

EFECTO 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; ascott2@sdsu.edu; jhonath.mejia@unmsm.edu.pe

RESUMEN:

Se realiza un estudio del efecto de la forma de la sección transversal sobre la estabilidad hidrodinámica del flujo de superficie libre. Las variables que controlan el proceso son el exponente β de la curva de gasto, el número de Froude F y el número de Vedernikov V . Se especifica un canal empinado y revestido para el análisis. 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 similares a las del río Huayñajahuira, en La Paz, Bolivia, en el cual las ondas de rollo se repiten con preocupante regularidad. El programa de ensayos considera la variación del ancho del fondo b en el rango $5 \geq b \geq 1$, a intervalos de 1 m, y la pendiente lateral z en el rango $0.25 \geq z \geq 0$, a intervalos de 0.05. La calculadora en línea *canalonline15b* se utiliza para calcular las variables hidráulicas, lo cual culmina 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 (30) casos considerados. 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 β , F y V se reducen, primero gradualmente y luego de manera pronunciada, a medida que $z \rightarrow 0$, con el valor asintótico $z = 0$ correspondiente a un canal rectangular. En una aplicación dada, estos hallazgos pueden usarse para determinar los valores óptimos de ancho de fondo b y pendiente lateral z para asegurar que $V < 1$ y, por lo tanto, evitar la inestabilidad hidrodinámica del flujo y las ondas de rollo asociadas.

ABSTRACT:

A study of the effect of cross-sectional shape on free-surface channel hydrodynamic stability is accomplished. At the outset, the rating exponent β , Froude number F , and Vedernikov number V are identified as the controlling variables. A steep, lined channel is specified for the analysis. The selected design discharge is $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$, with bottom slope $S = 0.06$ and Manning's $n = 0.025$, closely resembling the flow conditions of the Huayñajahuira river, in La Paz, Bolivia, where roll waves have been shown to recur with worrisome regularity. The testing program considers the variation of the bottom width b in the range $5 \geq b \geq 1$, at 1-m intervals, and the side slope z in the range $0.25 \geq z \geq 0$, at 0.05 intervals. The online calculator *onlinechannel15b* is used to calculate the relevant hydraulic variables, culminating in the values of rating exponent β , Froude number F , and Vedernikov number V for each of thirty (30) cases. The results show conclusively that as the channel width b is reduced from 5 to 1 m, and the side slope z reduced from 0.25 to 0, the values of β , F , and V are reduced, first gradually and then sharply, as $z \rightarrow 0$, with the asymptotic value $z = 0$ corresponding to a rectangular channel. For a given design application, these findings may be used to determine optimal geometric cross-sectional values b and z in order to assure that $V < 1$ and, therefore, avoid flow hydrodynamic instability and the associated roll waves.

PALABRAS CLAVES: Flujo en canales abiertos; estabilidad hidrodinámica; número de Vedernikov; número de Froude; exponente de la curva de gasto; ondas de rollo; ondas pulsantes.

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 asociado con canales empinados y revestidos, cuando el número de Vedernikov V es mayor o igual a 1 ($V \geq 1$) (Ponce, 2014b). Sin embargo, se puede demostrar que el desarrollo actual de una onda de rollo depende principalmente de la forma de la sección transversal, ya sea trapezoidal, rectangular o triangular. Para una sección transversal dada, existe una relación única entre el exponente β de la curva de gasto (la relación caudal Q vs. área de flujo A) y la razón V/F , en la cual F = número de Froude (Ponce y Choque Guzmán, 2019).

En algunas circunstancias, los eventos de ondas de rollo pueden ser de tal magnitud que pongan en peligro la vida y la propiedad. Este hecho es confirmado por las ondas pulsantes o de rollo que ocurren con preocupante regularidad en el río Huayñajahuira, en La Paz, Bolivia, como se muestra en la Fig. 1.



Figura 1.- Evento de onda pulsante o de rollo en un tramo canalizado del río Huayñajahuira, en La Paz, Bolivia, el 11 de diciembre de 2021 (Cortesía del Ing. Jorge Molina Carpio).

Observamos que el diseño de un canal revestido para el control de ondas de rollo puede lograrse mediante una elección juiciosa de la forma de la sección transversal. Con este fin, es necesario elegir, en la etapa de diseño, una forma de canal que reduzca efectivamente el número de Vedernikov por debajo del valor de 1 ($V < 1$). Por lo tanto, el enfoque de diseño debe centrarse en el valor de β , el exponente de la curva de gasto, parámetro definido en términos de V/F .

