynolds), intensidades turbulentas y energía cinética turbulenta, para tres condiciones de agitación de la masa de agua, las que definen tres niveles de energía cinética turbulenta, designadas como baja, media y alta. Un resumen de los valores medios espaciales de estas variables se presenta en la Tabla 1. Los paréntesis angulares indican promedio espacial y temporal de la variable. (u, v, w) son las componentes del vector velocidad según los ejes (x, y, z), los que se encuentran definidos en la Fig. 3. Las primas indican la fluctuación turbulenta.

Tabla 1.- Características del flujo para las distintas condiciones experimentales

	Baja	Media	Alta
$\langle u \rangle$ [cm/s]	0.23	0.35	0.05
$\langle v \rangle$ [cm/s]	0.46	-0.10	0.00
$\langle w \rangle$ [cm/s]	-1.98	-2.34	-2.28
$\langle u'v' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	0.21	0.53	0.61
$\langle u'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	-0.54	-0.86	-1.02
$\langle v'w' \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	-0.06	-0.15	-0.24
$\langle u'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	4.14	5.97	7.38
$\langle v'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	3.87	4.77	5.37
$\langle w'^2 \rangle$ [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	3.83	4.80	4.82
k [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	5.66	7.61	9.23

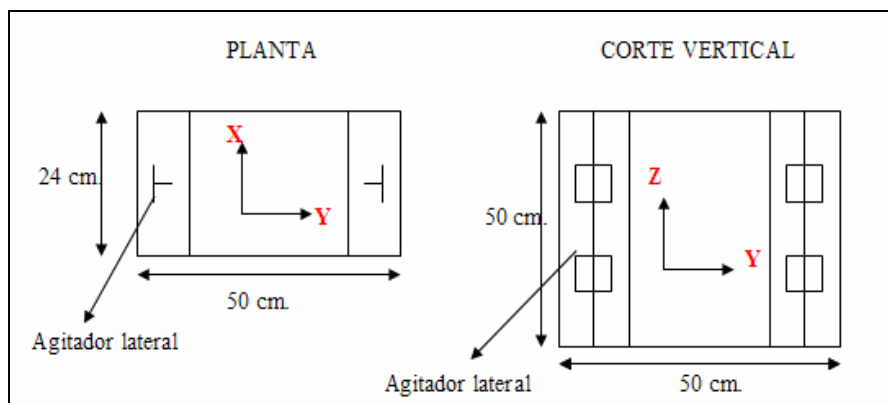


Fig. 3. Definición de los ejes de referencia

El registro de los flóculos en las filmaciones fue por contraste, según se esquematiza en la Fig. 4. Con el lente de la cámara se enfocaba un plano de grabación y la iluminación se hacía desde el lado opuesto a la cámara, mediante un foco de luz de corriente continua. Este modo de iluminación resultó ser el más efectivo para determinar el tamaño de las partículas. El área de grabación es de  $1 \text{ cm}^2$ , en un plano a 4 cm de la pared más próxima a la cámara.

