

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA PRESENCIA DE BARRERAS EN FLUJOS DETRÍTICOS

Santiago Montserrat M., Aldo Tamburrino T. y Yarko Niño C.

Resumen:

En este artículo se presentan resultados experimentales sobre la interacción de flujos detríticos con barreras transversales, permeables e impermeables. Las primeras bloquean completamente el cauce y las segundas sólo de manera parcial. Las barreras fueron ubicadas en serie dentro de una canal rectangular por donde fluían mezclas de agua y sedimento. Los sólidos incorporados a la mezcla agua-sedimentos están constituidos por arena, grava y bentonita en distintas concentraciones volumétricas según el experimento.

Los resultados muestran que tanto las barreras permeables como impermeables se comportan adecuadamente como medidas de control aluvional. La elección del tipo de barrera dependerá de la estrategia de control aluvional utilizada. Se determinaron las características de los depósitos generados: volumen de retención, segregación del material depositado y, en el caso de barreras impermeables, pendiente de los depósitos. Las variables más relevantes que definen estas características son la concentración de finos y el espaciamiento entre barreras. La presencia de finos en la mezcla altera la reología del fluido intersticial, lo que incide directamente en el comportamiento del flujo y capacidad de los sólidos en depositarse. En cuanto al espaciamiento entre barreras, éste controla los efectos de la socavación al pie de ellas, lo que puede disminuir la capacidad de retención.

Debido a que son varios los parámetros adimensionales que representan distintos aspectos de la dinámica del flujo, todos ellos deben ser considerados en la modelación ya que, en general, no existe un dominio de un aspecto sobre otro. Por esto, se concluye que es muy difícil escalar, a dimensiones de prototipo, resultados obtenidos en estudios a escala reducida. Esta conclusión, sin embargo, no invalida los estudios experimentales, ya que estos permiten orientar el diseño de barreras dentro del régimen de flujo estudiado.

Palabras clave: Flujos detríticos – control aluvional – obras fluviales

1 INTRODUCCIÓN

A pesar de que el estudio de los flujos detríticos es una rama relativamente nueva de la hidráulica, la construcción de soluciones estructurales para la protección contra aluviones es un tema abordado desde la antigüedad en zonas donde la ocurrencia de estos flujos resultaba habitual. Ya en 1897 se promulgó la primera ley sobre protección y construcción de defensas aluvionales, correspondiente a la “Sabo Law” en Japón (Seminara y Tubino, 1993).

El problema de control aluvional consiste esencialmente en controlar y manejar grandes cantidades de sedimentos, arrastrados durante crecidas intensas y de corta duración. El control puede resultar en una intervención a gran escala del cauce, manejando los sedimentos en las distintas fases de los flujos detríticos: iniciación, transporte y depositación. Una variedad de soluciones han sido desarrolladas para satisfacer diferentes requerimientos, tales como prevenir flujos o controlar su iniciación, movimiento y depositación.

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. Casilla 228-3, Santiago, Chile.
(smontser@ing.uchile.cl, atamburr@ing.uchile.cl, ynino@ing.uchile.cl)

Artículo recibido el 3 de octubre de 2003, recibido en forma revisada el 26 de noviembre de 2004 y aceptado para su publicación el 14 de diciembre de 2004. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las “Instrucciones para autores”. En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

Muchas de estas soluciones han sido probadas arrojando resultados satisfactorios. En otros casos, pruebas en terreno de nuevos diseños se encuentran en progreso (Armanini et al., 1991; VanDine, 1996; Okubo et al., 1997).

Las estructuras de control aluvional pueden ser clasificadas como activas, diseñadas para aumentar la estabilidad de los depósitos, y pasivas, las que se introducen en el cauce con el fin de provocar un cambio particular en el flujo. Las obras pasivas pueden ser permeables o impermeables. Las obras impermeables (o presas) fueron utilizadas ampliamente con el fin de retener grandes volúmenes de sedimento, sin embargo, los grandes depósitos generados tras la construcción de estas presas eran llenados por el arrastre ordinario del cauce, disminuyendo su capacidad de retención. Además, la detención y depositación permanente de los sedimentos provoca un gran desbalance en el arrastre del cauce (Armanini et al., 1991; Fiebigger, 1997).

Posteriormente se estableció que el objetivo central del control aluvional no es detener todo el sedimento, sino sólo la fracción causante de los desastres, es decir, flujos detríticos y transporte a gran escala durante crecidas. Incluso, durante estos eventos, la idea es retener sólo la fracción más gruesa de los sedimentos. Flujos menores deben transitar libremente a través de estructuras permeables, llevando la cantidad de sedimentos correspondientes a la capacidad de arrastre del torrente (Armanini et al. 1991; Fiebigger, 1997).

Los criterios de diseño de obras de control aluvional resultan escasos y las solicitaciones y condiciones de operación a las cuales se ven expuestas resultan también inciertas (Armanini, 1997). Por ello se hace necesario el estudio de obras de protección con el fin de orientar el diseño y disminuir el riesgo aluvional (Ayala, 1996).

Algunos estudios experimentales sobre el comportamiento de presas permeables e impermeables han sido realizados. A partir de los experimentos se concluye que las barreras efectivamente retardan y reducen la máxima concentración de sedimentos y que esta efectividad se reduce en caso de que la presa se encuentre llena antes del evento, sin embargo, el efecto de retardación y reducción de la máxima concentración sigue siendo importante. Además, el grado de reducción de la concentración de sedimentos aumenta según la razón entre la capacidad de retención de la presa

y el volumen de sedimentos descargados (Senoo y Mizuyama, 1984).

En el caso de barreras permeables, se ha demostrado que su funcionamiento depende principalmente del espaciamiento existente entre sus elementos y de la concentración y tamaño del material arrastrado por el flujo. (Mizuyama et al., 1996; Lin et al., 1997). Senoo y Mizuyama (1984) establecen que en el caso de presas de apertura vertical (slit dam), si el tamaño de la apertura es menor que 1,5 veces el tamaño máximo de los sedimentos, todo el sedimento es atrapado por la estructura y éste nunca saldrá a través de la presa por la acción de pequeñas crecidas. Si la apertura es mayor a 2 veces el tamaño máximo de los sedimentos, la mayoría de los granos son atrapados en un principio y luego sacados de la presa por el agua que sigue al flujo detrítico.

En este trabajo se presentan resultados obtenidos de un estudio experimental sobre la interacción entre barreras transversales, permeables e impermeables, y flujos detríticos. Los experimentos se realizaron en un canal rectangular por el cual se hacía escurrir una mezcla heterogénea de agua y sedimentos. Dentro del canal, barreras transversales permeables o impermeables eran colocadas en serie las que interactuaban con el flujo detrítico. El estudio se enfoca principalmente a las características de los depósitos generados tras las barreras.

Las barreras permeables fueron materializadas como una barrera simple de altura determinada y de ancho igual al del canal, de manera que el flujo se desarrolla por sobre la barrera. Por su parte, la barrera impermeable fue materializada como una barrera con una apertura central de ancho (b_o) aproximado 1/3 del ancho total de la barrera y altura suficiente como para evitar el rebase del flujo por sobre ésta.

2 ANÁLISIS DIMENSIONAL

La cuantificación de las corrientes de detritos desde el punto de vista hidráulico y mecánico fluvial constituye un problema altamente complejo que aún no ha sido completamente resuelto. El enfoque analítico requiere tomar en cuenta los esfuerzos que se generan en la masa líquida, la interacción líquido-sólido e interacción de las partículas sólidas entre sí. Como es de esperar, este enfoque no es general, sino que usualmente parcializa el análisis tomando en cuenta las

fuerzas que predominan en las interacciones o el comportamiento reológico de la mezcla. Además, esta aproximación al problema a menudo requiere algunos parámetros que son determinados experimentalmente, reduciendo aún más su generalidad. De este modo, resulta natural y adecuado enfrentar el problema de manera experimental a escala reducida, con el objeto de estudiar los aspectos más relevantes del fenómeno de los flujos detríticos y su interacción con estructuras ubicadas en el cauce.