En este artículo usamos la calculadora *canalenealinea15b*, la cual determina los valores de β , F y V para un canal prismático (Ponce y Boulomytis, 2021). 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 varios valores apropiados de pendiente lateral z (z H: 1 V), y una serie de anchos de fondo b , fijando la profundidad de flujo y para que corresponda con el caudal Q adoptado.

El objetivo es examinar el comportamiento y la sensibilidad de las variables hidráulicas a los números de Froude F y de Vedernikov V , y al valor asociado de β . En la práctica, se puede demostrar que la estabilidad hidrodinámica se alcanza para valores de β cercanos pero superiores a 1. Por lo tanto, la sección transversal óptima, desde el punto de vista de la estabilidad, corresponde al valor más bajo de β , superior a 1, que sea compatible con el costo del proyecto, las dimensiones sobre el terreno, y otras consideraciones afines.

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 las ondas de rollo se formarán 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 gravitacional y de fricción, iguale o exceda la celeridad de la onda dinámica, gobernada por fuerzas de inercia y del gradiente de presiones. En este caso, el número de Vedernikov es mayor o igual a 1: $V \geq 1$. Por el contrario, cuando $V < 1$, las ondas dinámicas viajan más rápido que las ondas cinemáticas y, en consecuencia, el flujo permanece estable.

En 1907, Cornish mostró, aparentemente por primera vez, una fotografía del fascinante fenómeno en un artículo publicado en el *Journal of the Royal Geographical Society* (Fig. 2) (Cornish, 1907). En 1948, Powell bautizó el concepto, al afirmar: "Este criterio, al que llamo número de Vedernikov..." (Powell, 1948). Posteriormente, Ven Te Chow se refirió al fenómeno como la "inestabilidad del flujo uniforme", lo que implica que, bajo ciertas condiciones, el flujo puede volverse inestable y romperse en un tren de ondas (Chow, 1959: Sección 8.8).

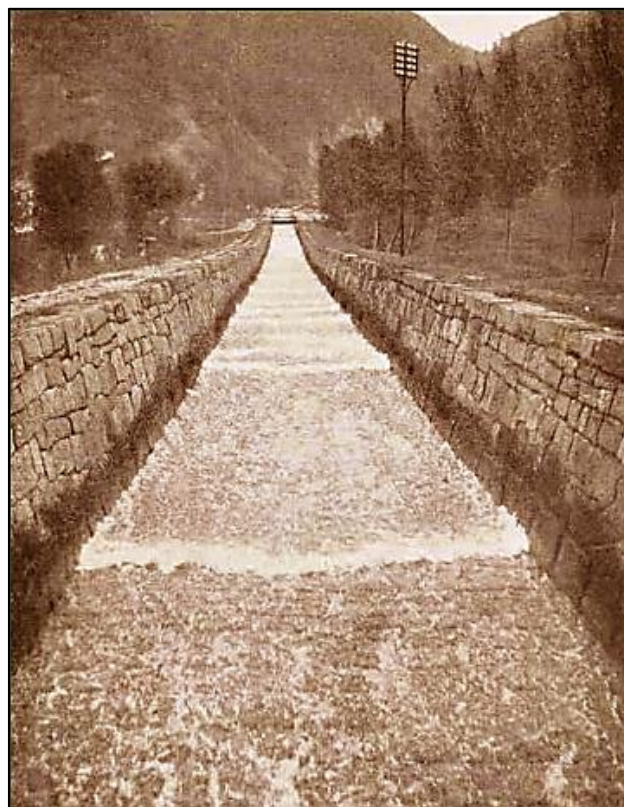


Figura 2.- Tren de ondas de rollo observadas en un canal en los Alpes suizos a principios del siglo XX (Cornish, 1907).

Los roles de la masa y la energía son fundamentales para comprender el desarrollo de las ondas de rollo. Mientras que las ondas cinemáticas transportan masa, las ondas dinámicas transportan energía (Lighthill y Whitham, 1955). Por lo tanto, las ondas de rollo ocurren cuando la celeridad de transporte de masa supera a la de transporte de energía. Bajo esta óptica, las ondas de rollo son vistas como una curiosa manifestación física de la preponderancia del transporte de masa sobre el transporte de energía en el flujo no permanente en canales abiertos (Ponce y Choque Guzmán, 2019).

RELACIÓN ENTRE β Y V/F

Hay tres velocidades características en la hidráulica de canales abiertos (Ponce, 1991):

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

Estas tres velocidades sólo pueden definir dos proporciones, o números adimensionales independientes, a saber, los números de Froude y Vedernikov (Ponce, 2014a). El número de Froude es la relación entre la velocidad media del flujo normal u y la celeridad relativa de la onda dinámica w :

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

en la cual D = profundidad hidráulica ($D = A/T$); A = área de flujo; T = ancho superior; y g = aceleración de la gravedad (Ponce y Choque Guzmán, 2019; Ponce y Boulomytis, 2021).