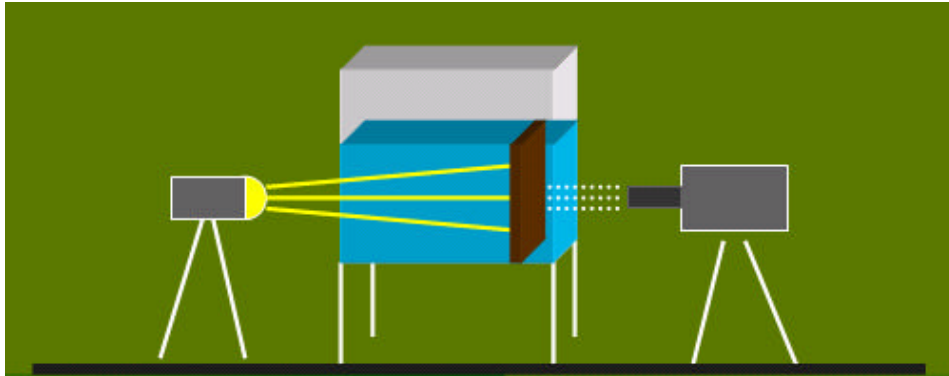


Fig. 4. Esquema del sistema de filmación e iluminación

Para cada experiencia, se grabó 1023 cuadros, con una velocidad de obturación de  $1/1000 \text{ s}$  y una resolución de  $512 \times 512$  píxeles, cada 4 minutos, durante 28 minutos. Antes de cada experiencia fue necesario calibrar la luz de tal manera de lograr el mayor contraste posible, pero sin saturar la imagen. Una vez guardados los videos en formato AVI, se procedió a analizarlos a través de una rutina programada en Matlab 6.5. Por cada experiencia se analizó 1 cuadro cada 15, totalizando 448 cuadros por experiencia. Para cada uno de los 448 cuadros, la rutina transforma todo el fondo a color negro y los flóculos en suspensión que se encuentran en el plano focal se definen de color blanco. De esta manera se evita trabajar con gradación de colores, y se facilita la identificación de los flóculos, pudiendo calcularse el área asociada a cada una de ellas, el número de partículas para cada frame y el área promedio de los flóculos. En la Fig. 5 se muestra un cuadro antes y después del cambio de color,



Fig. 5. Cambio de color de cada cuadro

## Condiciones experimentales

Las condiciones experimentales estuvieron definidas por tres niveles de turbulencia y tres concentraciones de bentonita. En la Tabla 2 se presentan las condiciones ensayadas y la identificación de cada experiencia.

Tabla 2.- Condiciones experimentales

Experiencias		
Experiencia	Energía Cinética Turbulenta [ $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ]	Concentración [gr/lit]
A	9.23	0.0129
B	7.61	0.0129
C	5.66	0.0129
D	9.23	0.0258
E	7.61	0.0258
F	5.66	0.0258
G	9.23	0.0515
H	7.61	0.0515
I	5.66	0.0515

## 4. PRESENTACIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS

El tamaño de los flóculos se obtuvo a partir del área, considerando un diámetro equivalente. En las Figs.6, 7 y 8 se presenta la evolución del valor medio de estos diámetros en el tiempo.

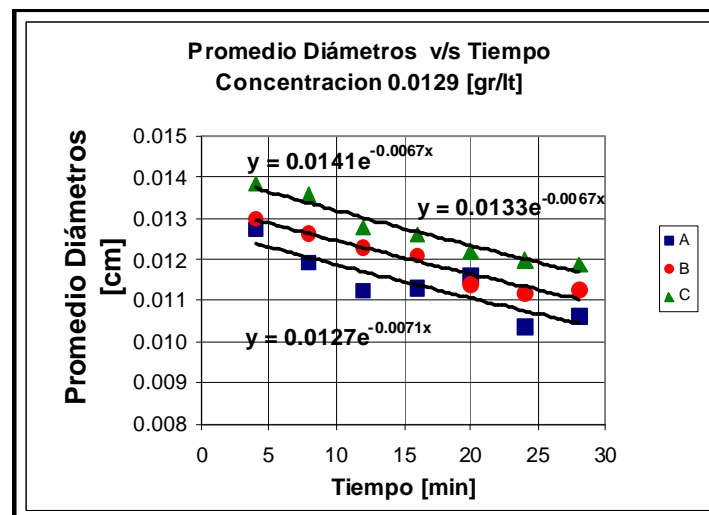


Fig. 6. Evolución del diámetro de los flóculos en el tiempo. Concentración de 0,0129 gr/lit, con el nivel de turbulencia como parámetro.

