

FLUJOS DENSOS E HIDRÁULICA DE RÍOS

José Daniel Brea, Pablo Daniel Spalletti

Instituto Nacional del Agua (INA) Casilla de Correo 21 – Ezeiza - 1804

E-mail: dbrea@ina.gov.ar; pspallet@ina.gov.ar

www.ina.gov.ar

Introducción

El tema de los flujos densos ha sido analizado desde diferentes disciplinas, entre las que se destacan, desde nuestro punto de vista, la geología y la hidráulica. Aún dentro de cada una de ellas existe un amplio espectro de enfoques y definiciones, muchas veces contrapuestos.

En términos generales, se aprecia que los enfoques de las dos especialidades mencionadas para el tratamiento de los procesos de transporte por flujos densos y de sus productos han seguido caminos paralelos, encontrándose muy escasos puntos de convergencia (Spalletti, Brea, Spalletti, 2002). Los motivos de ello quizá puedan deberse a que los geólogos hacen hincapié en los productos (sedimentos, depósitos) a los que conducen estos procesos, mientras que los ingenieros hemos prestado mucha mayor atención a las cuestiones hidrológicas y reológicas, es decir al funcionamiento de estos mecanismos de transporte en masa.

En efecto, más allá de las investigaciones básicas sobre el tema de los flujos densos, la hidráulica de ríos apunta a las aplicaciones prácticas en el campo de la ingeniería relacionadas con este tipo de fenómenos, las cuales necesitan imperiosamente de la cuantificación de los procesos.

Por lo tanto, gran parte de los desarrollos realizados desde la especialidad tratan de explicar el comportamiento de los flujos densos a partir de las fuerzas intervinientes en el proceso, llegando a ecuaciones que permiten a través de su resolución, poner un número a las variables en juego.

También desde la hidráulica los flujos de barro y de detritos han sido estudiados por un gran número de autores, y desde diferentes puntos de vista: observaciones de campo, características del flujo, comportamiento de los materiales, composición, etc. A pesar de ello, no hay todavía un acuerdo en la bibliografía específica del tema en lo que hace a una clasificación única y aceptada de este tipo de procesos. Resulta destacable además que diferentes términos pueden ser usados para describir el mismo fenómeno, dependiendo de la formación científica de los autores (Coussot, 1996).

Este universo de definiciones, interpretaciones y caracterizaciones de los flujos densos, hace dificultosa la tarea de adoptar definiciones, sin tomar partido por alguna de las escuelas o de algún autor. En este contexto, el espíritu del presente trabajo es el de apuntar a las aplicaciones prácticas en el campo de la ingeniería relacionadas con los flujos densos. Se presenta además la experiencia en un caso particular en la cuenca del río Iruya.

Definiciones desde la hidráulica

Comencemos recordando que, en situaciones normales de flujos cargados de sedimentos, estos son transportados por el flujo, teniendo poca influencia en el comportamiento del mismo. En otras situaciones, la presencia de muy grandes cantidades de partículas de sedimentos es de tal magnitud que influye notablemente en la mezcla, cambiando las propiedades del fluido y el comportamiento

del flujo. A los flujos de estas características de los denomina flujos hiperconcentrados (Wan, Wang, 1994).

En el marco de los flujos hiperconcentrados de sedimentos, los flujos densos pueden clasificarse en tres tipos: inundaciones o crecidas de barro (mud floods), flujos de barro (mudflows) y flujos de detritos (debris flows) (Julien, 2000). Se diferencian entre sí en los procesos físicos involucrados en cada uno de ellos, que son función de la reología de la mezcla agua-sedimento, tema sobre el que volveremos en puntos siguientes.

El volumen y las propiedades de la matriz del fluido (mezcla agua-sedimento) gobiernan la hidráulica del flujo, su desplazamiento y la deposición de los sedimentos. Las propiedades dependen de la concentración de sedimentos, de la distribución granulométrica y del contenido de arcillas.

Las *inundaciones o crecidas de barro* (Figura 1) son típicamente hiperconcentraciones de partículas no cohesivas, que presentan un comportamiento muy fluido para un rango de concentraciones de sedimento en volumen (C_v) de hasta un 40 %.



Figura 1.- Inundación de barro

Los *flujos de barro*, por su parte, se caracterizan por una concentración de limos y arcillas, lo suficientemente alta como para cambiar las propiedades de la matriz del fluido, favoreciendo el transporte de grandes tamaños de material. De este modo, los flujos de barro se comportan como una masa fluida muy viscosa, que a altas concentraciones es capaz de transportar en superficie piedras de gran tamaño. La C_v de la matriz del fluido en flujos de barro está en un rango entre el 45 y el 55 %.

Los flujos de barro presentan altas viscosidades y esfuerzos de cedencia, pudiendo viajar grandes distancias en pendientes moderadas a bajas velocidades, para depositarse en forma lobular en los abanicos aluviales.

Los *flujos de detritos* se componen de una mezcla de materiales clásticos, incluyendo grandes piedras, troncos, etc, donde la colisión lubricada entre las partículas es el mecanismo dominante de disipación de energía. El conocimiento de este tipo de flujos se debe en gran medida a Takahashi (1978).

Como ya se expresara, además de la definición de cada uno de los tres tipos de flujos densos presentada, que resulta función del mecanismo preponderante de disipación de la energía en el traslado de los mismos, existen descripciones basadas en otras características.

