LEYES DE RESISTENCIA DE FLUJOS DETRITICOS

SANTIAGO MONTSERRAT, ALDO TAMBURRINO Y YARKO NIÑO División Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile. Av. Blanco Encalada 2002, Casilla 228-3, Santiago, Chile. Teléfono: (56-2) 696 8448; Fax: (56-2) 689 4171 e-mail: <u>smontser@ing.uchile.cl</u>, <u>atamburr@ing.uchile.cl</u>, <u>ynino@ing.uchile.cl</u>

RESUMEN

En este artículo se presentan resultados preliminares de un estudio experimental respecto a las leyes de resistencia de flujos detríticos en canales. En los experimentos, mezclas heterogéneas de sedimentos y agua se dejaban fluir por un canal de alta pendiente, registrándose la altura de escurrimiento y la velocidad en de la superficie libre. Los sedimentos estaban constituidos por material fino (bentonita), arena y gravilla, en distintas proporciones. Los resultados muestran una clara dependencia de los números de Savage y de fricción con el número de Bagnold y el ángulo de inclinación del canal. Los datos experimentales se agrupan de acuerdo a la viscosidad de la mezcla agua – fino. Para poder cuantificar el efecto de los finos en la mezcla, se realizaron experimentos en dos instalaciones experimental construidas especialmente para ese efecto encontrándose que, dependiendo de la concentración de bentonita, la mezcla se comporta como un fluido newtoniano de gran viscosidad, o como un plástico de Bingham, para las concentraciones mayores.

ABSTRACT

Preliminary results of an ongoing experimental research regarding the flow characteristics of some debris flows are presented in this paper. A mixture of heterogeneous sediment and water was released in a tilting flume and the flow depth and free surface velocities were recorded. Bentonite, sand and small pebbles formed the solid phase. The results show that the Savage and friction numbers depend on both Bagnold number and flume slope. Experimental data gather according the viscosity of the bentonite - water mixture. In order to quantify the role played by the fine sediment in the mixture, its viscosity was determined from experiments carried out in two experimental set-ups specially designed for that porpoise. Presence of small amount of bentonite can dramatically change the rheological behaviour of the mixture, behaving as a macroviscous fluid or a Bingham plastic.

LEYES DE RESISTENCIA DE FLUJOS DETRITICOS

1 Introducción y Objetivos

El estudio de la dinámica de los flujos detríticos ha mostrado un creciente interés en los últimos años, debido a que grandes pérdidas económicas y de vidas humanas han resultado de la ocurrencia de estos eventos. Los flujos detríticos o aluviones no son un fenómeno nuevo en la naturaleza, pero sus efectos han cobrado importancia el último tiempo debido al crecimiento de las áreas urbanas, las que han ocupado zonas de mayor probabilidad de ocurrencia de estos flujos, como son los piedemonte y laderas cordilleranas.

En general, los flujos detríticos que ocurren en la naturaleza son trifásicos, constituidos por agua, gases y vapor de agua y material sólido constituido por sedimentos, troncos y todo cuanto se encuentra en el cauce que toma el flujo. La fase gaseosa se encuentra presente en eventos cuyo origen es volcánico.

Este trabajo se refiere a flujos bifásicos, excluyéndose la fase gaseosa. La cuantificación de los flujos detríticos es un problema altamente complejo, el que no ha sido resuelto aún. Una ley de resistencia corresponde a una relación que liga la velocidad del flujo con su altura. En el caso de escurrimientos detríticos, un enfoque analítico del problema requiere considerar los esfuerzos que se generan en la fase líquida y los debidos a las interacciones líquido – sólidos y sólidos – sólidos. Actualmente, no existe una teoría que resuelva el problema de manera general, y las que se han desarrollado son válidas para ciertas condiciones particulares de flujo, tipo de material granular, etc., y todas ellas requieren, en mayor o menor medida, de información experimental para determinar algunos parámetros que aparecen en la formulación teórica del problema.

El objetivo del presente artículo es presentar algunos resultados obtenidos en una investigación experimental en desarrollo, respecto a la ley de resistencia que gobierna el flujo de una mezcla agua – sedimentos. Para poder caracterizar la reología de la mezcla agua – finos, necesaria para evaluar adecuadamente los parámetros adimensionales que definen al flujo, debió diseñarse un conjunto de experimentos adhoc, cuyos resultados también se presentan en este artículo.

