

SALTO HIDRAULICO EN CANAL CIRCULAR

*Julio Milán Paz*¹

Resumen

El problema del salto hidráulico en un conducto de sección circular ha sido tratado por Straub⁽³⁾ en canal horizontal y sin fricción, utilizando fórmulas aproximadas, y por Caric⁽¹⁾, en canal inclinado y con fricción, empleando tablas y gráficas. La razón de estas metodologías radica en que las fórmulas o ecuaciones correspondientes son difíciles de resolver por métodos analíticos. En este artículo se expone una forma sistematizada, que emplea como herramienta una calculadora programable, y como solución del problema se obtienen las profundidades conjugadas (secuentes), la profundidad crítica, los ángulos centrales antes y después del salto, y el porcentaje de energía disipada.

Introducción

el salto hidráulico se define como el fenómenos que se presenta cuando en un canal el flujo pasa

¹ Ingeniero Civil Exprofesor Asociado Universidad Nacional, Bogotá. Profesor Asociado Universidad de la Salle, Bogotá. Profesor Catedrático Universidad Militar, Bogotá.

de supercrítico (de alta velocidad) a subcrítico (de baja velocidad), con cambio brusco en la profundidad del agua, observándose relativa turbulencia (salto) en las dos secciones. Normalmente se diseña como dissipador de energía, y puede tener lugar en canal horizontal o inclinado, liso o con fricción, canal que a su vez puede ser de sección recta trapezoidal, rectangular, parabólica, circular, o en forma de herradura.

Notación

A	=	sección mojada, m^2
D	=	diámetro del canal, m
n	=	factor de rugosidad de Manning
F	=	fuerza específica, m^3
g	=	aceleración de la gravedad = $9,81 \text{ m/seg}^2$
S_0	=	pendiente longitudinal del canal
P	=	perímetro mojado, m
T	=	ancho superior, m
Q	=	caudal (gasto), m^3/seg
R	=	radio hidráulico, m
V	=	velocidad media en la sección, m/seg
y	=	profundidad del flujo, m
y_c	=	profundidad crítica, m
y_0	=	profundidad normal, m
z	=	profundidad del centroide del área A, m
θ	=	ángulo central
NF	=	número de Froude
Subíndice 1	=	referido a la sección antes del salto
Subíndice 2	=	referido a la sección después del salto.

Flujo uniforme

Para el cálculo de la profundidad normal (profundidad antes del salto: $y_0 = y_1$) y la velocidad media del flujo, se usará la fórmula de Manning, dada por:

$$Q = AR^{2/3} S_0^{1/2} / n, \text{ o en la forma } Q = A^{5/3} S_0^{1/2} / nP^{2/3}.$$

puesto que $R = A/P$.

Para canal circular:

$$A = D^2 (\theta - \text{sen } \theta) / 8 \text{ y } P = \theta D / 2$$

Estas expresiones sustituidas en la fórmula de Manning, dan como resultado, para $\theta = \theta_1$:

$$\theta_{i+1} = [Qn/S_0^{1/2}]^{3/5} / (6,06D^{8/5})\theta_i^{2/5} + \text{sen}\theta_i, \quad \dots(1)$$

ecuación que se resuelve por interacciones sucesivas.

La profundidad normal $y_0 = y_1$, se halla con:

$$Y_1 = D[1 - \cos(\theta_1/2)]/2 \quad \dots(2)$$

El número de Froude en la sección 1 se calcula con:

$$NF_1 = 7,23Q [\text{sen}(\theta_1/2)/(\theta_1 - \text{sen}\theta_1)^3]^{1/2}/D^{2,5} \quad \dots(3)$$

La figura 1 muestra un esquema general del salto hidráulico en canal circular.

