

Propuesta de un enfoque para el diseño de rugosidad de fondo artificial empleando barras transversales discontinuas en canales con régimen rápido

Proposal of an approach for the design of artificial bottom roughness using discontinuous crossbars in channels with a fast flow regime

DOI: 10.46932/sfjdv4n1-041

Received in: February 24th, 2023

Accepted in: March 27th, 2023

Javier Osnaya Romero

Maestro en Ingeniería

Institución: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería
Dirección: Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, Coyoacán, CP 04510, México
Correo electrónico: jor@pumas.iingen.unam.mx

Jesús Gracia Sánchez

Doctor en Ingeniería

Institución: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería
Dirección: Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, Coyoacán, CP 04510, México
Correo electrónico: jgs@pumas.iingen.unam.mx

Óscar Arturo Fuentes Mariles

Doctor en Ingeniería

Institución: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería
Dirección: Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, Coyoacán, CP 04510, México
Correo electrónico: ofm@pumas.iingen.unam.mx

Víctor Manuel Ortiz Martínez

Maestro en Ingeniería

Institución: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería
Dirección: Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, Coyoacán, CP 04510, México
Correo electrónico: VOrtizM@iingen.unam.mx

RESUMEN

En canales revestidos de fuerte pendiente se presentan velocidades de flujo tan altas, que es necesario modificar su rugosidad para disminuirlas. En este trabajo se presenta un procedimiento para determinar el grado de confianza de que puede esperarse de uno de los criterios disponibles para el diseño de rugosidades artificiales de fondo altas en canales revestidos. Con base en el teorema de Buckingham se proponen expresiones para llevar a cabo el diseño mencionado. Se desarrollan diferentes ejemplos de cálculo que incluyen un tramo de transición de rugosidad alta a la entrada del canal. El estudio concluye que la rugosidad de fondo propuesta ocasiona flujos más estables y aunque implica un costo adicional, es recomendable considerar a la rugosidad artificial cuando se desea reducir mucho la velocidad del flujo de agua al final de esta clase de conductos, pero mantener el flujo de gastos bajos para evitar su almacenamiento en el canal.

Palabras clave: rugosidad artificial, canales revestidos, canales con pendiente fuerte.

ABSTRACT

In the lining of channels with a steep slope, flow velocities are so high that it is necessary to modify their roughness to reduce them. In this paper, a procedure is presented to determine the degree of confidence that can be expected from one of the available criteria for the design of high artificial bottom roughness in lining of channels. Based on Buckingham's theorem, expressions are proposed to carry out the aforementioned design. Different calculation examples are developed that include a section of transition of high roughness at the entrance of the channel. The study concludes that the proposed bottom roughness causes more stable flows and although it implies an additional cost, it is advisable to consider the artificial roughness when you want to greatly reduce the speed of the water flow at the end of this type of conduits, but maintain the flow of low discharges to avoid storage in the canal.

Keywords: artificial roughness, lining of channels, channels with a steep slope.

1 INTRODUCCIÓN

En canales revestidos de fuerte pendiente los flujos de agua alcanzan velocidades tan grandes que, si la corriente lleva material sólido en suspensión, tengan una capacidad erosiva muy fuerte y, al mismo tiempo, dan lugar a números de Froude de tal magnitud que no solo producen grandes sobrelevaciones del nivel del agua en las curvas, sino que engendran ondas de Mach que, al superponerse, ocasionan que el agua se salga en algunas de ellas. Para disminuir la velocidad se puede colocar en las rápidas una rugosidad artificial debidamente controlada de manera que, a cambio de tener secciones transversales más grandes, se consiga un funcionamiento más estable y disminuir la capacidad erosiva.

