

DEFICIENCIAS DE LOS MÉTODOS CONVENCIONALES EN EL CÁLCULO DE PERFILES DE FGV EN CANALES DE SECCIÓN COMPUESTA

Aldo Alberto Rangel Torres¹ y Víctor Manuel Arroyo Correa²

¹Maestría en Ingeniería Civil Hidráulica, Universidad Nacional Autónoma de México.

²Departamento de posgrado Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, ^{1,2}México.

E-mail: alrangelt@hotmail.com, vmarroyo@tlaloc.imta.mx

Introducción

El flujo gradualmente variado (FGV) se produce cuando existen leves variaciones en el tirante y la velocidad de flujo a lo largo de un canal de gasto constante, y está íntimamente relacionado con la pérdida por fricción, la cual es factible de valorar previamente.

El uso de canales de sección compuesta se ha extendido en zonas urbanas como emisores de aguas pluviales o como áreas inundables en caso presencia de caudales atípicos, lo anterior debido a su capacidad de transitar gastos menores en la sección central, y gastos mayores en conjunto al inundarse los niveles superiores.

Se ha demostrado que existe presencia de múltiples tirantes críticos yc 's para un mismo gasto en este tipo de canales, esto debido a la solución de ecuaciones nuevas para el no. de Froude $F_B = 1$ basadas en los criterios de energía específica mínima y momentum mínimo.

Planteamiento del problema

La teoría convencional para la determinación de perfiles de FGV está ampliamente probada en el diseño y revisión de canales de sección prismática simple y ha obtenido resultados aceptables para el cálculo en secciones irregulares. Por ello existe una amplia variedad de programas de cómputo que permiten determinar los perfiles de FGV en estos tipos de canales.

Sin embargo la omisión en la aplicación de las ecuaciones que permitan encontrar los múltiples yc 's en canales compuestos genera inconsistencias en el cálculo de perfiles de FGV.

A pesar de que hoy en día ya existen métodos para la determinación de los tirantes críticos múltiples partiendo de los criterios de Energía específica mínima (Blalock y Sturm) y de Momentum mínimo (Chaudhry y Bhallamudi), no se ha llevado a cabo su implementación en los softwares de uso común.

Objetivos

Presentar la solución de cálculo de un perfil de FGV en un canal de sección compuesta mediante un programa de cómputo que utilice los métodos convencionales, mostrar las inconsistencias encontradas, y compararlo con un programa que permita la determinación de los múltiples yc 's partiendo de los enfoques mencionados anteriormente.

Ecuaciones fundamentales

La ecuación convencional del no. de Froude Fr es ampliamente utilizada para la ubicación de los tirantes donde se cumple la condición de régimen crítico en todo tipo de canales.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g A/\alpha T}} \quad [1]$$

Esta se cumple cuando $Fr_r = 1$.

Blalock y Sturm propusieron un no. de Froude (Ec. 2) el cual debe ser igual a uno para que se presente el tirante crítico y la energía específica mínima.

$$F_B = \left(\frac{Q^2}{2g'K^3} \left[\frac{\sigma_2 \sigma_3}{K} - \sigma_1 \right] \right)^{1/2} \quad [2]$$

Donde

$$\sigma_1 = \sum \left[\alpha_i \left(\frac{K_i}{A_i} \right)^3 \left(3T_i - 2R_{hi} \frac{dP_i}{dy} - 3 \frac{A_i}{n_i} \frac{dn_i}{dy} \right) \right] \quad [3]$$

$$\sigma_2 = \sum \left(\frac{\alpha_i K_i^3}{A_i^2} \right) \quad [4]$$

$$\sigma_3 = \sum \left[\frac{K_i}{A_i} \left(5T_i - 2R_{hi} \frac{dP_i}{dy} - 3 \frac{A_i}{n_i} \frac{dn_i}{dy} \right) \right] \quad [5]$$

Esta ecuación es válida para todo tipo de canales, incluidos los canales de sección compuesta, pero debido a que su aplicación requiere de dividir los canales en secciones individuales y calcular sus propiedades hidráulicas por separado, resulta impráctico implementar su uso en canales de sección irregular.

(Sotelo Ávila, 2002)

FGV en canales de sección compuesta

El efecto de la presencia de tirantes críticos múltiples sobre un perfil del flujo se explica con la figura 1, donde se muestra un canal prismático de sección compuesta de gran longitud, cuyo extremo aguas abajo termina en una descarga libre.