Para el caso del flujo de una mezcla de un fluido con un material granular no cohesivo, de tamaño relativamente uniforme interactuando con una barrera vertical ubicada en un cauce de sección rectangular, las variables involucradas en el problema son:

- c_v , concentración en volumen de los sólidos
- c_{vmax} , concentración máxima o de empaquetamiento de los sólidos
- ϕ , ángulo de fricción interna de los sólidos
- d , tamaño característico de los sólidos
- ρ_s , densidad de los sólidos
- $(\rho_s - \rho_f)$, densidad de los sólidos relativa a la del fluido
- η , viscosidad dinámica equivalente del fluido intersticial
- h , altura característica del flujo
- \bar{u} , velocidad característica del flujo
- S_o , pendiente del fondo
- b , ancho del canal
- H , altura de la barrera
- b_0 , ancho de la abertura de la barrera
- L , distancia entre las barreras
- g , aceleración de gravedad

Los parámetros adimensionales que se generan son los siguientes:

$$\begin{array}{ccccc}
 \Pi_1 = c_v & \Pi_2 = c_{vmax} & \Pi_3 = tg\phi & \Pi_4 = S_o & \Pi_5 = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s} \\
 \Pi_6 = \frac{d}{h} & \Pi_7 = \frac{b_0}{b} & \Pi_8 = \frac{b}{h} & \Pi_9 = \frac{h}{H} & \Pi_{10} = \frac{L}{H} \\
 \Pi_{11} = \frac{\bar{u}^2}{gh} & \Pi_{12} = \frac{\rho_s \bar{u} h}{\eta} & & &
 \end{array}$$

Es frecuente encontrar que, en lugar de la concentración máxima, se utilice la concentración

lineal, definida como: $\lambda = \left((c_v / c_{vmax})^{\frac{1}{E}} - 1 \right)^{-E}$.

Para las arenas ensayadas, $c_{vmax} \sim 65\%$.

La combinación de algunos de los parámetros anteriores permite generar los parámetros clásicos que surgen en los flujos de mezclas, a saber, el número de Bagnolds (Ba), el número de Savage (Sa) y el número de fricción (N_f), definidos como:

$$Ba = \frac{\rho_s \gamma d^2 \lambda^{\frac{1}{E}}}{\eta} \quad (1)$$

$$Sa = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_f} \frac{\gamma^2 d^2 \lambda^{\frac{1}{E}}}{gh} \quad (2)$$

$$N_f = \frac{c_v}{1 - c_v} \frac{(\rho_s - \rho_f) gh}{\gamma \eta} tg\phi \quad (3)$$

En las relaciones anteriores se ha reemplazado el cociente \bar{u}/h por la tasa de deformación angular, γ . Los parámetros anteriores tienen sentido físico claro. El número de Bagnolds es una medida de la razón entre los esfuerzos generados por las colisiones entre partículas (esfuerzos dispersivos) y los viscosos, el número de Savage indica la relación entre los esfuerzos dispersivos y el peso sumergido de las partículas y el número de fricción mide la relación de la fricción entre partículas (esfuerzos de Coulomb) respecto al esfuerzo de origen viscoso intersticial. De este modo, se utiliza Ba , Sa y N_f en lugar de los parámetros Π_3 , Π_{11} y Π_{12} .

En general, la presencia de material fino en la mezcla se considera en el análisis representando a la mezcla de agua con finos como un fluido equivalente, con densidad y reología propia. La densidad de este fluido equivalente está dada por

$$\rho_f = c_b \rho_b + (1 - c_b) \rho$$

donde c_b es la concentración en volumen del material fino, ρ_b es su densidad y ρ es la densidad del agua. La viscosidad equivalente de la mezcla de agua y finos, η , debe determinarse de ensayos reológicos.

Dadas las condiciones experimentales que se reportan en este artículo, varios de los parámetros adimensionales antes indicados pueden excluirse del análisis ya que se mantienen constantes o varían poco en las experiencias. Para las experiencias con barreras impermeables, el parámetro Π_7 es irrelevante ($b_0 = 0$). En el caso de las barreras con la abertura central, la altura de ellas era tal que aseguraba que no existiese flujo sobre ellas, por lo que se excluyen los parámetros que involucran H . Además, las experiencias se realizaron para una sola abertura ($b_0 = 6$ cm), por lo que en este caso también se excluye Π_7 . Combinando Π_9 y Π_{11} se forma el parámetro \bar{u}^2/gH , que es una medida de la energía cinética del flujo sobre la barrera respecto a la potencial. Considerando más relevante la energía específica total (E) del flujo sobre la barrera que la altura de velocidad, el parámetro adimensional de interés es E/H . Estimaciones de E indican que los experimentos se realizaron para un estrecho rango de E/H , entre 1,7 y 2,4, por lo que para efectos del análisis puede considerarse como un parámetro que se mantuvo aproximadamente constante en la experimentación.

La generación de los números de Bagnold y Savage es tal que en ellos se incorpora los efectos de la concentración lineal y la densidad relativa de las partículas, además de los parámetros Π_{12} y Π_{11} . De este modo, cuatro de los parámetros adimensionales (Π_2 , Π_5 , Π_{11} y Π_{12}) se reducen a dos (Ba y Sa).

Para determinar el valor de $\dot{\gamma}$, es necesario conocer el perfil de velocidades de la mezcla, sin embargo, este dato es difícil de obtener en la práctica, por lo que generalmente se utiliza el cociente \bar{u}/h , como resulta del análisis dimensional anterior. En este artículo se considerará como velocidad característica del flujo la velocidad superficial.

En 1954, Bagnold, a partir de resultados experimentales, determinó tres regímenes de flujo, dependiendo del valor de Ba : régimen macro viscoso ($Ba < 40$), régimen de transición ($40 < Ba < 450$) y régimen inercial ($Ba > 450$). De esta manera, para valores de $Ba < 40$ el flujo queda dominado principalmente por el esfuerzo debido a la viscosidad del fluido intersticial, mientras que para $Ba > 450$ lo que domina es el choque entre partículas. Sin embargo, Bagnold en sus experimentos utilizó partículas esféricas neutralmente boyantes, de manera que escondió los efectos de la gravedad, y por ende, la fricción entre partículas (esfuerzos de Coulomb). La importancia relativa entre los esfuerzos debido a la fricción y al choque entre partículas puede ser evaluado por el número de Savage. Según Iverson (1997), en 1989 Savage y Hutter estimaron que si $Sa > 0.1$, los esfuerzos debido a las colisiones entre partículas dominan por sobre la fricción entre ellas. Se puede observar que para las condiciones experimentales de Bagnold, es decir partículas de boyancia neutra, $Sa \rightarrow \infty$. La relación entre los esfuerzos friccionales y viscosos se mide a través del número de fricción. Para valores de $N_f > 2000$, los esfuerzos friccionales predominan por sobre los esfuerzos viscosos (Iverson, 1997).

Además de los parámetros acá presentados, y de las dificultades para determinar las variables que los definen, es posible encontrar en la literatura varios otros que pueden resultar importantes dependiendo de las características del flujo y del objetivo del estudio. Esta multiplicidad de parámetros adimensionales, y la cantidad de fenómenos que estos describen, revelan las dificultades a que se está expuesto si se quiere escalar flujos detríticos a instalaciones de laboratorio.