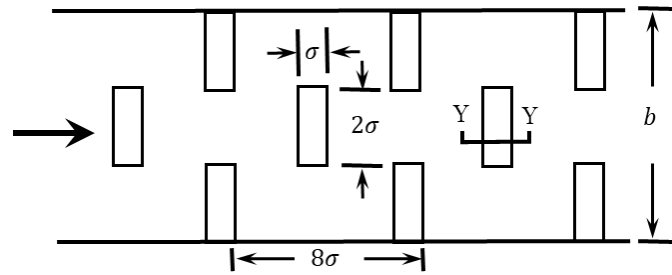
En el trabajo de Krochin, 1986 se han propuesto distintas formas de generar la rugosidad artificial alta. Las dimensiones de los elementos que configuran los distintos tipos de rugosidad artificial se determinan mediante fórmulas específicas en cada caso.

Con el fin de juzgar el grado de confianza que se esperaría con tales ecuaciones, en este trabajo se analizan los resultados que proporcionan utilizando para ello el teorema de Buckingham. Esta forma de proceder permite; en adición, disponer de expresiones adimensionales que simplifican notoriamente el cálculo.

2 ECUACIONES

Para este análisis se utiliza un tipo de rugosidad artificial, para un canal de pendiente S y sección rectangular de ancho b que proporciona una alta rugosidad artificial controlada y que es de construcción práctica. Está constituido por barras horizontales transversales discontinuas (rugosidad de fondo) de sección casi cuadrada de lado σ , normales a la dirección de la corriente y a una equidistancia $\lambda = 8\sigma$ (Fig. 1). En el trabajo de Krochin, (1986) se muestran otros tipos de rugosidad artificial. La rugosidad que aquí se presenta tiene la ventaja de permitir el paso de los gastos bajos sin que se retenga el agua.

Figura 1.- Rugosidad de fondo con barras transversales discontinuas (vista en planta)



2.1 RUGOSIDAD DE FONDO

En las Figs 1 y 2 se muestran los elementos que configuran una rugosidad de fondo, en donde la huella de los travesaños es también horizontal, de modo que su sección es casi cuadrada de lado. Al escurrir un flujo con gasto Q , el desnivel entre la superficie libre del agua y la huella de los travesaños es h . Con estos datos se definen dos parámetros adimensionales:

$$\alpha_* = h/\sigma \quad [1]$$

$$\beta_* = b/h \quad [2]$$

De acuerdo con ello y dentro de los límites

$$8.0 \geq \alpha_* \geq 3.5 \quad [3]$$

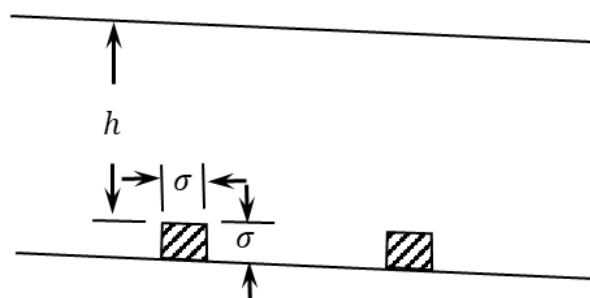
$$6.0 \geq \beta_* \geq 1.0 \quad [4]$$

$$S \leq 0.15 \quad [5]$$

El coeficiente de rugosidad es (Ref [1])

$$K = (54.2 - 2.1\alpha_* + 0.33\beta_*)/1000 \quad [6]$$

Figura 2.- Rugosidad de fondo con barras transversales discontinuas (corte vertical en Y-Y)



Por otra parte, el área y el radio hidráulicos son, respectivamente

$$A = b(h + \sigma) \quad [7]$$

$$R = \frac{A}{b+2(h+\sigma)} \quad [8]$$

Así que la velocidad media y el gasto que circula son

$$V = SR^{0.5}/K \quad [9]$$

$$Q = VA \quad [10]$$

Nótese que si en un canal son datos S y b , seleccionando un valor de σ y escogiendo el de α_* dentro de los límites impuestos (ec 3) se puede determinar el valor de h que, a su vez, permite valuar β_* teniendo en cuenta los límites (ec 4). Así se puede determinar K con la ec 6, A y R con las ecs. 7 y 8 respectivamente y finalmente V y Q con (las ecs 9 y 10).

