Consideración de la aireación natural del flujo en rápidas para determinar la altura de los muros laterales

INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista hidráulico, la altura de los muros laterales de una rápida debe ser tal que evite el desbordamiento del agua hacia el exterior de la estructura [Pardo 2000, Alegret et. al. 2001], de ahí que es evidente que dicha altura para cada sección transversal será igual a la suma del tirante hidráulico en esa sección más el denominado borde libre, según se indica en la expresión (1).

$$AM = h_a + BL \qquad (1)$$

Con respecto al borde libre hay diversidad de criterios en la literatura especializada, el autor del presente trabajo opina que atendiendo a aspectos hidráulicos el mismo debe tomar valores entre 0,5 m y 1,0 m.

En cuanto al tirante hidráulico no hay dudas que resulta fácil identificar métodos precisos e igualmente confiables para su determinación en términos de tirante de agua; sin embargo, todos los proyectistas coinciden en que dicho tirante deberá ser incrementado por el fenómeno de la aireación natural del flujo que tiene lugar como consecuencia del atrapamiento de aire de la atmósfera por esa corriente de agua que generalmente se produce con velocidades medias de circulación relativamente altas.

Los métodos de cálculo de la aireación natural de corrientes de agua abiertas a la atmósfera son en general complicados y dependientes de un alto número de coeficientes, que los hacen tener poca precisión; de ahí que los ensayos en laboratorios especializados, con alta experiencia y elevados recursos, unidos a observaciones a nivel de prototipos, han devenido en varios métodos propuestos a los fines mencionados.

Resumen / Abstract

Considerar el fenómeno de la aireación natural del flujo en rápidas es sumamente importante para determinar la altura de los muros de la rápida desde un punto de vista hidráulico; por esa razón en este trabajo se hace una comparación entre varios métodos propuestos para cuantificar dicho fenómeno y finalmente se propone un nuevo método más sencillo, e igualmente confiable, que el mejor de los analizados.

Palabras clave: *aireación natural, rápidas, radio hidráulico, coeficiente de Manning, pendiente.*

In supercritical flow canals it is very important to consider the air - entrainment phenomenon. This phenomenon is needed for the hydraulic design of the canal wall height. In this paper a comparison is made between several existing methods for the air - entrainment determination and a new simpler method is proposed which appears to be as trustable as the best of the existing ones.

Keywords: *air - entrainment, chutes, hydraulic radius, Manning coefficient, slope.*

Dr. Rafael Pardo Gómez
Director, Centro de Investigaciones Hidráulicas, CUJAE, Habana
email: rpardo@cih.cujae.edu.cu

A continuación se hace un análisis comparativo de cinco de los métodos que la literatura presenta, y posteriormente se presenta una formulación desarrollada por el autor con una estructura más sencilla.

INICIO DE LA AIREACIÓN

En general los investigadores [Lappo 1988, Slisski 1979] coinciden en plantear que se produce atrapamiento de aire de la atmósfera por una corriente de agua, cuando la velocidad media del flujo en la sección objeto de estudio supera un valor de la velocidad denominado crítico [Pardo 2000, Alegret et. al. 2001, Lappo 1988].

Dependiendo de la interpretación física que se dé al fenómeno del atrapamiento de aire, se llegan a obtener distintas expresiones para calcular dicha velocidad crítica, así se tienen:

a) según Grishin: $V_* = 5{,}753\sqrt{R}$ (2)

b) según Douma: $V_* = 2{,}24\sqrt{gR}$ (3)

c) según Isachenko: $V_* = 6{,}7\sqrt{gR}\left(1-\frac{\Delta}{R}\right)^7$ (4)

d) según Skrebkov: $V_* = 0{,}089 C \cos\alpha$ (5)

e) según Voinich:

$$V_* = 6{,}33\sqrt{gR\cos\alpha\left(1+\frac{0{,}011}{R}\right)}\left(1+8{,}7\frac{n}{R^{1/6}}\right)^{-1} \quad (6)$$

en todos los casos:

V_* : velocidad crítica a partir de la cual se produce aireación del flujo, m/s.
R : radio hidráulico, m
g : aceleración de la gravedad, m/s².
Δ : rugosidad absoluta del fondo, m.
C: coeficiente de Chezy.
α: ángulo de inclinación de la rápida con la horizontal.
n: coeficiente de rugosidad de Manning.

Con el fin de hacer una primera comparación entre estos métodos, el autor efectuó los cálculos para varias combinaciones de R, n, y S (pendiente de la rápida), obteniendo en todos los casos comportamientos similares a los que se presentan en la figura 1, para la que S = 0,1 y n = 0,015.

