

CONCEPTOS Y APLICACIONES SOBRE FLUJOS DENSOS EN LA HIDRÁULICA DE RÍOS

José Daniel Brea¹, Luis Spalletti², Haroldo Juan Hopwood³, Pablo Spalletti¹

Resumen:

Los flujos densos han sido estudiados desde diferentes disciplinas, como la geología y la hidráulica. En general, en la hidráulica fluvial se apunta a las aplicaciones prácticas en el campo de la ingeniería por lo que es necesaria la cuantificación de los procesos. Para ello, los desarrollos que parten de conocer la física del problema, analizando las fuerzas en juego, y que plantean ecuaciones que resuelven la dinámica, resultan los más adecuados. En ese contexto, han sido desarrolladas expresiones complejas que intentan incluir las variables que afectan el fenómeno a partir del comportamiento reológico de los flujos densos, y que permiten su estudio mediante modelación numérica. En la bibliografía, a partir de enfoques similares, se han desarrollado relaciones para definir los umbrales de las distintas clases de flujos hiperconcentrados.

La dificultad para la determinación de los datos básicos en la aplicación de dichos desarrollos, complica el uso de estas herramientas, por lo que en la práctica ingenieril en problemas de flujos densos, en general se utilizan expresiones empíricas. A modo de ejemplo, se presentan aplicaciones en la alta cuenca del río Bermejo, en el norte argentino, en las que se analizan las características del fenómeno y la información disponible, describiéndose también las expresiones que dan los parámetros básicos a utilizar en el diseño de obras.

Palabras clave: flujos densos, definiciones, aplicaciones

INTRODUCCIÓN

El tema de los flujos densos ha sido analizado desde diferentes disciplinas, entre las que se destacan la geología y la hidráulica. Aún dentro de cada una de ellas existe un amplio espectro de enfoques y definiciones, muchas veces contrapuestos (Mainali, 1994).

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 han 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.

¹ Programa de Hidráulica Fluvial - Laboratorio de Hidráulica - Instituto Nacional del Agua Argentina. E-mail: dbrea@ina.gov.ar

² Centro de Investigaciones Geológicas – Universidad Nacional de la Plata – Buenos Aires – Argentina. E-mail: spalle@cig.museo.unlp.edu.ar

³ Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Buenos Aires. E-mail: hopwood@arnet.com.ar

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.

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.

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, y siendo las aplicaciones prácticas en el campo de la ingeniería hidráulica relacionadas con los flujos densos las de mayor interés ingenieril, los desarrollos que parten de conocer la física del problema, analizando las fuerzas en juego, y que plantean ecuaciones que resuelven la dinámica del problema, resultan los más adecuados. Aún cuando la aplicación de los modelos surgidos de estas metodologías es todavía difícil, debiendo recurrirse al empirismo para la resolución de casos prácticos, el conocimiento del comportamiento cualitativo de los flujos densos que se adquiere que a partir de su desarrollo, constituye una base fundamental frente a un problema de ingeniería concreto con necesidad de ser resuelto (Brea, Spalletti, 2003).

CONSIDERACIONES DESDE LA GEOLOGÍA

Dentro de esta ciencia, aunque ya han pasado muchos años de propuesta, la clasificación de Sharpe (1960) sobre movimientos de remoción en masa subaéreos es todavía válida. Reconoce a los deslizamientos (landslides), los flujos (lentos o imperceptibles y rápidos o perceptibles) y la subsidencia, siendo importantes en este caso los dos primeros. La diferencia estriba en que mientras que en los deslizamientos no hay deformación interna en la masa que se desplaza, en los flujos sí la hay, tratándose de fluidos viscosos o plásticos. Entre los deslizamientos se ubican los desmoronamientos (slumps), así como los deslizamientos y caídas de detritos y de rocas. Entre los flujos rápidos o perceptibles, reconoce a los flujos de tierra, flujos de barro y las avalanchas de detrito.

En el marco del presente trabajo, dentro de la clasificación de Sharpe conviene tener en cuenta a los desmoronamientos, deslizamientos y, entre los flujos, a los de barro. En lo que hace a los flujos, el ordenamiento en tres términos se hace fundamentalmente sobre la base del contenido de agua involucrada en el desplazamiento, de modo tal que al aumentar la cantidad de agua se tendrá necesariamente que pasar desde un flujo en masa rápido a un flujo de carácter newtoniano, denominado de diversas maneras, todas válidas: flujo gravitacional de fluidos, flujo friccional.