3 ANÁLISIS

Según el teorema de Buckingham, un fenómeno físico cuyo comportamiento depende de n magnitudes físicas que pueden expresarse mediante m dimensiones fundamentales, se cuantifica en función de $m - n$ parámetros adimensionales.

Así, en el caso de un canal con rugosidad artificial de fondo, su funcionamiento dependerá de las magnitudes b, h, σ, S, g y Q las cuales se expresan en dimensiones de longitud y tiempo, de manera que para cuantificar su forma de trabajo se determina la relación entre cuatro parámetros adimensionales. Dado que $\alpha_* = h/\sigma$, $\beta_* = b/h$ y S son adimensionales, se necesita definir un cuarto parámetro que, por tratarse de un escurrimiento a superficie libre, es el número de Froude.

$$F_r = V / \sqrt{g(h + \sigma)} \quad [11]$$

De esta igualdad se concluye que

$$F_r = \frac{Vb(h+\sigma)}{\sqrt{g} b (h+\sigma)^{3/2}} \quad [12]$$

Y en atención a que $Q = Vb(h + \sigma)$, se tiene que

$$F_r^{2/3} = \left[\frac{(Q/b)^2}{g} \right]^{1/3} / (h + \sigma) \quad [13]$$

Por tal motivo resulta que haciendo $Z = F_r^{2/3}$, $X = \alpha_*$, $Y = \beta_*$ el funcionamiento del canal con rugosidad de fondo se cuantifica mediante una expresión de la forma.

$$Z = X^\alpha Y^\beta S^\gamma \quad [14]$$

Para valuar los exponentes α , β y γ en un canal de ancho de plantilla b , se necesita seleccionar N conjuntos de valores de h , σ y S que, dentro de los límites impuestos por las desigualdades de las ecs 3 a 5 permiten determinar, en cada conjunto, X , Y y S , así como un primer valor de Z utilizando las ecs. 6 a 10. Para que la muestra de N conjuntos sea suficientemente representativa, requiere incluir los valores máximo, medio y mínimo de X , Y y S .

Haciendo $z = \ln Z$, $x = \ln X$, $y = \ln Y$ y $s = \ln S$, con el método de mínimos cuadrados se establece el sistema de ecuaciones lineales.

$$\begin{Bmatrix} \sum^N x^2 & \sum^N xy & \sum^N xs \\ \sum^N xy & \sum^N y^2 & \sum^N ys \\ \sum^N xs & \sum^N ys & \sum^N s^2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum^N xz \\ \sum^N yz \\ \sum^N sz \end{Bmatrix} \quad [15]$$

La solución de este sistema de ecuaciones permite conocer los valores de α , β y γ con los cuales se calculan, nuevos valores Z_c para cada uno de los conjuntos por medio de la ec. 14.

Al comparar los resultados Z con los Z_c para el i ésimo conjunto se tiene el error relativo $\varepsilon_i = \frac{Z_i - Z_{ci}}{Z_i}$ con lo cual se calcula el error medio y la desviación estándar con las ecs 16 y 17.

$$\bar{\varepsilon} = (\sum^N \varepsilon_i) / N \quad [16]$$

y

$$\bar{S}_\varepsilon = \left[\frac{(\sum^N (\bar{\varepsilon} - \varepsilon_i)^2)}{N-1} \right]^{1/2} \quad [17]$$

Suponiendo que estos errores tienen una distribución normal es posible calcular el porcentaje de

error que se excede y juzgar así el grado de confianza que tiene con la ec 14.