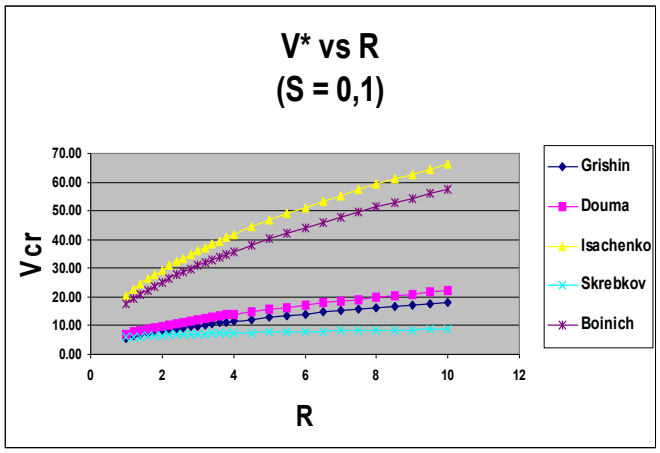

Figura 1. Resultados de cinco de los métodos de cálculo de la velocidad crítica.

En esta figura 1 se aprecia de manera evidente que los métodos de Isachenko y Voinich pronostican un inicio de la aireación mucho más «demorado» que para los tres restantes, es decir, se tienen que producir velocidades del flujo mucho mayores, para que la aireación tenga lugar.

Otro aspecto que no se debe pasar por alto es que solo los métodos de Skrebkov y Voinich toman en cuenta el efecto de la pendiente de la rápida, mientras que Grishin y Douma tampoco consideran el efecto de la rugosidad de la rápida.

En la literatura consultada [Slisski 1979] se aprecia la figura 2, que indica que de los cinco métodos analizados, el de Voinich presenta los resultados más próximos a la realidad; de ahí que en lo adelante en el presente trabajo se tomará ese método como elemento de comparación.

A partir de la observación antes apuntada en cuanto a que tres de los métodos no consideran importante tomar en cuenta la incidencia de la pendiente longitudinal de la rápida en el valor de la velocidad crítica, el autor del presente trabajo obtuvo con el auxilio de la expresión de Voinich los resultados que se muestran en la figura 3, que obviamente indican la necesidad de tomar en cuenta el referido parámetro en los cálculos de la aireación. Más adelante en la formulación nueva que se propone, se ratificará este criterio.

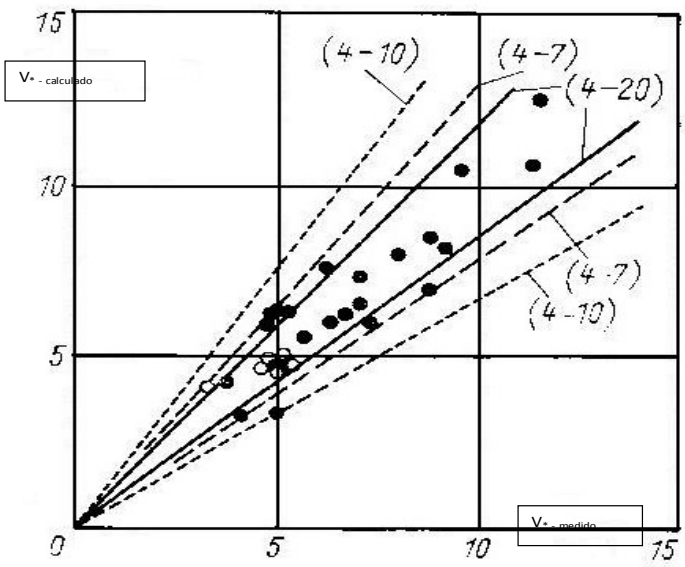

Figura 2 - Comparación entre los métodos de cálculo de la velocidad crítica para la aireación según Slisskii 1979

Leyenda: 4 -20: Voinich; 4 -7: Isachenko; 4 – 10: Skrebkov

FORMULACIÓN PROPUESTA POR EL AUTOR

Partiendo de la expresión (6) y mediante el empleo de herramientas matemáticas y estadísticas, el autor del presente trabajo obtuvo la expresión (7) que como se puede apreciar es de formulación mucho más sencilla que la original de Voinich.

$$V_* = (19{,}682 - 134{,}29n - 3{,}4816S^2 + 24{,}691nS^2 - 0{,}5304S + 6{,}26nS)\, R^{(0{,}4991 + 1{,}0229n)} \quad (7)$$

Se calculó la V_* por la expresión original de Voinich (6) y por la propuesta del autor (7), variando n desde 0,013 a 0,018; S entre 0,1 y 0,5; y R entre 1 m y 5 m; obteniéndose coincidencia casi total y en los casos en que hubo diferencias, ésta no superó el valor de 0,03 m/s, que resulta totalmente satisfactorio desde el punto de vista práctico.

