

Journal of Engineering Research

Acceptance date: 29/04/2025

Submission date: 10/04/2025

UN ENFOQUE PARA EL DISEÑO DE RUGOSIDAD DE FONDO TIPO “M” (ARTIFICIAL ALTA), EN CANALES CON RÉGIMEN RÁPIDO

Javier Osnaya Romero

Universidad Nacional Autónoma de México,
Instituto de Ingeniería, México
Ciudad de México, México

Jesús Gracia Sánchez

Universidad Nacional Autónoma de México,
Instituto de Ingeniería, México
Ciudad de México, México

Víctor M Ortiz Martínez

Universidad Nacional Autónoma de México,
Instituto de Ingeniería, México
Ciudad de México, México

Oscar A Fuentes Mariles

Universidad Nacional Autónoma de México,
Instituto de Ingeniería, México
Ciudad de México, México

Víctor Franco

Universidad Nacional Autónoma de México,
Instituto de Ingeniería, México
Ciudad de México, México

All content in this magazine is
licensed under a Creative Com-
mons Attribution License. Attri-
bution-Non-Commercial-Non-
Derivatives 4.0 International (CC
BY-NC-ND 4.0).



Resumen: En canales revestidos de fuerte pendiente se presentar 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 al emplear rugosidades tipo “M”, que es 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. 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. Esto incluye una comparación experimental 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. El estudio concluye que la ecuación propuesta para representar la rugosidad tipo “M” concuerda bien con los trabajos experimentales realizados expofeso para comprobarlos.

Palabras-clave: pendientes pronunciadas, rugosidad de lecho artificial, rugosidad tipo “M”

INTRODUCCIÓN

En canales revestidos de fuerte pendiente se pueden alcanzar velocidades grandes que, si lleva material sólido en suspensión, tengan una capacidad erosiva, al mismo tiempo, números de Froude de tal magnitud que no solo producen grandes sobrelevaciones en las curvas, sino que engendran ondas de Mach que, al superponerse, ocasionan que el agua salga en algunas de ellas. Para disminuir la velocidad se coloca en las rápidas una rugosidad artificial de manera que, a cambio de tener secciones transversales mayores, se tenga un funcionamiento más estable y una capacidad erosiva menor.

ECUACIONES

En este trabajo se presenta 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, constituida por barrotes horizontales (rugosidad de fondo) con forma de M , de sección casi cuadrada de lado σ , normales a la dirección de la corriente y a una equidistancia $\lambda = 8\sigma$. En el trabajo de Krochin, 1986 se muestran otros tipos de rugosidad artificial, la que aquí se presenta es la que proporciona mayor efecto.

En las Fig.1 se muestra la rugosidad de fondo, en donde la huella de los travesaños con forma M 's. 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: $\alpha_* = \frac{h}{\sigma}$, y $\beta_* = \frac{b}{h}$ y De acuerdo con ello y dentro de los límites $8.0 \geq \alpha_* \geq 3.5$, $6.0 \geq \beta_* \geq 1$, y $S \geq 0.15$ el coeficiente de rugosidad (Ref [1]) $K = (54.2 - 2.1 \alpha_* + 0.33 \beta_*)/1000$.

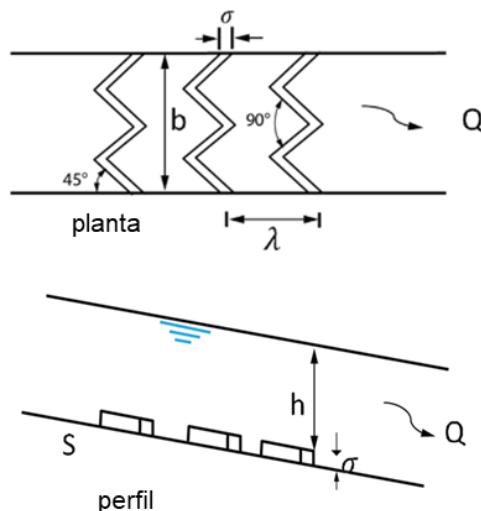


Figura 1.- Rugosidad de fondo tipo “M”.