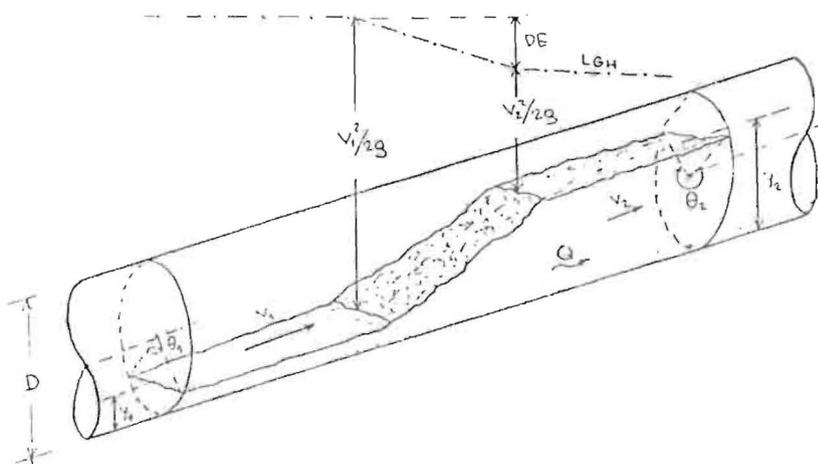


FIG. 1. Salto Hidráulico. Vista General

Flujo crítico

La condición general para que en cualquier canal se presente flujo crítico, es:

$Q^2/g = A_c^3/T_c$; pero $T = D \text{sen}(\theta/2)$. Al sustituir se obtiene:

$$(\theta_c - \text{sen}\theta_c)^3 / \text{sen}(\theta_c/2) = 8/D^5 \cdot Q^2/g, \quad \dots(4)$$

solución que se halla por incrementos finitos de θ_c .

La profundidad crítica se calcula con:

$$Y_c = D [1 - \cos(\theta_c/2)]/2 \quad \dots(5)$$

Fuerza específica

Al suponer que la fuerza componente del peso del agua en la dirección del flujo contrarresta la fuerza de fricción en el lecho del canal, se puede considerar que antes y después del salto la fuerza específica es igual ($F_1 = F_2$). Su expresión es:

$$F = zA + Q^2/(gA) \quad \dots(6)$$

Como quiera que $z = T^3/(12A) - D\cos(\theta/2)/2$ (Figura 2), al sustituir las expresiones de A y T, resulta:

$$Z = D[4/3 \text{sen}^3(\theta/2)/(\theta - \text{sen}\theta) - \cos(\theta/2)]; \text{ y al efectuar todas las sustituciones en la ec. (6)}$$

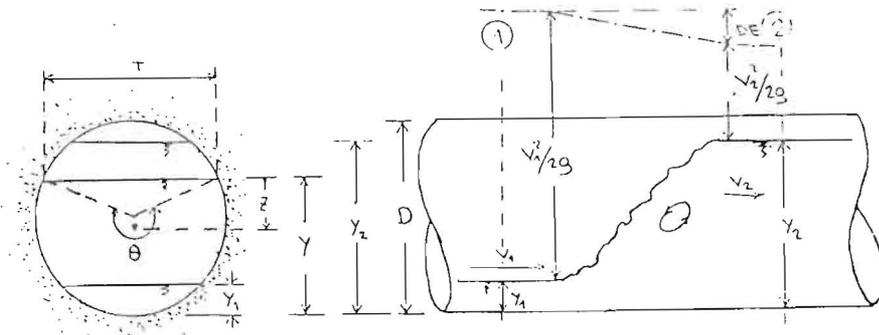


FIG. 2. Sección mojada (2) parcialmente llena después del salto

$$F = D^3[4/3 \text{sen}^3(\theta/2) - X\cos(\theta/2)]/16 + 0,815(Q/D)^2/X, \quad \dots(7)$$

en donde $X = \theta - \text{sen}\theta$.

$$E_2 = y_2 + 0,083 (Q/D)^2, \quad \dots(13)$$

si $y_2 > D$.

El porcentaje de energía disipada en el salto se obtiene con:

$$DE = 100 (E_1 - E_2)/E_1 \quad \dots (14)$$

```

10 CLS : PRINT "SALTO CANAL CIRCULAR": CLEAR : ANGLE 1: I = 1 : W = 0.1
20 INPUT "Q";Q,"n";"N","S";S,"D":CLS: PRINT TAB(21); "ESPERE, POR FAVOR:"
30 K=(Q/D) ^ 2:Q0=.312*D^(8/3)*SQRS/N
35 IF Q>Q0 THEN CLS: BEP:BEEP:PRINT "Q>Qo!":GOTO 20
40 B=13.048*K/ D^ 3: C =3..262*K/D^ 2
50 O1=SIN 4/D 1.6*I ^ 1.6* (Q*N/SQRS)^. 6
60 IF ABS (Oi - I) > W THEN I = O1: GOTO 50
70 H=O1/2:Y1=(1-COSH)*D/2:J=O1-SINO1:NF=7.23*Q*SQR (SINH/J ^ 3)/D ^ 2.5
80 IF NF < =1 THEN BEEP: BEEP: CLS: PRINT "NF< 1!": GOTO 20
90 FE = D ^ 3* (4/3*(SINH)^ 3-J*COSH)/16+.815*K/J
100 G=52.2*K /D^ 3:OC=O1
110 X1 = (OC-SINOC) ^ 3/SIN(OC/2)
120 IF X1 < G THEN OC=OC + W: GOTO 110
130 IF X1 > G THEN OC = OC-W/2
140 YC = (1-COS (OC/2))*D/2
150 Y2 = D/2 + 4/PI/D^ 2* (FE - .13*K)
160 IF Y2 > D THEN O2=2*PI: GOTO 240
170 O2 = OC
180 Z=O2-SINO2: U=O2/2
190 X2 = Z* (Z*COSU-4/3*(SINU)^ 3 + 16*FE/D^ 3)
200 IF X2>B THEN O2=O2 + W:GOTO 180
210 IF X2 < B THEN O2=O2-W/2
220 Y2=(1-COSU)*D/2
230 E2=Y2 + C/Z^ 2: GOTO 250
240 E2 = Y2 + .083*K/D^ 2
250 O1=O1*180/PI:O2 = O2*180/PI:E1=Y1+C/J^ 2: DE=100*(E1-E2)/E1: BEEP:BEEP
260 CLS:PRINT USING"###.##": "Yc(m)=":YC,"Y1(m)=":Y1,"Y2(m)=":Y2,:INPUT"" ,FS
270 PRINT USING"###.##": "G1(°)=":O1,"G2(°)=":O2,"DE(%)" :DE,:INPUT"" ,FS:END

```

CUADRO 4 Programa solución del salto hidráulico. Calculadora PB-770

El cuadro 4 muestra un programa en BASIC para una calculadora PB-770, en el cual:

Q0	=	Q0	=	caudal a sección llena.
O1	=	θ_1	=	ángulo central, sección 1.
O2	=	θ_2	=	ángulo central, sección 2.
Y1	=	y1	=	profundidad sección 1.
Y2	=	y2	=	profundidad sección 2.
NF	=	NF ₁	=	número de Froude, sección 1.
FE	=	F ₁	=	F ₂ .
OC	=	θ_c	=	ángulo central para condición crítica.
YC	=	y _c		
E	=			energía específica
DE	=			porcentaje de energía específica disipada.
G1°	=	θ_1	=	ángulo en grados, sección 1.
G2°	=	θ_2	=	ángulo en grados, sección 2.

Ejemplo ⁽¹⁾:

Dados: $Q = 600 \text{ m}^3/\text{seg}$; $D = 10 \text{ m}$; $n = 1/70$, hallar la solución del salto hidráulico:

1. si $S_0 = 0,005$.
2. si $S_0 = 0,02$.

Solución

1. $y_c = 7,92 \text{ m}$; $y_1 = 7,00 \text{ m}$; $y_2 = 8,93 \text{ m}$; $\theta_1 = 227,10^\circ$
 $\theta_2 = 283,25^\circ$; $DE = 0,37\%$
2. $y_c = 7,92 \text{ m}$; $y_1 = 4,52 \text{ m}$; $y_2 = 13,42 \text{ m}$; $\theta_1 = 169,00^\circ$
 $\theta_2 = 360,00^\circ$; $DE = 17,76\%$

Conclusiones

1. Como es lógico, a un autor de tablas y/o de curvas empleadas para dar solución a un determinado problema, le es difícil describir dentro del contexto la metodología seguida para obtenerlas, así que el usuario las utiliza casi que en forma mecánica, sin pensar en entenderlas.
2. Pero si el mismo problema logra ser sistematizado con base en fórmulas racionalmente obtenidas, el usuario las encontrará en el respectivo programa, y si lo desea podrá interpretarlas correctamente.

Bibliografia

1. CARIC, D.M., *Flow in circular conduits*. Water Power & Dam Construction, 1977.
2. CHOW, V.T., *Open channel hydraulics*. McGraw Hill, 1959.
3. FRENCH, R., *Open channel hydraulics*. McGrawHill, 1985.
4. HENDERSON, F.M., *Open channel flow*. MacMillan Publising Co., 1966.
5. SUBRAMANYA, K., *Flow in open channels*, Mc Graw Hill, 1984.

* * * * *