

LA HIDRÁULICA TORRENCIAL

GUILLERMO LEÓN RENDÓN VALENCIA

Msc. Ciencias y Técnicas del Agua Estrasburgo, Francia

Profesor Asociado - Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

RESUMEN

El tema de la hidráulica torrencial apenas empieza a adquirir importancia en nuestro medio.

Este artículo trata de establecer algunas diferencias entre la hidráulica fluvial y la hidráulica torrencial.

Una revisión bibliográfica sobre el tema permite presentar los modelos reológicos más utilizados en el análisis de flujos torrenciales y la aplicación del método simplificado de Jhonson, herramienta importante para caracterizar un fluido no-newtoniano en un lecho natural.

PALABRAS CLAVES:

Reología, torrencial, torrentes, avalanchas, lahares, lavas, flujo de lodos, comportamientos no-newtonianos.

ABSTRACT

The subject of the torrential hydraulics is just beginning to take importance in our medium.

This paper tries to establish some differences between fluvial hydraulics and torrential hydraulics. A bibliographical review of the theme permits to present the rheological models currently used for the analysis of torrential flows and the applications of the Johnson's simplified method, important tool to characterize a non-Newtonian fluid in a natural bed.

KEY WORDS

Rheology, debris flow, torrential, torrents, floods, mud flows, non-newtonian behaviour.



1. INTRODUCCIÓN

Hasta hace dos décadas, se puede afirmar que el desarrollo de la hidráulica fluvial se limitó a estudiar las relaciones fundamentales de la dinámica de los fluidos Newtonianos (fundamentalmente el agua). Es así como el análisis de la resistencia al flujo en ríos y canales permitió establecer relaciones confiables para variables fundamentales como la velocidad, la profundidad, el caudal, la pendiente y la rugosidad del lecho en flujos de agua «clara», pero no así, para otras variables o características físicas y dinámicas como la viscosidad, la densidad, la intensidad de la turbulencia, la tensión de corte, el caudal sólido, la movilidad del lecho, etc. en flujos con fuertes concentraciones en sedimento y en altas pendientes, como son los flujos que en adelante denominaremos flujos torrenciales (flujos de lodos, avalanchas, lahares, lavas, flujos cargados, etc.).

Estos fluidos en movimiento, no se comportan como fluidos Newtonianos y por lo tanto, otros modelos (no Newtonianos) deben ser utilizados para describir adecuadamente el fenómeno. En este tipo de flujos, además de la disipación interna de energía, debida a la interacción entre las partículas, la resistencia al flujo depende también de distorsiones internas causadas por las grandes rugosidades y de las pérdidas de energía resultantes de cambios de aceleraciones locales y de la diferencia de velocidades de desplazamiento entre los sedimentos y el líquido. En este artículo, se hace referencia, inicialmente a la distinción que se establece informalmente entre la hidráulica fluvial o clásica y la hidráulica torrencial; luego se hace alusión a las leyes de comportamiento o modelos reológicos más utilizados en el análisis de flujos torrenciales y finalmente se presenta un método simplificado que permite caracterizar flujos concentrados en lechos naturales.

Apenas en la década del 80 se empezaron a desarrollar algunas experimentaciones importantes en el mundo (China, Japón, Estados Unidos, Suiza y Francia principalmente) tendientes a seleccionar leyes que caractericen el comportamiento de flujo torrencial. Nosotros en Colombia hemos padecido el efecto de la fuerza devastadora de estos flujos, con una

frecuencia de ocurrencia mucho mayor de la que, normalmente a ellos se atribuye (Armero en 1985, inundaciones en la mayoría de las quebradas del Valle de Aburrá en 1988, San Carlos en 1990. Tapartó y Curumani en 1991, Caquetá en 1992, Murindó y Tariquitudó en 1993, Manizales y Paez en 1994, Carmen de Atrato en 1995, nudo de Paramillo en 1997 para mencionar solamente algunos sitios).

Es importante tener presente que los fenómenos torrenciales no son tan inhabituales ni tan extraordinarios, lo que sucede más bien es que nuestra memoria suele ser corta, en un país andino como el nuestro, donde el 80% de la población habita en regiones montañosas, habrá siempre que contar con que las avalanchas pueden sobrevenir no importa cuándo ni dónde y es por ello, que luego de presentar las debilidades o limitantes de la hidráulica fluvial para el análisis de flujos torrenciales, se presentan algunos modelos reológicos, conceptos y métodos de análisis que espero permitan comprender un poco mejor los fenómenos torrenciales.