El número de Vedernikov es la relación entre la celeridad relativa de la onda cinemática v y la celeridad relativa de la onda dinámica w :

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

La tercera relación, la cual es función de las otras dos, es la celeridad relativa adimensional de la onda cinemática v/u , expresada de la siguiente manera (Ponce y Choque Guzmán, 2019):

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

El número de Froude de estabilidad neutra F_{ns} es el que corresponde al número de Vedernikov $V = 1$. Por lo tanto, el número de Froude de estabilidad neutra es función únicamente de β , el exponente de la curva de gasto:

$$F_{ns} = \frac{1}{\beta - 1} \quad [4]$$

La Tabla 1 muestra los valores correspondientes de β y F_{ns} para tres formas de sección transversal asintótica y dos tipos de fricción. La forma del canal inherentemente estable ha sido documentada, primero por Liggett (1975), y luego por Ponce y Porras (1995) (Fig. 3).

Tabla 1.- Valores de β y F_{ns} correspondientes a tres secciones transversales asintóticas.

Sección transversal asintótica	Tipo de fricción	β	F_{ns}
Hidráulicamente ancha	Manning	5/3	3/2
	Chezy	3/2	2
Triangular	Manning	4/3	3
	Chezy	5/4	4
Inherentemente estable	Manning o Chezy	1	∞

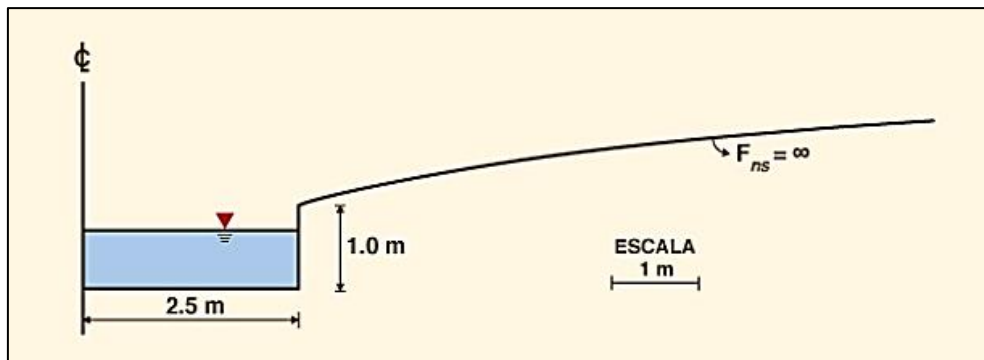


Figura 3.- Sección transversal de un canal inherentemente estable.

La Ecuación 4 muestra que conforme $\beta \rightarrow 1$, el número de Froude de estabilidad neutra $F_{ns} \rightarrow \infty$. En la práctica, sin embargo, el número de Froude está limitado por la cantidad demostrablemente finita de la fricción de fondo, por lo que los números máximos de Froude no exceden, de manera realista, un valor en el rango de 25-30. Por lo tanto, el canal inherentemente estable debe considerarse teórico.

Sin embargo, lo que es más importante, ciertas formas de sección transversal que presentan valores de β cercanos pero superiores a 1, dan como resultado un aumento real en el valor del número de Froude de estabilidad neutra F_{ns} , lo que reduce efectivamente la probabilidad de que el flujo se vuelva inestable. Este razonamiento se considera en este artículo: Encontrar la óptima forma de la sección transversal, típicamente trapezoidal, que sea tanto práctica como estable.

PROGRAMA DE ENSAYOS

La calculadora **canalenealinea15b** calcula el valor de β , el exponente de la curva de gasto, correspondiente a una sección rectangular, trapezoidal o triangular. La calculadora requiere los siguientes datos de entrada (Fig. 4):

1. Ancho de fondo b
2. Profundidad de flujo y
3. Pendiente lateral z_1
4. Pendiente lateral z_2
5. n de Manning
6. Pendiente de fondo S .

