

VALOR S/. 200,00

# REVISTA CIENTIFICA



Facultad de Ingeniería

Ciencias

Físicas y Matemática

REVISTA 1 SEGUNDA EPOCA  
VOLUMEN II MAYO 1985

# HIDRAULICA

## ESTRUCTURAS DISIPADORAS DE ENERGIA POR RESALTO

Ing. Salomón E. Jaya Quezada  
Ingeniero Civil

Profesor Auxiliar de Hidromecánica III—  
Laboratorio de Hidráulica  
Jefe del Departamento de Hidráulica  
Universidad Central del Ecuador

Ing. Luis Castillo Elsitdié  
Ingeniero Civil  
Investigador asistente del Laboratorio de  
Hidráulica  
Universidad Central del Ecuador

### Resumen

El presente trabajo tiene por finalidad determinar teórica y experimentalmente la eficiencia de un cuenco amortiguador o disipador de energía por resalto, del tipo BR III, desarrollado por Bureau of Reclamation.

### Introducción

Cuando el flujo por la acción de la fuerza gravitatoria cambia de un régimen lento o subcrítico —Número de Froude  $F < 1$ —, a un régimen rápido o supercrítico —Número de Froude  $F > 1$ —, como sucede en el caso de tener una estructura hidráulica —aliviaderos,



$$y_n: k = \frac{Q \cdot n}{b^{5/3} 1^{1/2}} = \frac{0.00314 \times 0.010}{(0.10)^{5/3} \times (0.001)^{1/2}} = 0.461$$

$$\Rightarrow \frac{y_n}{b} = 0.9655 \Rightarrow y_n = 96.5 \text{ mm}$$

$$v_n: v_n = \frac{Q}{A_n} = \frac{0.00314}{0.0965 \times 0.10} = 0.325 \text{ m/s}$$

$$\Rightarrow v_n^2/2g = 0.0054 \text{ m} = 5.4 \text{ mm}$$

$$Fr_n: Fr_n = \frac{v_n \sqrt{g}}{(g y_n)^{1/2}} = 0.334 \Rightarrow \text{Régimen subcrítico}$$

$$En: y_n + v_n^2/2g = En \Rightarrow En = 101.9 \text{ mm}$$

$$y_c: y_c = (q^2/g)^{1/3} = \left( \frac{(0.00314)^2}{(0.10)^2 \cdot 9.81} \right)^{1/3} = 46.5 \text{ mm}$$

$$v_c: v_c = (g y_c)^{1/2} = 9.81 \times 0.465 = 0.675 \text{ m/s}$$

### 1.1.2 Cálculo de la carga de diseño Ho

$$Q = M b Ho^{3/2}$$

$$M = Cd \frac{2}{3} \left( \frac{2}{3} g \right)^{1/2} = Cd \times 1.704 ; Cd = 1.17$$

El valor de Cd, se obtuvo de la calibración del perfil Creager, entonces:

$$M = 1.99$$

$$Ho = \left( \frac{Q}{M b} \right)^{2/3} = 63.00 \text{ mm}$$

### 1.1.3 Cálculo de Y<sub>1</sub>, V<sub>1</sub>, V<sub>1</sub><sup>2</sup>/2g, E<sub>1</sub> y Fr<sub>1</sub>

Y<sub>1</sub> = Ecuación de Bernoulli

$$Y_1 + Z_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = Y_2 + Z_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + hf$$

Donde:

$$\alpha_1 = \int_{A_1} \frac{V_1^2}{V_1^2} \cdot Q \, dA = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \left( \frac{V_1}{V_1} \right)^3 dA$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{A_2} \int_{A_2} \left( \frac{V_2}{V_2} \right)^3 dA$$

Hipótesis simplificada:

$\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ , puesto que la distribución de velocidades en las secciones 1 y 2 consideramos uniforme.