En la tabla 3.1 se muestran los valores de σ, h, X, Y y S seleccionados para 27 conjuntos en un canal de 6 m de ancho (propuesto). Se calcularon los valores de Z mediante las ecs. 6 a 10, se estableció y resolvió el sistema ec.15, se calcularon los valores Z_c y el valor del error medio $\bar{\varepsilon}$ y la desviación estándar \bar{S}_ε . Los resultados fueron:

$$\begin{aligned}\alpha &= 0.420 \\ \beta &= 0.307 \\ \gamma &= 0.297 \\ \bar{\varepsilon} &= 0.002047 \\ \bar{S}_\varepsilon &= 0.008815\end{aligned}$$

De acuerdo con estos datos los errores que podrían sobrepasarse con una probabilidad de 0.05 serían

$$\varepsilon_M = 0.002047 + 0.008815 (1.645) = 0.01655$$

y

$$\varepsilon_m = 0.002047 - 0.008815 (1.645) = -0.01245$$

Dado que con una probabilidad de solo 0.05 de ser sobrepasados, los errores no serían mayores que el 10%, se considerar que los efectos que produce una rugosidad de fondo en un canal de $b = 6$ m de ancho (propuesto), se pueden evaluar por medio de la expresión adimensional y razonablemente confiable que se escribe a continuación:

$$\left(\left(\frac{Q}{b} \right)^2 / g \right)^{1/3} / (h - \sigma) = (h/\sigma)^{0.42} (b/h)^{0.307} S^{0.297} \quad [18]$$

Así, para un gasto y una pendiente dados, para determinado valor de σ se evalúe h resolviendo la ec 18. Para cerciorarse de la validez del resultado es conveniente verificar que los valores de $\alpha_* = h/\sigma$ y $\beta_* = b/h$ queden dentro de los límites impuestos.

De manera que, en este caso, para un gasto y una pendiente dados para determinar el valor de h bastará con emplear la ec. 18 para un determinado valor de b .

Por otra parte, conviene recordar que el gasto que circula en un canal revestido de sección rectangular, ancho de plantilla b , pendiente S y coeficiente de rugosidad, según la ecuación de Manning n , si el tirante es h y el radio hidráulico es $r = b h / (b + 2h)$ queda definido por la expresión

$$Q = b h S^{1/2} r^{1/2} / n \quad [19]$$

En esta ecuación para canales revestidos puede considerarse que n es del orden de 0.015, lo cual sirve de parámetro para juzgar la efectividad de la rugosidad artificial. Como ejemplo ilustrativo se calculó con los valores de la col. 7 de la Tabla 1 el valor promedio de los valores de rugosidad de la ecuación de Manning y se obtuvo de 0.045. Comparando este valor con el anterior de 0.015, para tener una idea de la manera en que la rugosidad artificial que se logra. Esto muestra de manera objetiva, el valor de la rugosidad al se puede aspirar con la rugosidad artificial con barras transversales discontinuas.

Tabla 1.- Valores promedio de n de Manning.

σ	h	X	Y	S	Q	n
[m]	[m]	[m]	[m]	[adm]	[m ³ /s]	[s/m ^{1/3}]
0.28	2.24	8.00	2.679	0.15	179.005	0.040
0.28	1.61	5.75	3.727	0.15	109.084	0.044
0.28	1.01	3.60	5.952	0.15	58.456	0.048
0.38	3.04	8.00	1.974	0.15	264.030	0.041
0.38	2.18	5.75	2.746	0.15	162.881	0.045
0.38	1.33	3.50	4.511	0.15	85.791	0.049
0.48	3.84	8.00	1.563	0.15	352.297	0.042
0.48	2.76	5.75	2.174	0.15	219.337	0.046
0.48	1.68	3.50	3.571	0.15	117.116	0.050
0.28	2.24	8.00	2.679	0.1	146.157	0.040
0.28	1.61	5.75	3.727	0.1	89.066	0.044
0.28	1.01	3.60	5.952	0.1	47.729	0.048
0.38	3.04	8.00	1.974	0.1	215.580	0.041
0.38	2.18	5.75	2.746	0.1	132.992	0.045
0.38	1.33	3.50	4.511	0.1	70.048	0.049
0.48	3.84	8.00	1.563	0.1	287.650	0.042
0.48	2.76	5.75	2.174	0.1	179.088	0.046
0.48	1.68	3.50	3.571	0.1	95.625	0.050
0.28	2.24	8.00	2.679	0.05	103.349	0.040
0.28	1.61	5.75	3.727	0.05	62.979	0.044