2. LIMITES DE LA HIDRÁULICA FLUVIAL - TORRENCIAL

Aunque oficialmente no existe una frontera definida entre la hidráulica fluvial y torrencial, la mayoría de investigadores coinciden en que un flujo torrencial desarrolla una dinámica especial que no es posible abordar con las bases técnicas de la hidráulica clásica. Un flujo torrencial se caracteriza por contener un alto porcentaje de material sólido (del orden de millones de m³ por evento), transitar por cauces de altas rugosidades (del mismo orden de magnitud que el radio hidráulico) y por altas pendientes (superior a 1%) en ellos la presencia de sólidos suele incrementar considerablemente su viscosidad.

Aunque la hidráulica fluvial ha permitido calcular eficazmente las obras hidráulicas y las correcciones requeridas en muchos de nuestros ríos, en la mayoría de nuestras quebradas, torrentes, o ríos de montaña ésta no puede ser utilizada satisfactoriamente, ya que dichos flujos presentan una serie de particularidades que conllevan a un campo de aplicación completamente diferente.

En un torrente se suelen presentar pendientes muy diversas; en la parte baja o cono de dejección (ver la Figura 1) se suelen encontrar pendientes del 1 a 10%, a lo largo del canal o zona de transporte, las pendientes pueden variar de 5 a 50% o más, lo que impide casi siempre el establecimiento de un régimen de flujo uniforme.

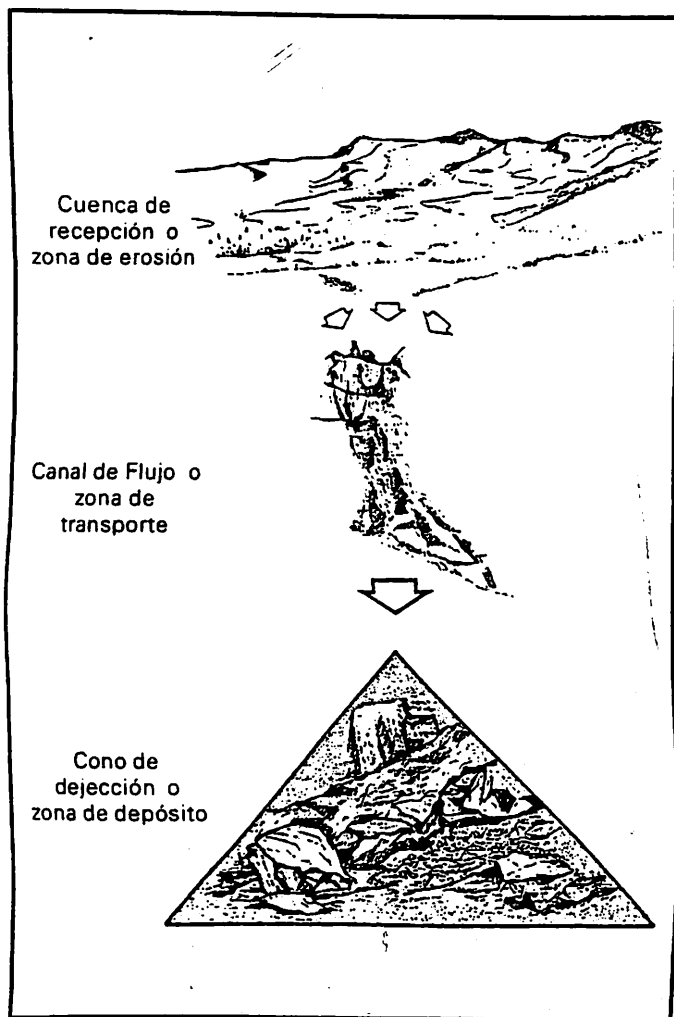


Figura 1. Diferentes partes de un lecho torrencial

Con respecto a la rugosidad, la talla de los elementos encontrados en un lecho torrencial (del orden de m^3 en crecientes) y su heterogeneidad, difieren considerablemente de la granulometría del fondo de un río viejo o de llanura (del orden de mm^3 o cm^3 en crecientes). La mayoría de las fórmulas de la hidráulica fluvial, son confiables solamente para las condiciones en las cuales éstas fueron establecidas, lo cual limita demasiado su campo de aplicación.