Luego, aplicando esta ecuación entre 0 y 1, tenemos:

$$0.15 + 0.063 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g}$$

$$0.213 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad \text{①}$$

Ecuación de la continuidad:

$$Q = A_1 V_1 ; 0.00314 = 0.10 y_1 \cdot V_1$$

$$V_1 = \frac{0.00314}{0.10 y_1}$$

$$V_1 = \frac{0.0314}{y_1} \quad \text{②}$$

$$\text{② en ①} : 0.213 = y_1 + (0.0314)^2 / 19.62 y_1^2$$

$$19.62 y_1^2 - 4.179 y_1^2 + 9.9 \times 10^{-4} = 0$$

Ecuación cúbica resuelta utilizando el programa de la TI-59, que se indica a continuación:

RST		LRN	
LRN	RCL 20	2ND	PRG 08
2ND	X <sup>2</sup>	0.001	A
2ND	X	0.003	B
(	+	0.001	C
STO 20	)	0.001	D
Y <sup>X</sup>	INV		E
X	SBR		

$$\Rightarrow \gamma_1 = 0.01603 \text{ m} = 16.03 \text{ mm}$$

V<sub>1</sub>: Reemplazando  $\gamma_1$  en la ecuación 2, tenemos:

$$V_1 = \frac{0.0314}{0.01603} = 1.959 \text{ m/s}$$

$$\frac{V_1^2}{2g} = 197 \text{ mm}$$

$$E_1: E_1 = \gamma_1 + \frac{V_1^2}{2g} = 213 \text{ mm}$$

$$Fr_1: Fr_1 = V_1 / (g\gamma_1)^{1/2} = 4.95 \Rightarrow \text{Régimen supercrítico}$$

1.1.4 Cálculo de E<sub>o</sub>, V<sub>o</sub>, V<sub>o</sub><sup>2</sup>/2g e  $\gamma_0$

$$E_o: E_o = W + H_o$$

$$E_o = 150 + 63 = 213 \text{ mm}$$

$$V_o: Q = A_o V_o \Rightarrow 0.00314 = 0.10 \times \gamma_o \times v_o$$

$$0.0314 = \gamma_o v_o$$

$$0.0314 = \left(0.213 - \frac{V_o^2}{2g}\right) \times V_o$$

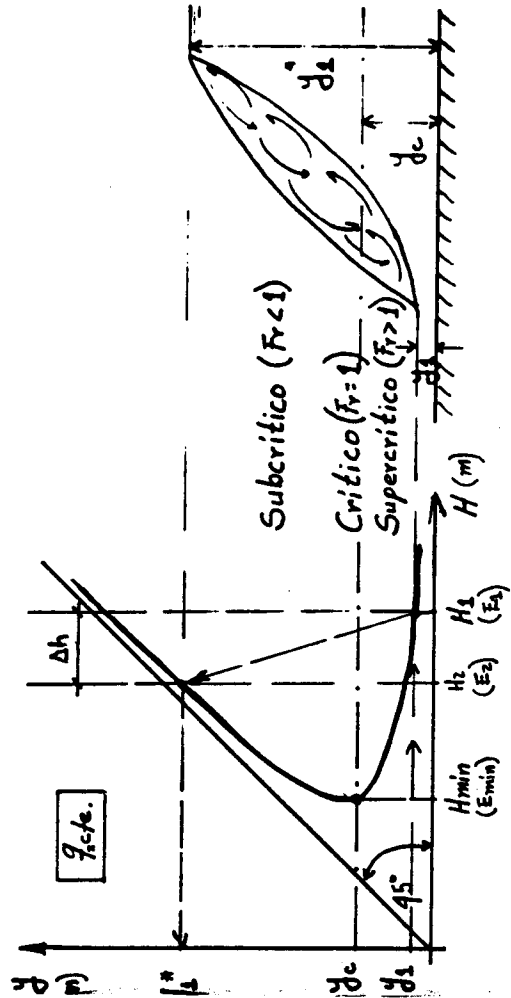
$$V_o^3 - 4.179 V_o + 6.161 \times 10^{-1} = 0$$