3 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA UTILIZADA

Los experimentos fueron realizados en un canal rectangular de lecho fijo de 6,5 m de largo, 20 cm de ancho y 40 cm de alto disponible en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Una de las paredes del canal es de acrílico transparente, el que permite la visualización del flujo. Los experimentos fueron realizados para dos pendientes del canal (S_0), 15 y 32%. En los experimentos, una mezcla de 130 lts. de agua y sedimentos se deja escurrir por el canal desde una cámara de carga ubicada en la cabecera del canal. La mezcla sale de la cámara de carga a través de una compuerta de apertura 1 ó 2 cm y de ancho igual al del canal (20 cm).

Dentro de la cámara, la mezcla era agitada mecánicamente con el fin de mantener condiciones de mezcla homogénea.

La fracción sólida agregada a la mezcla consiste en una mezcla de arena ($d_{50}=0,48$ mm), gravilla ($d_{50}=9$ mm) y bentonita en distintas proporciones. La cantidad de gravilla se mantuvo constante en todos los experimentos, con un valor del 10% del total del peso de los sólidos. La cantidad de arena varió entre un 85% y 90% del total del peso de los sólidos dependiendo de la cantidad de bentonita (c_b) agregada a la mezcla. Debido al tamaño de la gravilla, esta fue incorporada inmediatamente a la salida del flujo del estanque. No se incorporó dentro del estanque de mezcla debido a su tendencia a depositar y bloquear la salida. Tres distintas concentraciones volumétricas de sólidos fueron ensayadas: 25%, 30% y 35%.

Se realizaron experiencias con dos tipos de barreras: una de ellas consiste en presas del tipo impermeables materializadas como barreras verticales de 8 cm de alto construidas en madera de 2 cm de espesor. El otro tipo de barrera ensayada consiste en una barrera permeable materializada como una barrera vertical de 30 cm de altura y una abertura central de 6 cm de ancho y 30 cm de alto, también en madera de 2 cm de espesor.

Las barreras impermeables fueron ensayadas individualmente y en serie, variando el número de barreras colocadas en el cauce entre 1 y 7. Se ensayaron dos espaciamientos de las barreras. Una de las distancias de separación (L) fue determinada por la línea horizontal entre la cresta de la barrera y su intersección con el lecho, y la otra ($2L$) por 2 veces esta distancia. En cuanto a las barreras permeables, éstas fueron espaciadas en una distancia horizontal de 48 cm y se colocaron 3 barreras en serie. Fueron ensayadas considerando sólo una pendiente del lecho, igual a 15%.

Tres cámaras de video fueron utilizadas para registrar los experimentos, una de ellas ubicada frente a la pared de acrílico, la cual capturaba vistas laterales del flujo en el sector de ubicación de las barreras, la segunda ubicada en dirección normal a la superficie libre, la cual capturaba vistas planas de la superficie del flujo suficientemente aguas arriba de los obstáculos, con el fin de medir las características del flujo sin influencia de éstos. La tercera cámara fue ubicada en dos posiciones distintas, dependiendo del tipo de experimento. En el caso de experimentos con barreras impermeables, ésta fue utilizada para capturar vistas laterales del flujo suficientemente aguas arriba de las barreras, con el fin de medir las características del flujo no influido por aguas abajo. En el caso de experimentos con barreras permeables, la cámara fue ubicada sobre éstas, en forma normal a la superficie libre, capturando así vistas planas de la superficie libre al pasar entre las barreras. Pequeños trozos de papel fueron utilizados como trazadores para determinar la velocidad de la superficie libre. El movimiento de los trazadores era registrado por la cámara ubicada en forma normal a la superficie libre y aguas arriba de las barreras.

La distancia entre la compuerta de salida y las cámaras de video utilizadas para registrar las características del flujo de aproximación, altura y velocidad, resulta suficiente como para considerar en todos los experimentos que el flujo de aproximación base es uniforme. De esta manera, la magnitud de la apertura de la compuerta sólo condiciona el caudal del escurrimiento, pudiendo prescindirse de esta variable en la formulación de los parámetros adimensionales.

Debido a las características de la fracción sólida agregada a la mezcla, en particular producto de la presencia de bentonita, fue necesario caracterizar la reología del fluido intersticial con el fin de estimar la viscosidad equivalente (η) de éste, constituido por la mezcla agua-bentonita.

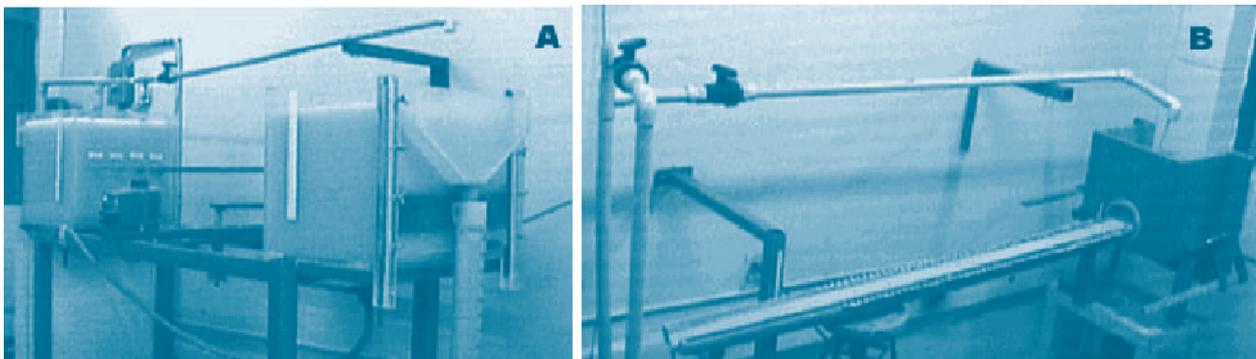


Figura 1. Instalaciones experimentales utilizadas para determinar la reología de la mezcla agua-bentonita. A) viscosímetro de Poiseuille, B) canal semi circular.

Para ello fue necesario construir dos instalaciones experimentales: la primera de ellas consistente en un viscosímetro de Poiseuille y la segunda en un canal semi circular el que permite observar la tasa de deformación del elemento de fluido (Fig. 1).

4 RESULTADOS

4.1 Reología de la mezcla agua-bentonita

A partir de experiencias realizadas en el viscosímetro de Poiseuille (Fig. 1A), se descubrió la existencia de un esfuerzo de fluencia de la mezcla, ya que para algunas concentraciones de bentonita y condiciones de carga no hubo flujo a través de la instalación. De esta manera, se determinó que la mezcla no queda bien representada por un modelo reológico Newtoniano. La existencia del esfuerzo de fluencia pudo ser claramente observado en las experiencias realizadas en el canal semi circular. Un ejemplo de la visualización de la tasa de deformación del elemento de fluido puede ser observada en la Fig. 2. Se ve claramente que existe deformación sólo en la cercanía de la pared, donde los esfuerzos de corte son mayores, pero en la zona central el esfuerzo no es capaz de deformar al fluido, evidenciando que en esa región no se ha superado el esfuerzo de fluencia.

A partir de la información experimental se determinó que la mezcla agua-bentonita queda bien representada por un modelo reológico plástico de Bingham:

$$\tau = \tau_f + K\dot{\gamma}^n \tag{8}$$

donde τ es el esfuerzo de corte, τ_f el esfuerzo de fluencia y K es el coeficiente de viscosidad. Para un fluido newtoniano $\tau_f = 0$ y K corresponde a la viscosidad dinámica. Los valores de τ_f y K , en función de la concentración volumétrica de bentonita, c_b , pueden ser observados en los gráficos de la Fig. 3.