Con el fin de simplificar aún más la expresión (7), el autor analizó cuatro modificaciones a la misma; fueron estas:

- 1ª) despreciando la influencia de n.

$$V_* = (19{,}682 - 3{,}4816S^2 - 0{,}5304S)R^{(0{,}4991)} \quad (8)$$

Con las mismas variaciones de S y R arriba planteadas, se obtuvieron diferencias máximas entre los resultados de Voinich y esta fórmula simplificada, iguales a 4,2 m/s.

- 2ª) despreciando la influencia de S.

$$V_* = (19{,}682 - 34{,}29n)\, R^{(0{,}4991 + 1{,}0229n)} \quad (9)$$

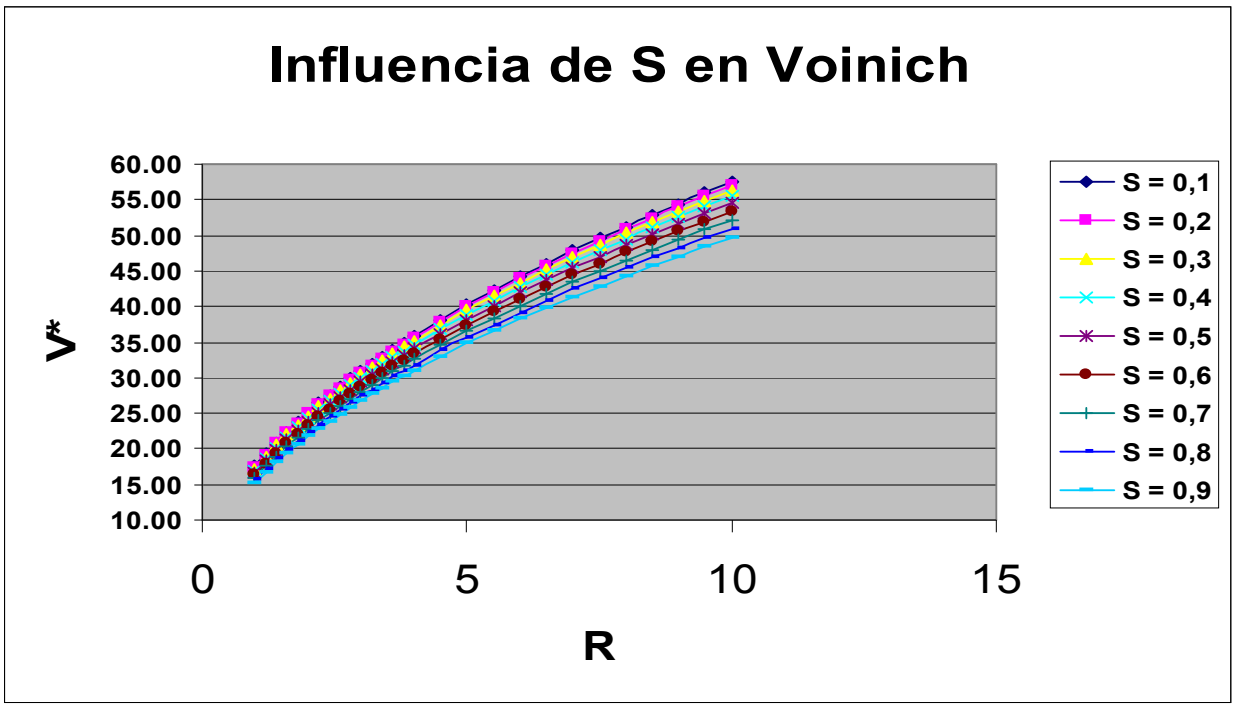

Figura 3. Influencia de la pendiente de la rápida en la velocidad crítica

Con las mismas variaciones de n y R arriba planteadas, se obtuvieron diferencias máximas entre los resultados de Voinich y esta formula simplificada, iguales a 2,2 m/s.

- 3ª) despreciando la influencia de los términos cuadráticos.

$V_* = (19,682 - 134,29n - 0,5304S)R^{(0,4991 + 1,0229n)}$ (10)

Con las mismas variaciones de n, S y R arriba planteadas, se obtuvieron diferencias máximas entre los resultados de Voinich y esta formula simplificada, iguales a 1,6 m/s.