$$\Rightarrow V_o = 0.148 \text{ m/s}$$

$$\frac{V_o^2}{2g} = 1.0 \text{ mm}$$

$$\gamma_o = E_o - \frac{V_o^2}{2g} = 212 \text{ mm}$$

1.1.5 Cálculo del calado conjugado  $\gamma_1^*$



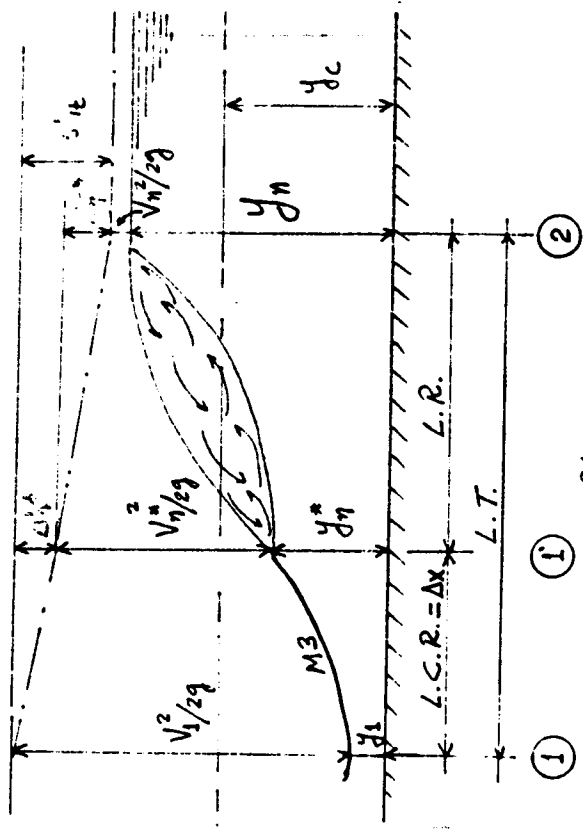
$$y_1^* = \frac{y_1}{2} \left( (1 + 8Fr_1^2)^{1/2} - 1 \right); \text{ Ecuación válida para canales rectangulares e } l \approx 0$$

$$y_1^* = \frac{0.01603}{2} \quad (13.036)$$

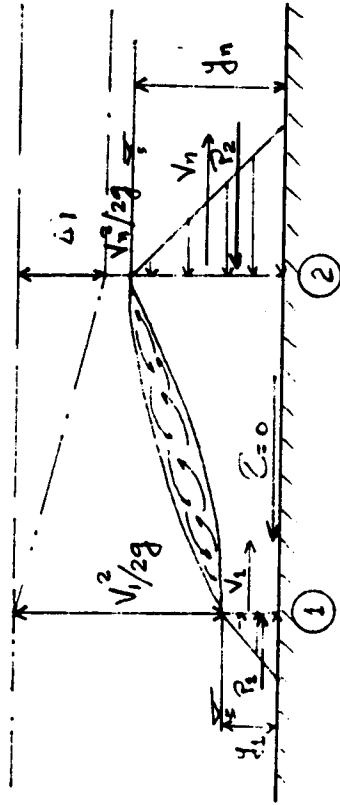
$$y_1^* = 104.5 \text{ mm}$$

Como:  $y_1^* > y_n$ ;  $104.5 \text{ mm} > 96.5 \text{ mm} \Rightarrow$  El resalto es rechazado

El resalto ha sido rechazado porque la cantidad de movimiento más la suma de fuerzas exteriores (momentum) aguas arriba, son mayores que las correspondientes aguas abajo; es decir, se produce una curva de remanso M3, con la cual se logra igualar los momentum, produciéndose entonces el resalto hidráulico justamente en el conjugado del calado normal. ( $y_n^*$ ).



### COMPROBACION CON LA ECUACION DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO



$$\Sigma F_x = \rho Q (\beta_2 V_{x2} - \beta_1 V_{x1}) \text{ Ecuación general}$$

$$\beta = \frac{1}{Q} \int \frac{V_x}{\bar{V}_x} dQ = \frac{1}{A} \int \frac{V_x}{\bar{V}_x} \cdot \frac{V}{\bar{V}} dA$$

La cantidad:  $\beta \int QV$  representa una rata o tasa de flujo de momentum en una sección dada.

$$\beta_1 = \beta_2 = 1$$

Hipótesis simplificadora

$$\Rightarrow \frac{\rho y_1^2 V_1^2}{2} + \rho V_1^2 y_1 = \frac{\rho y_2^2}{2} + \rho V_2^2 y_2$$

Ecuación para canal rectangular y  $l \approx 0$

Sección ①

$$\frac{1000 \cdot (0.01603)^2}{2} + \frac{1000}{9.81} (1.959)^2 \times 0.01603 = 6.406 \text{ kg/m}$$

Sección ②

$$\frac{1000 \times (0.0965)^2}{2} + \frac{1000}{9.81} (0.325)^2 (0.0965) = 5.696 \text{ kg/m}$$

Cantidad de movimiento	>	Cantidad de movimiento
+		+
Σ Fuerzas ext. en ①		Σ Fuerzas ext. en ②
6.406 kg/m	>	5.696 kg/m