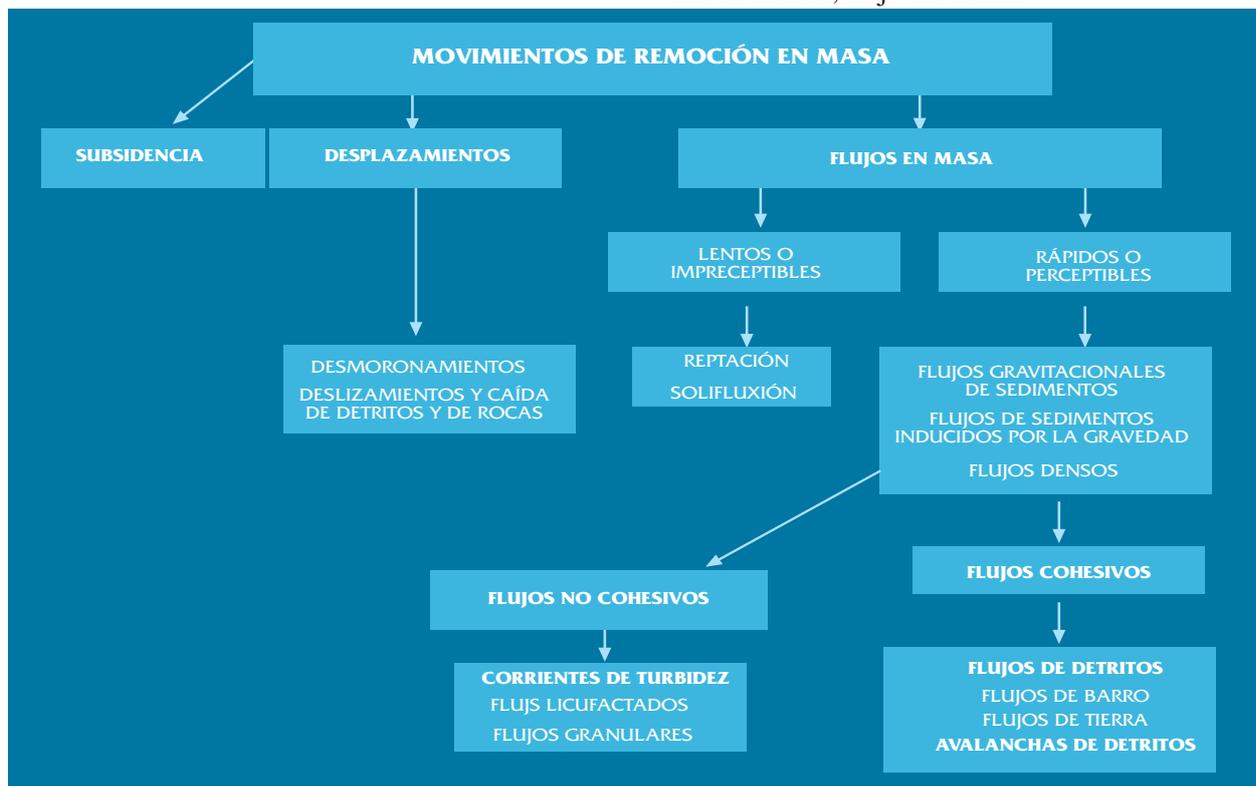


Figura 1: Clasificación movimientos de remoción en masa volumétrica.

Más modernamente a los flujos en masa se los denomina flujos gravitacionales de sedimentos (Middleton y Hampton, 1973, 1978; Middleton y Southard, 1984), flujos de sedimentos inducidos por la gravedad (McLane, 1995), o simplemente flujos gravitacionales (Lewis y McConchie, 1994). En ellos la gravedad que actúa sobre las partículas sedimentarias es la que produce el desplazamiento del fluido (Middleton y Southard, 1984). Algo similar dicen Lewis y McConchie (1994): “los materiales se mueven debido a que la aceleración gravitacional actúa directamente sobre las partículas más que sobre el medio que las rodea. Ellas finalmente se depositan cuando la componente que actúa pendiente abajo de dicha aceleración es menor que la resistencia friccional al movimiento”. Pueden aparecer en cualquier ambiente sedimentario en el que existe una pendiente, una acumulación inestable de sedimentos y un mecanismo disparador.

En un reciente trabajo, Mulder y Alexander (2001) proponen una nueva clasificación de los que denominan flujos de densidad o flujos densos (density flows) o flujos sedimentarios densos (sedimentary density flows) sobre la base de las propiedades físicas del flujo y los mecanismos de soporte de los clastos. Se refieren a los que hemos denominado flujos gravitacionales de sedimentos subacuáticos. Esencialmente proponen la subdivisión en flujos de densidad cohesivos y no cohesivos (o friccionales).

El cuadro de la Figura 1 esquematiza la clasificación sobre la que hemos venido tratando hasta este punto.

Flujos de detrito y/o flujos de barro

En los ambientes subacuáticos son los flujos densos o movimientos de remoción en masa rápidos más importantes, tanto por su frecuencia como por su poder destructivo. En la literatura geológica clásica el término más divulgado era el de flujo de barro (mud flow). Con el correr del tiempo, comenzó a tener mucha más difusión y –si se quiere– aceptación el de flujo de detrito (debris flow). Hoy en día existe cierta confusión, ya que para algunos autores ambos términos son sinónimos, para otros “casi” sinónimos y para otros, involucran a movimientos en masa singularmente diferentes.

La denominación “flujos de barro” está muy arraigada en la literatura geológica argentina. Representa a movimientos de masas de detritos que

se originan en canales preexistentes cuando se produce aporte súbito de aguas a una zona en la que hay materiales en exceso como para ser puestos en movimiento (Sharpe, 1960). Una de sus características es que son desplazamientos en los que la masa posee en material pelítico (fango), el que aunque no necesariamente predominante dota a la masa de propiedades específicas y un comportamiento especial.