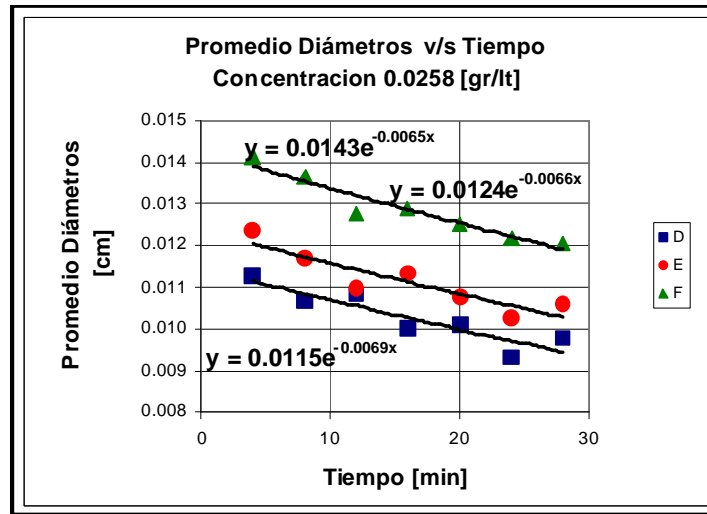


Fig. 7. Evolución del diámetro de los flóculos en el tiempo. Concentración de 0,0258 gr/l, con el nivel de turbulencia como parámetro.

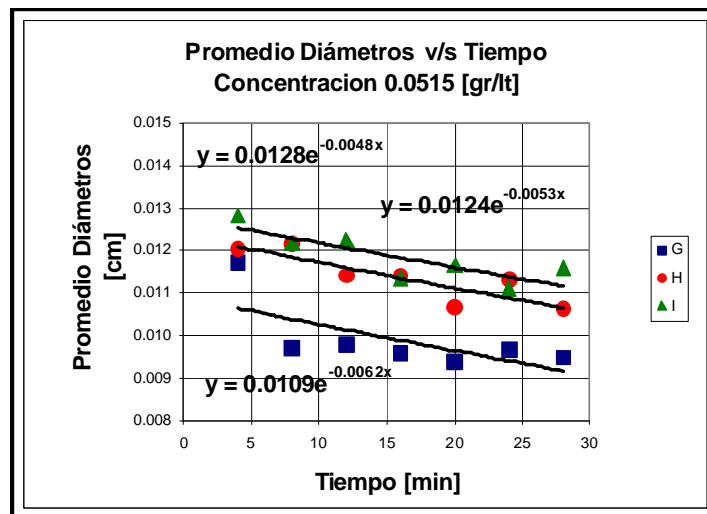


Fig. 8. Evolución del diámetro de los flóculos en el tiempo. Concentración de 0,0515 gr/l, con el nivel de turbulencia como parámetro.

Las curvas en las figuras anteriores corresponde a las de mejor ajuste, las que permiten determinar los parámetros  $A$  y  $B$  del modelo propuesto (Ec. 2). Mediante mínimos cuadrados se obtuvo los valores  $A = 1,5869 \times 10^{-7}$  y  $B = 1,6433 \times 10^{-4}$ , cuando el tamaño de los flóculos ( $D$  y  $D_0$ ) se expresa en cm; la energía cinética turbulenta,  $k$ , en  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ; la concentración,  $c$ , en gr/l y el tiempo,  $t$ , en minutos. La comparación entre los valores medidos y los que resultan de evaluar la



Ec.2 con los valores de  $A$  y  $B$  antes mencionados se presentan en la Fig. 9. El parámetro  $\alpha$  en dicha figura corresponde a  $\alpha = \frac{Ak}{B+c}$ .