⇒ el resalto es rechazado

1.1.6 Cálculo de  $y_n^*$ ,  $v_n^*$ ,  $(v_n^*)^2/2g$  y  $En^*$

$$y_n^* : y_n^* = \frac{y_n}{2} [(1 + 8 Fr_n^2)^{1/2} - 1] = 18.14 \text{ mm}$$

$$v_n^* : v_n^* = Q/b \cdot y_n^* = 1.73 \text{ m/s}$$

$$(v_n^*)^2/2g : (v_n^*)^2/2g = 152.5 \text{ mm}$$

$$En^* : En^* = y_n^* + (v_n^*)^2/2g = 170.9 \text{ mm}$$

1.1.7 Cálculo de las pérdidas de energía entre:

① y ② :  $(\Delta h^*)$ ; ③ y ④ :  $(\Delta h^{**})$  y total:  $\Delta h_t$

$$\Delta h^* : \Delta h^* = E_1 - En^* = 42.1 \text{ mm}$$

$$\Delta h^{**} : \Delta h^{**} = En^* - En = 69.0 \text{ mm}$$

$$\Delta h_t : \Delta h = \Delta h^* + \Delta h^{**} = 111.1 \text{ mm}$$

1.1.8 Cálculo de la longitud de la curva de remanso

M3 :  $(\Delta x)$

$\Delta x$ :  $\Delta x = \frac{En^* - E1}{1 - \frac{v_1}{v_n^*}}$  : Ecuación de incrementos finitos

$$R_1 = \frac{y_1 \cdot b}{2y_1 + b} = 0.0121 \text{ m}$$

$$l_1 = \left( \frac{v_1 \cdot n^2}{(R_1)^{2/3}} \right) = 0.1382 \text{ m/m}$$

$$R_{1'} = \frac{y_n^* \cdot b}{2y_n^* + b} = 0.01331 \text{ m}$$

$$l_{1'} = \left( \frac{v_n^* \cdot n^2}{(R_{1'})^{2/3}} \right) = 0.09488 \text{ m/m}$$

$$\bar{l} = \frac{l_1 + l_{1'}}{2} = 0.11654 \text{ m/m}$$

$$\text{Luego: } \Delta x = \frac{0.171 - 0.213}{0.001 - 0.11654} = 0.364 \text{ m}$$

$$\Delta x = 364.0 \text{ mm}$$



1.1.9 Cálculo de la longitud del resalto: LR

$$\text{Calculamos: } Fr_n^* = \frac{v_n^*}{(gY_n^*)^{1/2}} = 4.10$$

Con  $Fr_n^*$  entramos al siguiente ábaco y determinamos la relación  $L-R/y_n$ .

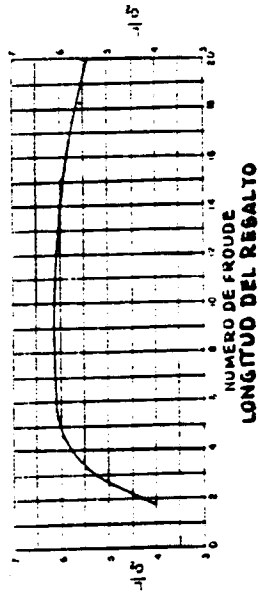


FIGURA B-15. Relación de las características del resalto con el número de Froude.

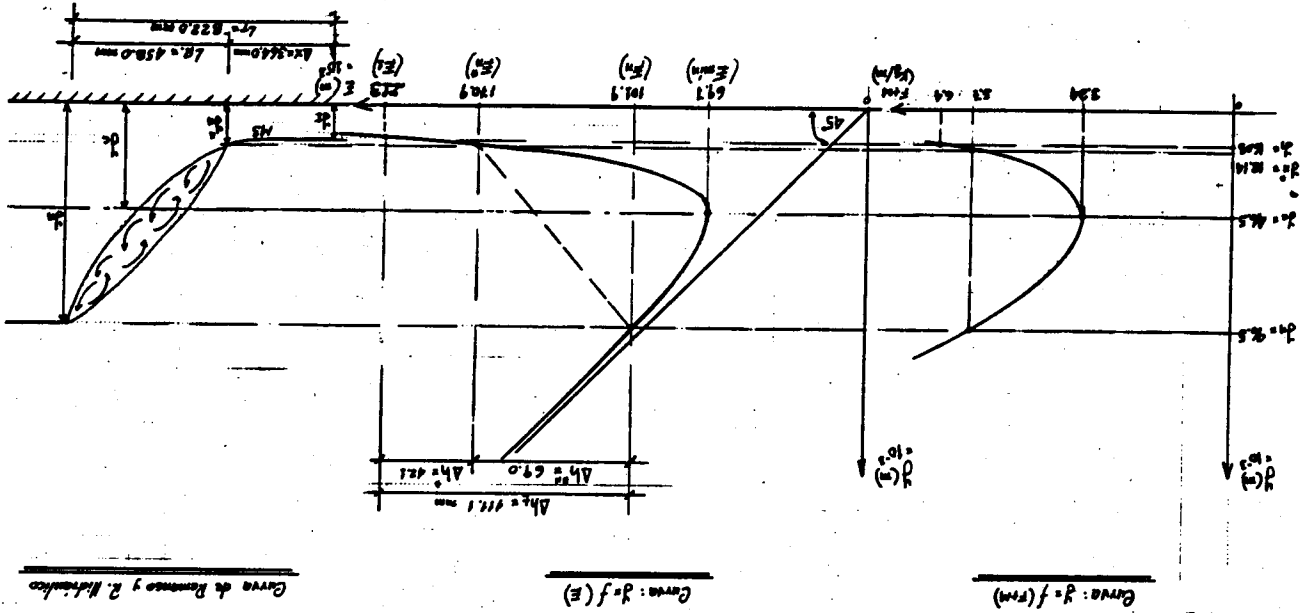
$$LR/y_n = 4.75 \Rightarrow LR = 4.75 \times y_n = 4.75 \times 0.0965$$