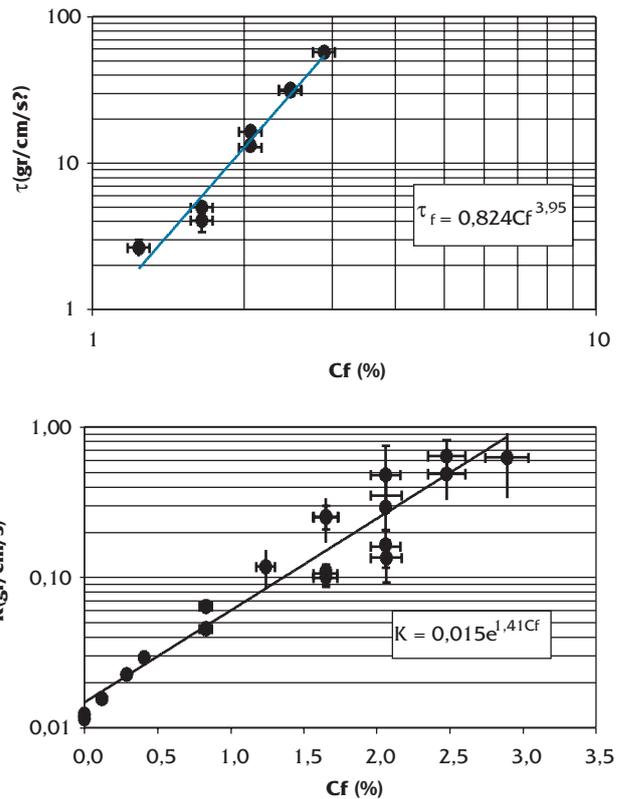


Figura 3. Variación del coeficiente de viscosidad, K , y esfuerzo de corte, τ_f , en función de la concentración volumétrica de bentonita, c_b

De esta forma, y para el modelo reológico sugerido para la mezcla agua-bentonita (plástico de Bingham) se obtiene que la viscosidad equivalente puede ser estimada como:

$$\eta = K \left(1 - \frac{2\tau_f R_h}{3Ku} \right) \tag{4}$$

donde R_h corresponde al radio hidráulico y \bar{u} es la velocidad media del flujo detrítico o alguna velocidad característica de la mezcla. Al igual que para el caso de $\dot{\gamma}$, se considera como velocidad característica del flujo detrítico su velocidad superficial, u .

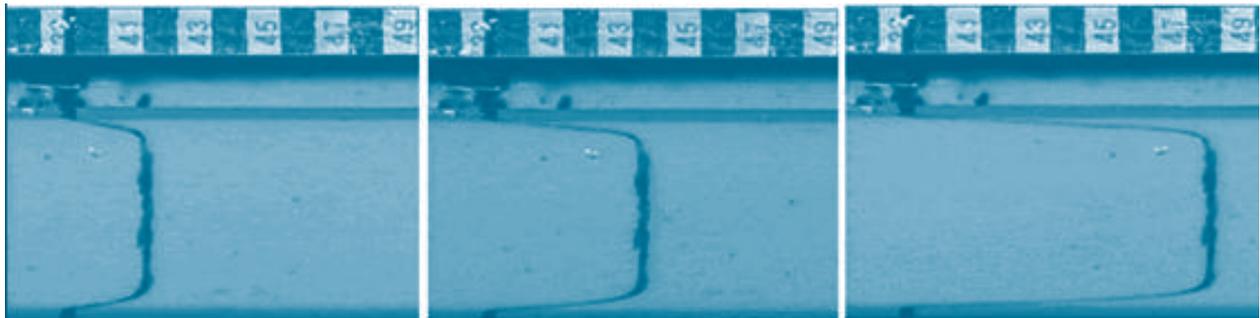


Figura 2 Existencia de esfuerzo de fluencia. Visualización de la distribución de velocidades en la superficie libre para las concentraciones mayores de bentonita

4.2 Caracterización del flujo detrítico.

A partir de datos experimentales y de las características de la mezcla agua-sedimento, es posible estimar los parámetros adimensionales que permiten caracterizar la dinámica del flujo: Ba , Sa , y N_f . Al observar detenidamente los flujos generados, se nota una gran interacción de las partículas de mayor tamaño (gravilla). Comparando los regímenes entregados por los adimensionales con los observados en los experimentos, se concluye que tanto la arena como la gravilla son relevantes en el cálculo de Ba y Sa . Finalmente se concluyó que un diámetro único no es capaz de representar la dinámica de los flujos generados y que por lo tanto es necesario considerar las distintas fracciones granulométricas en la cuantificación de la inercia asociada al choque entre partículas. Una buena caracterización de los flujos se obtiene al ponderar el Ba y Sa por la cantidad de arena y grava presente en la mezcla (Montserrat et al., 2004).

A partir de los resultados experimentales, se obtiene que los flujos ensayados son supercríticos y turbulentos: Además, éstos se encuentran dentro del rango de transición a inercial ($Ba > 40$) indicando que tanto la interacción entre partículas (choques de partículas) como la viscosidad resultan importantes en la dinámica del flujo. En cuanto al Sa , el cual toma en cuenta el efecto relativo entre el choque entre partículas y fricción entre las mismas (esfuerzos de Coulomb), éste permanece por sobre el valor de 0,1, indicando que es el choque entre partículas el que predomina en los flujos. El número de fricción, N_f , resulta mayor a 2000, indicando que la viscosidad predomina por sobre los esfuerzos friccionales.

4.3 Interacción del flujo con barreras transversales

4.3.1 Interacción del flujo con barreras impermeables

En general, los flujos detríticos ensayados corresponden a flujos supercríticos y turbulentos según la clasificación utilizada para flujos en ausencia de mezclas sólidas. La barrera actúa como una condición de aguas abajo, forzando la aparición de un flujo subcrítico inmediatamente aguas arriba de ella y un resalto hidráulico que compatibiliza ambos regímenes de escurrimiento. La aparición de una condición de remanso inmediatamente aguas arriba de la barrera disminuye la velocidad del flujo y su capacidad de arrastre, permitiendo la depositación de parte de los sólidos transportados.

Tanto el resalto hidráulico como el paso del flujo por sobre la barrera, semejante al típico paso de un flujo sobre un vertedero de pared delgada, hacen que el flujo pierda energía facilitando la depositación de los sedimentos en las barreras de aguas abajo. Sin embargo, y dependiendo del espaciamiento entre barreras, la retención en las barreras de aguas abajo puede ser limitada debido a la socavación producida por el chorro que cae desde la barrera de aguas arriba sobre los depósitos. El efecto de la socavación del chorro de aguas arriba pudo ser eliminado, para ciertas condiciones experimentales, aumentando el espaciamiento entre barreras. De esta forma, el impacto del chorro de la barrera de aguas arriba cae fuera de la zona de depositación, permitiendo el desarrollo completo de la zona de remanso aguas arriba de la barrera de aguas abajo (Fig.).

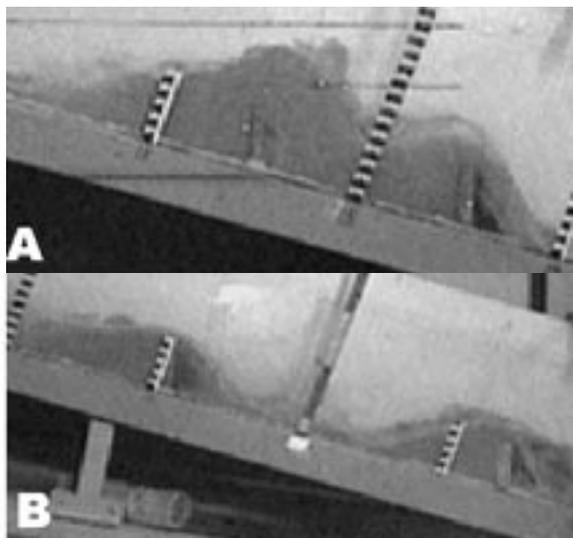


Figura 4. A) Depósitos restringidos por el chorro de aguas arriba, B) depósitos sin influencia del chorro de aguas arriba.