2 Antecedentes previos

Hace 50 años, Bagnold clasificó el comportamiento de los flujos detríticos en tres regímenes, dependiendo del efecto relativo que tiene los esfuerzos de origen viscoso con la interacción entre partículas. Definiendo el Número de Bagnold como

$$Ba = \frac{\rho_s \gamma d^2 \lambda^{1/2}}{\mu_f}$$
(1)



donde ρ_s es la densidad de las partículas sólidas, γ es la tasa de deformación angular, d es el tamaño de las partículas, μ_f es la viscosidad dinámica del fluido intersticial y λ es la concentración lineal, dada por

$$\lambda = \left(\left(\frac{c_v}{c_{vmax}} \right)^{1/3} - 1 \right)^{-1}$$
(2)

donde c_v es la concentración volumétrica de los sólidos en la mezcla y c_{vmax} es la máxima concentración posible de los sólidos. Para el caso de arenas, c_{vmax} es alrededor de 0,65. Para valores de Ba menores que 40, el régimen de flujo se denomina macroviscoso y, como el nombre lo indica, el escurrimiento de la mezcla es equivalente al flujo laminar de un fluido de gran viscosidad. Para valores de Ba mayores que 450, domina el efecto de choque entre las partículas sólidas y el régimen se denomina inercial. Valores intermedios del número de Bagnold corresponde a un régimen de transición.

En un flujo donde la fuerza motriz está dada por la fuerza de gravedad, es importante el efecto relativo entre choques de partículas y la gravedad. Este efecto se mide a través del número de Savage (Iverson, 1997), definido como

$$Sa = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_f} \frac{\gamma^2 d^2}{gh}$$
(3)

donde ρ_f es la densidad del fluido intersticial, g es la aceleración de gravedad y h es la profundidad del flujo. Valores de Sa menores que 0,1 corresponden a flujos dominados por la fricción entre partículas, mientras que para Sa mayor que 0,1 el exceso de presión elimina los efectos de la gravedad.

La relación entre esfuerzos friccionales debido a la gravedad y los viscosos se mide a través del número de fricción, dado por:

$$Nf = \frac{c_v}{1 - c_v} \frac{(\rho_s - \rho_f)gh}{\gamma \mu_f} tg\phi$$
(4)

En la expresión anterior, ϕ es el ángulo de fricción interna del material, el que frecuentemente se considera igual al ángulo de reposo. Si Nf es mayor que 2000, los esfuerzos friccionales dominan sobre los viscosos.

La tasa de deformación es un parámetro difícil de medir, por lo que usualmente en las expresiones anteriores se utiliza en su lugar U/h, siendo U la velocidad media del flujo.

Si los sólidos no son de un tamaño único, la elección del tamaño característico de las partículas no es evidente y generalmente debe seguirse un procedimiento de aproximaciones sucesivas, comparando el tipo de régimen de flujo que definen los números adimensionales antes indicados, con lo que se observa en la experimentación.

Otros parámetros adimensionales de importancia en la caracterización del flujo detrítico corresponden a los números de Froude y de Reynolds, definidos como



$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}}$$
 y $Re = \frac{Uh}{v_f}$, respectivamente, siendo $v_f = \frac{\mu_f}{\rho_f}$. Notar que se cumplen las

siguientes igualdades: Sa = $\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_f} \left(\frac{d}{h}\right)^2 Fr^2$, Nf = $\frac{c_v}{1 - c_v} tg \phi Re Fr^{-2}$.

Lo que se denomina fluido intersticial generalmente no es el agua, sino la mezcla del agua con el material más fino de los sólidos, la que se comporta como un fluido equivalente, con características físicas distintas a la del agua. La densidad de este fluido equivalente está dada por $\rho_f = c_b \rho_b + (1 - c_b)\rho$, siendo c_b la concentración en volumen del material fino (bentonita) en la mezcla agua – finos, ρ_b es la densidad del sedimento fino y ρ es la densidad del agua. La manera cómo altera el material fino la viscosidad de la mezcla es un problema complejo y ha sido motivo de numerosos estudios, comenzando por el de Einstein en 1906, los que han desarrollado expresiones para la viscosidad en función de la concentración. Sin embargo, la utilidad práctica de estos resultados es muy limitada, ya que han sido derivadas para bajas concentraciones y materiales sin cohesión. También se han determinado relaciones empíricas, pero éstas están limitadas al rango de concentraciones y tipo de sedimento para las que fueron deducidas. De este modo, es imprescindible determinar, para cada mezcla en particular, su comportamiento reológico.