Para efectos de considerar la rugosidad del lecho, las fórmulas de la hidráulica fluvial suelen reemplazar toda la curva granulométrica de los diferentes tamaños por un diámetro calificado de equivalente o característico (d_{50} , d_{65} , d_{90} u otro).

Existen dos criterios primordiales para diferenciar el dominio o campo de experimentación de la hidráulica fluvial y de la hidráulica torrencial, estos son: la pendiente del fondo y la profundidad relativa.

En cuanto a la pendiente (I), el establecimiento de la frontera es puramente subjetivo, pero la mayoría de las publicaciones coinciden en que la pendiente del 1% constituye el límite superior conveniente para el campo de estudio de la hidráulica fluvial.

En cuanto a la profundidad relativa, definida ésta como la relación entre la profundidad (h) y el tamaño de material del lecho superior al 90% de los tamaños existentes (d_{90}), se distinguen en general tres rugosidades así:

- rugosidad importante $h/d_{90} < 1.2$
- rugosidad media $1.2 < h/d_{90} < 4$
- rugosidad baja $h/d_{90} > 4$

En general el campo de la hidráulica fluvial considera desde rugosidades bajas hasta intermedias.

Si representamos en un diagrama (ver la Figura 2), en el cual la abscisa tiene la pendiente en % y en la ordenada la profundidad relativa en valor absoluto, vemos que el campo de estudio de la hidráulica fluvial ($I < 1\%$, $h/d_{90} > 4$) es mucho más restringido que el de la hidráulica torrencial ($I > 1\%$, $h/d_{90} < 4$).

3. ESCOGENCIA DE UN MODELO REOLÓGICO EN HIDRÁULICA TORRENCIAL

Ya se ha dicho, que cuando un flujo contiene altas concentraciones de sedimentos y transita por lechos pendientes y muy rugosos, las características físicas y dinámicas del flujo son muy diferentes a las del agua en régimen uniforme en cualquier río o canal.

Corrientemente, se habla de flujos torrenciales cuando los fluidos son cargados de material fino cohesivo en concentraciones altas (muchas veces hasta de 80% del peso total de la mezcla); la presencia de las partículas de sedimento regulariza la turbulencia al interior del fluido y liga las partículas líquidas y sólidas, por lo que a este tipo de flujo se le denomina monofásico o de Bingham (por su comportamiento reológico); estos flujos se suelen presentar en avalanchas e inundaciones en lechos de baja pendiente. Cuando este tipo de flujo sobrepasa el límite líquido se tiene lo que denominaremos comúnmente como deslizamiento de tierra.

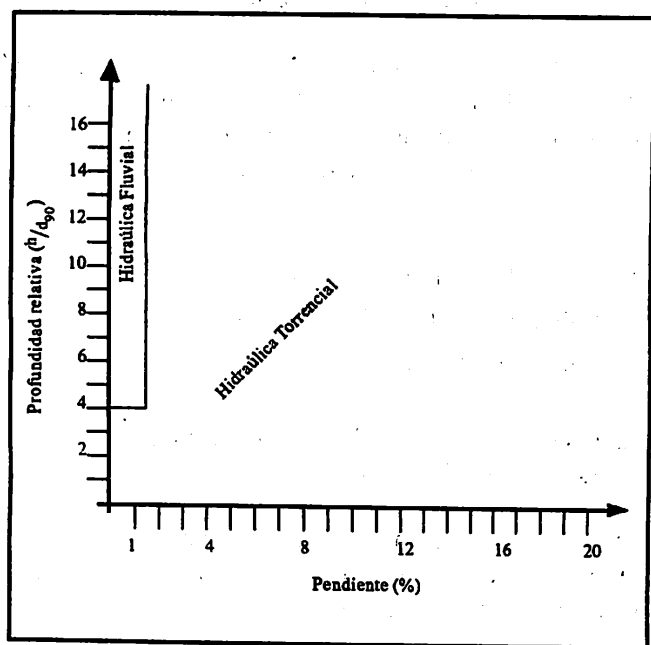


Figura 2. Campo de estudio de la hidráulica fluvial y torrencial

En los flujos naturales, también se presentan con frecuencia los flujos bifásicos constituidos por material granular (gravas, piedras o grandes rocas) en presencia, tan reducida, de material fino cohesivo que no se alcanza a constituir una mezcla homogénea; en este tipo de flujo las partículas granulares chocan entre sí originando un esfuerzo dispersivo importante por lo que se les suele denominar flujos dilatantes bifásicos o de Bagnold (por su comportamiento reológico).