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

$$A = b(h + \sigma) \quad (1)$$

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

Así que la velocidad media y el gasto que circula son

$$V = \frac{(SR)^{0.5}}{K} \quad (3)$$

$$Q = VA \quad (4)$$

ANÁLISIS

De acuerdo con el teorema de Buckingham, un fenómeno físico cuyo comportamiento depende de n magnitudes físicas se expresa mediante m dimensiones, se cuantifica en función de $m - n$ parámetros adimensionales. Así, para 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 se tienen cuatro parámetros. Dado que $a_* = \frac{h}{\sigma}$, y $\beta_* = \frac{b}{h}$, y S son adimensionales, se necesita definir un cuarto y, por tratarse de un escurrimiento a superficie libre, y considerando que $Q = Vb(h + \sigma)$ el número de Froude se expresa como ec 1.

$$F_r^{2/3} = \frac{[(Q/b)^2/g]^{1/3}}{h + \sigma} \quad (5)$$

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

$$Z = X^\alpha Y^\beta S^\gamma \quad (6)$$

Para valuar los exponentes en un canal de ancho de plantilla b , se necesita N conjuntos de valores de h , σ y S . Dentro de los límites descritos anteriormente. 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

$$\begin{pmatrix} \sum^N x^2 & \sum^N xy & \sum^N xs \\ \sum^N xy & \sum^N y^2 & \sum^N ys \\ \sum^N xs & \sum^N ys & \sum^N s^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum^N xz \\ \sum^N yz \\ \sum^N sz \end{pmatrix} \quad (7)$$

La solución de este sistema de ecuaciones permite conocer los valores de a , β y γ con los cuales se calculan, nuevos valores Z_c para cada uno de los conjuntos por medio de la ec. 2.

Al comparar los resultados Z con los Z_c para el iésimo 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.

$$\bar{\varepsilon} = (\sum^N \varepsilon_i)/N \quad (8)$$

$$\bar{S}_\varepsilon = [(\sum^N (\bar{\varepsilon} - \varepsilon_i)^2)/N - 1]^{1/2} \quad (9)$$

Suponiendo que estos errores tienen una distribución normal se calcula el porcentaje de error que se excede y así juzgar el grado de confianza que tiene con la ec. 6.

En la Tabla 1 se muestran los valores de seleccionados para 27 conjuntos en un canal de 6 m de ancho (propuesto).

Resolviendo el sistema de ecuaciones (ec. 7), para un canal de 6 m de ancho (propuesto). se calcularon los valores Z_c y el error medio $\bar{\varepsilon}$ y la desviación estándar \bar{S}_ε . Resultando: $a = 0.420$, $\beta = 0.307$, $\gamma = 0.307$, $\bar{\varepsilon} = 0.002047$, y $\bar{S}_\varepsilon = 0.008815$

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

$$\varepsilon_M = 0.01655 \text{ y } \varepsilon_m = -0.01245$$

De ser sobrepasados, los errores no serían mayores que el 10%. Considerando que los efectos que produce una rugosidad de fondo, se evalúan por medio de la expresión que se escribe a continuación:

$$[Q^2/b^2g]^{1/3}/h + \sigma = (h/\sigma)^{0.42} (b/h)^{0.307} S^{0.297} \quad (10)$$

Así, para Q , b y S dados, para determinado valor de σ se evalúe h resolviendo la ec. 10. Para cerciorarse de la validez del resultado es conveniente verificar que los valores de $a_* = h/\sigma$ y $\beta_* = b/h$ queden dentro de los límites impuestos.

σ [m]	h [m]	X [m]	Y [m]	S [adm]	Q [m ³ /s]	n [s/m ^{1/3}]
0.28	2.24	8.00	2.679	0.15	106.935	0.068
0.28	1.61	5.75	3.727	0.15	61.778	0.078
0.28	0.98	3.50	6.122	0.15	31.556	0.086
0.38	3.04	8.00	1.974	0.15	154.727	0.070
0.38	2.18	5.75	2.746	0.15	90.171	0.082
0.38	1.33	3.50	4.511	0.15	46.421	0.091
0.48	3.84	8.00	1.563	0.15	204.166	0.072
0.48	2.76	5.75	2.174	0.15	119.834	0.084
0.48	1.68	3.50	3.571	0.15	62.179	0.094
0.28	2.24	8.00	2.679	0.10	87.312	0.068
0.28	1.61	5.75	3.727	0.10	50.442	0.078
0.28	0.98	3.50	6.122	0.10	25.766	0.086
0.38	3.04	8.00	1.974	0.10	126.334	0.070
0.38	2.18	5.75	2.746	0.10	73.624	0.082
0.38	1.33	3.50	4.511	0.10	37.902	0.091
0.48	3.84	8.00	1.563	0.10	166.701	0.072
0.48	2.76	5.75	2.174	0.10	97.844	0.084
0.48	1.68	3.50	3.571	0.10	50.769	0.094
0.28	2.24	8.00	2.679	0.05	61.739	0.068
0.28	1.61	5.75	3.727	0.05	35.668	0.078
0.28	0.98	3.50	6.122	0.05	18.219	0.086
0.38	3.04	8.00	1.974	0.05	89.332	0.070
0.38	2.18	5.75	2.746	0.05	52.060	0.082
0.38	1.33	3.50	4.511	0.05	26.801	0.091
0.48	3.84	8.00	1.563	0.05	117.875	0.072
0.48	2.76	5.75	2.174	0.05	69.186	0.084
0.48	1.68	3.50	3.571	0.05	35.899	0.094