Tres características de los depósitos generados por las barreras fueron investigados: i) el volumen retenido, expresado como un porcentaje de una capacidad de retención nominal, V_{*} , esta última definida como el volumen contenido entre la barrera, el lecho y la línea horizontal que une la cresta de la barrera y el lecho; ii) la pendiente de los depósitos; y iii) la distribución granulométrica de los sólidos retenidos por las barreras.

Los resultados sobre los depósitos generados tras las barreras impermeables se presentan en los gráficos de la Fig. 5. Tanto en la Fig. 5A como Fig. 5C se observa que la mayor retención se produce en la barrera de aguas arriba, demostrando la importancia en la separación entre barreras si el objetivo

de control consiste en maximizar la retención de los sedimentos. Además, esta disminución en los niveles de retención respecto de la primera barrera acusa el efecto que produce la socavación del chorro que cae de la barrera de aguas arriba sobre los depósitos generados tras la barrera siguiente. El efecto de la socavación queda claramente demostrado en la Fig. 5C, donde los depósitos aguas abajo de la primera barrera no superan el 100%, ya que éstos son removidos por el chorro de la barrera de aguas arriba. Lo anterior muestra además la importancia de la pendiente en los efectos de la socavación para barreras con igual espaciamiento ($L=H/S_o$).

En las Fig. 5A y Fig. 5C se aprecia que en la primera barrera las mayores retenciones se registran para los flujos de mayor concentración de sólidos (c_v). Sin embargo esta dependencia se pierde en las barreras de aguas abajo mostrando que la retención queda más condicionada por la socavación del chorro que cae de la barrera de aguas arriba o limitación de espacio debido al poco espaciamiento entre barreras que por las características propias de la mezcla y del escurrimiento.

En la Fig. 5B se observan experiencias realizadas con una apertura de compuerta de 2 cm. A diferencia de los otros gráficos, ésta presenta los menores niveles de retención en la primera barrera. Lo anterior se explica atendiendo a que una mayor apertura de compuerta genera flujos de mayor caudal, es decir de mayor energía.

Este exceso de energía es capaz de arrastrar el material que tiende a depositarse tras la primera barrera, además de disminuir la zona de remanso, es decir la zona de depositación. Sin embargo, se observa que en la segunda barrera se alcanzan niveles de depositación similares a los registrados en la Fig. 5A demostrando que la primera barrera es capaz de reducir efectivamente el exceso de energía presentado por el flujo.

Los efectos de la socavación sobre los depósitos pudo ser eliminada, para ciertas condiciones experimentales, aumentando el espaciamiento entre barreras. Estas experiencias pueden ser observadas en la Fig. 5D, donde se presentan experiencias con separación entre barreras de $L=2H/S_o$, es decir el doble que en los casos anteriores. En la Fig. 5D se observa que en el caso de mezclas con bajo contenido de finos (c_b) la retención es prácticamente constante en todas las barreras, mostrando que el efecto de la socavación fue eliminado. Sin embargo, para las experiencias con mayor contenido de finos la distancia adoptada aún no es suficiente y los efectos de la socavación siguen presentes, indicando que una mayor concentración de finos, es decir, mayor viscosidad de la mezcla, obligan a un mayor espaciamiento entre barreras con el fin de eliminar los efectos de socavación sobre los depósitos.

En general se observa que mezclas de mayor c_b presentan menores niveles de retención,

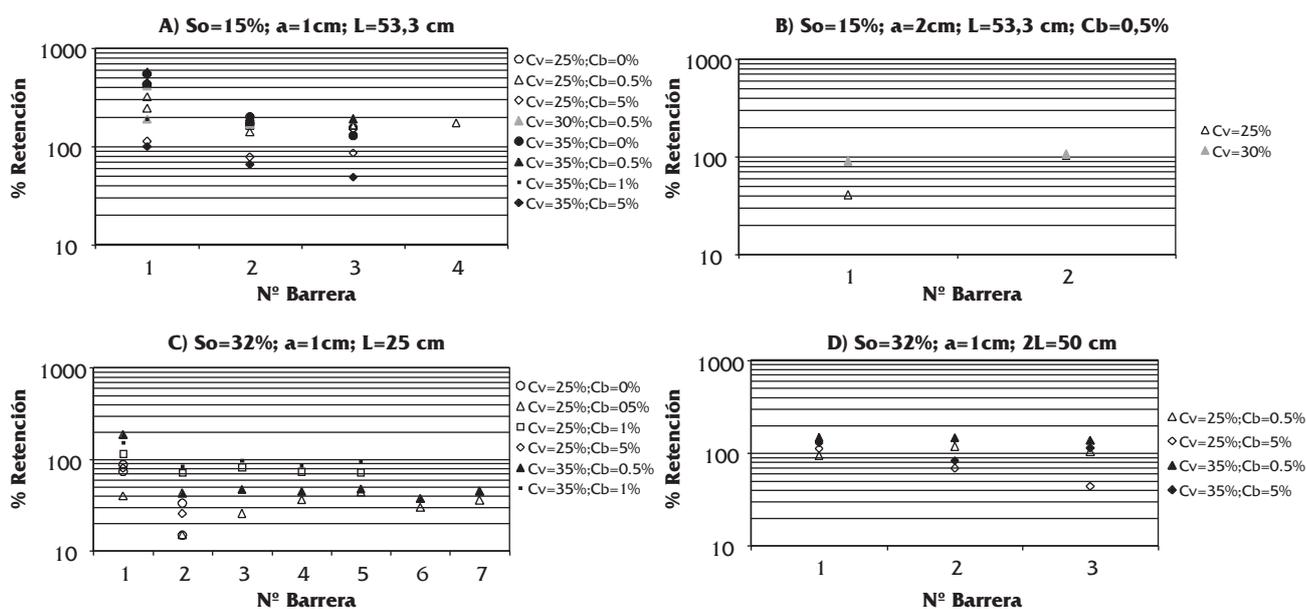


Figura 5. Porcentaje de retención en barreas impermeables. c_b , concentración de finos (expresada como el porcentaje en peso del total de los sólidos), a , apertura de la compuerta.

indicando que mayores concentraciones de finos limitan la retención y amplifican los efectos de la socavación sobre los depósitos. Altos niveles de material cohesivo aumentan en forma considerable la viscosidad de la mezcla disminuyendo la velocidad de sedimentación de las partículas lo que dificulta su depositación en las barreras.

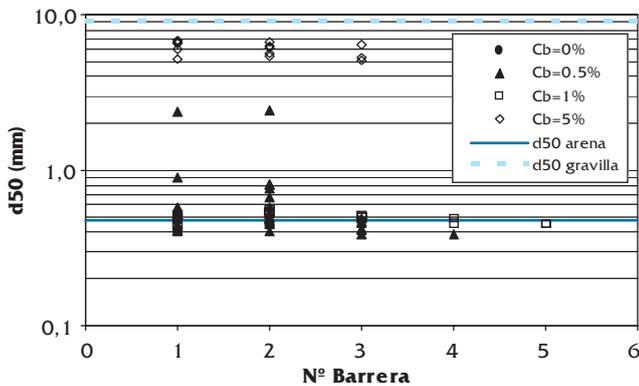


Figura 6. Diámetro medio de los sedimentos (d_{50}) encontrados en los depósitos

Esta disminución en la capacidad de sedimentación afecta de distinta forma a los distintos tamaños de partículas presentes en la mezcla, es decir, altos niveles de material cohesivo favorecen la segregación del material sólido. Al aumentar la viscosidad de la mezcla debido a altas concentraciones de material cohesivo, las partículas más finas son arrastradas con mayor facilidad por el flujo, no pudiendo depositar en las barreras. Esto queda demostrado en la Fig. 6, la que muestra el diámetro medio (d_{50}) de los sedimentos deposita-

dos tras las barreras. En ella se aprecia que para valores de $c_b=5\%$ los depósitos quedan constituidos principalmente por grava, mientras que para bajas concentraciones de bentonita la granulometría de los depósitos prácticamente no difiere de la granulometría original.