Estos tipos de flujos se suelen presentar en forma de avalanchas en las zonas de alta pendiente, erosionando considerablemente los lechos y originando un arrastre torrencial de dimensiones devastadoras. En general, la mayoría de los flujos naturales se encuentran entre las dos tendencias que acabamos de describir y que se muestran en el esquema triangular de la Figura 3, pero no existe ningún límite preciso que se pueda fijar con exactitud para cada flujo, ni tampoco una ley de comportamiento o modelo reológico a considerar en cada caso que describa perfectamente el fenómeno.

Para la selección de un modelo reológico que permita explicar las características de un determinado flujo torrencial, es necesario realizar un razonamiento crítico, basado en la comparación de los datos cuantitativos que se puedan obtener de mediciones efectuadas bien sea a nivel microscópico, sobre muestras concentradas en sedimento (en viscosímetros clásicos en el laboratorio o en modelos físicos reducidos) o bien a nivel macroscópico (directamente en los flujos naturales) considerando valores promedios de parámetros reológicos e hidráulicos globales que intervengan en cada tipo de problema y mediante la ayuda de cámaras de filmación, radares, sismógrafos, piezómetros y muestreadores. La mayoría de los resultados experimentales realizados hasta ahora con viscosímetros y en modelos reducidos (Migniot, Cheny Lun Chen, Pfeiff, Valentik, Fleishman, Daido, Engelund, Smart y Jaegge, para citar sólo algunos) arrojan resultados bastante similares, coincidentes y factibles de ser representados por modelos reológicos generalizados como el viscoplastico de Cheng Lung Chen o el modelo potencial. No se puede decir lo mismo de los datos experimentales provenientes de flujos naturales (en erupciones del volcán Santa Helena en Estados Unidos, en el Monte Yakedake en Japón, en el río Amarillo en China, o en torrentes de los Alpes Suizos y Franceses principalmente), los resultados han sido mucho más dispersos entre sí y bastante alejados de los resultados obtenidos a nivel microscópico; tampoco se presenta mucha coincidencia en cuanto a que se tenga un solo modelo reológico que traduzca adecuadamente estos fenómenos, sin embargo, hasta el presente, el modelo