Tabla 1 Valores de parámetros seleccionados

De manera que, en este caso, para un gasto y una pendiente dados para determinar el valor de h bastará con emplear la ec. 10 para un determinado valor de b . También es conveniente verificar que los parámetros a_* y β_* queden dentro de los límites impuestos por las desigualdades.

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, n según la ecuación de Manning, tirante h , y radio hidráulico $r = bh/(b+2h)$ queda definido por la expresi

$$Q = b h S^{1/2} r^{1/2} / n \quad (11)$$

En la ec. 11 para canales revestidos puede considerarse que es 0.015, lo cual sirve para juzgar la efectividad de la rugosidad artificial. Como ejemplo ilustrativo se calcularon los valores y el valor promedio de rugosidad de fue de 0.081. Contrastando con el anterior de 0.015, esto muestra a que valor de la rugosidad se puede aspirar con la rugosidad artificial con forma de M .

EJEMPLO DE CÁLCULO

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

CANAL REVESTIDO

Si el canal es revestido de concreto con n de 0.015, $Q = 95 \text{ m}^3/\text{s}$, $h = 0.882 \text{ m}$, una velocidad media 19.27 m/s y . Se reducirá la velocidad del agua usando una rugosidad tipo M 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 tirantes 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.

CANAL CON RUGOSIDAD ARTIFICIAL DE FONDO TIPO M

Para reducir la velocidad se emplea rugosidad de fondo tipo M con $\sigma = 0.28 \text{ m}$, el tirante total sería $T = 2.14 + 0.28 = 2.384 < 3.0 \text{ m}$ (es decir, que no se saldría el agua). La velocidad media se reduciría a 6.42 m/s y el número de Froude a 1.373. El valor calculado de $K=14.931$ y el coeficiente n sería 0.07. También se calculan $a_* = 7.514$ y $\beta_* = 2.852$, los cuales se encuentran en los límites establecidos.

Es interesante preguntarse qué sucedería en el canal con rugosidad tipo M y $\sigma=0.28 \text{ m}$ cuando el gasto fuera inferior a los $95 \text{ m}^3/\text{s}$.

$Q [\text{m}^3/\text{s}]$	$Q [\%]$	$T [\text{m}]$	F_r	a_*	βa_*	$V [\text{m}/\text{s}]$
95	100	2.384	1.373	7.514	2.852	6.642
50	2.6	1.644	1.262	4.871	4.399	5.069
30	1.6	1.226	1.175	3.380*	6.34*	4.077
25	6.3	1.106	1.144	2.948*	7.268*	3.769

Tabla 2. Características del canal con rugosidad tipo M

*Fuera de los límites

De acuerdo con los resultados de la Tabla 2, el límite de validez corresponde a un gasto del $\pm 30\%$ del original. No obstante, en el supuesto de que la ec. 6 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 se 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, porque lo que podría esperarse, la tendencia 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.