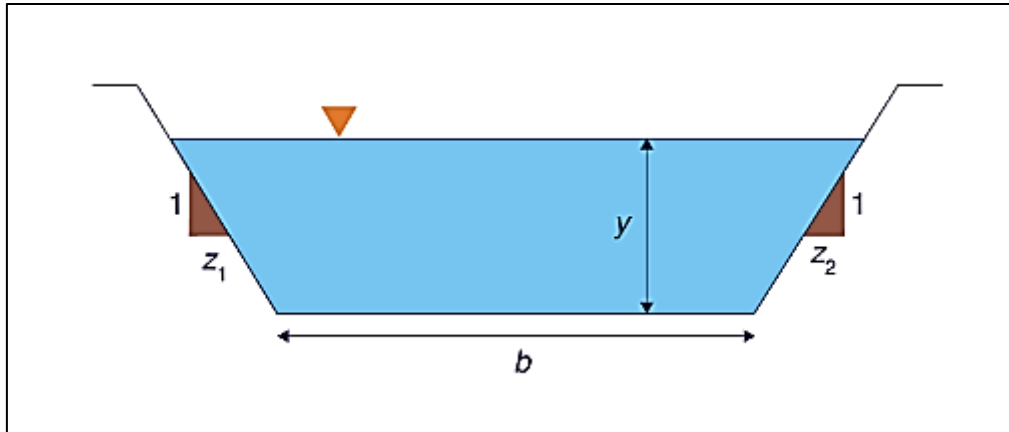


Figura 4.- Diagrama de definición para una sección transversal trapezoidal, rectangular, o triangular.

Al principio, para cada aplicación, determinar los valores aplicables de n de Manning y pendiente de fondo S . La metodología consta de los siguientes pasos:

1. Seleccionar un valor apropiado de caudal de diseño Q ;
2. Seleccionar un conjunto de valores apropiados de las pendientes laterales z_1 y z_2 ;
3. Determinar un conjunto de prueba de valores del ancho inferior 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 y correspondiente al caudal Q ;
5. Tomar nota del resultado de la calculadora en línea, el cual consta de lo siguiente: (a) confirmación del valor del caudal Q ; (b) velocidad de flujo v ; (c) número F de Froude; (d) exponente de la curva de gasto β ; (e) número de Froude de estabilidad neutra F_{ne} ; y (f) número de Vedernikov V .

Teniendo en cuenta las consideraciones de estabilidad ($V < 1$) o inestabilidad ($V > 1$) del flujo, los resultados se analizan para elegir la forma de sección transversal óptima, compatible con consideraciones de costo y restricciones existentes en el sitio.

DATOS DE ENTRADA:	CÁLCULOS INTERMEDIOS:	RESULTADOS:
Corriente o río (opcional): Ensayo 220616	Unidades seleccionadas: SI (métricas)	Corriente o río (opcional): Ensayo 220616
Seleccione: Unidades SI (métricas) Unidades EE.UU.	Aceleración de la gravedad g : 9.806 m s ⁻²	Descarga/caudal Q : 100.0 m ³ s ⁻¹
Ancho de fondo b : 5 m	Constante C : 1	Velocidad de flujo v : 10.48 m s ⁻¹
Profundidad de flujo y : 1.754 m	Perímetro mojado P : 8.615 m	Número de Froude F : 2.62
Pendiente lateral z_1 : 0.25	Ancho superior T : 5.877 m	Exponente de la curva de gasto β : 1.56
Pendiente lateral z_2 : 0.25	Área de flujo A : 9.539 m ²	Número de Froude neutralmente estable F_{ne} : 1.76
Coefficiente de Manning n : 0.025	Radio hidráulico R : 1.107 m	Número de Vedernikov V : 1.48
Pendiente de fondo S : 0.06	Profundidad hidráulica D : 1.623 m	
<input type="button" value="Calcular"/>	<input type="button" value="Reiniciar"/>	

Figura 5.- Ejemplo de cálculo para $z = 0.25$ y $b = 5$ m, usando *canalonline15b*, mostrado en la Tabla 2, Columna 2.

El programa de ensayos 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 inferior b dentro de un rango adecuado ($5 \geq b \geq 0$). 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 adecuado de estabilidad/inestabilidad del flujo en el canal.

Las siguientes seis (6) pendientes laterales se consideran en este estudio:

- A. $z = 0.25$;
- B. $z = 0.20$;
- C. $z = 0.15$;
- D. $z = 0.10$;
- E. $z = 0.05$; y
- F. $z = 0.0$.

Las Tablas 2 a 7 muestran los resultados del cálculo utilizando *canal en línea 15b*. Generalmente, cuando se reduce el ancho de fondo b en el rango elegido $5 \geq b \geq 1$, y cuanto menor es el valor de la pendiente lateral z , más rápido disminuye el número de Vedernikov V a valores menores que 1. De hecho, la Tabla 7 muestra que el valor más bajo de V ($V = 0.05$) se obtiene para el caso de $z = 0$ (canal rectangular) y $b = 1$, es decir, el valor más estrecho de b dentro del rango de ensayo ($5 \geq b \geq 1$). A continuación, se presenta un análisis detallado.