Pasemos ahora a analizar algunos conceptos sobre flujo de detritos (debris flow) y compáremos. Friedman y Sanders (1978) indican que un flujo de detritos es más una masa plástica que un fluido Newtoniano y que se produce cuando hay una cantidad de sedimento suficiente como para que se incremente la viscosidad y densidad de la masa. Por su parte, Middleton y Southard (1984) destacan que en los flujos de detrito subacuáticos la mezcla de agua y sedimento tiene propiedades que los aproximan a un plástico ideal (Bingham). El rasgo más peculiar de estos flujos es la presencia de una matriz de grano fino que cumple dos funciones importantes: a) imparte una alta viscosidad a la masa, la que mantiene el flujo en condiciones laminares, b) la matriz tiene una elevada cohesión y suficiente resistencia para sostener a los clastos mayores en el flujo. Clastos del tamaño de bloques pueden entonces ser transportados incluso por flujos que se desplazan en forma relativamente lenta. Estos clastos mayores no se concentran necesariamente cerca de la base del flujo e incluso ellos pueden aparecer como proyecciones que sobresalen de la matriz en el tope del flujo siempre que la fuerza de gravedad que actúa sobre ellos no supere la resistencia de la matriz presente entre los clastos.

Allen (1985) indica que el flujo de detrito es un desplazamiento gravitacional de lento a rápido de material detrítico mezclado con una cantidad igual o subordinada de agua, sobre una pendiente moderada a baja. La mayoría de los flujos de detritos se caracterizan por ser elongados y angostos en planta, pero que cambian a mantos con geometría de lóbulo cuando circulan por áreas no canalizadas.

Como puede apreciarse, todas las definiciones son aplicables totalmente al concepto de flujo de barro, por lo que surge la pregunta acerca de si flujo de barro y de detritos representan lo mismo.

Para McLane (1995) flujo de detrito y flujo de barro son sinónimos que definen a un movimiento pendiente abajo de materiales lubricados por agua intergranular. Para Friedman y Sanders (1978) flujo de detrito y flujo de barro son “casi” sinónimos, señalando que un flujo de barro es un flujo de detritos en el que el fango es dominante; contiene más de 25 % de partículas arcillosas, y uno de los rasgos que lo distinguen es su capacidad para transportar grandes bloques, gracias a la alta densidad efectiva de la mezcla de agua y fango.

Más modernamente, la tendencia parece ser la de considerar como de mucho más amplio alcance al concepto de flujo de detritos, mientras que el de flujo de barro tiene un significado bastante más restringido.

Por empezar, los flujos de barro son sin dudas desplazamientos en masa que aparecen en ambientes netamente continentales. En cambio, los flujos de detrito pueden presentarse tanto en ambientes subaéreos como subácueos.

Cabe entonces la pregunta si flujo de barro es sinónimo de flujo de detrito subaéreo. La respuesta es negativa, encontrando nuevamente que el concepto de flujo de detrito es mucho más abarcativo que el de flujo de barro.

Una discusión muy importante al respecto ha sido efectuada por Lewis y McConchie (1994), quienes diferencian a los flujos de detritos cohesivos y no cohesivos. Para estos autores, el flujo de detritos es un tipo de flujo gravitacional de sedimentos que puede tener mecanismos de soporte de granos múltiples y en los cuales hay gradaciones a otros tipos de flujos gravitacionales. La mayoría contienen agua intersticial cuando se desplazan, pero otros pueden incluso tener aire. Lo importante es que la mayoría de los flujos de detritos poseen una fase continua y una fase dispersa. La fase continua es normalmente agua más arcillas y posiblemente otros componentes sedimentarios que se comporta como un plástico de baja viscosidad antes que como un fluido como el agua. Esta fase continua es la que soporta a la otra fase dispersa compuesta por individuos mayores que pueden ir desde arenas hasta gravas con bloques, en las que pueden aparecer clastos de gran tamaño, desde decenas a centenares de metros de longitud.

En síntesis, puede decirse que (Spalletti, Brea, Spalletti, 2002):

- el concepto de flujo de barro es sinónimo del de flujo de detrito cohesivo subaéreo;
- los flujos de detritos no cohesivos de baja viscosidad constituyen el grupo de los flujos gravitacionales de sedimentos de Middleton y Hampton (1973, 1976);
- los flujos gravitacionales de sedimentos deben subdividirse en flujos cohesivos y flujos no cohesivos (no en flujos de detritos cohesivos y flujos de detritos no cohesivos, ya que los flujos de detritos son cohesivos).

CONSIDERACIONES DESDE LA HIDRÁULICA

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. Y también dentro de esta especialidad no hay todavía un acuerdo en la bibliografía específica del tema, que es muy abundante, 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).

En situaciones normales, en los flujos cargados de sedimentos estos son transportados por la corriente, teniendo poca influencia en el comportamiento de la misma. 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 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 %.

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 (Takahashi, 1978).

