

EFFECTO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN CANAL EN LA ESTABILIDAD HIDRODINÁMICA

1^{er}. Víctor M. Ponce, 2^{do}. Andrea C. Scott y 3^{er}. Jhonath W. Mejía

Universidad Estatal de San Diego, California, EE.UU.
vponce@sdsu.edu; aconfig2@sdsu.edu; jhonath.mejia@unmsm.edu.pe

Introducción

La inestabilidad de la superficie libre en el flujo en canales abiertos generalmente se manifiesta por el desarrollo de ondas de rollo, llamadas así por su nombre en inglés: roll waves. Éstas son una característica de un flujo inestable, usualmente asociada con canales empinados y revestidos, cuando el número de Vedernikov V es mayor o igual a 1 ($V \geq 1$). Sin embargo, puede demostrarse que el desarrollo de una onda de rollo depende principalmente de la forma de la sección transversal, ya sea ésta trapezoidal, rectangular o triangular. Para una determinada sección transversal, existe una relación única entre el exponente β de la curva de gasto (la relación caudal-área de flujo Q vs A) y la razón V/F , en la que F = número de Froude (Ponce y Choque Guzmán, 2019).

En este trabajo usamos la calculadora en línea *canal en línea 15b*, la cual determina los valores de β , F , y V en un canal prismático. Corremos la calculadora para una serie de formas de sección transversal, incluidas trapezoidales y rectangulares, manteniendo constantes las siguientes variables: (1) caudal Q , (2) n de Manning, y (3) pendiente de fondo S . El efecto de la forma de la sección transversal se examina corriendo la calculadora para una serie de valores apropiados de pendiente lateral z (z H: 1 V), y una serie de anchos de fondo b , fijando la profundidad de flujo para que corresponda al caudal Q adoptado.

Antecedentes

La teoría de la estabilidad hidrodinámica del flujo en canales abiertos se debe a Vedernikov (1945). Varios años más tarde, Craya aclaró el criterio de Vedernikov al establecerlo en términos de la celeridad de las ondas (Craya, 1952). El criterio de Vedernikov-Craya establece que la aparición de ondas de rollo se formará cuando la celeridad de Seddon iguale o exceda la celeridad de Lagrange, es decir, cuando la celeridad de la onda cinemática, gobernada por las fuerzas gravitacionales y de fricción, iguale o exceda la celeridad de la onda dinámica, gobernada por fuerzas de inercia y de gradiente de presiones. En este caso, el número de Vedernikov es mayor o igual a 1: $V \geq 1$. De lo contrario, $V < 1$, es decir, las ondas dinámicas viajan más rápido que las ondas cinemáticas y, en consecuencia, el flujo es estable.

Relación entre β y V/F

Hay tres velocidades características en el flujo en canales (Ponce, 1991):

1. La velocidad media u del flujo normal, permanente, expresada por las fórmulas de Manning o Chezy;
2. La celeridad relativa v de la onda cinemática, expresada por la fórmula de la celeridad de Seddon; y
3. La celeridad relativa w de la onda dinámica, expresada por la fórmula de la celeridad de Lagrange.

Estas tres velocidades pueden definir solamente dos relaciones adimensionales independientes, el número de Froude y el número de Vedernikov (Ponce, 2014). El número de Froude se define como sigue:

$$F = \frac{u}{w} = \frac{u}{(gD)^{1/2}} \quad [1]$$

en la cual D = profundidad hidráulica ($D = A/T$); A = área de flujo; T = ancho superior; y g = aceleración de la gravedad. El número de Vedernikov se define como sigue:

$$V = \frac{v}{w} = \frac{v}{(gD)^{1/2}} \quad [2]$$

La tercera relación, la cual es función de las otras dos, es la celeridad relativa adimensional de la onda cinemática v/u , expresada como sigue:

$$\frac{v}{u} = \beta - 1 = \frac{V}{F} \quad [3]$$

Programa de ensayos

La calculadora en línea *canal en línea 15b* calcula el valor de β , el exponente de la curva de gasto, correspondiente a una forma de sección transversal rectangular, trapezoidal, o triangular. La calculadora requiere de los siguientes datos: (1) ancho de fondo b ; (2) profundidad de flujo y ; (3) pendiente lateral z_1 ; (4) pendiente lateral z_2 ; (5) n de Manning; y (6) pendiente de fondo S .