$$LR = 458 \text{ mm}$$

1.1.10. Cálculo de la longitud total de la disipación de energía: LT

$$LT = \Delta x + LR = 364.0 + 458.0$$

$$LT = 822.0 \text{ mm}$$



ALIVIADEROS

2. DISEÑO DEL CUENCO DISIPADOR DE ENERGIA

2.1 Resumen de los resultados obtenidos necesarios para el diseño.

$Fr_1 = 4.95$        $V_1 = 1.959 \text{ m/s}$

$Y_1 = 0.01603 \text{ m} = 16.03 \text{ mm}$

Entonces, como:

$4.5 < Fr_1 < 9$   
 $v_1 < v \text{ admisible}$   
 $1.959 < 15 \text{ m/s}$

Corresponde diseñar el cuenco convencional Tipo III del Bureau Reclamation.

2.2 Datos de la escarpa:

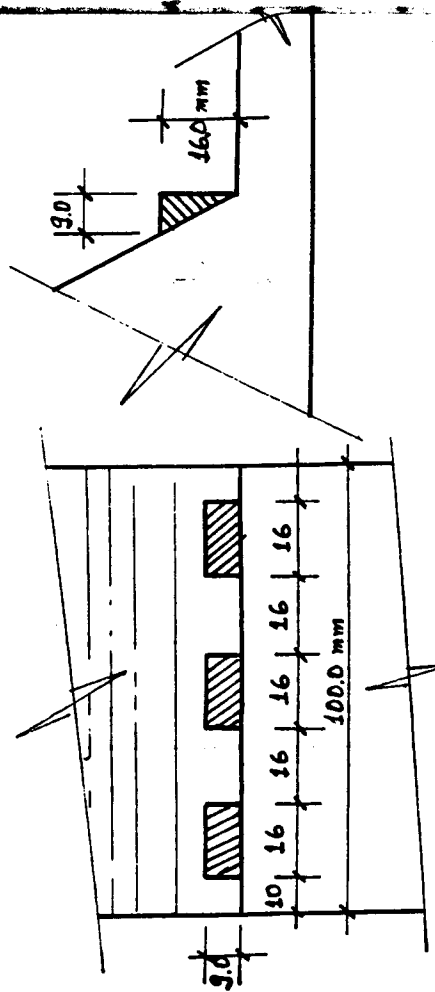
$h_1 = Y_1 = 16.03 \text{ mm} \cong 16.00 \text{ mm}$