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 autores que efectúan diferentes descripciones o definiciones, basadas en otras características o propiedades. Las aquí presentadas, en opinión de los autores 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 cohesión entre las partículas finas de sedimento controla el comportamiento no newtoniano de la matriz de fluido. Esta cohesión contribuye al esfuerzo de cedencia (yield stress) τ_y , que debe ser excedido por una tensión aplicada para iniciar el movimiento del fluido.

Para grandes tasas de corte (du/dy , velocidad de deformación), como puede ocurrir en abanicos aluviales empinados, pueden generarse tensiones turbulentas. Una componente adicional de la tensión de corte, la dispersiva, aparece en flujos turbulentos por la colisión de las partículas de sedimento bajo grandes tasas de deformación. Las tensiones dispersivas altas ocurren cuando las partículas más grandes de sedimento dominan el flujo y el porcentaje de partículas cohesivas es pequeño. A muy altas concentraciones de sedimentos finos, el impacto turbulento y dispersivo entre partículas es suprimido, y el flujo se aproximará a uno laminar.

La concentración de sedimentos puede variar drásticamente en un mismo evento de crecida, alternándose el dominio de las tensiones viscosas y turbulentas, produciendo flujos pulsantes.

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.

Julien y Lan (Julien y Lan, 1991) propusieron una formulación adimensional del modelo reológico, con tres parámetros que definen las tres clases de flujos hiperconcentrados en cuestión. Estos parámetros son:

- exceso de tensión de corte adimensionalizada t^*
- relación dispersiva-viscosa Dv^* (para grandes Dv^* , el flujo es dispersivo, para valores pequeños el flujo es viscoso)
- relación turbulenta-dispersiva Td^* (para grandes Td^* el flujo es turbulento, para valores pequeños el flujo es dispersivo).

A partir del contraste del modelo con datos de otros investigadores (Figuras 2 y 3), sugieren los siguientes valores guía para los flujos hiperconcentrados:

- Inundaciones de barro ocurren cuando son dominantes las tensiones turbulentas, con $Dv^* > 400$ y $Td^* > 1$
- Flujos de barro ocurren cuando son dominantes las tensiones viscosas y de cedencia, con $Dv^* < 30$
- Flujos de detritos son esperados cuando son dominantes las tensiones dispersivas, con $Dv^* > 400$ y $Td^* < 1$

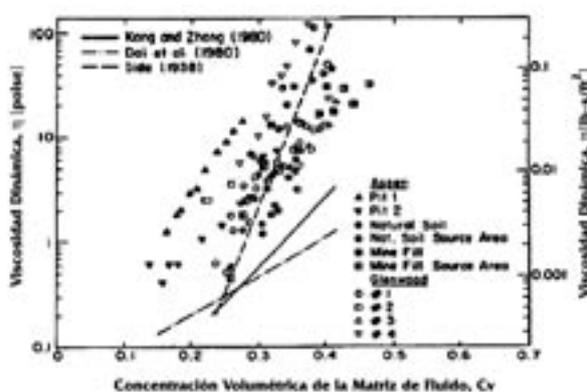


Figura 2: Viscosidad dinámica en función de la concentración volumétrica.

En resumen, la resolución de la ecuación diferencial [2] presentada permite desarrollar modelos numéricos, a partir de cuya aplicación pueden obtenerse resultados de interés para la resolución de problemas ingenieriles relacionados con los flujos densos. En la práctica, la ausencia de los datos básicos necesarios, más la dificultad de determinarlos o definirlos, complica el uso de estas herramientas en la mayoría de los casos, por lo que debe recurrirse al empirismo.

ANTE UN PROBLEMA DE INGENIERÍA

Si bien es fundamental el conocimiento de la física de este tipo de fenómenos, la mecánica de los flujos densos es materia de investigación en pleno desarrollo, y consecuentemente existe una notoria escasez de lineamientos o recomendaciones de manual para la resolución práctica de proyectos de ingeniería en estas condiciones (Hopwood, Cardini, 2003).

En numerosos ríos y cauces de montaña del noroeste argentino se presentan las condiciones necesarias para la generación de flujos densos. La afectación de poblaciones o infraestructura producida por estos eventos motiva la necesidad práctica de efectuar el proyecto y construcción de obras que mitiguen los daños asociados a los mismos. Se presentan a continuación algunos casos prácticos que reflejan lo expresado en los párrafos precedentes.

Sistematización del río Iruya, Salta, Argentina

Dentro del noroeste argentino, la cuenca del río Iruya se destaca por su elevada producción de sedimentos, que dio motivo a numerosos estudios

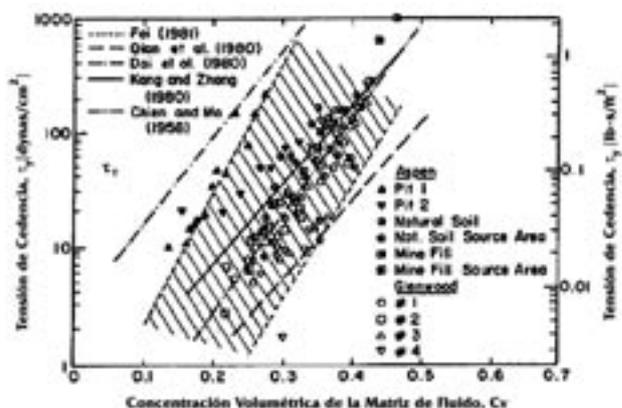


Figura 3: Esfuerzo de cedencia en función de la concentración volumétrica.

básicos sobre la misma (Pérez Ayala, Rafaelli, Brea, Peviani, 1998). Uno de ellos consistió en el proyecto de obras de sistematización de la cuenca de dicho río. Dentro de la información básica recopilada para la concreción del estudio, se obtuvo una filmación de un evento de flujos densos en la zona. A comienzos de febrero de 1999 se produjo un evento de crecida del río Colanzulí, afluente del Iruya, que pudo ser filmado a su paso frente a la ciudad de Iruya, los días 5 y 7 de febrero.