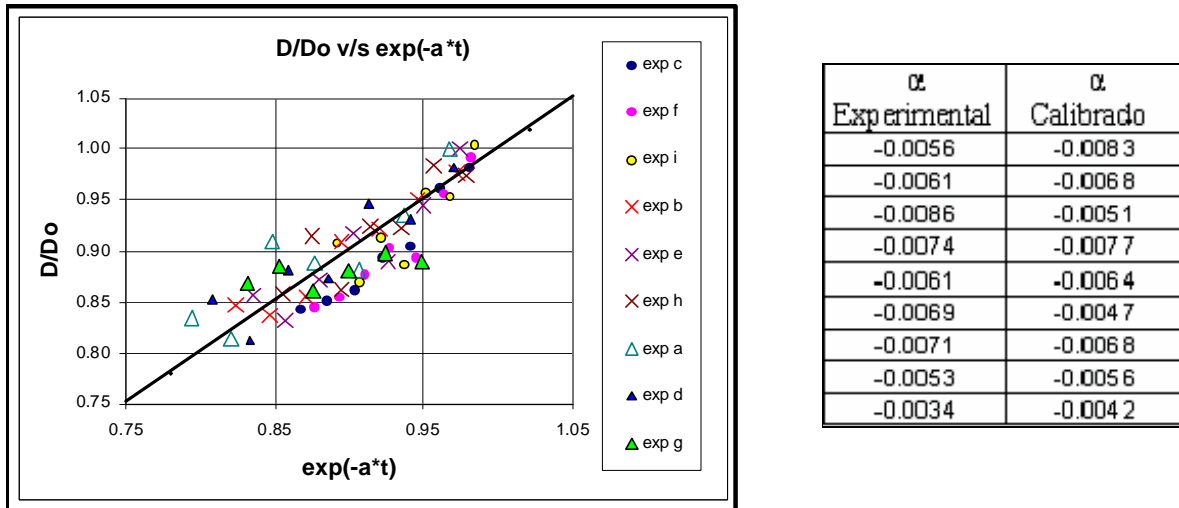


Fig. 9. Comparación entre los valores medidos del tamaño de los flóculos y los que resultan de evaluar el modelo propuesto con los valores de  $A$  y  $B$  ajustados a partir de los datos experimentales

El análisis del modelo de Winterwerp requirió resolver numéricamente la Ec. 3 y, mediante un ajuste de mínimos cuadrados, determinar los parámetros  $K_A$  y  $K_B$  del modelo, resultando los valores  $K_A = 1,2 \text{ cm}^2/\text{gr}$  y  $K_B = 0,039 \text{ s}^{1/2}/\text{cm}^2$ .

Para estimar el parámetro de disipación,  $G$ , se consideró que la tasa de disipación de energía está dada por  $\epsilon = \frac{U_c^3}{L_c}$ , donde  $U_c$  y  $L_c$  son escalas integrales de la velocidad y longitud características del flujo, respectivamente. Se utilizó las aproximaciones  $U_c = \sqrt{k}$  y  $L_c = b$ , donde  $b$  es el ancho de separación entre mallas de la instalación experimental.

En la solución numérica de la Ec. 3, se consideró los valores de  $n_f = 2$ ,  $p = 1$  y  $q = 0,5$ , propuestos por Winterwerp. Como tamaño de la partícula individual se tomó el  $d_{50}$ .

El ajuste de los datos experimentales al modelo de Winterwerp fue adecuado, como se aprecia en la Fig. 10, donde se presenta los datos y el modelo para las condiciones experimentales A a H.