0.28	1.01	3.60	5.952	0.05	33.750	0.048
0.38	3.04	8.00	1.974	0.05	152.438	0.041
0.38	2.18	5.75	2.746	0.05	94.040	0.045
0.38	1.33	3.50	4.511	0.05	49.532	0.049
0.48	3.84	8.00	1.563	0.05	203.399	0.042
0.48	2.76	5.75	2.174	0.05	126.634	0.046
0.48	1.68	3.50	3.571	0.05	67.617	0.050

4 EJEMPLOS DE CÁLCULO

Supóngase un canal de sección rectangular, con ancho de plantilla b de 6.0 m y pendiente S igual a 0.15, excavado en roca de tal modo que el desnivel entre la plantilla y el terreno natural sea 3.0 m. Considérese un gasto máximo de $Q = 95 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.1 CANAL REVESTIDO

Si el canal es revestido de concreto con coeficiente de rugosidad n de 0.015, fluye agua con un gasto de $Q = 95 \text{ m}^3/\text{s}$, se encuentra un tirante $h = 0.822 \text{ m}$, una velocidad media $V = 19.27 \text{ m/s}$ y un número de Froude $F_r = 6.789$. Se desea reducir la velocidad del agua en el canal usando barras transversales discontinuas, determinar el tirante, la velocidad en el canal y la transición del flujo original al modificado a partir de la rugosidad calculada.

Conviene señalar que, aunque el tirante es 0.822 m y el tirante máximo que cabría en el canal es de 3.0 m aparentemente no se saldría el agua; sin embargo, hay que recordar la presencia de las ondas de Mach y lo errático de los tirantes en un flujo supercrítico podrían provocar que el agua salga del cauce. Por ello, se considera conveniente incluir una rugosidad artificial en el fondo del canal.

4.2 CANAL CON RUGOSIDAD ARTIFICIAL DE FONDO CON BARRAS TRANSVERSALES DISCONTINUAS

Si en el canal, se desea reducir la velocidad del flujo empleando la rugosidad artificial de fondo con barras transversales discontinuas con $\sigma = 0.28 \text{ m}$ se encuentra que el tirante total sería $T = 1.403 + 0.28 = 1.683 < 3.0 \text{ m}$ (es decir, que no se saldría el agua). La velocidad media se reduciría a 9.406 m/s y el número de Froude a 2.315. El valor calculado de K empleando la ec. 6 es $K = 1/22.18$ y el coeficiente de rugosidad n sería 0.046. También se calculan $\alpha_* = 5.012$ y $\beta_* = 4.276$, los cuales se encuentran en los límites establecidos.

Es interesante preguntarse qué sucedería en el canal con rugosidad de fondo con barras transversales discontinuas y $\sigma = 0.28 \text{ m}$, cuando el gasto fuera inferior a los $95 \text{ m}^3/\text{s}$ considerado.

Tabla 2.- Variación de la velocidad

Q [m ³ /s]	Q [%]	T [m]	F_r	α_*	β_*	V [m/s]
95	100	1.683	2.315	5.012	4.276	9.406
65	68.4	1.348	2.21	3.814	5.618	8.037
40	42.1	1.017	2.075	2.632*	8.141*	6.555
25	26.3	0.685	1.942	1.776*	12.07*	5.361

* Fuera de los límites

De acuerdo con los resultados que se consignan en la Tabla 2 el límite de validez de ellos corresponde a un gasto del $\mp 30\%$ del original. No obstante, en el supuesto de que la ec. 14 fuera general, con el fin de tener una idea de cuál sería la tendencia del comportamiento del canal al disminuir el gasto, se añadió el último renglón. Así aprecia que tal tendencia implica una disminución gradual de la velocidad y una reducción paulatina del número de Froude, que cada vez se acercaría más a 1, de tal suerte que lo que podría esperarse que al disminuir el gasto, la tendencia sería hacia el régimen crítico, por lo que las alteraciones de la superficie libre se irían atenuando.