En la Fig. 7 se observan los resultados obtenidos de la pendiente de los depósitos inmediatamente aguas arriba de las barreras. Se observa que para las experiencias realizadas con $S_o=15\%$, la gran mayoría de las pendientes supera el valor de la horizontal (Fig. 7A y Fig. 7B), lo que concuerda con los resultados presentados en la Fig. 5, valores de S_d mayores que la horizontal corresponden a retenciones superiores al 100%. Algo similar se observa en el gráfico de la Fig. 7D ($S_o=32\%$), donde prácticamente todas las pendientes registradas son cercanas o superan el valor de la horizontal. A su vez, estas experiencias presentan retenciones cercanas o superiores al 100%. Sin embargo, en las experiencias presentadas en el gráfico de la Fig. 7C, experiencias de igual pendiente que las del gráfico de la Fig. 7D, se observa una mayor dispersión de los datos y que éstos pueden superar o no el valor de la horizontal. Estos resultados ratifican la relevancia de la socavación producida por el chorro que cae de la barrera de aguas arriba sobre los depósitos en estos experimentos. La gran variabilidad, tanto en los valores de S_d como del porcentaje de retención, registrada en estos experimentos, se atribuye a que los depósitos generados se encuentran fuertemente condicionados por los efectos de la socavación y estructura del flujo al pasar por las barreras.

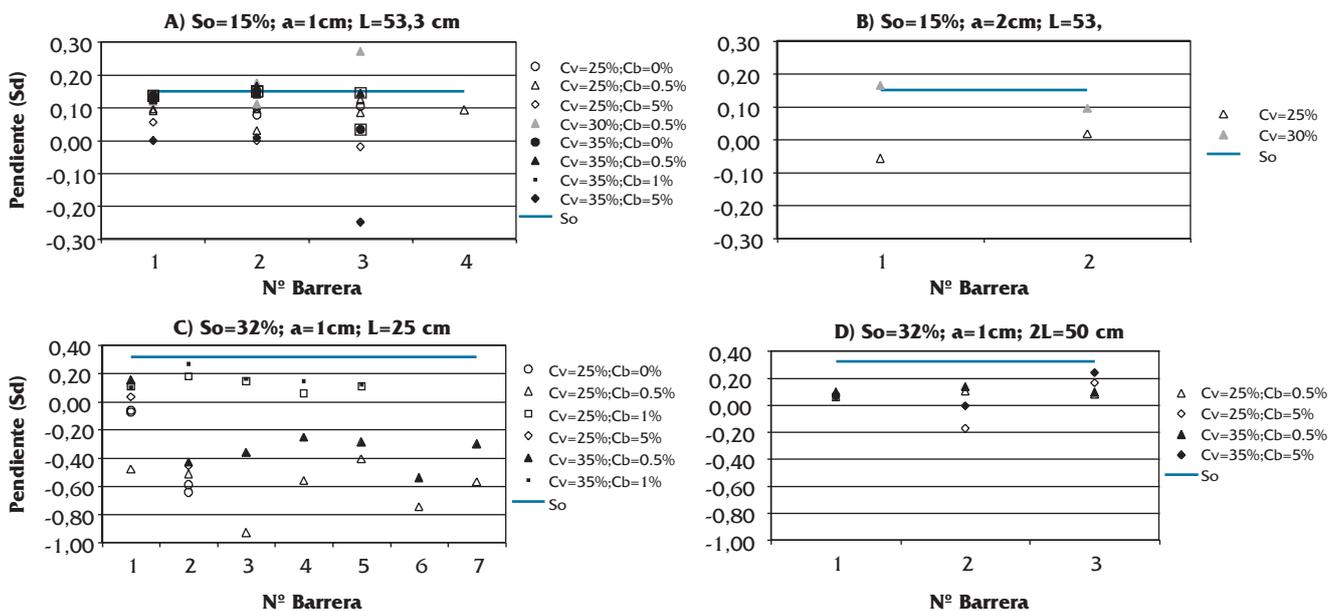


Figura 7. Pendiente de los depósitos generados en las barreras (S_d)

Por esto, pequeñas variaciones en las condiciones experimentales, propias de la experimentación, se traducen en una gran dispersión de los resultados.

En el caso de los experimentos donde la retención supera el 100%, se observa que los valores de S_d se encuentran entre el valor de la horizontal y la pendiente del canal, S_o . Esto muestra la capacidad de los torrentes (escurrimientos supercríticos), para ciertas condiciones de arrastre y de flujo, de retomar la pendiente original del lecho peraltando el fondo por sobre el nivel de las barreras (Fig. 8). Este efecto constituye un apropiado sistema de control de inicio de flujos detríticos en zonas altas donde el cauce se encuentra erosionado. La profundización del lecho del cauce debilita las laderas aledañas causando derrumbes e incorporación de material al cauce. Peraltar el lecho y restablecer su condición original resulta en una efectiva herramienta para prevenir deslizamientos y limitar la cantidad de sedimentos que pueden llegar al cauce en un evento aluvional (Okubo et al., 1997; Fiebigler, 1997).

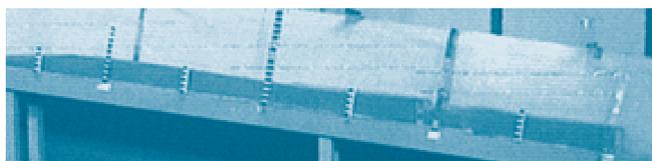


Figura 8. Elevación del lecho tras la interacción de un flujo detrítico con barreras transversales impermeables.

4.3.2 Interacción del flujo con barreras permeables

El flujo a través de las barreras permeables se manifiesta en una sucesión de contracciones y ensanches bruscos donde el flujo va perdiendo energía. En general los depósitos comienzan en la segunda barrera propagándose hacia aguas arriba y aguas abajo. Luego de un instante se genera una situación más o menos estable, donde la altura de los depósitos inmediatamente aguas arriba de las barreras pueden superar los 10 o 15 cm, es decir, la altura de los depósitos puede incluso superar la altura de las barreras impermeables antes utilizadas.

El máximo volumen de depósitos en las barreras permeables se manifiesta durante el transcurso del experimento, donde las pérdidas de energía debido al paso del flujo por las barreras se vuelven más importantes, producto de las altas velocidades que presenta el flujo. Una vez que el flujo decae, hacia el final del experimento, los depósitos son arrastrados disminuyendo en forma considerable el volumen de sedimentos depositados (Fig. 9).

Es decir, flujos menores y de menor concentración de sólidos son capaces de lavar los sedimentos depositados durante el evento aluvional y mantener así las obras operativas ante próximos eventos. Este efecto ha sido observado en terreno y descrito por varios investigadores (Armanini, 1991; Senoo y Mizuyama, 1984).