- 4ª) despreciando la influencia de n y S.

$V_*=(19,682)R^{(0,4991)}$ (11)

Con las mismas variaciones de R arriba planteadas, se obtuvieron diferencias máximas entre los resultados de Voinich y esta formula simplificada, iguales a 6 m/s.

A partir de estos resultados el autor sugiere el empleo de la expresión (10) por la total validez de sus resultados desde el punto de vista práctico.

$V_* = (19,682- 134,29n - 0,5304S)R^{(0,4991 + 1,0229n)}$ (10)

ANÁLISIS DE LA AIREACIÓN PARA CAUDALES DIFERENTES AL DE DISEÑO

Lo presentado arriba indica que la aireación natural del flujo en rápidas se produce a partir de valores relativos de la velocidad media del flujo y no debido a valores absolutos de la misma, de manera que no resulta ociosa una reflexión acerca de qué ocurrirá para caudales diferentes al de diseño, llegando a la pregunta "¿se producirán aireaciones con los correspondientes incrementos de los tirantes de circulación hasta el punto de llegar a superar los muros laterales determinados con el caudal mencionado?"

Para dar respuesta a esta pregunta, el autor presenta el análisis siguiente.

Según lo expresado arriba se puede formular que el inicio de la aireación natural ocurre cuando

$V \geq V^*$ (12)

donde:

V: velocidad media del flujo

De manera que igualando las expresiones (10) y (12) se obtiene

$$Q = CbY_*\left[\frac{bY_*}{b+2Y_*}\right]^B \quad (13)$$

en la que:

Q: caudal, m³/s.

b: ancho de la rápida, m.

Y_*: tirante en el que comienza la aireación, m.

B y C: parámetros que se calculan según:

B = 0,4991 + 1,0229n

C = 19,682 – 134,29n – 0,5304S

Mediante esta expresión (13) es posible determinar para cada caudal el tirante para el cual iniciará el proceso de aireación; posteriormente se deberá determinar el lugar donde tiene lugar dicho tirante y se calculará la altura de muros que requiere según (1), la cual deberá compararse con la determinada para esa misma sección con el caudal de diseño y obviamente deberá seleccionarse el valor mayor.

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo para un aliviadero real cubano en el que la rápida está precedida de una transición en la que se garantiza la ocurrencia de régimen subcrítico de circulación, lo cual determina que al inicio de la rápida siempre ocurrirá el tirante crítico; la rápida tiene las características siguientes:

b = 10,00 m

L = 105 m

S = 15%

n = 0,017

Q_{DIS} = 240 m³/s

Sustituyendo valores en (13) resulta

$$Q = 173,195Y_*\left[\frac{10Y_*}{10+2Y_*}\right]^{0,5165} \quad (13a)$$

a partir de la cual se obtiene la tabla 1 siguiente:

Tabla 1

Y_*	Q	Y_i	X	V	F^2	Y_a	AM
0,25	20,63	0,76	35,00	8,25	27,75	0,30	0,90
0,50	57,63	1,50	57,59	11,53	27,10	0,59	1,19
0,75	104,16	2,23	75,00	13,89	26,22	0,85	1,45
1,00	157,63	2,94	98,00	15,76	25,32	1,08	1,68
1,25	216,49	3,63	110,00	17,32	24,46	1,42	2,02
1,50	279,72	4,30	123,60	18,65	23,64	1,70	2,30

En la que:

Y_i: tirante al inicio de la rápida calculado por

$$Y_{cr} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gb^2}}$$

X: ubicación de la sección donde se produce el tirante Y_* respecto al inicio de la rápida (X = 0)

V: velocidad media del flujo en X, según

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{10Y_*}$$

F^2: Número de Froude $F^2 = \frac{V^2}{gY_*}$

Y_a: tirante aireado (Pardo et. al. 2001), calculado según

$$Y_a = Y_*(1 + 0{,}12\sqrt{F^2 - 25}) \qquad \text{para } F^2 > 25$$

$$Y_a = 1{,}135 Y_* \qquad \text{para } F^2 \leq 25$$

Otro autor (Brunner, 2002) propone que el tirante aireado se calcule según:

$$Y_a = 0{,}906 Y_* e^{0{,}061F} \quad \text{para } F \leq 8{,}2$$
$$Y_a = 0{,}620 Y_* e^{0{,}1051F} \quad \text{para } F > 8{,}2$$

El autor ha tomado la primera propuesta considerando que la misma fue sugerida específicamente para rápidas, mientras que la segunda fue presentada en una publicación referida a cauces naturales.