3 Estudio Experimental

3.1 Características Generales de la Mezclas Agua – Sedimentos

La fracción sólida de la mezcla agua – sedimentos de este estudio está constituida por una combinación de gravilla, arena y bentonita, cuyas proporciones variaron según el experimento, así como la proporción total de sólidos respecto a la mezcla. La arena tiene un d₅₀ igual a 0,48 mm y la gravilla se encontraba en el rango de 6 a 12 mm, con un d₅₀ de 9 mm. La cantidad de gravilla en la mezcla fue siempre la misma, para todas las experiencias, siendo un 10% del total del peso de los sólidos. La cantidad de bentonita varió entre el 0 y el 5% del total de peso de los sólidos, según el experimento. Para el cálculo de ρ_f se consideró ρ_b = 2,42 kg/m³. Se experimentó con tres valores de la concentración volumétrica de los sólidos en la mezcla (c_v), correspondiente a 25, 30 y 35%.

3.2 Reología de la mezcla agua – finos

La determinación de la viscosidad de la mezcla agua - finos requirió diseñar y construir dos instalaciones experimentales. La primera permite determinar la viscosidad de fluidos newtonianos y la segunda es para caracterizar fluidos de cualquier reología. Con estas instalaciones no se determina la relación entre esfuerzo de corte y tasa de deformación, sino que se liga el caudal con los parámetros que definen la reología.



3.2.1 Instalaciones Experimentales

La primera instalación construida consiste en un viscosímetro de Poiseuille (Fig.1A) constituida por dos estanques cúbicos con lados de 40 cm y unidos por 4 tubos de cobre de 1 m de largo. Cada uno de estos tubos posee un diámetro distinto y operan de a uno a la vez. Los diámetros de los tubos utilizados corresponden a 2,85, 4,40, 7,60 y 10,65 mm. El estanque de aguas abajo posee un vertedero de pared móvil, el que permite controlar el gradiente de energía del flujo en el tubo y así variar el caudal para distintas condiciones experimentales. El flujo es aforado volumétricamente a la salida de este vertedero y devuelto al estanque de aguas arriba mediante la acción de una bomba. Dado los grandes tiempos de residencia de la mezcla en los estanques, para evitar la sedimentación de los sólidos, la mezcla era levemente agitada en ambos estanques con la misma intensidad.

La segunda instalación experimental (Fig.1B) consiste en una canal de sección semi-circular, de 1,5 m de largo, 5,6 cm de diámetro y pendiente variable. El canal es alimentado por una cámara de carga en donde es depositada la mezcla en forma continua. Una vez logrado el régimen permanente y altura normal en el canal (la altura debe coincidir con el borde del canal) se traza una línea de color en la superficie libre del flujo. La deformación de esta línea es capturada mediante una cámara de video. Mediante la deformación de la línea es posible obtener el perfil de velocidades del flujo e inferir la reología de la mezcla.



Fig. 1 Instalaciones experimentales para determinar la reología de la mezcla

3.2.2 Resultados

En una primera fase del estudio, se supuso que la mezcla agua - bentonita tendría un comportamiento newtoniano. De este modo, utilizando la instalación experimental de la Fig. 1A, se determinó la viscosidad a partir de la relación existente entre ella y el caudal en un flujo de Poiseuille. Sin embargo, para altas concentraciones de bentonita se observó que no existía flujo para ciertas condiciones de carga, infiriéndose la existencia de un esfuerzo de fluencia en la mezcla y por lo tanto un comportamiento no newtoniano, debiendo realizarse los ensayos en la instalación de la Fig. 1B. Un ejemplo de la visualización del perfil de velocidades en esta instalación se presenta en la Fig. 2, la que muestra la forma que toma la línea de colorante en tres tiempos sucesivos. Claramente se observa que existe deformación del elemento de fluido 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.



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

En general, la reología para un fluido no Newtoniano esta dada por la Ec. 5

$$\tau = \tau_{\rm f} + {\rm K}\gamma^{\rm n} \tag{5}$$

donde τ es el esfuerzo de corte, τ_f el esfuerzo de fluencia, K es el coeficiente de viscosidad y n es un exponente característico de la reología. Para un fluido newtoniano $\tau_f = 0$, n = 1 y K corresponde a la viscosidad dinámica. Para la geometría de la instalación de la Fig. 1B, γ = du/dr, siendo u la velocidad longitudinal y r la distancia radial desde el centro del canal.