Espaciamiento = Ancho =  $h_1$

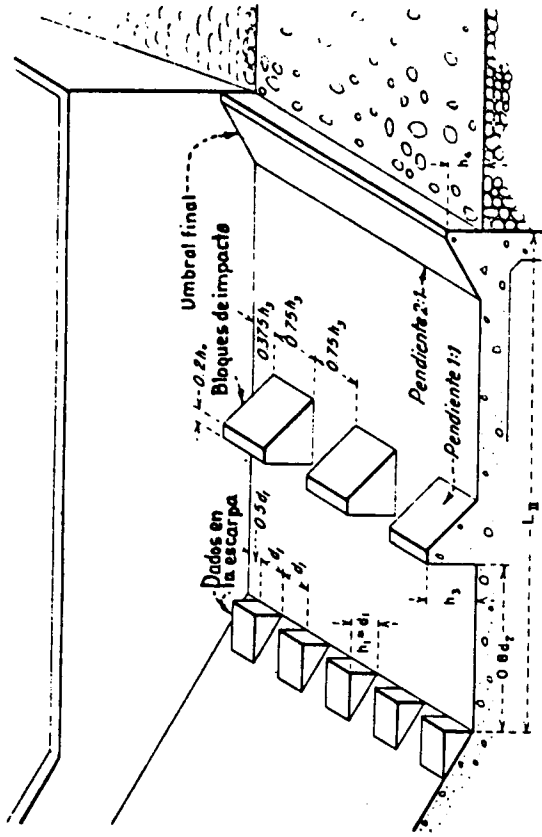
$e_1 = a_1 = 16.0 \text{ mm}$

Espaciamiento de los extremos:  $e_1$ ,

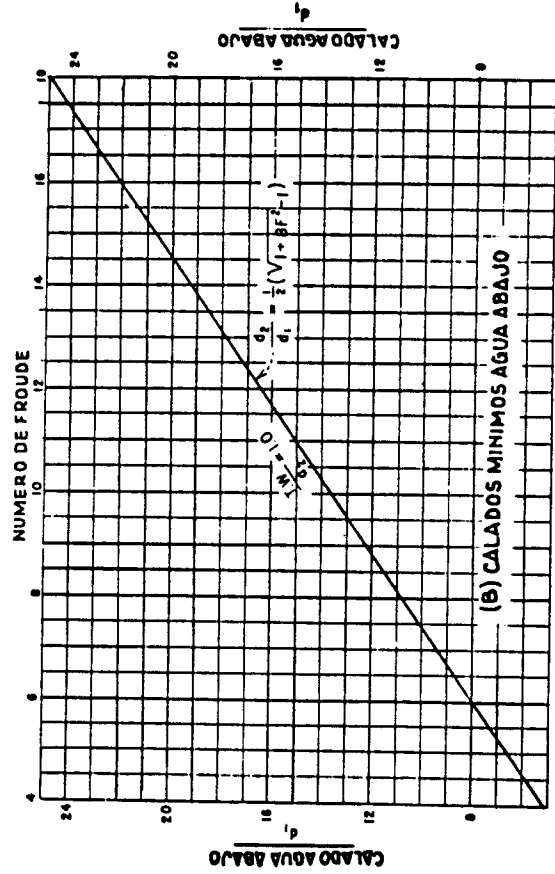
$e_1' = 0.5 h_1 = 8 \text{ mm}$



Nota: Para el uso del abaco 206, considerar  $d_1 = Y_1$



(A) DIMENSIONES DEL CUENCO TIPO III



(B) CALADOS MINIMOS AGUA ABAJO

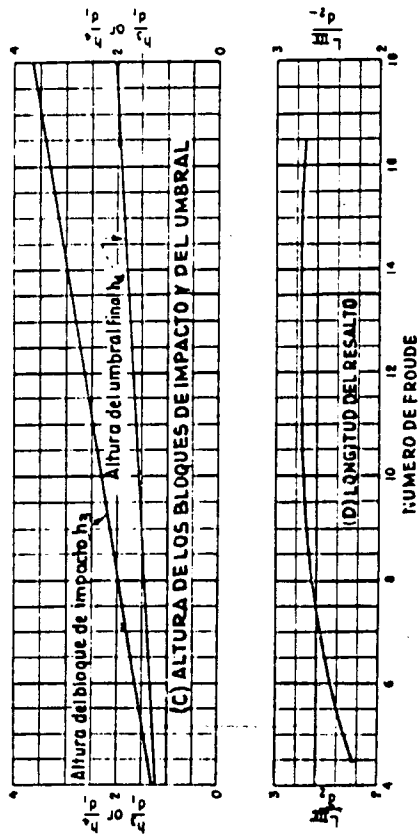


Figura 206.— Características del cuenco amortiguador para números de Froude superior a 4,5 y velocidad de llegada inferior a 15 m/seg.