En el caso a) la pendiente S_0 es grande por lo que el perfil se calcula en dirección al flujo (régimen supercrítico dentro de la sección central). En el caso b) la pendiente S_0 es menor al caso anterior, por lo que el perfil se calcula en dirección contraria al flujo (régimen subcrítico dentro de la sección central).

En el caso c) la pendiente S_0 disminuye aún más por lo que el perfil del agua sube a los niveles superiores, de nuevo el perfil se calcula en dirección al flujo (régimen supercrítico en el nivel superior). En el caso d) la pendiente S_0 es la menor de todas, ocasionando que el perfil vuelva a elevarse, calculándose de nuevo en dirección contraria al flujo (régimen subcrítico en el nivel superior).

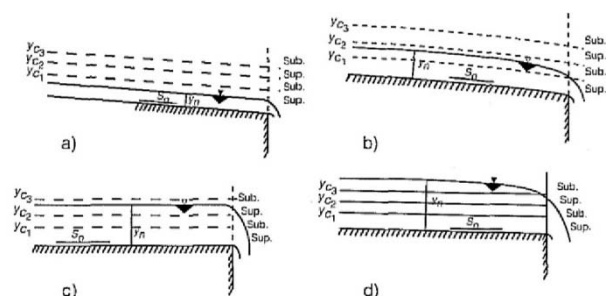


Figura 1.- Combinaciones de perfiles de FGV en una descarga libre para un canal de sección compuesta.

(Sotelo Ávila, Flujo gradualmente variado en canales de sección compuesta, 2001)

Resultados

El programa utilizado es HEC-RAS 5.0.3 (versión más reciente), en el mismo se genera un canal con las siguientes características:

- Sección compuesta de 2 niveles, canal central trapecial ($b_1 = 3 \text{ m}, k_1 = 1, l_m = 1.7 \text{ m}, n_1 = 0.00412$) y secciones laterales trapeciales simétricas con ($b_{2y3} = 12 \text{ m}, k_{2y3} = 1, l_s = 0.8 \text{ m}, n_{2y3} = 0.0068$).
- Caudal $Q = 24.5 \text{ m}^3/\text{s}$, en flujo permanente.
- Longitud del canal $L = 1000 \text{ m}$, con secciones a cada 1 m .
- Condiciones de frontera: Entrada con tirante normal bajo una pendiente $S_0 = 0.00005$ y salida en descarga libre.

Al llevar a cabo la simulación los resultados son los siguientes:

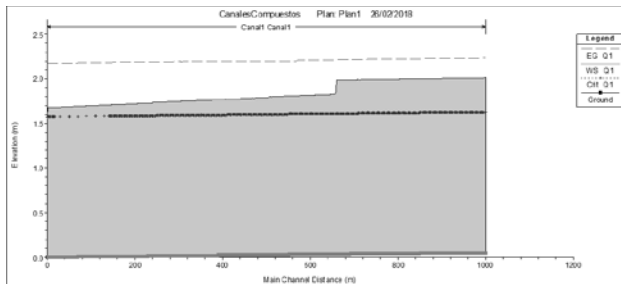


Figura 2.- Perfil de FGV del canal. La zona gris achurada representa nivel del agua y la línea punteada inferior representa el tirante crítico.

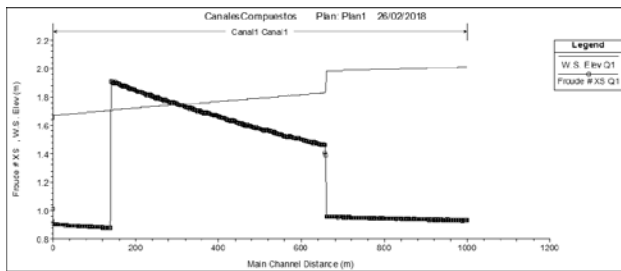


Figura 3.- Perfil de FGV del canal. La línea superior representa el nivel de la superficie libre del agua y la línea punteada inferior el comportamiento del no. de Froude.

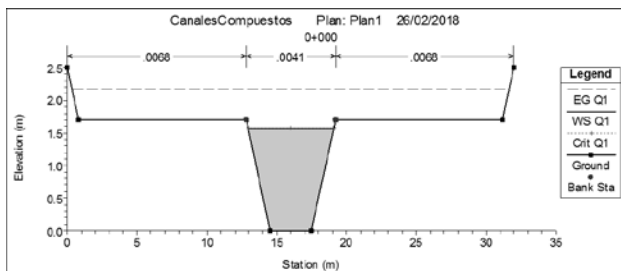


Figura 4.- Sección transversal en la descarga del canal. La zona gris representa nivel del agua que sale un tirante crítico $yc_1 = 1.57 \text{ m}$.