Analizando los registros de precipitaciones en la localidad de Iruya para esa fecha (Figura 4), se observa que el día 28 de enero de 1999 hubo un evento de importancia: una lluvia de 42 mm en algo más de 6 horas. Considerado a nivel diario, dicho evento constituye el máximo histórico registrado en la estación Iruya, sobre una serie disponible de veinte años (1982-2002). Luego de este evento extraordinario se sucedieron lluvias menores hasta los días previos al paso de la crecida frente a Iruya, en los que las precipitaciones registradas fueron de 18.5 mm el 3 de febrero, y de 15 mm el 5 de febrero de 1999.

El esquema de precipitaciones en la cuenca se inició pues, con un evento extraordinario que seguramente afectó las zonas más susceptibles de sufrir procesos de remoción en masa y desmoronamientos, ya sea desencadenando dichos procesos o saturando los suelos, de modo que cuando se produjeron las precipitaciones de los días siguientes, de menor magnitud, siguieron generándose importantes aportes de sedimentos al sistema.

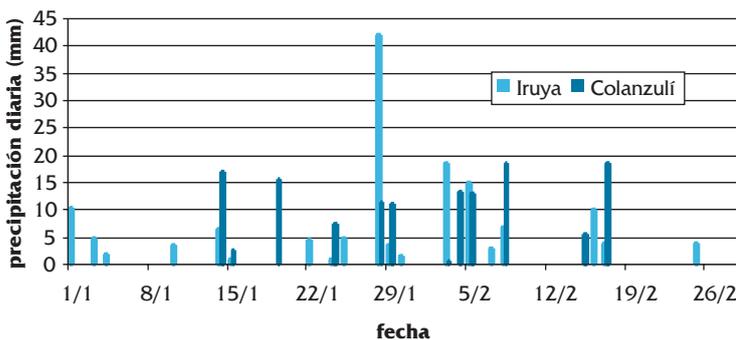


Figura 4.- Precipitaciones diarias en Iruya, enero-febrero 1999

Se observa que el evento del 28 de enero en la estación Iruya no se correspondió con uno de similar magnitud en Colanzulí (ubicada en las cabezeras de la cuenca), mientras que para la fecha del registro fílmico disponible, en ambas estaciones se registraron precipitaciones similares.

El análisis del citado video permitió observar que las características de la crecida del río Colanzulí frente a la ciudad de Iruya de los días 5 y 7 de febrero fueron las de un flujo denso ubicado entre una crecida de barro y un flujo de barro. El flujo denso registrado el día 5 de febrero tiene claramente las características señaladas de los flujos de barro, mientras que el del 7 de febrero se asemeja más a una crecida de barro. No obstante, debe tenerse en cuenta en estos casos que en un mismo evento pueden darse diferentes tipos de flujo denso, 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 (Spalletti, L., Brea, J.D., Spalletti, P.; 2003).

Las fotos de las Figuras 5, 6, 7 y 8, extraídas del video, muestran la secuencia del paso de un pulso de crecida impactando sobre las defensas rígidas ubicadas aguas arriba del pueblo de Iruya.



Figura 5.- Flujo denso frente a Iruya, 1999.(1/4)

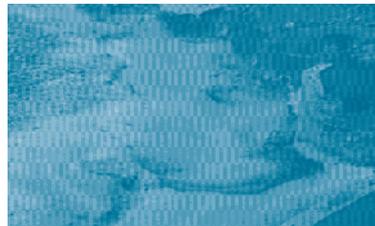


Figura 6.- Flujo denso frente a Iruya, 1999. (2/4)



Figura 7.- Flujo denso frente a Iruya, 1999. (3/4)

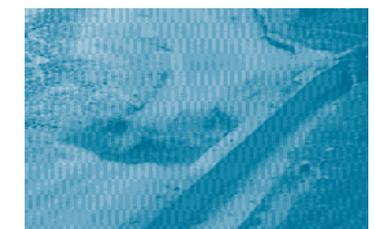


Figura 8.- Flujo denso frente a Iruya, 1999. (4/4)

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 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 sobreelevación (VanDine, 1996). Algunas de estas características pueden determinarse por rigurosos métodos y mediciones, mientras que otras requieren estimaciones de campo y reglas del arte.

La mayor parte de los puntos mencionados presenta una importante dificultad para su definición, lo que se ve agravado en este caso por la ausencia total de datos de base. Se utilizaron no obstante algunas expresiones que, a partir del conocimiento de la tipología de los fenómenos, permitieron estimar acciones para que las obras proyectadas tuvieran en cuenta los flujos densos potencialmente incidente sobre ellas.