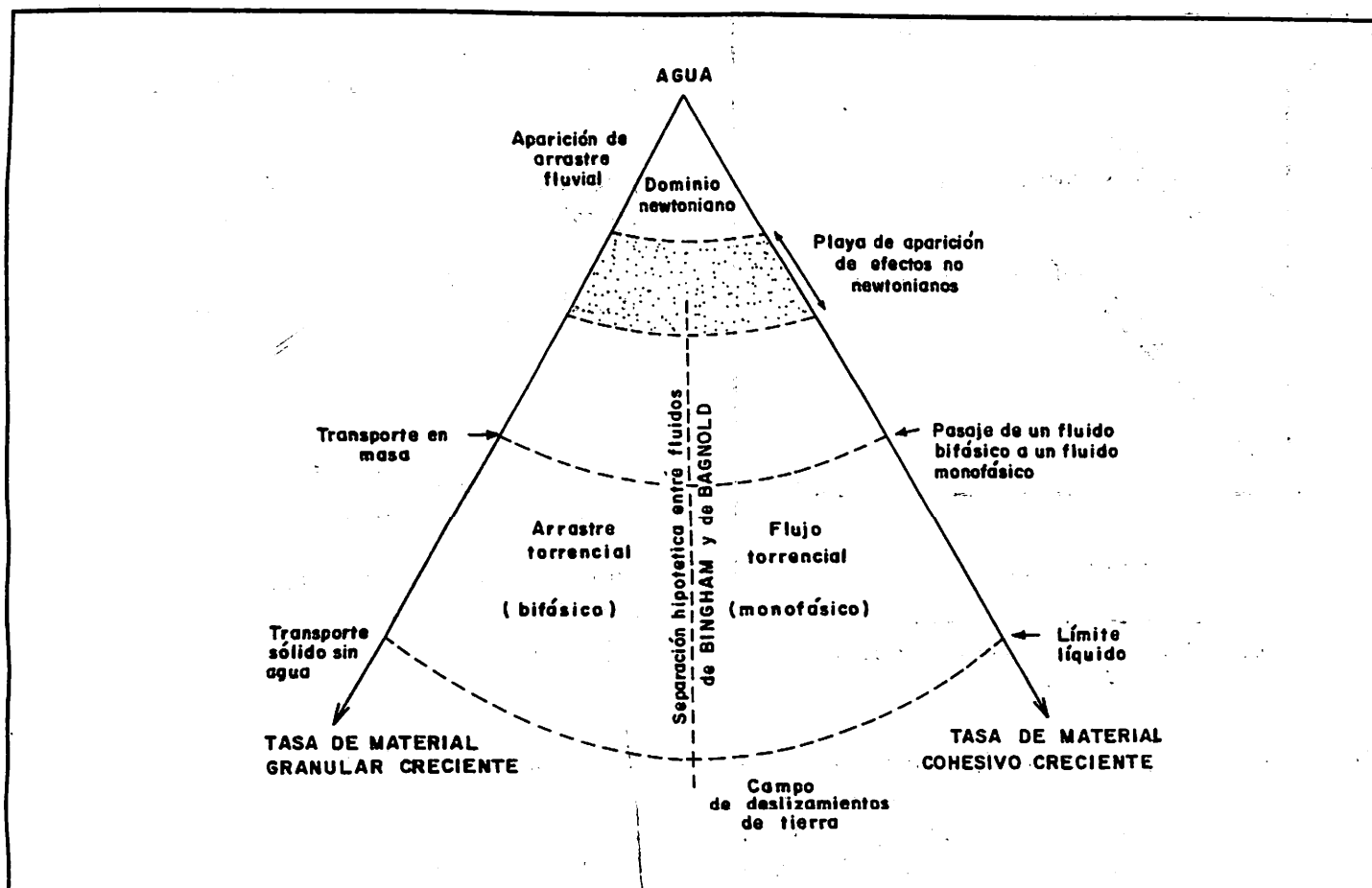


Figura 3. Tendencias de conformación de los flujos naturales y modelos reológicos utilizados

plástico de Bingham ha sido el más utilizado y según Pierson y Johnson, éste puede traducir satisfactoriamente las condiciones reales (así sea globalmente) de estos flujos. Jensen ha propuesto un método para el caso de flujos en lechos semicirculares o elípticos, que puede ser utilizado para la evaluación aproximada de cualquier flujo torrencial.

4. MODELO DE JOHNSON

Se supone un comportamiento según la ley de Bingham

$$\tau = \tau_c + \eta \left(\frac{du}{dy} \right) \quad (1)$$

donde:

- τ = tensión cortante
- τ_c = tensión de cedencia o de fluencia (esfuerzo mínimo para empezar a fluir)
- η = viscosidad plástica o de Bingham
- du/dy : velocidad de deformación o rata de corte

El reograma de un flujo de Bingham es el de una recta de pendiente η que no pasa por el origen como en el caso de un fluido Newtoniano.