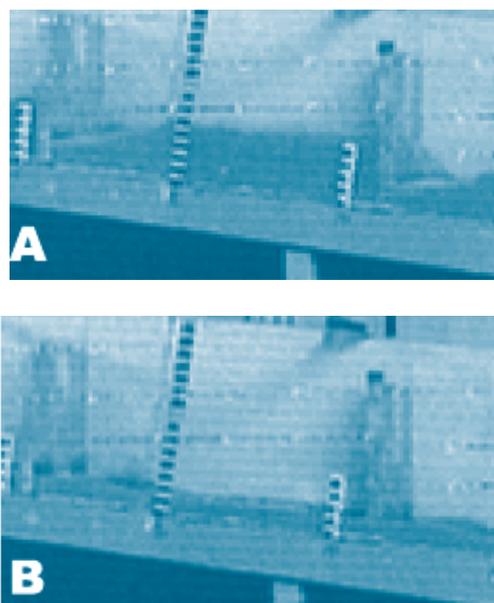


Figura 9. Retención en barreras permeables. A) durante el experimento, B) al final del experimento

Es posible observar que los depósitos son limitados por la barrera de aguas arriba y por la socavación producida por el chorro que sale de esta misma barrera (expansión brusca). Por lo tanto, un mayor espaciamiento entre barreras puede resultar en una mayor capacidad de retención de estas obras. Sin embargo, no se ensayaron distintos espaciamientos, lo que no permite profundizar en esta apreciación.

Dos características de los depósitos generados en las barreras fueron estudiados: i) el volumen máximo retenido en cada experimento, expresado como un porcentaje de una capacidad de retención nominal, V_0 , definida como el volumen contenido entre la barrera, el lecho y la línea horizontal que va desde la barrera hasta la intersección entre el lecho y el pie de la barrera de aguas arriba, y ii) la distribución granulométrica de los sólidos retenidos en cada una de las barreras permeables.

Los resultados sobre la máxima retención de sedimentos en las barreras, en función de la concentración total de sólidos, c_v , y la concentración de finos, c_b , se presentan en el gráfico de la Fig. 10.

Los resultados obtenidos resultan similares a los observados en el caso de barreras impermeables. Los porcentajes de retención superan el 100% en todas las barreras y el mayor volumen de retención en general se registra en la primera barrera, demostrando que el espaciamiento entre barreras no es el óptimo, si no que limita el potencial volumen de depositación. En general la altura máxima de los depósitos observada en las barreras 2 y 3 resultan mayores que los registrados en la primera, de manera que las barreras 2 y 3 podrían almacenar incluso más que la primera barrera en caso de encontrarse espaciadas en forma adecuada.

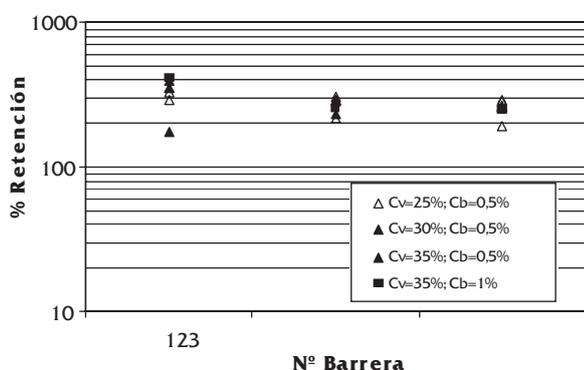


Figura 10. Porcentaje de máxima retención en barreras permeables

En cuanto a la granulometría del material retenido por las barreras luego de acabado el flujo, éste no presenta mayor variación respecto del material original, mostrando que no existe segregación del material en las barreras para las condiciones ensayadas (Fig. 11). Estos resultados son similares a los encontrados en barreras impermeables para concentraciones de bentonita de 0,5 y 1%.

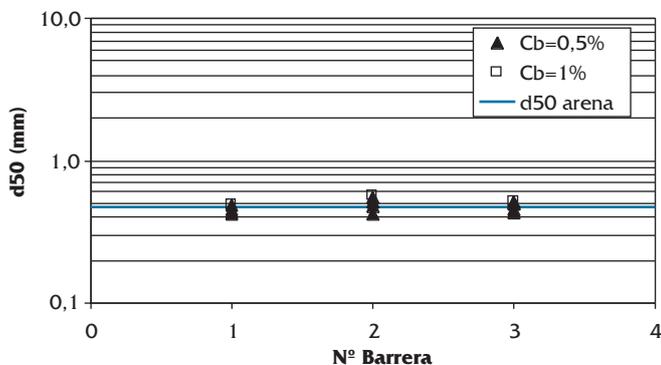


Figura 11. Diámetro medio de los sedimentos (d_{50}) encontrados en los depósitos luego de ocurrido el flujo.

5. DISCUSIÓN

A pesar de que fue posible cuantificar los resultados experimentales en términos de porcentajes de retención en barreras, pendiente de los depósitos y segregación del material depositado, estos no pueden ser escalados directamente a flujos naturales debido a la dificultad que presenta el escalamiento de flujos detríticos. La multiplicidad de fenómenos y parámetros adimensionales que describen la dinámica del flujo, limitan la utilización de resultados experimentales en el diseño de obras civiles relacionadas con la mitigación de flujos aluvionales.

Sin embargo, los resultados obtenidos pueden orientar el diseño de barreras para el control de flujos detríticos en el rango de regímenes de escurrimiento comprendido entre el régimen de transición a régimen inercial. Los resultados muestran la importancia del espaciamiento entre barreras con el fin de aumentar la capacidad de retención de éstas y cómo la reología del fluido intersticial, debido a la presencia de finos en la mezcla (sedimento cohesivo), afecta los patrones de depositación entorno a las barreras. A pesar de que las concentraciones de finos (bentonita) utilizados en los experimentos se encuentran normalmente en flujos naturales, los efectos, en términos de esfuerzos viscosos, no son directamente escalables. Por ejemplo, en un flujo detrítico compuesto por una fracción importante de partículas de mediano o gran tamaño, los efectos del exceso de viscosidad, debido a la presencia de material fino, puede resultar despreciable en el cambio de velocidad de sedimentación de las partículas en relación a su velocidad de sedimentación en agua pura. De esta manera, a pesar de existir cierta concentración de finos en la mezcla, los efectos en los patrones de depositación (por ejemplo cantidad y segregación) pueden resultar despreciables. De la misma forma, la inercia asociada a estas partículas de gran tamaño puede resultar en que los esfuerzos viscosos sean despreciables en la dinámica del flujo.

Finalmente, se puede mencionar que la aplicabilidad de los resultados experimentales obtenidos se encuentran limitados a flujos de características dinámicas similares a las registradas en los experimentos, de manera que se debe conocer en detalle las características del flujo detrítico de diseño. Además, se debe buscar la forma de escalar estos resultados dependiendo de la dinámica del flujo y de los esfuerzos que prevalecen en cada uno.

6 CONCLUSIONES

En este artículo se presentan resultados sobre la interacción de flujos detríticos con barreras transversales, permeables e impermeables, puestas en el cauce. Los resultados obtenidos muestran una fuerte dependencia con diversos parámetros como: tipo de presa, distanciamiento entre presas y características propias del flujo. Dentro del comportamiento del flujo se debe destacar la importancia de las características de la mezcla sólido-líquido, ya que distintas fracciones granulométricas pueden resultar fundamentales en la dinámica del flujo. Mientras las fracciones más finas pueden alterara en forma dramática las propiedades reológicas del fluido intersticial, las partículas más grandes pueden ser las responsables de otorgar la inercia suficiente como para dar al flujo un carácter inercial.