### 2.3 Bloques de impacto

Del ábaco 206, tenemos:

$$\text{Con } Fr_1 = 4.95 \Rightarrow \frac{h_3}{y_1} = 24.0 \text{ mm}$$

Ancho del bloque = espaciamiento intermedio:

$$a_2 = e_2 = 0.75 h_3 = 18.0 \text{ mm}$$

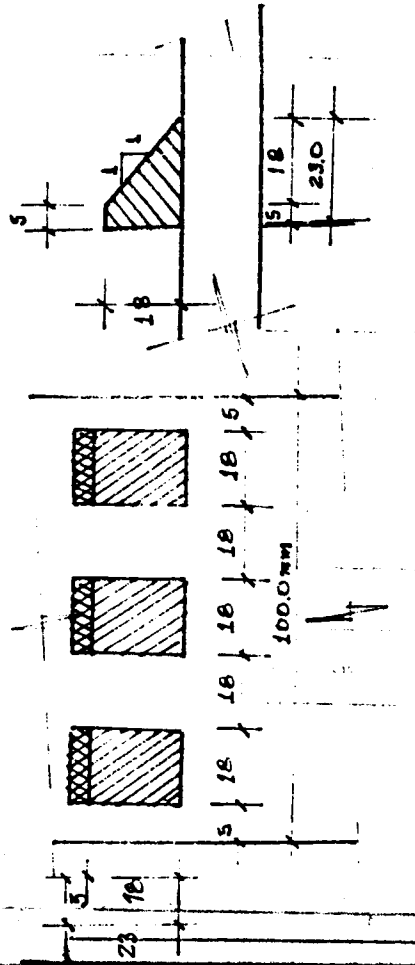
Espaciamiento de los extremos:

$$e_2' = 0.375 h_3 = 9.0 \text{ mm}$$

$$\text{Ancho de la corona} = 0.2 h_3 = 4.8 \text{ mm}$$

Distancia entre los dados de escarpa y bloques de impacto:

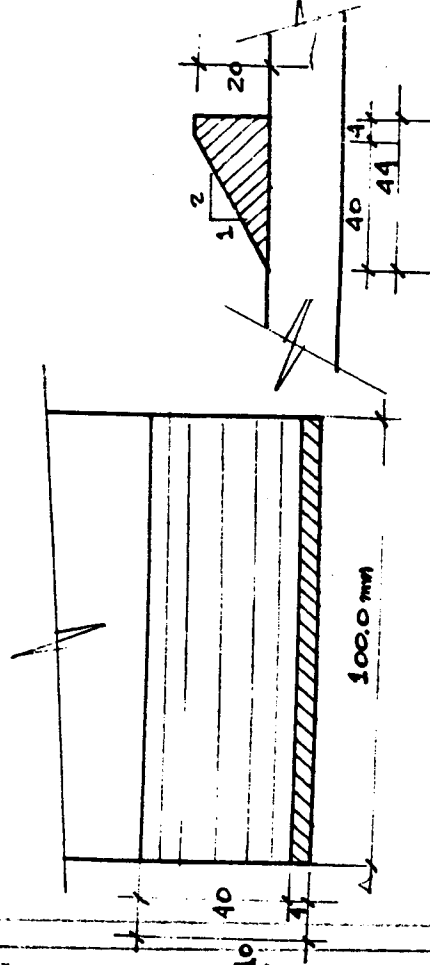
$$0.8y_1^* = 83.6 \text{ mm}$$



### 2.4 Umbral final

$$\text{Con } Fr_1 = 4.95 \Rightarrow \frac{h_4}{y_1} = 1.25 \Rightarrow h_4 = 20.0 \text{ mm}$$

$$\text{Ancho de la corona} = 0.2 h_4 = 4.0 \text{ mm}$$



### 2.5 Longitud del cuenco

$$\text{Con } Fr_1 = 4.95 \Rightarrow L/y_2 = 2.30 \Rightarrow L = 240.35 \text{ mm}$$



LOS RESULTADOS SON OBTENIDOS CON  $Q = 3.14 \text{ l/s}$

SIMBOLO	Sin cuenco		Con cuenco
	TEORICOS (mm)	EXPERIM. (mm)	
ho	62.00	59.00	59.00
$V_o^2/2g$	1.00	4.00	4.00
Ho	63.00	63.00	63.00
Yo	213.00	209.00	209.00
EO	213.00	213.00	213.00
d <sub>I</sub>	16.03	15.00	15.00
Y <sub>I</sub>	16.03	15.00	57.00
$v^2/2g$	196.97	198.00	143.00
E <sub>I</sub>	213.00	213.00	200.00
$y_n^*$	18.14	20.00	---
$(v_n^*)^2/2g$	152.50	154.00	---
E <sub>n</sub> *	170.64	174.00	---
$y_n$	96.50	96.50	96.00
$v_n^2/2g$	5.40	5.00	5.00
E <sub>n</sub>	101.90	101.50	101.00
$\Delta h^*$	42.36	39.00	$\Delta h_1 = 13.00$
$\Delta h^{**}$	68.80	72.50	$\Delta h_2 = 99.00$
$\Delta h_t$	111.10	111.50	112.00
$\Delta x$	364.00	350.00	---
L <sub>R</sub>	458.00	437.00	---
L <sub>I</sub>	822.00	787.00	L <sub>c</sub> = 241.00