Tabla 2.- Resultados de la Serie A ($z = 0.25$).

Q = 100 m ³ /s		n = 0.025			S = 0.06	
Variable	Ancho de fondo b (m)					
	5	4	3	2	1	
Profundidad del flujo de entrada						
y	1.754	2.078	2.581	3.408	4.769	
Datos de salida intermedios						
P	8.615	8.283	8.32	9.025	10.83	
T	5.877	5.039	4.29	3.704	3.384	
A	9.539	9.391	9.408	9.719	10.45	
R	1.107	1.133	1.13	1.076	0.965	
D	1.623	1.863	2.192	2.624	3.089	
Resultados finales						
v	10.48	10.65	10.63	10.29	9.569	
F	2.62	2.49	2.29	2.02	1.73	
β	1.56	1.53	1.48	1.4	1.32	
F_{ns}	1.76	1.87	2.07	2.45	3.12	
V*	1.48	1.32	1.1	0.82	0.55	
* Se encontraron dos (2) valores estables de V, mostrados en negrita.						

Tabla 3.- Resultados de la Serie B ($z = 0.20$).

Q = 100 m ³ /s		n = 0.025			S = 0.06	
Variable	Ancho de fondo b (m)					
	5	4	3	2	1	
Profundidad del flujo de entrada						
y	1.783	2.128	2.68	3.625	5.26	
Datos de salida intermedios						
P	8.636	8.34	8.466	9.393	11.72	
T	5.713	4.851	4.072	3.45	3.104	
A	9.55	9.417	9.476	9.878	10.79	
R	1.105	1.129	1.119	1.051	0.92	
D	1.671	1.941	2.327	2.863	3.477	
Resultados finales						
v	10.47	10.62	10.56	10.13	9.27	
F	2.58	2.43	2.21	1.91	1.58	
β	1.56	1.53	1.47	1.39	1.3	
F_{ns}	1.77	1.88	2.09	2.5	3.26	
V*	1.46	1.29	1.05	0.76	0.48	
* Se encontraron dos (2) valores estables de V, mostrados en negrita.						

Tabla 4.- Resultados de la Serie C ($z = 0.15$).

Q = 100 m ³ /s		n = 0.025			S = 0.06	
Variable	Ancho de fondo b (m)					
	5	4	3	2	1	
Profundidad del flujo de entrada						
y	1.814	2.184	2.795	3.9	5.95	
Datos de salida intermedios						
P	8.668	8.416	8.652	9.887	13.03	
T	5.544	4.655	3.838	3.17	2.785	
A	9.563	9.451	9.556	10.08	11.26	
R	1.103	1.122	1.104	1.019	0.863	
D	1.724	2.03	2.489	3.18	4.043	
Resultados finales						
v	10.46	10.58	10.46	9.925	8.888	
F	2.54	2.37	2.11	1.77	1.41	
β	1.56	1.52	1.47	1.38	1.28	
F _{ns}	1.77	1.89	2.11	2.58	3.47	
V*	1.43	1.25	0.99	0.68	0.4	

* Se encontraron tres (3) valores estables de V, mostrados en negrita.

Tabla 5.- Resultados de la Serie D ($z = 0.10$).

Q = 100 m ³ /s		n = 0.025			S = 0.06	
Variable	Ancho de fondo b (m)					
	5	4	3	2	1	
Profundidad del flujo de entrada						
y	1.849	2.248	2.935	4.269	7.019	
Datos de salida intermedios						
P	8.716	8.518	8.889	10.58	15.1	
T	5.369	4.449	3.587	2.853	2.403	
A	9.586	9.497	9.666	10.36	11.94	
R	1.099	1.114	1.086	0.979	0.79	
D	1.785	2.134	2.694	3.63	4.969	
Resultados finales						
v	10.43	10.53	10.35	9.661	8.377	
F	2.49	2.3	2.01	1.61	1.2	
β	1.56	1.52	1.46	1.37	1.26	
F _{ns}	1.77	1.9	2.15	2.68	3.82	
V*	1.4	1.2	0.93	0.6	0.31	

* Se encontraron tres (3) valores estables de V, mostrados en negrita.

Tabla 6.- Resultados de la Serie E ($z = 0.05$).