La descarga máxima de un flujo denso depende de la geometría del canal y de la velocidad del flujo, la que queda determinada por la pendiente y geometría del canal, y la viscosidad dinámica y la densidad de la matriz del fluido. Existen expresiones para el cálculo de la velocidad, que dependen de cómo se considere el tipo de flujo. Por ejemplo, si se considera al flujo newtoniano y laminar, la velocidad puede calcularse mediante la ecuación de Poiseuille.

Un parámetro de importancia cuando se proyecta una obra transversal al flujo es la fuerza de impacto sobre la misma, la que puede calcularse mediante la expresión:

$$F = \rho A V^2 \text{ sen } \beta \quad (3)$$

donde:

- F = empuje dinámico
- ρ = densidad del flujo
- A = área transversal del flujo
- V = velocidad
- β = ángulo entre la dirección del flujo y la cara de la estructura

Este empuje debe ser distribuido en un área de igual ancho que la del flujo, y de altura igual a 1.5 el tirante, valor que tiene en cuenta la trepada del flujo. Las normas japonesas indican que si el frente de la onda del flujo pega contra la estructura, el empuje puede ser el doble del calculado.

Otra variable de importancia es la erosión producida por el flujo. La experiencia japonesa (Rickenmann, 1990) recomienda asumir una profundidad de erosión de 5 metros si no hay información básica que permita estimarla con corrección, caso que se corresponde con el del presente estudio.

Una simple expresión empírica propuesta por Kronfellner-Kraus (Kronfellner-Kraus, 1985) permite calcular la profundidad máxima de erosión E en función de la pendiente del lecho S:

$$E = 1.5 + 12.5 S \quad (4)$$

En el caso del río Colanzulí, para una pendiente del 8 %, la profundidad resultante de la fórmula es de 2.5 metros, que se encuentra en el del orden de lo recomendado por las normas japonesas.

El caso aquí descrito corresponde al diseño de obras de protecciones de márgenes y control del lecho, que pueden estar sometidas a la acción de flujos densos. En otras situaciones, el objetivo es directamente diseñar obras de protección contra flujos densos. En estos casos es de importancia conocer el tamaño de piedra estable a la acción del flujo de barro de diseño. Vale también aquí lo expresado sobre la ausencia de metodologías de cálculo universales, debiendo recurrirse a experiencias y conocimiento de campo.

Otra posibilidad de cálculo es aplicar experiencias de cuencas de similares características, en las que haya mediciones que permitan desarrollar metodologías de análisis de las propiedades físicas del barro. Tal es el caso de las utilizadas en Venezuela, sobre la base de resultados en cuencas chinas y experiencias de laboratorio (Martínez Pérez, 2000).

Como ya se expresara, en los casos presentados 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.

En estas condiciones, las obras proyectadas no dejan de ser de tipo experimental, en escala 1:1, lo que implica la necesidad de tareas de monitoreo, tanto sistemático como especial ante eventos de magnitud, a los efectos de una identificación temprana de afectaciones de las obras, que permitan la programación del mantenimiento que resulte necesarios para garantizar la estabilidad de las obras de protección (Hopwood, Cardini, 2003).

Protección de lecho sometido a acción de detritos, alta cuenca del río Bermejo, Argentina.

Una primera alternativa de protección de lecho sujeta a la acción de un flujo de detritos es la colocación de un enrocado ciclópeo. Una mejora posible del enrocado simple, dentro de las posibilidades limitadas de la logística de obras en alta montaña, es el agregado de juntas tomadas con suelo cemento.

El diámetro de roca estable en una rápida de enrocado simple puede estimarse mediante la expresión de Knauss (Hopwood, Cardini, 2003):

$$\frac{q}{\sqrt{g(\Delta D)^3}} = 1.18 + 0.5 \phi - 1.87 \text{sen}(\alpha) \quad (5)$$

donde:

- ϕ = coeficiente de colocación (0.6 para piedra volcada, 1.1 para piedra colocada en seco)
- α = pendiente de la rampa en grados
- Δ = densidad relativa
- q = caudal específico
- D = diámetro del enrocado

Esta expresión se utilizó en el caso del cruce del río Volcán, a 2400 msnm, perteneciente a la cuenca del río Bermejo. En la figura 9 se presenta la granulometría del río en la zona de emplazamiento de la obra.

A los efectos de brindar una mejora de estabilidad al enrocado ciclópeo sujeto a la acción de flujos de detritos, surgido directamente del cálculo mediante la expresión [5], se consideró recomendable realizar el relleno de las juntas entre rocas mediante el agregado de suelo cemento. El especto final del enrocado ciclópeo con juntas tomadas con suelo cemento se observa en la Figura 10.