1. Seleccionar el valor apropiado del caudal de diseño Q ;
2. Seleccionar los valores apropiados de las pendientes laterales z_1 y z_2 ;
3. Seleccionar un conjunto (de prueba) de valores de ancho de fondo b ;
4. Usando la calculadora en línea, para cada valor de ancho de fondo b , calcular, por prueba y error, la profundidad de flujo y correspondiente al caudal Q y
5. Anotar el resultado de la calculadora en línea: (a) caudal Q ; (b) velocidad de flujo v ; (c) número de Froude F ; (d) exponente β de la curva de gasto; (e) número de Froude neutralmente estable F_{ne} ; y (f) número de Vedernikov V .

El programa de prueba está diseñado para determinar las condiciones hidráulicas en una serie de secciones transversales alternativas para las cuales el número de Vedernikov calculado varía en el rango $V \geq 1$. Se especifican varios valores de pendiente lateral z , que van desde alto ($z = 0.25$; trapezoidal) a bajo ($z = 0$; rectangular), y variando el ancho de fondo b dentro de un rango adecuado ($5 \geq b \geq 1$). La experiencia indica que es probable que el rango elegido de pendientes laterales ($0.25 \geq z \geq 0$) proporcione un rango deseado de números de Vedernikov V para un análisis

apropiado de estabilidad/inestabilidad del flujo.

Las siguientes seis (6) pendientes laterales se consideran en este estudio: (1) $z = 0.25$; (2) $z = 0.20$; (3) $z = 0.15$; (4) $z = 0.10$; (5) $z = 0.05$; y (6) $z = 0$.

Los resultados del cálculo utilizando *canalenealinea15b* se muestran en las tablas correspondientes (Tablas 2 a 7 del artículo completo). En general, cuando se reduce el ancho del fondo b en el rango elegido $5 \geq b \geq 1$, cuanto menor sea el valor de la pendiente lateral z , más rápido disminuye el número de Vedernikov V a valores menores que 1. La Tabla 7 mostrada abajo indica que los valores más bajos de V ($V = 0.05$) se obtienen para el caso de $z = 0$ (canal rectangular) y $b = 1$, es decir, para el menor valor de b dentro del rango seleccionado para prueba ($5 \geq b \geq 1$).

Tabla 1.- Resultados para $z = 0$.

$Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$	$n = 0.025$		$S = 0.06$		
Variable	Ancho de fondo b (m)				
	5	4	3	2	1
Profundidad de flujo de entrada					
y	1.929	2.407	3.33	5.69	16.54
Resultados intermedios					
P	8.858	8.814	9.66	13.38	34.08
T	5	4	3	2	1
A	9.645	9.628	9.99	11.38	16.54
R	1.088	1.092	1.034	0.85	0.485
D	1.929	2.407	3.33	5.69	16.54
Resultados finales					
v	10.37	10.39	10.01	8.795	6.05
F	2.38	2.13	1.75	1.17	0.47
β	1.55	1.51	1.44	1.31	1.11
F_{ns}	1.79	1.93	2.24	3.13	8.36
V^*	1.33	1.1	0.78	0.37	0.05
* Se encontraron tres valores estables de V .					

Análisis

Los resultados de las Tablas 2 a 7 se analizan para determinar la forma de la sección transversal, que en este trabajo varía de trapezoidal ($z = 0.25$; Tabla 2) a rectangular ($z = 0$; Tabla 7), bajo la cual el número de Vedernikov disminuye desde el rango inestable, $V \geq 1$, hasta el rango estable, $V < 1$. Al principio, se reconoce que los números de Froude y Vedernikov (ecuaciones 1 y 2, respectivamente) varían inversamente con la profundidad hidráulica D .