Q = 100 m ³ /s		n = 0.025			S = 0.06	
Variable	Ancho de fondo b (m)					
	5	4	3	2	1	
Profundidad del flujo de entrada						
y	1.887	2.322	3.108	4.799	9.037	
Datos de salida intermedios						
P	8.778	8.649	9.223	11.6	19.09	
T	5.188	4.232	3.31	2.479	1.903	
A	9.613	9.557	9.806	10.74	13.12	
R	1.095	1.104	1.063	0.925	0.687	
D	1.852	2.258	2.962	4.334	6.892	
Resultados finales						
v	10.4	10.47	10.2	9.307	7.628	
F	2.44	2.22	1.89	1.42	0.92	
β	1.56	1.52	1.45	1.35	1.22	
F _{ns}	1.78	1.91	2.19	2.84	4.52	
V*	1.36	1.15	0.86	0.5	0.2	

* Se encontraron tres (3) valores estables de V, mostrados en negrita.

Tabla 7.- Resultados de la Serie F ($z = 0$).

Q = 100 m ³ /s		n = 0.025			S = 0.06	
Variable	Ancho de fondo b (m)					
	5	4	3	2	1	
Profundidad del flujo de entrada						
y	1.929	2.407	3.33	5.69	16.54	
Datos de salida 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 (3) valores estables de V, mostrados en negrita.

ANÁLISIS

Los resultados de las Tablas 2 a 7 se analizan para determinar la forma de la sección transversal, que en este artículo 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, $V > 1$, hasta el rango estable, $V \leq 1$. Puede observarse 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, $V \leq 1$. Proponemos que aquí está la solución de la dicotomía estabilidad/inestabilidad: Cuanto mayor sea la profundidad hidráulica D , más estable será el flujo.

Para explicar mejor los hallazgos de este trabajo, la variación, con la profundidad hidráulica D , del exponente β , el número de Froude F , y el número de Vedernikov V se muestran en las Figs. 6 a 8, respectivamente.

La Figura 6 muestra que la disminución de β es gradual para las formas trapezoidales ($0.25 \geq z \geq 0.05$), y marcada (hasta $\beta = 1.11$) para la forma rectangular asintótica ($z = 0$). La Figura 7 muestra que la disminución de F es gradual para las formas trapezoidales ($0.25 \geq z \geq 0.05$), y marcada (hasta $F = 0.47$) para la forma rectangular asintótica ($z = 0$). La Figura 8 muestra que la disminución de V es gradual para las formas trapezoidales ($0.25 \geq z \geq 0.05$), y marcada (hasta $V = 0.05$) para la forma rectangular asintótica ($z = 0$).

Se concluye que la forma más rápida de disminuir el número de Vedernikov por debajo de 1 y, por lo tanto, asegurar la estabilidad hidrodinámica, es elegir un ancho de fondo b , en conjunto con una pendiente lateral z , que asegure que $V < 1$. En la práctica, se puede utilizar como objetivo de diseño un valor apropiado de $V < 1$. Los resultados de las Tablas 2 a 7 indican que, para el ejemplo aquí presentado, se obtiene un $V = 0.93$ para $b = 3$ m y $z = 0.10$. Además, para $b = 3$ m y $z = 0.05$, se obtiene un $V = 0.86$, algo más bajo y, por lo tanto, más estable.