AM: altura de muros laterales que requieren los tirantes Y_a considerando un borde libre BL = 0,60 m.

Obsérvese que los dos últimos puntos no tienen valor práctico pues caen fuera de la rápida (X > 105 m).

Por otro lado, se determinó la curva superficial en la rápida para el caudal de diseño, destacándose que al verificar la posible ocurrencia de aireación resultó que no se produce de manera natural dicho fenómeno, obteniéndose la tabla 2:

Tabla 2

Q	Y_*	X	AM_{240}	$AM_{REQUERIDA}$
20,63	0,25	35,00	2,40	0,90
57,63	0,50	57,29	2,30	1,19
104,16	0,75	75,00	2,10	1,45
157,63	1,00	98,00	2,00	1,68

El análisis de los resultados puede hacerse mediante la combinación adecuada de las tablas 1 y 2 anteriores, resultando la tabla 3:

Tabla 3

Y	X	AM
3,89	0	4,49
2,02	25	2,62
1,68	50	2,28
1,50	75	2,10
1,38	105	1,98

En la que AM_{240} es la altura de muros determina para la sección X con el caudal de diseño de 240 m³/s.

Como puede apreciarse los valores requeridos para las altura de muros correspondientes a cada tirante de inicio de aireación para los caudales Q, resultan inferiores a los valores definidos para dichas secciones por el caudal de diseño y por tanto son estos últimos los que se seleccionan.

Acerca de la validez de considerar $R \approx y$.

Dado que es muy frecuente en la práctica de la ingeniería hidráulica, específicamente en los procesos de cálculos en conducciones libres en las que el ancho de plato de la misma es relativamente grande, que se asuma el radio hidráulico aproximadamente igual al tirante de circulación (Sliiski 1979, Lappo 1988, Pardo 2000); a continuación se expone una sencilla reflexión sobre este asunto que evidentemente está muy relacionado con las expresiones (7) a (10) (Pardo et. al. 2001) en el presente trabajo.

A partir de las conocidas expresiones:

$$R = \frac{A}{P} = \frac{by}{b + 2y} \qquad (13)$$

y $\quad R \approx y \qquad (14)$

Es posible establecer una relación entre el ancho de plato «b», el tirante de circulación «y» y el error «e» en que se incurre al aceptar la expresión (14), según se observa en la expresión (15) y en la tabla 4 siguiente:

$$b = \frac{2}{e} y \qquad (15)$$

Tabla 4

e (%)	2/e
1	200
2	100
3	67
4	50
5	40

Es práctica común aceptar errores del orden de 3 a 5% en los cálculos en conducciones libres, luego a partir de la tabla 4 anterior, es posible plantear que se puede aceptar la simplificación (14) siempre que el ancho de plato b sea al menos 40 veces el tirante de circulación en la sección objeto de estudio.

CONCLUSIONES

1. La estimación de la magnitud de la aireación natural de un flujo libre continúa siendo un proceso en estudio y con diversos métodos que sus respectivos autores presentan como confiables.

2. En el presente trabajo se ha introducido una expresión resultante del análisis de cinco métodos que la literatura recoge, pero en una estructura que a juicio del autor resulta mucho más sencilla sin que por ello sea afectada la precisión del método original.

3. Dada la ocurrencia de aireación del flujo en rápidas para caudales menores que el diseño, se demuestra mediante un ejemplo que la altura de muros de la rápida definida para el caudal de diseño resulta suficiente para los tirantes aireados correspondientes a los referidos caudales menores.

4. También es interesante la reflexión que se muestra acerca del indiscriminado uso que se hace de la simplificación en el cálculo del radio hidráulico en una conducción libre.

REFERENCIAS

1. **Pardo R.**– Aireación del flujo en rápidas. Memorias del XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Chile. 2000.
2. **Alegret E., Pardo R. Hernández C. y García E.** - Diseño hidráulico de aliviaderos para presas pequeñas. La Habana. 2001.
3. **Lappo D. D. et. al.** - Manual de cálculos hidráulicos de obras hidrotécnicas. Editorial Energoatomizdat. Moscú. 1988.
4. **Slisski S. M.** - Cálculos hidráulicos de obras hidrotécnicas de alta carga. Editorial Energía. Moscú. 1979.
5. **Brunner Gary W.** – HEC RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual. US Army Corps of Engineers. USA. 2002.

Septiembre de 2010