En opinión de los autores, las definiciones presentadas

permiten comprender el fenómeno de los flujos densos, y su análisis a partir de su comportamiento reológico.

Reología de los flujos hiperconcentrados

Dentro de los flujos hiperconcentrados de sedimentos, el comportamiento reológico involucra la interacción de diversos y complejos procesos físicos. Las partículas sólidas pueden chocar, rozar, rotar y vibrar en el desarrollo del movimiento.

Los cuatro elementos clave en el intercambio de momento de un flujo hiperconcentrado de sedimentos son: la viscosidad de la matriz de fluido, la turbulencia, la fricción entre partículas y la colisión entre las mismas.

La tensión de corte total en flujos hiperconcentrados de sedimentos, incluyendo los tres tipos descritos en el punto anterior, puede ser calculada por la suma de cinco componentes:

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \quad [1]$$

donde la tensión de corte total τ depende del esfuerzo de cedencia cohesivo τ_c , la tensión de corte de Mohr-Coulomb τ_{mc} , la tensión de corte viscosa τ_v , la tensión de corte turbulenta τ_t , y la tensión de corte dispersiva τ_d . Escribiendo la ecuación anterior en términos de la tasa de corte dv/dy o gradiente de velocidad, se obtiene la ecuación cuadrática reológica (O'Brien and Julien, 1985):

$$\tau = \tau_y + \eta \left(\frac{dv}{dy} \right) + C \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \quad [2]$$

siendo η la viscosidad dinámica; τ_y el esfuerzo de cedencia, y C representa el coeficiente de la tensión de corte inercial.

Los dos primeros términos de la ecuación corresponden a las tensiones de corte de Bingham y representan las tensiones de resistencia internas de un fluido de esas características. La suma de la tensión de cedencia y la viscosa define la tensión de corte de un fluido hiperconcentrado de sedimentos cohesivo en un régimen de flujo viscoso. El último término es la suma de las tensiones de corte dispersiva y turbulenta, que es función del cuadrado del gradiente de velocidad.

La resolución de esta ecuación permite obtener resultados de interés para una aplicación ingenieril del problema de flujos densos. La ausencia de los datos básicos necesarios, más la dificultad de determinarlos o definirlos, complica el uso de esta herramienta en la mayoría de los casos, por lo que debe recurrirse al empirismo.

Ante un problema de ingeniería

A comienzos de febrero de 1999 se produjo un evento de crecida del río Colanzulí, afluente del río Iruya, que pudo ser filmado a su paso frente a la ciudad homónima (Figura 2).

El análisis del video permitió concluir que las características de la crecida se ubican entre las de una crecida de barro y un flujo de barro.



Figura 2.- Flujo denso en Iruya, febrero 1999

Debe tenerse en cuenta que en un mismo evento pueden darse diferentes tipos de flujos densos, dependiendo, entre otros factores, de las características de los materiales de las cuencas de aporte y de la concentración de sedimentos de la mezcla en el colector principal.

La importancia de la observación de esta crecida fue conocer las características de los flujos densos en movimiento. El proyecto de las obras de sistematización que se está desarrollando en la zona, tuvo pues en cuenta las solicitaciones generadas por estos flujos.

En general, el proyecto de una obra a la acción de flujos densos debe incluir consideraciones de diseño sobre los siguientes aspectos, entre otros: frecuencia de ocurrencia, volumen, caudal máximo y profundidad, granulometría de los materiales, líneas probables de flujo, distancia de llegada, fuerza de impacto, trepada y sobre elevación (VanDine, 1996). Algunas de estas características pueden determinarse por rigurosos métodos y mediciones, mientras que otras requieren estimaciones de campo y reglas del arte.

En el caso presentado, los datos disponibles y las características del fenómeno sólo permitieron el uso de expresiones empíricas ofrecidas por la bibliografía específica sobre el tema. Esta es la situación más probable ante la que pueda encontrarse un ingeniero frente a un problema de flujos densos.

Referencias

- Coussot, P.; Meunier, M.** (1996). "Recognition, classification and mechanical description of debris flows" *Earth Science Reviews* 40, 209-227. Elsevier Science. B.V.
- Julien, P., León, C.** (2000). "Mud floods, mudflows and debris flows. Classification, rheology and structural design". *Jornadas de Investigación JIFI 2000: the debris flow disaster of december 1999 in Venezuela*.
- O'Brien, J.S.** (2000): "FLO2-D. User Manual 2002".
- O'Brien, J.S., Julien, P.** (1985) "Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows." *Proc. ASCE H.D. Delineation of landslides, flash flood and debris flow Hazards*.
- Spalletti, L., Brea, J.D., Spalletti, P.** (2002): "Contribución al ordenamiento conceptual geológico-hidráulico de flujos densos", *Seminario sobre flujos densos en áreas de montaña, San Salvador de Jujuy*.
- Takahashi, T.** (1978). "Mechanical characteristic of debris flow". *J. of Hydr. Div., ASCE*, 104.
- VanDine, D.F.** (1996). *Debris flow control structures for forest engineering*. Res.Br. British Columbia, work pap 08.
- Wan, Z., Wang, Z.** (1994). "Hyperconcentrated Flow". *IAHR Monograph Series*. A.A.Balkema.