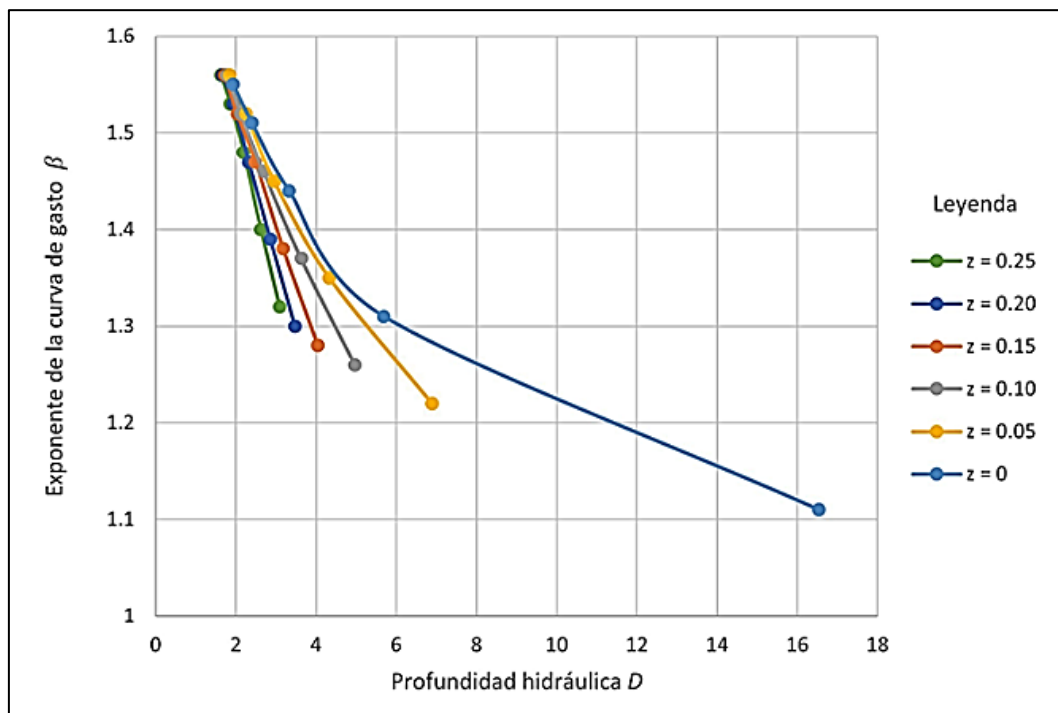


Figura 6.- Exponente de la curva de gasto β vs. profundidad hidráulica D .

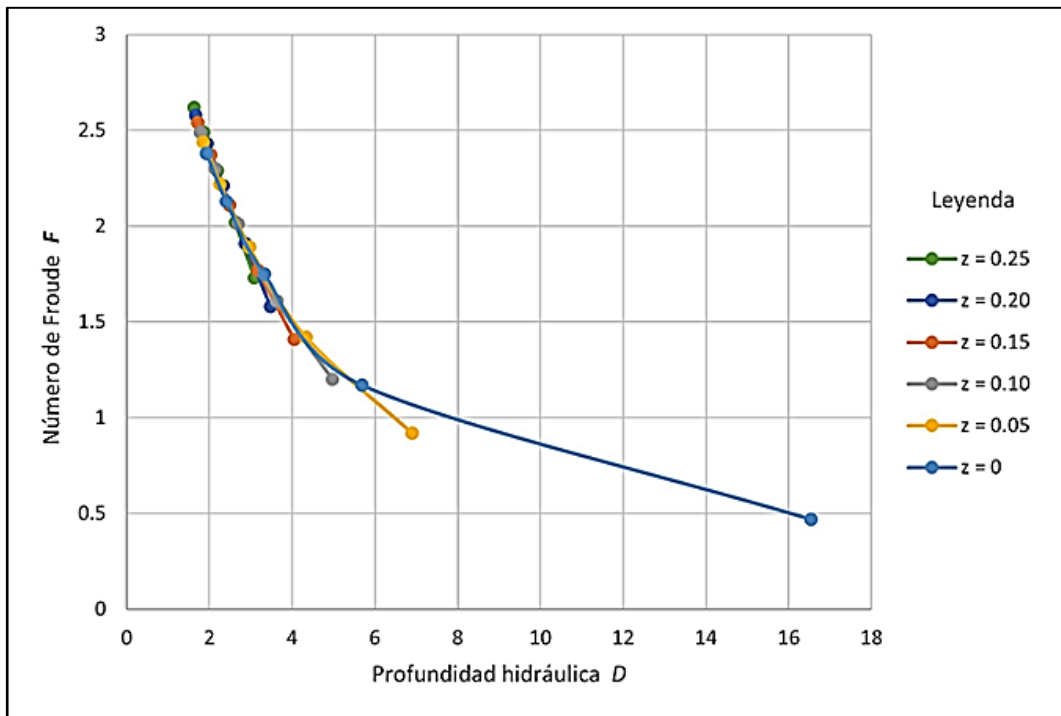


Figura 7.- Número de Froude F vs. profundidad hidráulica D .