 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
 SEDE MEDELLÍN
 DEPTO. DE BIBLIOTECAS
 BIBLIOTECA MINAS

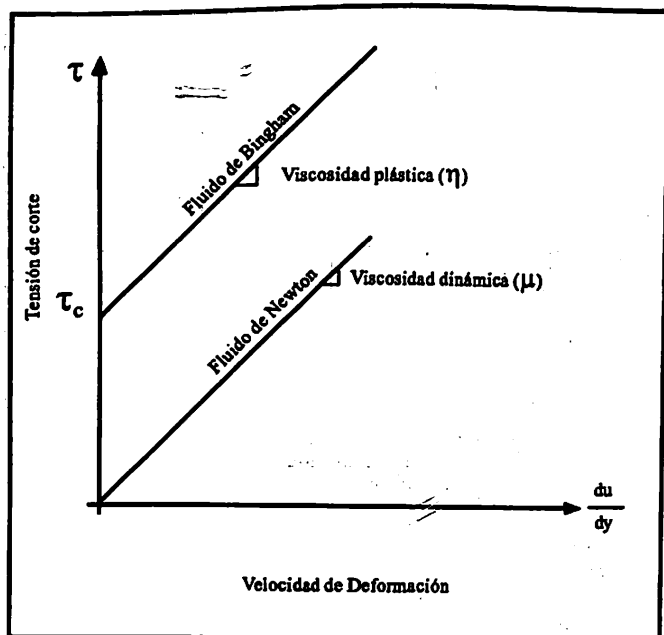


Figura 4. Reogramas de fluidos Binghamianos y Newtonianos

En un canal semi-circular (ver la Figura 5) el perfil de velocidades para un fluido de Bingham está compuesto de una parte parabólica correspondiente a la zona laminar localizada alrededor del núcleo central.

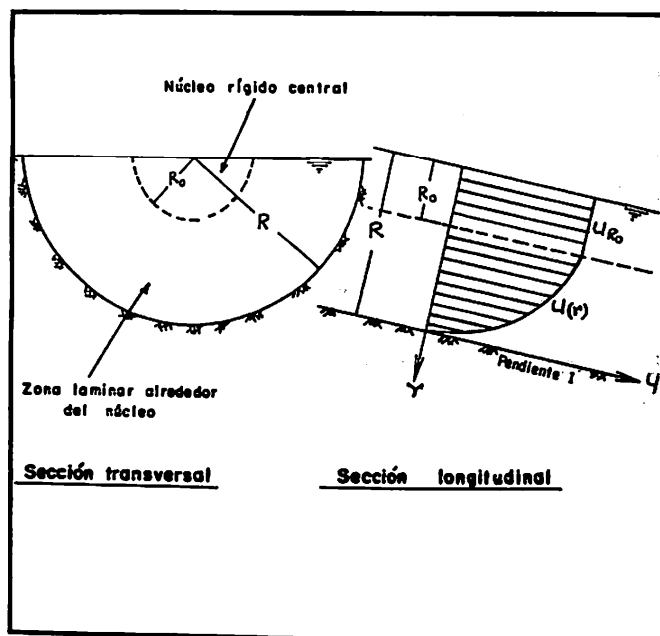


Figura 5. perfil de velocidades para un fluido de BINGHAM en un canal semicircular

$$\mu(r) = \frac{1}{\eta} \left[\frac{R^2 - r^2}{4} I \rho_m g - (R - r) \tau_c \right] \text{ para } r > R_0 \quad (2)$$

y de una parte constante correspondiente al núcleo central.

$$\mu(R_0) = \frac{1}{\eta} \left[\frac{R^2 - R_0^2}{4} I \rho_m g - (R - R_0) \tau_c \right] \quad (3)$$

con:

$$R_0 = \frac{2\tau_c}{\rho_m g I} \quad (4)$$

En un canal elíptico, la velocidad constante del núcleo central puede ser calculada según Hampton por la expresión

$$\mu(m) = \frac{1}{\eta} \left[\frac{\rho g I}{2 \left[1 + \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right]} \left[b^2 + \left[\frac{\tau_c \left[1 + \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right]}{\rho_m g I} \right]^2 \right] - \tau_c b \right] \quad (5)$$

En las expresiones (2), (3), (4), (5)

ρ_m = densidad de la mezcla o suspensión

$$\text{con } \rho_m = C_v (\rho_s - \rho) + \rho \quad (6)$$

C_v : concentración en volumen de la mezcla

ρ_s : densidad del sedimento

ρ : densidad del líquido (agua)

g : aceleración de la gravedad

I : pendiente del lecho o de la superficie del agua

Para poder caracterizar completamente un flujo Bingham es necesario conocer los parámetros reológicos τ_c y η , que mediante el método de Johnson se pueden determinar de una manera simplificada a partir de las siguientes expresiones:

$$\tau_c = \tau'_c a \rho_m g I = \tau''_c b \rho_m g I \quad (7)$$

$$X_0 = \frac{\tau_c}{\rho_m g l} \left[\left(\frac{a}{b} \right)^2 + 1 \right] \quad (8)$$

donde:

a : semiancho de la sección transversal (elíptica o semicircular)

b : profundidad máxima en la sección

X_0 : semiancho del núcleo central (ver la Figura 6)