Por lo tanto, cuanto mayor sea el valor de D , menores serán los valores de los números de Froude y Vedernikov, lo que eventualmente conducirá a la condición de flujo estable, es decir, $V < 1$. Proponemos que aquí está la solución de la dicotomía estabilidad/inestabilidad: Cuanto mayor sea la profundidad hidráulica, más estable será el flujo. La Figura 1 muestra la reducción en el número de Vedernikov con el aumento en la profundidad hidráulica.

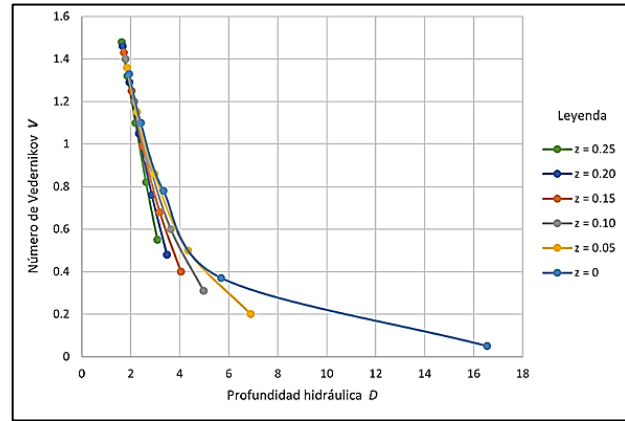


Figura 1.- Número de Vedernikov V vs. profundidad hidráulica D .

Conclusiones

Se realiza un estudio del efecto de la forma de la sección transversal sobre la inestabilidad hidrodinámica de un canal de superficie libre. Para este análisis se especifica un canal empinado y revestido. El caudal de diseño seleccionado es $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$, con pendiente de fondo $S = 0.06$ y n de Manning = 0.025, condiciones que simulan a las del río Huayñajahuira, en La Paz, Bolivia, donde las ondas se repiten con una regularidad preocupante. El programa de ensayos considera la variación del ancho del fondo b en el rango $5 \geq b \geq 1$, en intervalos de 1 m (cinco (5) anchos de canal), y la pendiente lateral z en el rango $0.25 \geq z \geq 0$, en intervalos de 0.05 (seis (6) pendientes laterales).

La calculadora en línea *canalenealinea15b* se utiliza para calcular las variables hidráulicas, que culminan en los valores del exponente de la curva de gasto β , el número de Froude F y el número de Vedernikov V para cada uno de treinta ($5 \times 6 = 30$) casos. Los resultados muestran de manera concluyente que a medida que el ancho del canal b se reduce de 5 a 1 m, y la pendiente lateral z se reduce de 0.25 a 0, los valores de F y V se reducen, primero gradualmente, y luego bruscamente a medida que $z \rightarrow 0$. Para una aplicación de diseño dada, estos hallazgos pueden usarse para determinar los valores óptimos de la sección transversal geométrica b y z para asegurar que $V < 1$ y, por lo tanto, evitar la inestabilidad hidrodinámica del flujo y, consecuentemente, las ondas de rollo usualmente asociadas con esta condición.

Referencias Bibliográficas

- Craya, A.** (1952). The criterion for the possibility of roll wave formation. Gravity Waves, Circular 521, 141-151, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- Ponce, V. M.** (1991). New perspective on the Vedernikov number. Water Resources Research, Vol. 27, No. 7, 1777-1779, July.
- Ponce, V. M., y P. J. Porras.** (1995). Effect of cross-sectional shape on free-surface instability. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 4, April, 376-380.
- Ponce, V. M.** (2014). Chow, Froude, and Vedernikov. Proceedings, American Society of Civil Engineers (ASCE) World Environment and Water Resources Congress, June 1-5, 2014, Portland, Oregon.
- Ponce, V. M. y B. Choque Guzmán,** (2019). El control de ondas pulsantes en ríos canalizados. http://ponce.sdsu.edu/el_control_de_ondas_pulsantes.html
- Powell, R. W.** (1948). Vedernikov's criterion for ultra-rapid flow. Transactions, American Geophysical Union, Vol. 29, No. 6, 882-886.
- Vedernikov, V. V.** (1945). Conditions at the front of a translation wave disturbing a steady motion of a real fluid, Dokl. Akad. Nauk. SSSR, 48(4), 239-242.