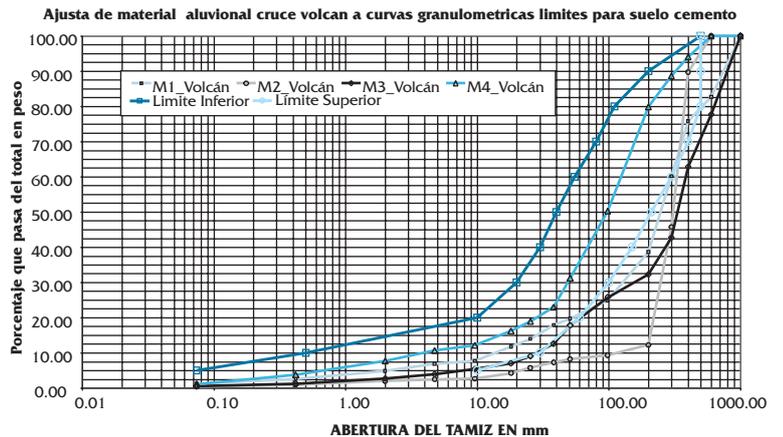


Figura 9.- Granulometría lecho del río Volcán en zona de obra



Figura 10.- Enrocado ciclópeo con junta tomada con suelo cemento

Puede suceder en algunos casos que las solicitaciones atribuibles a la acción del flujo de detritos excedan el límite de estabilidad esperable de una protección de enrocado ciclópeo con junta tomada. En estos casos es posible considerar la aplicabilidad de una protección con un enrejado de perfiles o barras de acero estructural.

Este fue el caso del río San Andrés, a 1800 msnm, también en la cuenca del río Bermejo, donde se proyectó la protección del cruce de un gasoducto. La metodología de aplicada en este caso fue un entramado de barras de acero con una distancia entre barras transversales y longitudinales de 750 mm.

La capa superior de barras se orientó en el sentido de la corriente., y la inferior en sentido transversal. Las barras fueron de acero de sección cuadrada 63.5 x 63.5 mm. La reja se apoyó en vigas transversales que a su vez permitieron el alojamiento de los cabezales y placas de apoyo de los anclajes en roca destinados a sujetar el conjunto a la acción del arrastre debido al flujo de detritos.



Figura 11. Protección de lecho con reja de acero estructural

CONCLUSIONES

Más allá de las investigaciones básicas sobre el tema de los flujos densos desde diferentes disciplinas, 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.

Sí resulta de interés el ordenamiento conceptual entre la geología y la hidráulica, porque permite una mejor comprensión y entendimiento, facilitando las tareas interdisciplinarias en este tipo de problemáticas. Sobre el particular, se ha observado que, en términos generales, los enfoques geológicos e ingenieriles para el tratamiento de los procesos de transporte por flujos densos y de sus productos han seguido caminos paralelos, con muy escasos puntos de convergencia. También es llamativo que la bibliografía en la que se basan ambas disciplinas es singularmente distinta. Motivo de esto puede deberse a que los geólogos han hecho hincapié en los productos (sedimentos, depósitos) a los que conducen estos procesos, mientras que los ingenieros han prestado mucha mayor atención al funcionamiento de estos mecanismos de transporte en masa, con fines de aplicaciones prácticas.

Sin embargo, este trabajo comparativo nos muestra que entre los conceptos geológicos y de la ingeniería hidráulica referidos a los flujos densos surgen muchos puntos en común, quizás más de lo que podría haberse supuesto. Así por ejemplo, el empleo entre los ingenieros hidráulicos de flujos hiperconcentrados para denominar a las inundaciones de barro, flujos de barro y flujos de detritos es perfectamente compatible con el que se da en el campo de la geología, aunque en esta última es todavía mucho más frecuente la utilización de flujo gravitacional de sedimentos o flujo denso como vocablos de alcance más abarcativo o general.

Por su parte, la diferenciación entre flujos densos cohesivos y no cohesivos que se hace actualmente en geología es adaptable sin ningún inconveniente al campo de la ingeniería. El concepto de inundación de barro empleada en hidráulica es semejante al de crecidas en la jerga geológica. Existe además un absoluto acuerdo en lo que se refiere al empleo de flujo de barro.

El punto de mayor divergencia se relaciona con la utilización de flujo de detrito, ya que mientras en hidráulica está referido a un flujo denso no cohesivo, en el campo geológico se orienta a caracterizar a un flujo denso cohesivo. El arraigo del vocablo flujo de detritos para definir a estos diferentes procesos parece imposibilitar llegar a un acuerdo de tipo nomenclatural entre geólogos e ingenieros hidráulicos, lo que obviamente no se intenta ni sugiere en la presente contribución. No obstante, siendo tan amplio el universo de las definiciones presentadas, es posible que en un determinado y adecuado marco, lleguemos a estar absolutamente de acuerdo.

En este contexto, desde la hidráulica, y siempre dentro del universo de definiciones y clasificaciones existentes, resultan de especial interés los desarrollos que 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. En este sentido, se recomiendan las definiciones y expresiones que tienen en cuenta el comportamiento reológico de los flujos densos, como las que surgen de los estudios de Julien, Lan, O'Brien, entre otros.

La ausencia de los datos básicos necesarios, y su dificultad para determinarlos o definirlos, complica el uso de este tipo de modelos, debiéndose recurrir necesariamente al empirismo para la

resolución de problemas particulares, tal como se ha descrito en la aplicación presentada sobre la cuenca del Iruya. Esta es la situación más probable ante la que pueda encontrarse un ingeniero frente a un problema de flujos densos.