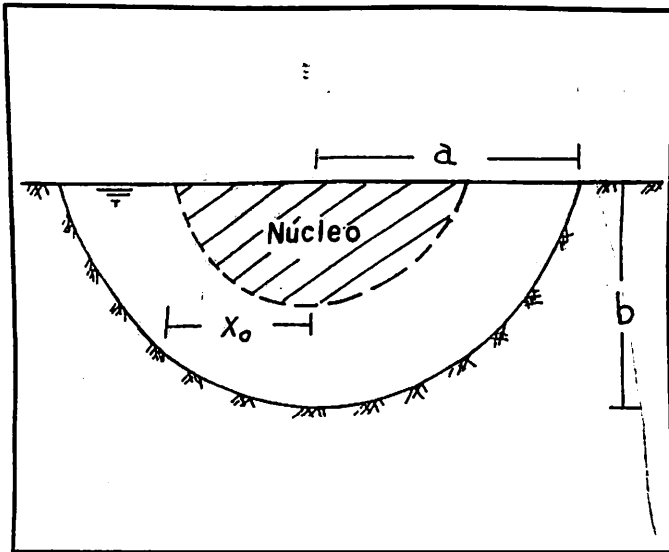


Figura 6. Sección transversal de un canal elíptico

Johnson presenta la solución gráfica de la ecuación (5) en los ábacos de la Figura 7, lo cual representa un método simplificado para determinar la tensión de cedencia y la viscosidad plástica en flujos torrenciales en canales no circulares.

Para ello Johnson parte de igualar la ecuación (5) a la siguiente expresión

$$\mu(n) = \frac{\mu'(n) \rho_m g l b^2}{\eta} \quad (9)$$

luego se procede en la forma siguiente:

- i. Se mide la pendiente del lecho o de la superficie del fluido (I)
- ii. Se mide igualmente el semiancho (a) y la

profundidad (b) de la sección del flujo

- iii. Se localiza visualmente el núcleo central (este presenta cierto aspecto rígido como una especie de canal, taco o tapón central).
- iv. Se mide el semiancho de dicho núcleo (X_0).
- v. Se mide mediante la ayuda de bastones lanzados y cronómetro la velocidad de dicho núcleo $\mu(n)$
- vi. Se calcula el valor de (a/b) y de (X_0/a) y con estos dos valores se lee el valor de τ'_c en el gráfico A de la Figura 7.

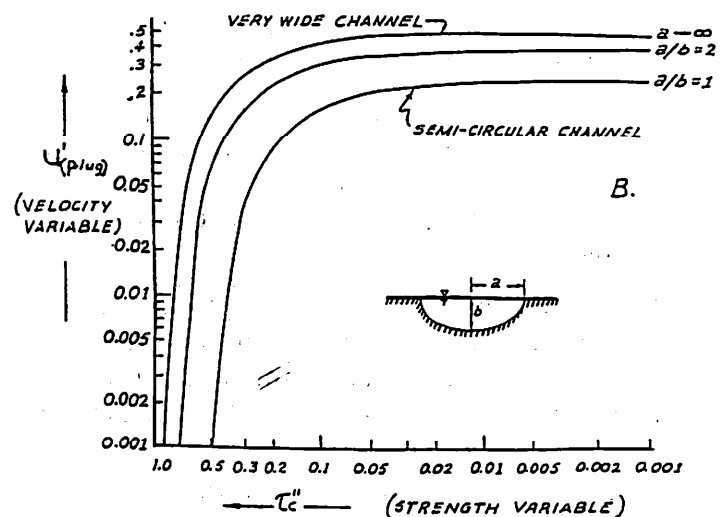
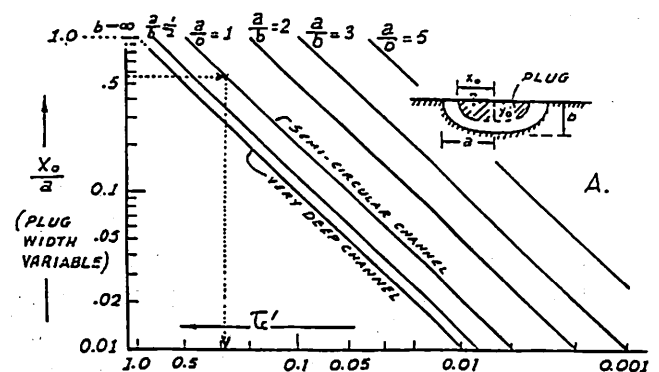