El perfil de flujo presenta una caída vertical brusca justo entre las secciones 659 y 658 (figura 2); en ese punto el nivel cae de un $y = 1.98 \text{ m}$ a un $y = 1.84 \text{ m}$, en esa zona el programa presenta una inconsistencia en el cálculo generando resultados erróneos y arrojando la única advertencia en toda la simulación:

“Durante los cálculos de paso estandar, la respuesta final de energía que fue calculada es menor que la energía aguas abajo. Esto no es físicamente posible. Por favor revisa tus datos”.

Lo anterior implica que la energía específica baja y después vuelve a subir, es decir una zona de energía específica mínima E_{min} y por definición un tirante crítico yc en ese punto. Esto puede corroborarse al analizar el comportamiento del no. de Froude (ver figura 3), el cual es igual a uno en tres sitios:

1. En el punto donde se ubica la caída vertical brusca de nivel.
2. Justo arriba del nivel de desbordamiento $l_m = 1.7 \text{ m}$.
3. En la descarga del canal donde se ubica el $yc_1 = 1.57 \text{ m}$.

Lo siguiente que se realizó fue la búsqueda de los yc 's con ayuda del programa MCDC desarrollado como tesis de maestría de la Universidad Nacional Autónoma de México, este resuelve el criterio de energía específica mínima propuesto por Blalock y Sturm dando los siguientes resultados:

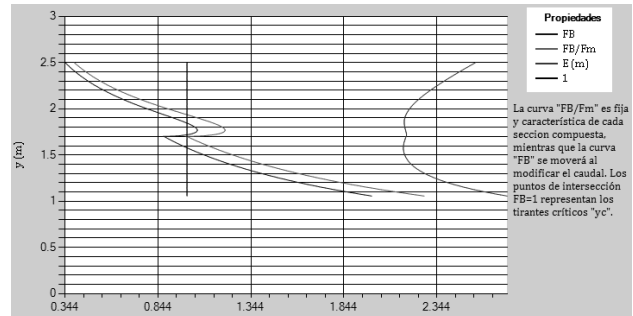


Figura 5.- Gráfica de curvas “ $F_B - y$ ”, “ $F_B/F_m - y$ ” y “ $E - y$ ”, en ese orden de izquierda a derecha.

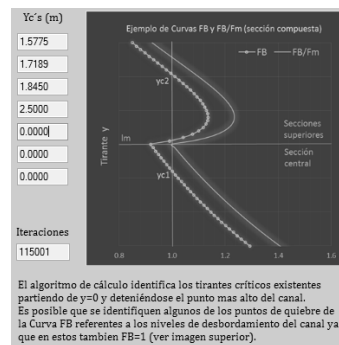


Figura 6.- Ventana explicativa con ubicación de yc 's (método de Blalock y Sturm).

En los tres sitios mencionados anteriormente $F_B = 1$ según el criterio (figura 5), resultando además que efectivamente existe un tirante crítico $yc_2 = 1.845 \text{ m}$ (figura 6) ubicado en el intervalo donde HEC-RAS detectó la inconsistencia.

Conclusiones

En la simulación HEC-RAS detecta únicamente un yc en la sección mas profunda (Figura 4); al comparar este valor con los obtenidos en MCDC (Figura 5) se observa que coincide con el yc_1 ubicado en el punto energía específica mínima absoluta, es decir que, aunque se presentan dos mínimos en la curva “ $E - y$ ” el que se detecta es el menor de ambos.

Si bien el punto yc_2 no representa el valor mínimo absoluto de E igual manifiesta la condición de régimen crítico, por lo que la forma correcta que debería tener el perfil de FGV sería como la mostrada en la figura 1 para el caso d).

Como ya se comprobó, el no tomar en cuenta el criterio correcto en la solución de canales compuestos ocasiona la presencia de inestabilidades en los cálculos e incoherencia en los resultados. Implementar las fórmulas correctas en los programas de uso común para la detección de los múltiples yc 's, permitiría dividir de forma adecuada este tipo de canales en tramos de cálculo para una correcta solución de la ecuación dinámica de flujo.

Referencias

- Sotelo Ávila, G. (enero-marzo de 2001). Flujo gradualmente variado en canales de sección compuesta. *Ingeniería hidráulica en México*, XVI(1), 57-62.
- Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidráulica de Canales* (Vol. 2). México, D.F.: Limusa.