Aún dentro del empirismo, las expresiones de cálculo ofrecidas en la bibliografía no pasan de ser aplicaciones válidas para las condiciones en que fueron desarrolladas. En estas condiciones, un adecuado conocimiento e interpretación de la física del fenómeno, complementado con relevamientos y análisis de campo, permitirán encarar adecuadamente el proyecto de obras, las que de todos modos serán de tipo experimental, en escala natural.

LISTA DE SÍMBOLOS

A:	Área transversal del flujo
C:	Coefficiente de tensión de corte inercial
C_v :	Concentración de sedimentos en volumen
D:	Diámetro del enrocado
Dv^* :	Relación dispersiva viscosa
E:	Profundidad máxima de erosión
F:	Empuje dinámico
g:	Aceleración de la gravedad
q:	Caudal específico
S:	Pendiente del lecho
Td^* :	Relación turbulenta-dispersiva
V:	Velocidad media del flujo
α :	Pendiente de rampa en grados
β :	Ángulo entre la dirección del flujo y la cara de la estructura
Δ :	Densidad relativa
ϕ :	Coefficiente de colocación de enrocado en rampa
η :	Viscosidad dinámica
ρ :	Densidad del flujo
τ :	Tensión de corte total.
τ_c :	Tensión de cedencia cohesiva
τ_d :	Tensión de corte dispersiva
τ_{mc} :	Tensión de corte de Mohr-Coulomb
τ_t :	Tensión de corte turbulenta
τ_v :	Tensión de corte viscosa
τ_y :	Tensión de cedencia.

REFERENCIAS

- ALLEN, J.R.L. (1985). "Principles of Physical Sedimentology". Allen & Unwin, 272 pp. London.
- BREA, J.D.; SPALLETTI, P.D. (2003). "Flujos densos e hidráulica de ríos". Nuevas tendencias en Hidráulica de Ríos. Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Buenos Aires. Argentina. ISBN 987-20109-1-9.
- COUSSOT, P.; MEUNIER, M. (1996). "Recognition, classification and mechanical description of debris flows". Earth Science Reviews 40, 209-227. Elsevier Science.B.V.
- FRIEDMAN, G.M. & SANDERS, J.E. (1978). "Principles of Sedimentology". John Wiley & Sons, 792 pp. New York.
- HOPWOOD, H., CARDINI, J. (2003). "Protecciones de lecho sujetos a flujo de detritos". Nuevas tendencias en Hidráulica de Ríos. Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Buenos Aires. Argentina. ISBN 987-20109-1-9.
- JULIEN, P., LAN, Y. (1991). "On the rheology of hyperconcentrations". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 117.
- 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.
- KRONFELLNER-KRAUS, G. (1985). "Quantitative estimation of torrent erosion". Proc. International Symposium on Erosion and Disaster Prevention. Tsukuba. Japan.
- LEWIS, D.W. & MCCONCHIE, D. (1994). "Practical Sedimentology." Chapman & Hall, 213 pp. New York.
- MAINALI, A.; RAJARATMAN, N. (1994). "Experimental study of debris flow". Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. Vol 120. No.1. Discussion by P.Coussot and M.Meunier in Journal of Hyd. Eng. ASCE. May 1995.
- MARTÍNEZ PÉREZ, E. (2000). "Dimensionamiento de obras de protección contra flujos de barro". Anales del XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Córdoba. Argentina. Tomo III. ISBN 950-33-0268-4.
- MCLANE, M., (1995). "Sedimentology". Oxford University Press, 423 pp. Oxford.
- MIDDLETON, G.V. & HAMPTON, M.A. (1973). "Sediment gravity flows: mechanics of flow and deposition". In: Middleton, G.V. & Bouma, A.H. (Eds.) Turbidities and Deep Water Sedimentation. Short Course 1, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists: 1-38. Tulsa.
- MIDDLETON, G.V. & HAMPTON, M.A. (1978). "Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity flows". In: Stanley, J.D. & Swift, D.J.P. (Eds.) Marine Sediment Transport and Environmental Management. John Wiley & sons: 197-218. New York.
- MIDDLETON, G.V. & SOUTHWARD, J.B. (1984). "Mechanics of Sediment Movement". Lecture Notes, Short Course 3, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 401 pp. Tulsa.
- 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.

- PÉREZ AYALA, F., RAFAELLI, S., BREA, J.D. PEVIANI, M. (1998). "Programa de manejo integrado de la Cuenca del Iruya. Metodología para su desarrollo". Anales del XVII Congreso Nacional del Agua. Santa Fe, Argentina.
- SHARPE, C.F.S. (1960). "Landslides and related phenomena." Columbia University Press, 138 pp. New York.
- 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. Argentina.
- RICKENMANN, D. (1990). "Debris flow 1987 in Switzerland: modeling and sediment transport. Hydrology in Mountainous Regions". IAHS Publ. N° 194.
- RICKENMANN, D. (1999). "Empirical relationships for debris flows". Natural Hazards 19. Kluwer Academic Publishers. Netherlands.
- 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.