Conviene hacer notar que de acuerdo con el tipo sedimento transportado puede ocurrir un depósito, de tal manera que la rugosidad de fondo seguiría siendo útil, aunque, claro, menos efectiva. Mas, debe tenerse en cuenta que para que los resultados anteriores fueran creíbles, es necesario que el material sólido se hubiera cementado porque en un lapso muy prolongado no se removiera, lo que no ocurriría entre dos crecientes sucesivas de importancia, puesto que según los datos mostrados en la Tabla 2, aún para gastos menores la velocidad del agua sería capaz de remover hasta partículas de material sólido de regular tamaño.

Finalmente, es necesario considerar que, aguas arriba del tramo del canal con rugosidad artificial de fondo, la velocidad sería tan grande que se produciría un choque violento del agua contra el primer travesaño que forma parte de la zona con rugosidad artificial, causaría una sobrelevación considerable del nivel del líquido. Por este motivo, conviene que los primeros travesaños tuvieran peraltes que fueran creciendo linealmente hasta alcanzar la altura σ .

5 CONCLUSIONES

Debe tenerse en cuenta que los errores de aproximación fueron sistemáticamente en más, lo que podría suceder es que las velocidades y los números de Froude fueran menores, lo que sería favorable para el funcionamiento de los canales. Así para los diseños que se hagan con las ecuaciones para números de Froude menores que 1.5, con el fin de respetar el desnivel entre el terreno natural y el fondo del canal, se pueden tener bordos libres adecuados.

Se considera que la rugosidad artificial de fondo con barras transversales discontinuas ocasiona

flujos más estables dentro de un rango más amplio, aunque es un poco más costosa y menos resistente al desgaste, para otras clases de la rugosidad artificial generalmente sucede lo contrario.

Por otra parte, debe tenerse presente que si los diseños se hacen para un flujo de agua con el gasto máximo con probabilidad de ocurrencia relativamente baja, con la rugosidad artificial de fondo propuesta, para flujos con gastos menores, el desgaste se atenuaría notoriamente.

Más aún, conviene recordar que en este trabajo se han analizado solo un tipo de rugosidad artificial. En el trabajo de Krochin, 1986, se describen otras que podrían mejorar la eficiencia a la alcanzada en este trabajo.

Se recomienda instalar un tramo de transición del canal aguas arriba de la zona en la cual se tiene la rugosidad de fondo con barras transversales discontinuas, ya que el cambio de la rugosidad del fondo no debe ser brusco, para evitar el peligro de deflectar el flujo de agua a la entrada.

Los autores agradecen a la Dra. Judith Guadalupe Ramos Hernández su participación en la elaboración de este trabajo.

REFERENCIAS

French R. H. (1985). Open Chanel. McGraw Hill, N. York.

Kratz D B y Mahaj I, K, (1975), Small Hydraulic Structures, FAO, Irrigation and Drainage Paper, 26/2

Krochin S, (1986), Diseño hidráulico, 3a Edición, Quito Ecuador.

Sánchez B J L, Gracia S J y Franco V, (2000), Critical review of equations to determine the effect of artificial roughness in a canal with steep slopes, Dam Engineering, XI, 2, 89-109, UK.

Wood I. R. (editor), (1991) Air Entrainment in Free-Surface Flows, (Cap. 3, Free Surface Air Entrainment in Spillways), A.A. Balkema, Rotterdam.