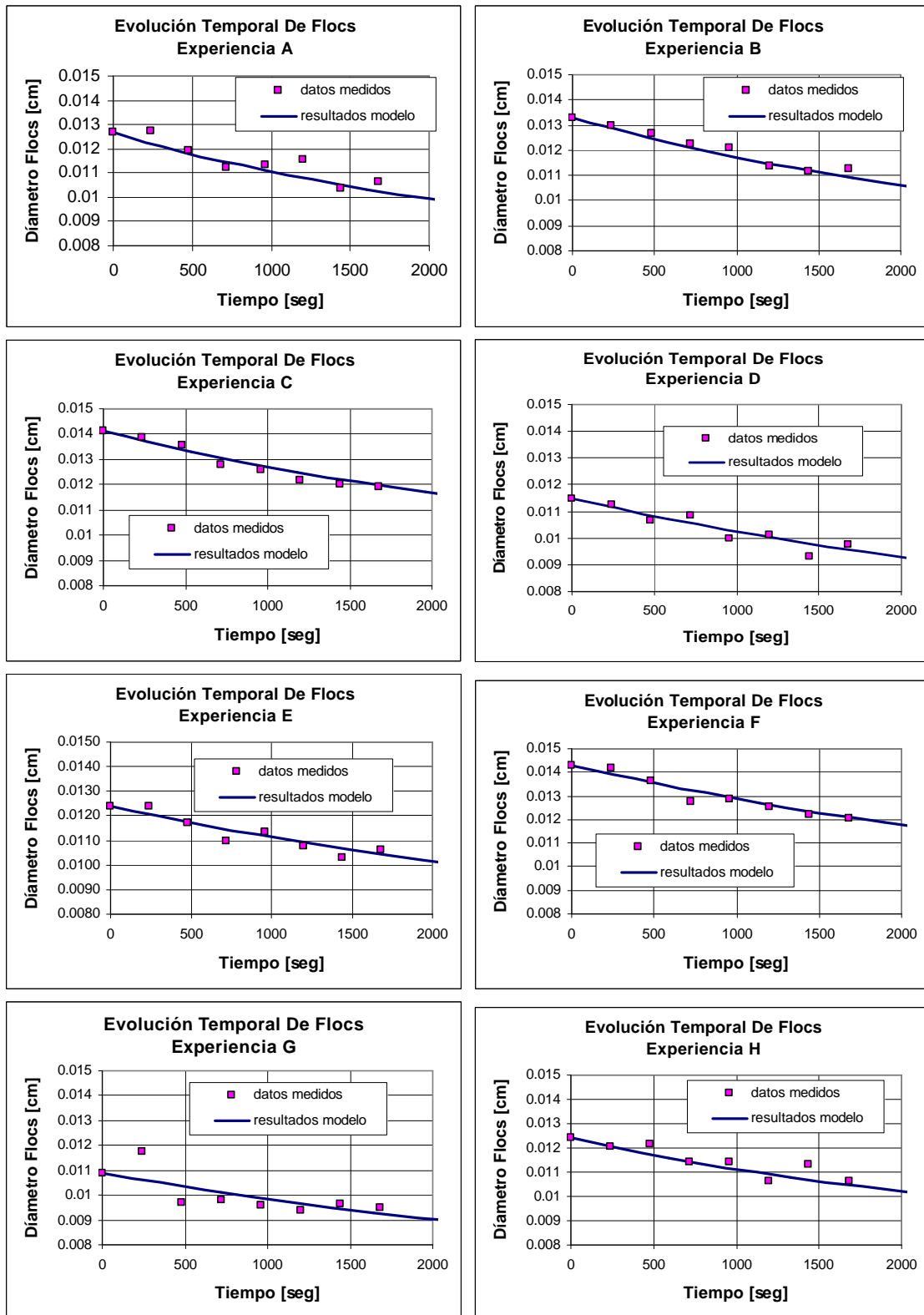


Fig. 10. Comparación entre los datos experimentales y el modelo de Winterwerp

El diámetro de equilibrio de los flóculos,  $d_{eq}$ , se obtiene al hacer  $\frac{dd_f}{dt} = 0$  en la Ec. 3, resultando:

$$d_{eq} = d_p + \frac{K_A c}{K_B \sqrt{G}} \quad (4)$$

El valor del diámetro de equilibrio para las distintas condiciones experimentales se presenta en la tabla de la Fig. 11, siendo entre 2 y 6 veces el tamaño medio de una partícula aislada.