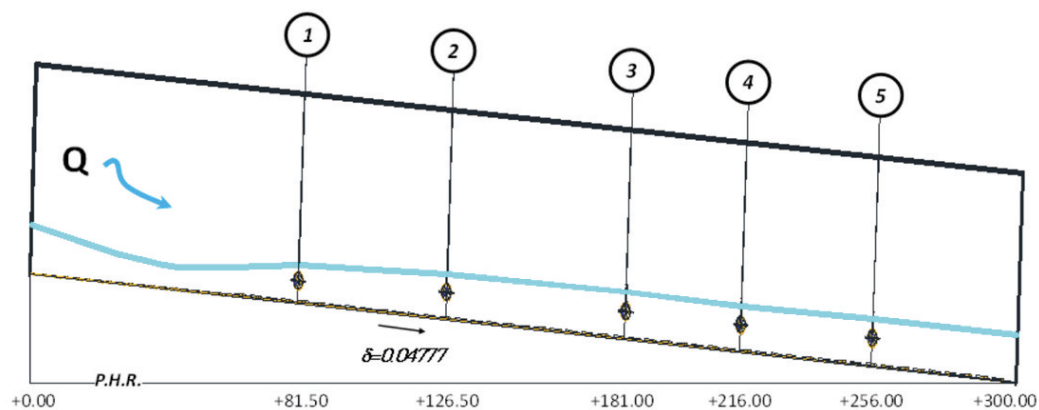


Figura 2.- Vista general del canal experimental.

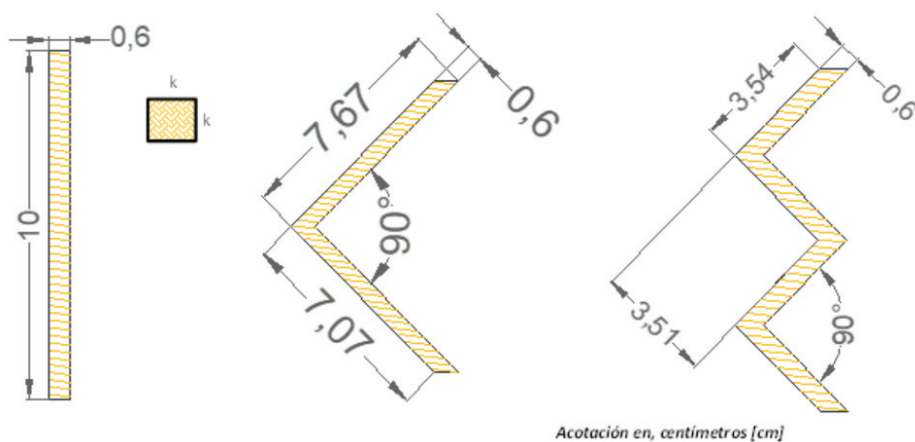


Figura 3.- Características de los elementos de rugosidad artificial tipo M.

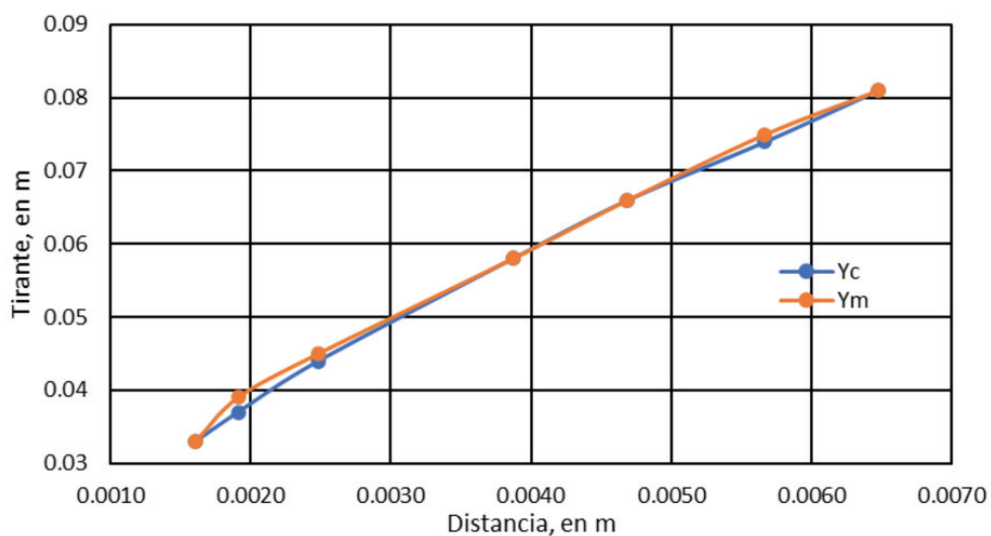


Figura 5.- Tirante calculado y medido.