Un primer intento para determinar n se hizo mediante la aplicación directa de la Ec. 5, o sea, calculando a partir de las imágenes la tasa de deformación. Sin embargo, este método arrojó un error excesivamente grande, por lo que se procedió de una manera similar a como se hizo cuando la mezcla se comporta como fluido newtoniano. Integrando la distribución de velocidades sobre el área de flujo se obtiene el caudal, el que se compara con la expresión resultante para un fluido con reología dada por la Ec. 5:

 $Q = \pi R \frac{\left(\frac{\tau_{b}}{K}\right)^{\frac{1}{n}}}{1 + \frac{1}{n}} \left[\frac{\left(1 - \frac{\tau_{o}}{\tau_{b}}\right)^{1 + \frac{1}{n}}}{2} - \frac{\left(1 - \frac{\tau_{o}}{\tau_{b}}\right)^{2 + \frac{1}{n}}}{2 + \frac{1}{n}} + \frac{\left(1 - \frac{\tau_{o}}{\tau_{b}}\right)^{3 + \frac{1}{n}}}{\left(2 + \frac{1}{n}\right)\left(3 + \frac{1}{n}\right)} \right]$ (6)

donde τ_b corresponde al esfuerzo de corte actuando sobre la pared y R el radio del canal. Los esfuerzo de corte τ_b y τ_f se determinaron al hacer un equilibrio entre la fuerza debido al corte y la componente del peso, en la dirección del flujo. Los valores de K y n se obtuvieron buscando el mejor ajuste del caudal medido con el calculado con la Ec. 6, concluyéndose que para las concentraciones mayores, el modelo reológico que



mejor representa la mezcla de agua y bentonita es el de un plástico ideal o de Bingham (n = 1). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1 y en la Fig. 3.

Tabla 1. Condiciones y resultados experimentales

Exp	C _b (%)	Q (lt/s)	ρ _f (kg/m³)	v _f (m²/s)	μ _f (kg/m/s)	$Re=VD/v_f$
1A	0.00	3.24E-04	1000.0	1.13E-06	1.13E-03	128
2A	0.12	1.48E-03	1001.8	1.50E-06	1.50E-03	287
3A	0.29	1.06E-03	1004.1	2.21E-06	2.22E-03	139
4A	0.41	8.35E-04	1005.9	2.87E-06	2.88E-03	84
5A	0.83	4.55E-03	1011.7	4.30E-06	4.35E-03	177
6A	0.83	3.87E-04	1011.7	6.09E-06	6.16E-03	18
7A	1.65	8.60E-03	1023.5	1.37E-05	1.40E-02	105
8A	1.65	1.78E-02	1023.5	1.58E-05	1.62E-02	135
9A	2.06	1.47E-02	1029.4	3.05E-05	3.14E-02	58

A) Comportamiento newtoniano de la mezcla

V: velocidad media del flujo, D: diámetro de la tubería

B) Comportamiento plástico de Bingham

Exp	C _b (%)	Q (It/s)	ρ _f (kg/m³)	K/ρ _f (m²/s)	K (kg/m/s)	τ _f (kg/m²)	Re=VR _h /(K/ρ _f)		
1B	2.48	1.50E-01	1035.2	1.71E-05	1.77E-02	18.75	50		
		3.53E-01	1035.2	1.71E-05	1.77E-02	18.78	117		
2B	2.89	2.11E-01	1041.1	2.15E-05	2.24E-02	41.42	56		
		4.04E-01	1041.1	2.15E-05	2.24E-02	40.58	107		

R_h: radio hidráulico





Como es de esperar, los resultados indican un fuerte aumento de la viscosidad a medida que aumenta la concentración de bentonita en la mezcla. Los valores obtenidos son mucho mayores que los que resultan del cálculo con algunas de las expresiones usuales que ligan la viscosidad con la concentración y que se encuentran en la literatura (por ejemplo, las relaciones de Einstein, Thomas, Eilers, Fei y Yang, etc.). Del mismo modo, los valores de τ_f aquí calculados presentan diferencias con los que resultan de



evaluar relaciones típicas existentes (por ejemplo, Wan, Thomas, etc.) (Wan y Wang, 1994).

3.3 Leyes de Resistencia

3.3.1 Instalación Experimental

Los experimentos se llevaron a cabo en un canal de pendiente variable, de 6 m de largo por 20 cm de ancho. Una de las paredes del canal es de acrílico transparente de 12 mm de espesor. El fondo del canal fue recubierto por la misma arena utilizada en la mezcla sólido – líquido, o por un lecho de gravillas de tamaño aproximado 4 mm, dependiendo del experimento. Los experimentos se realizaron para dos valores de la pendiente (S₀): 15% y 32%. En cada experimento, una mezcla específica de arena, bentonita y agua fluye al canal desde un estanque de carga ubicado aguas arriba, debido a la apertura repentina de una compuerta, cuyo ancho es igual al del canal. La apertura de la compuerta es de 1 o 2 cm. El volumen total de la mezcla se mantuvo constante para todos los experimentos, siendo de 130 litros. La gravilla se agregó al flujo inmediatamente después de la salida de la mezcla del estanque. No se agregó en el estanque de carga debido a su tendencia a sedimentar y bloquear la salida del flujo desde el interior del estanque.