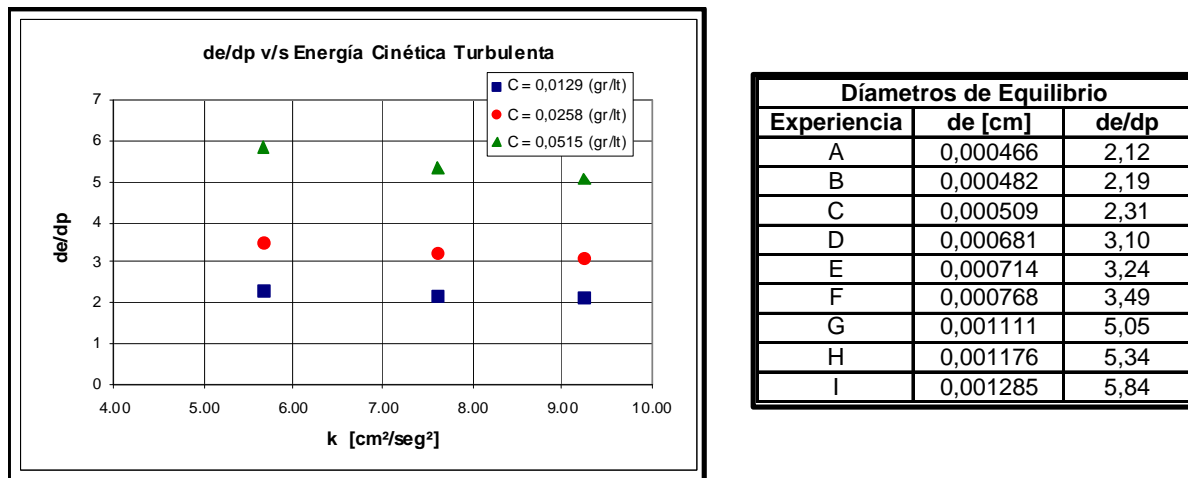


Fig. 11. Diámetro de equilibrio para las distintas condiciones experimentales

## 5. CONCLUSIÓN E INVESTIGACIÓN FUTURA

Un importante resultado de el trabajo presentado es haber diseñado una instalación experimental y definido una metodología para determinar los parámetros que definen el proceso de floculación de materiales cohesivos. Este proceso se modeló de dos formas, a través de un modelo fenomenológico de desagregación propuesto por los autores y utilizando el modelo de agregación-desagregación de Winterwerp (1998).

Aunque el modelo aquí propuesto se ajusta bastante bien a los datos medidos, la potencialidad del modelo de Winterwerp es mucho mayor ya que combina los dos efectos que hacen que un flóculo cambie de tamaño en un flujo turbulento.

El estudio, cuyos resultados aquí se han presentado, es sólo un eslabón de un proyecto más ambicioso en desarrollo por los autores seniors de este artículo, cual es la modelación y transporte de sedimentos –gruesos y finos- en cauces, considerando los procesos asociados a la sedimentación y formación de corrientes de turbidez. El modelo, presentado en el XVII Congreso Chileno de Hidráulica (González et al., 2005), está operativo para material granular no-cohesivo y ha sido usado en estudios de sedimentación en embalses. De este modo, la caracterización de

los parámetros que definen los modelos de agregación o desagregación de flóculos es fundamental para incorporar los modelos en los estudios que involucran la evolución de sedimentos cohesivos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile las facilidades brindadas para desarrollar este estudio.

## **REFERENCIAS**

González J., A. Tamburrino e Y. Niño , 2005, “Sedimentación en embalses: Modelo matemático y numérico de corrientes de turbidez y deltas de sedimento grueso”, XVII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Octubre 4 y 5, Valparaíso.

Kranenburg C., 1994, “The fractal structure of cohesive sediment aggregates” Estuarine, Coastal and Shelf Science, v. 39, pp 451-460.

Winterwerp J.C., 2002, “On the flocculation and settling velocity of estuarine mud”, journal of Continental Shelf Research 22, 1339–1360.

Winterwerp J.C., 1998, “A simple model for turbulence induced flocculation of cohesive sediment”, Journal of Hydralic Research, v. 36, n. 3, pp. 309-326.