Figura 7. Gráficas de JOHNSON

- vii. Con el valor de τ'_c se calculan los valores de τ_c y τ''_c en la ecuación (7)
- viii. Con los valores de τ''_c y de (a/b) se obtiene el valor de $\mu'(n)$ en el gráfico B de la Figura 7.
- ix. Con los valores de $\mu'(n)$ y $\mu(n)$ se obtiene el valor de la viscosidad plástica de la mezcla en la ecuación (9).

El análisis de resultados obtenidos mediante este procedimiento ha mostrado que los resultados varían considerablemente cuando se pasa de una forma de canal a otra, lo cual ha permitido confrontar las propiedades del fluido, y las características del flujo con la configuración del canal.

5. CONCLUSIONES

- Las exigencias impuestas por la complejidad de los flujos torrenciales, hace necesario que se desarrolle cuanto antes la investigación en este campo con el fin de conocer y aplicar lo que al respecto se está haciendo en otras latitudes y de presentar ideas nuevas para el establecimiento de una hidráulica torrencial que permita analizar con detenimiento y profundidad aspectos de diseño y cálculo de obras de protección en nuestros cauces naturales (la mayoría de ellos torrenciales).
- Los aspectos analizados en estas breves notas, constituyen solamente una muy pequeña parte de los diversos temas complejos e inexplorados (muchos de ellos) de la hidráulica torrencial y la reología.
- El conocimiento y evaluación precisa de los parámetros reológicos: tensión de fluencia, viscosidad y concentración son necesarios para poder estimar adecuadamente los parámetros hidráulicos del flujo.
- El método de Johnson se constituye en una herramienta importante para el análisis de flujos torrenciales ya que considera la influencia de la geometría del lecho, pero para utilizarlo en un flujo natural debemos primero verificar que se trata de un flujo monofásico (Binghamiano) y ser

conscientes de las simplificaciones del método al no considerar el efecto de escala, el efecto de zonas muertas, la no uniformidad de la sección del canal, etc.

Es importante tener presente que los flujos torrenciales no son tan inhabituales ni tan extraordinarios y que resulta utópico creer que el hombre será capaz un día de controlar la naturaleza hasta el punto de evitar estos fenómenos, pero no quiere decir, ello, que no debamos esforzarnos por aprender a interpretar los signos de la naturaleza con miras a adquirir algún dominio y comprensión de este tipo de eventos y podernos proteger de sus consecuencias.

Finalmente, lamento haber hecho una presentación tan resumida de un tema tan complejo, sin embargo, el objetivo de este artículo se habrá logrado si el lector ha tomado conciencia, de que la interpretación y evaluación de los flujos torrenciales es un problema complejo que no puede ser resuelto adecuadamente con las ecuaciones clásicas de la hidráulica fluvial no con la utilización de un solo modelo reológico. Que para ello se requiere aún de mucho trabajo experimental y teórico, tendiente a establecer las bases de una hidráulica torrencial en nuestro medio.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **RENDÓN V.,** Guillermo. Les Modeles Rheologiques et la resistance Hydraulique en torrents. Ecole Nationale des ingenieurs. Strasbourg. 1987.
2. **CARION,** Christian. Pertes de charge et granulométrie en torrents. Cemagref Grenoble. 1986.
3. **Third International Symposium on River Sedimentation.** University of Mississippi, March 31-April 4, 1986.

para el transporte de caolín. Universidad Nacional de Colombia. 1992.

5. **RENDÓN V., Guillermo.** Introducción a la hidráulica torrecncial. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín. 1993.



ADEMINAS

INVITA:

A las tertulias que realiza los primeros viernes de cada mes a las 6:30 p.m. en las instalaciones de la finca "Las Mercedes"

Cra. 80 No. 65-393 Tels: 234 15 38 / 421 04 20