Q [lps]	Y_{cl} [cm]	Y_{MI} [cm]	Y_{MAXI} [cm]	Y_{MINI} [cm]	V_{cl} [cm/s]	V_{MI} [cm/s]	V_{MAXI} [cm]	V_{MINI} [cm]
0.61	3.3	3.3	3.6	3.1	41.7	42.8	52	33.5
1.91	3.7	3.9	4.3	3.6	44.9	40.2	50.1	30.4
2.48	4.4	4.5	4.9	4.2	50.1	39	52.9	25.1
3.87	5.8	6.2	6.4	6	60.3	61.7	65.3	58.2
4.69	6.6	6.6	6.8	6.3	65.3	66.7	69.1	64.4
5.67	7.4	7.5	7.6	7.3	70.7	76.5	82.4	70.6
6.47	8.1	8.1	8.2	8	74.7	88	92.5	83.5

Tabla 3. Gastos empleados y los valores de los tirantes y velocidades medidos.

COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL

Para comparar los resultados obtenidos con el método propuesto ec. 10 y mediciones experimentales, se realizaron una serie de pruebas en un canal de pendiente variable empleando la rugosidad artificial (con forma de M).

Se empleo un canal de laboratorio de pendiente variable de 2.0 m de largo y 0.1 m de ancho, en la Fig 2. se muestra el canal experimental empleado. Se fabricaron rugosidades del tipo *M* cuyos detalles se presentan en la Fig. 3. Estas rugosidades se instalaron en el canal con espaciamientos de 0.15 m, y los valores medidos y calculados se muestran en la Fig 2.

Se realizaron 5 pruebas para diferentes gastos, y se midieron los tirantes y las velocidades del agua en diferentes sitios. Los tirantes se midieron con limnímetros y la velocidad con molinetes tipo Sonda recta para medir velocidad del agua en cursos abiertos. Rango: 0,025 a 1,5 m/s Armfield - H33-2, con rotor de 11,6 mm de diámetro y hélice plástica. En la Fig. 4, se muestra un detalle del funcionamiento del canal con la rugosidad tipo (*M*).

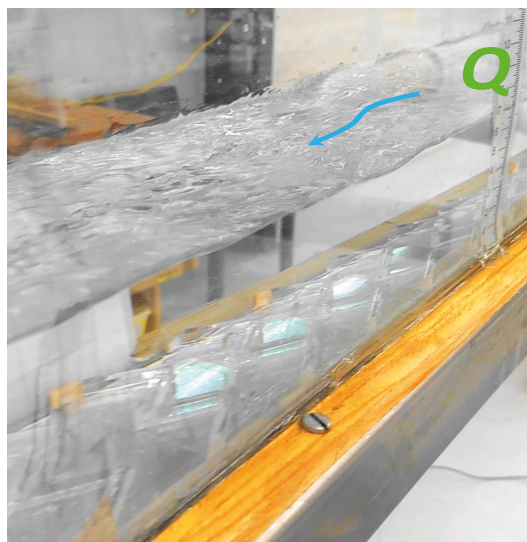


Figura 4.-Funcionamiento de la rugosidad artificial tipo "M"

RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la Tabla 3, se muestran los gastos empleados y los valores de los tirantes y velocidades medidos. En la misma tabla, se incluyen los resultados de los tirantes y velocidades calculados con la ec. 1 y 3 y en la Fig. 5 se muestran los tirantes a lo largo del canal.

Como se puede observar los valores calculados en todos los casos están dentro de los límites estadísticos de las pruebas, es decir dentro de la desviación estándar de las mediciones.

CÁLCULO DE LA TRANSICIÓN DE LA ENTRADA A LA ZONA DE RUGOSIDAD DE FONDO TIPO “M”

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, lo que causaría una sobrelevación considerable del nivel del líquido. Por este motivo, conviene que los primeros travesaños tengan peraltes que fueran creciendo linealmente hasta alcanzar la altura, σ como se expone a continuación.