Dos cámaras de video fueron utilizadas para registrar los experimentos: una de ellas ubicada frente a la pared de acrílico, permitía registrar la altura del flujo y la otra, ubicada en dirección normal a la superficie libre, se usaba para determinar la velocidad de la superficie libre.

3.3.2 Resultados

La primera observación es que la mayorías de los flujos experimentados presentan características pulsantes, las que están asociadas a ondas rodantes, producto de una inestabilidad del flujo. Un ejemplo de esta fluctuación, tanto de la altura como de la velocidad se presenta en la Fig. 4. En los cálculos que siguen, se utiliza el valor medio temporal de estas variables.



Fig. 4. Velocidad superficial y altura de un flujo detrítico en función del tiempo

Para evaluar los números de Bagnold, Savage y de fricción, se utilizó $\rho_s = 2,6 \text{ kg/m}^3 \text{ y} \phi$ = 35°. Como una primera aproximación, y siguiendo la metodología utilizada por otros



autores (Iverson y Vallance, 2001, Parsons et al., 2001), se consideró que el tamaño característico de las partículas es el diámetro medio de todos los sedimentos (arena y gravilla). Sin embargo, al evaluar Ba, Sa y Nf, éstos parámetros definen regímenes de flujo contradictorios con lo observado en los experimentos, concluyéndose que el tamaño de los sedimentos que condiciona las características hidráulicas del escurrimiento no corresponde al diámetro medio de la muestra de sedimentos, sino que está asociado a los tamaños mayores de éstos. De este modo, se consideró como valor representativo el tamaño medio de la gravilla, d = 9 mm. Con esta consideración, resulta que para todos las condiciones experimentales se tiene Ba > 450 y Sa > 0,1, es decir se encuentran dentro del rango inercial y la colisión entre partículas domina ampliamente por sobre los otros efectos. La única excepción la presenta el experimento en el que no se incluyó gravilla, el cual presenta un comportamiento macroviscoso y no se incluye en este análisis.



Fig. 5 Número de Savage en función de Ba $\text{sen}\theta$





Los resultados de las experiencias, en términos de los parámetros adimensionales definidos en el punto 2, se presentan en las Figs. 5 y 6. En ellos se ha graficado el número de Savage y el número de fricción en función de (Ba sen θ). Ambos gráficos son indicativos de la existencia de una relación funcional entre dichos parámetros, pero además existe una dependencia de la viscosidad cinemática de la mezcla agua – bentonita, debido a que los datos tienden a colapsar en regiones distintas dependiendo de la viscosidad.

4 Conclusiones

Resultados preliminares respecto a las leyes de resistencia que gobiernan al flujo detrítico en el rango inercial se han presentado en este trabajo. Los resultados experimentales indican una clara dependencia de los números de Savage y de fricción con (Ba sen θ). Sin embargo, los datos tienden a agruparse según la viscosidad de la mezcla agua – finos, demostrando así la gran importancia que tiene el determinar adecuadamente las características reológicas de la mezcla de agua con el material fino de la fracción sólida. Esto exigió diseñar y construir dos instalaciones con el exclusivo propósito de determinar la viscosidad de las mezclas ensayadas. Es importante destacar el rol fundamental que juega la presencia de material cohesivo en las mezclas detríticas, ya que pequeñas cantidades pueden cambiar sustancialmente el comportamiento reológico de las mezclas. Para las condiciones ensayadas, una presencia de bentonita en la mezcla agua – finos del 2% (en volumen) se traduce en aumentos de la viscosidad de la mezcla un orden de magnitud mayor que la correspondiente a agua sin finos.

5 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.

6 Referencias

IVERSON, Richard, The Physics of Debris Flows, *Review of Geophysics, (35)3:* 245-296. August 1997.

IVERSON, Richard and VALLANCE, James, New Views of Granular Mass Flows. *Geology*, 29 (2): 115-118, February 2001

PARSON, Jeffrey, WHIPPLE, Kelin and SIMONI, Alessandro, Experimental Study of the Grain-Flow, Fluid-Mud Transition in Debris Flows. *The Journal of Geology, 109:* 427-447, 2001.

WAN, Zhaohui and WANG, Zhaoyin, Hyperconcentrated Flow. A.A. Balkema, Rotterdam, 1994.