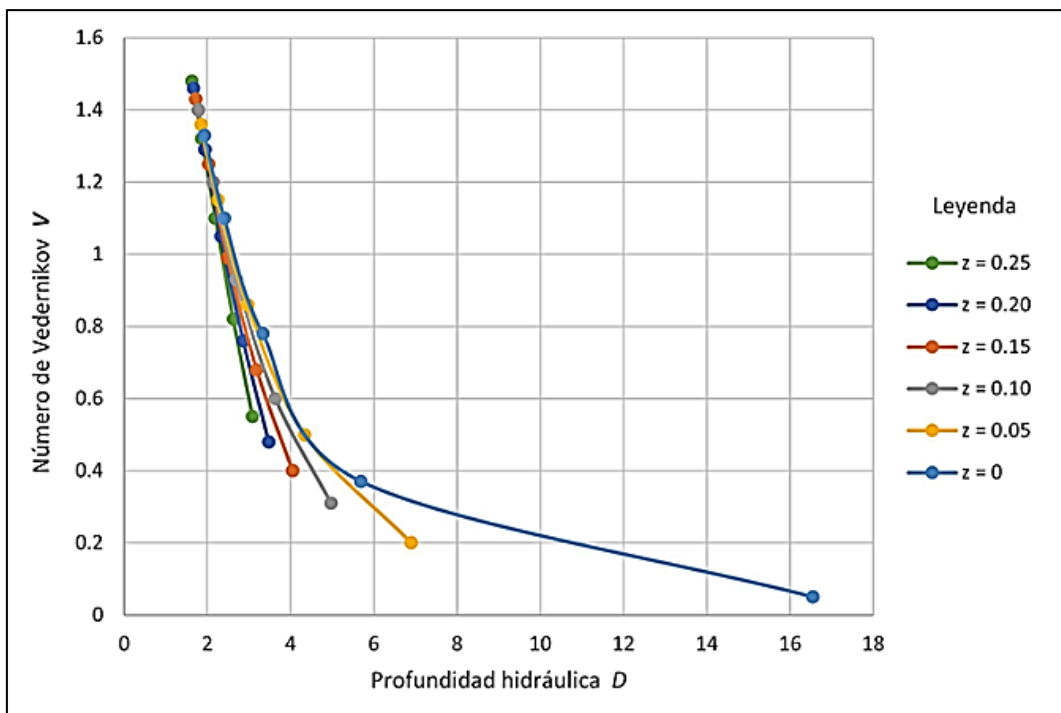


Figura 8.- Número de Vedernikov V vs. profundidad hidráulica D .

El análisis presentado aquí considera sólo la cuestión de la estabilidad hidrodinámica. En una situación actual de diseño, otras consideraciones, como el costo, la huella geométrica del proyecto, y la facilidad de construcción pueden desempeñar un papel importante en la elección de la óptima forma de la sección transversal.

CONCLUSIONES

Se realiza un estudio del efecto de la forma de la sección transversal sobre la estabilidad o inestabilidad hidrodinámica del flujo en un canal abierto. Se identifican como las variables de control el exponente de la curva de gasto β , el número de Froude F , y el número de Vedernikov V . El exponente de la curva de gasto caracteriza la relación entre el caudal y el área de flujo ($Q = \alpha A^\beta$). El número de Froude caracteriza el régimen de flujo como: (a) subcrítico, (b) crítico, o (c) supercrítico. El número de Vedernikov describe un tipo de flujo que puede ser: (a) estable, (b) neutro, o (c) inestable. Para el 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, similar a las condiciones hidráulicas en el río Huayñajahuira, en La Paz, Bolivia, en el cual las ondas de rollo se repiten con preocupante regularidad. El programa de prueba considera la variación del ancho del fondo b en el rango $5 \geq b \geq 1$, en intervalos de 1 m, y la pendiente lateral z en el rango $0.25 \geq z \geq 0$, en intervalos de 0.05.

La calculadora [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 demuestran 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 calculados de β , F , y V se reducen, primero gradualmente, y luego marcadamente, a medida que $z \rightarrow 0$. Para una aplicación dada, estos hallazgos pueden usarse para determinar los valores óptimos de ancho de fondo b y pendiente lateral z que aseguren que $V < 1$, evitando así la inestabilidad hidrodinámica del flujo y las ondas de rollo normalmente 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.
- Cornish, V.** 1907. Progressive waves in rivers. *Journal of the Royal Geographical Society*, Vol. 29, No. 1, January, 23-31.
- Liggett, J. A.** 1975. Stability. Chapter 6 in *Unsteady Flow in Open Channels*, K. Mahmood and V. Yevjevich, eds., Water Resources Publications, Ft. Collins, Colorado.
- Lighthill, M. J. y G. B. Whitham.** 1955. On kinematic waves: I. Flood movement in long rivers. *Proceedings, Royal Society of London, Series A*, 229, 281-316.
- 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.** 2014a. Sección 1.3 en *Fundamentos de Hidráulica de Canales*, texto en línea. http://ponce.sdsu.edu/canales/hidraulica_de_canales_01.html#estado
- Ponce, V. M.** 2014b. Sección 11.4 en *Fundamentos de Hidráulica de Canales*, texto en línea. http://ponce.sdsu.edu/canales/hidraulica_de_canales_11.html#rollo

Ponce, V. M. 2014c. 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. The control of roll waves in channelized rivers. http://ponce.sdsu.edu/the_control_of_roll_waves.html

Ponce, V. M. y V. Boulomytis. 2021. Design of a stable channel on a steep slope using the exponent of the rating. http://ponce.sdsu.edu/design_of_a_stable_channel_using_the_exponent_of_the_rating.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.