La manera de cuantificar el cambio en la reología del fluido intersticial debido a la presencia de material fino resulta un proceso altamente complejo, ya que la reología de la mezcla agua-finos no solo depende de la concentración de finos, sino que además de las características electroquímicas del material. Por ello resulta de suma importancia identificar el material que conforma la fracción fina de los sólidos y determinar el comportamiento reológico de la mezcla intersticial según las concentraciones de finos posibles en la mezcla. La presencia de finos en la mezcla afecta fundamentalmente la viscosidad del fluido intersticial, por ejemplo en el caso estudiado, concentraciones volumétricas de apenas un 3 % de bentonita, aumentan el valor del coeficiente de viscosidad, K , en casi dos ordenes de magnitud respecto de la viscosidad del agua pura. Altos valores de viscosidad facilitan el escurrimiento ya que las partículas son capaces de permanecer suspendidas por más tiempo. Por otra parte, altos valores de viscosidad dificultan la resuspensión (ya que disminuyen los niveles de turbulencia) y reduce el grado de interacción entre partículas.

Según sea la estrategia de control aluvional y las condiciones del flujo y del terreno donde éste se desarrolla, las barreras pueden resultar herramientas efectivas en el control aluvional. Las barreras impermeables pueden ser trampas de sedimento efectivas en terrenos de pendientes no tan pronunciadas, como lo demuestran las experiencias con $S_o=15\%$ que, en general, muestran retenciones por sobre el 100%. Además, tienen la capacidad de retener material, peraltando el lecho del cauce lo que

contribuye a evitar deslizamientos desde laderas aledañas (Fig. 8). El espaciamiento óptimo entre barreras es un tema complejo que depende tanto de la estrategia de control como condiciones de flujo, características de la mezcla, concentración de finos (ej. Bentonita), terreno, etc.

De los resultados experimentales se observa que las barreras permeables actúan como volúmenes de acumulación temporal, capaces de reducir y retardar el máximo de la descarga al introducir una pérdida singular de energía importante. La sucesión de angostamientos y ensanches bruscos a los que se ve enfrentado el flujo provocan que estas barreras sean efectivos mecanismos de disipación de energía del flujo. En el caso de retención temporal o disipación de energía, las barreras permeables pueden resultar tanto o más efectivas que barreras impermeables.

Presas permeables deberían ser utilizadas en la zona intermedia del cauce con el fin de retener temporalmente parte de los sedimentos, reduciendo el máximo del caudal detrítico y la energía. Presas impermeables pueden ser utilizadas en zonas de inicio de flujos detríticos, con el fin de estabilizar pendientes y evitar deslizamientos de laderas, o hacia el final del recorrido del flujo, constituyendo grandes trampas de sedimentos.

El problema de la escalabilidad de los flujos detríticos resulta de gran importancia pero a su vez de gran complejidad. A partir de Bagnold (1954), una gran cantidad de parámetros adimensionales relevantes en la dinámica de los flujos detríticos han sido determinados, parámetros que toman en cuenta distintos procesos físicos importantes involucrados en la dinámica y comportamiento de estos flujos. Sin embargo, la multiplicidad de fenómenos que coexisten en un flujo detrítico y los parámetros que los representan hacen altamente complejo el problema de escalamiento de flujos generados en laboratorios a flujos que ocurren en la naturaleza.

El problema del escalamiento aún no ha sido resuelto, por lo que es importante referirse a él, en particular cuando se aborda el problema de estudiar en modelos físicos estructuras de control aluvional o determinado efecto del flujo. Un adecuado escalamiento del fenómeno requiere preservar la totalidad de los parámetros adimensionales relevantes, es decir, R_e, F_r, Ba, Sa, N_f , etc., lo que resulta imposible de conseguir en la práctica. De este modo, es probable que para una obra o flujo

en particular sea necesario realizar varios modelos diferentes, preservando distintos adimensionales en cada uno de ellos, dependiendo del fenómeno particular que se desee estudiar, por ejemplo, erosión al pie de la obra, volumen del depósito, interacción entre obras, características del flujo sobre la obras, efecto de la obra en el comportamiento hidráulico del flujo, dinámica del flujo, etc.

7 AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento parcial dado por el Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y El Caribe, CAZALAC, a través de una beca otorgada al primer autor de este artículo.

8 LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	densidad del agua
ρ_s	densidad de los sólidos
ρ_f	densidad del fluido intersticial
ρ_b	densidad de la bentonita
d	tamaño característico de los sólidos
g	aceleración de gravedad
h	altura característica del flujo
R_h	radio hidráulico
$\dot{\gamma}$	tasa de deformación angular del flujo detrítico
\bar{u}	velocidad característica del flujo (ej. velocidad media)
u	velocidad superficial del flujo detrítico
ϕ	ángulo de fricción interna de los sólidos
λ	concentración lineal
c_v	concentración en volumen de los sólidos
c_{vmax}	concentración máxima o de empaquetamiento de los sólidos
c_f	concentración volumétrica de bentonita
c_b	porcentaje en peso de bentonita del total de sólidos en la mezcla
η	viscosidad dinámica equivalente del fluido intersticial
τ	esfuerzo de corte del fluido intersticial
τ_f	esfuerzo de fluencia del fluido intersticial
K	coeficiente de viscosidad
a	apertura de la compuerta (1 ó 2 cm)
S_o	pendiente del fondo
S_d	pendiente de los depósitos
L	distancia entre las barreras
H	altura de barreras impermeables
b_o	Ancho de la apertura de la barrera permeable
V_m	volumen de retención nominal, barreras impermeables
V_p	volumen de retención nominal, barreras permeables

9 REFERENCIAS

- ARMANINI, A. Control Measures for Debris Flows, En: Recent Developments on Debris Flows. Armanini and Michieu (Eds.), Springer-Verlag, Berlin. 1997.
- ARMANINI, A. DELLAGIACOMA and F. FERRARI, L. From the check dam to the development of functional check dams. Fluvial Hydraulics of Mountain Regions. Lecture notes in earth sciences, n.37, Springer-Verlag, pp. 331-344, 1991
- AYALA, L. Hidráulica de los Fenómenos de Remoción en Masa: Corrientes de Detritos y Flujos de Barro. Curso Pre- XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Guayaquil, Ecuador, 1996.
- FIEBIGER, G. Structures of Debris Flow Countermeasures, En: Debris –Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, First International Conference, August 7-9, San Francisco, California. 1997. pp 596-605
- IVERSON, R. The Physics of Debris Flows, Review of Geophysics, (35)3: 245-296. August 1997.
- LIN, P. CHANG, W. LIU, K. Retaining Function of Open-Type Sabo Dams, En: Debris –Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, First International Conference, August 7-9, San Francisco, California. 1997. pp 636-645
- MIZUYAMA, T. KOBASHI, S. and MIZUNO, H. Development and Improvement of Open Dams. Proc. Int. Symp. Interpraevent, 1996, Garmisch-Partenkirchen, Alemania, Vol. 5, pp. 59-65
- MONTSERRAT, S. TAMBURRINO y A. NIÑO, Y. Relaciones Friccionales de Mezclas de Agua y Sedimentos. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, São Pedro, Brasil, 2004.
- OKUBO, S. IKEYA, H., ISHIKAWA, Y. and YAMADA T. Development of New Methods for Countermeasures against Debris Flows, En: Recent Developments on Debris Flows. Armanini and Michieu (Eds.), Springer-Verlag, Berlin. 1997. pp 166-185
- SEMINARA, G. and TUBINO, M. Debris Flows: Meccanica, Contollo e Previsione. Monografia delle Unità Operativa del Guppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche, Istituto di Idraulica, Università de Genova. Giugno 1993
- SENOO, K. and MIZUYAMA, T. Function of Structures against Debris Flow. Proc. Int. Symp. Interpraevent, 1984, Villach, Austria, Vol. 3, pp 113-120.
- VANDINE, D. Debris Flow Control Structures for Forest Engineering. British Columbia. 1996.