Considérese que el coeficiente de rugosidad en el canal sin rugosidad de fondo es n_0 y que con tal rugosidad es n_p , se supone que en i_1 travesaño el coeficiente de rugosidad es el correspondiente al canal con rugosidad tipo M con travesaños colocados a una distancia λ con altura σ . Si la velocidad en el canal con rugosidad de fondo M y travesaños de altura σ es v_E ; se propone que entre dos secciones contiguas con espaciamiento λ , la ecuación de conservación de la energía se escribiría como ec. 8.

$$(h_i + \sigma_i) + \frac{v_i^2}{2g} + Z_i = (h_{i+1} + \sigma_{i+1}) + \frac{v_{i+1}^2}{2g} + Z_{i+1} + \lambda \left(\frac{\bar{v}\bar{n}}{r^{2/3}} \right)^2 \quad (12)$$

Calculando las velocidades y radios hidráulicos con Ecs 9 y 10.

$$v = \frac{q}{(b(h+\sigma))} \quad (13)$$

$$r = \frac{b(h+\sigma)}{(b+2(h+\sigma))} \quad (14)$$

La ec. 8 suele usarse para cálculo de perfiles en un canal tomando en cuenta que es régimen supercrítico y con el coeficiente de rugosidad promedio entre dos secciones transversales contiguas. Nótese que en cálculo de los tirantes está incluido el valor de σ en cada escalón.

Empleando la ec. 8 en el tramo de entrada al canal se obtuvo el perfil consignado en la Tabla 4. El cálculo corresponde a un canal de sección rectangular con las características siguientes $S = 0.15$, $b = 6m$ y $Q = 95 m^3/s$. Sin revestir, el tirante h es 0.822 m y el coeficiente de rugosidad es n_0 es 0.015. Como se indicó, cuando en este mismo canal se dispone rugosidad de fondo M con $\sigma = 0.28m$, el tirante h es 2.097m, la velocidad v es 6.66 m/s y el coeficiente de rugosidad n_f es 0.07. El espaciamiento entre secciones es de $\lambda = 8(0.28) = 2.24 m$.

Al observar los resultados que aparecen en la Tabla 4, se observa que con el aumento paulatino de la altura del travesaño se obtiene que en a alrededor de 30 m aguas abajo del primer travesaño, se alcanza el valor del tirante de la rugosidad de tipo M, de tal manera que puede concluirse que una forma de evitar sobrelevaciones grandes y brascas, es conveniente que en los primeros tramos el peralte que crezca linealmente hasta alcanzar la altura σ ; en ello, se tiene presente que el efecto de la rugosidad de fondo alcanzará su máxima eficiencia cerca de los 30 m aguas abajo del primer travesaño tipo M.

Distancia entre dos secciones transversales [m]	σ [m]	h [m]	V [m/s]
100.00	0.000	0.822	19.273
97.76	0.000	0.822	19.273
95.52	0.030	0.875	18.103
93.28	0.060	0.955	16.574
91.04	0.090	1.062	14.905
88.80	0.120	1.194	13.266
86.56	0.150	1.346	11.764
84.32	0.180	1.515	10.454
82.08	0.210	1.692	9.357
79.84	0.240	1.868	8.475
77.60	0.028	2.029	7.805
75.36	0.028	2.164	7.316
73.12	0.028	2.240	7.070
70.88	0.028	2.275	6.961

Tabla 4. Tirantes y velocidades en la transición de entrada

Es pertinente señalar que la aproximación propuesta para elaborar la Tabla 1 se ha considerado en el cálculo del perfil un valor promedio del coeficiente de rugosidad igual a 0.043 (valor promedio entre la rugosidad del canal a la llegada y la rugosidad una vez que se ha establecido el flujo en las secciones con la rugosidad tipo M).

El tirante normal obtenido en el cálculo de la rugosidad artificial es igual a 2.097 m y el último valor de la tabla 4 es 2.275 m, que deberían ser iguales; sin embargo, la diferencia se atribuye a las aproximaciones hechas.

La validez de esta propuesta deberá comprobarse con mediciones de campo, ya que el crecimiento de los escalones también se ha considerado una variación lineal, y a pesar de las suposiciones realizadas, los resultados parecen congruentes con el fenómeno real.

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 libres bordos adecuados.

REFERENCIAS

French R. H. (1985). **Open Channel**. 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 channel with steep slopes**, Dam Engineering, XI, 2, 89-109, UK.

Se considera que la rugosidad artificial de fondo de tipo M 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 ha propuesto un criterio de cálculo de la rugosidad en un tramo de transición del canal aguas arriba de la zona en la cual se tiene la rugosidad de fondo tipo M, ya el cambio de la rugosidad del fondo no debe ser brusca para evitar el peligro de deflectar el flujo de agua.

El criterio empleado está basado en el cálculo del efecto de la rugosidad M y la ecuación de conservación de la energía de flujo a superficie libre. La aproximación propuesta ha sido comprobada con mediciones experimentales y ofrecen resultados congruentes y satisfactorios.