RESULTADOS DE LAS VELOCIDADES Y NUMEROS DE FROUDE

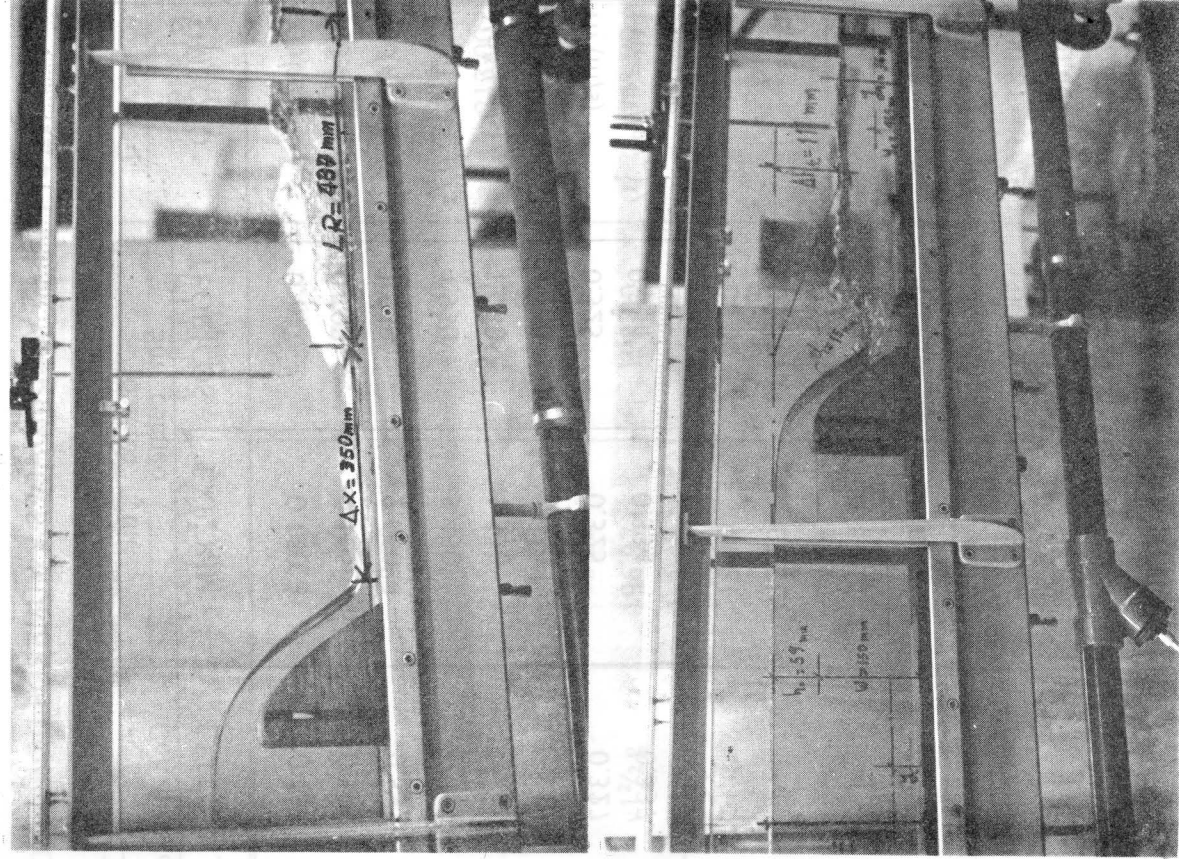
SIMBOLO	Sin cuenco		Con cuenco
	TEORICOS	EXPERIM	
$V_o$ (m/s)	0.147	0.150	0.150
$F_o = v_o / (g y_o)^{1/2}$	0.102	0.105	0.105
$v_I$ (m/s)	1.959	2.090	0.532
$F_{r1} = v_I / (g y_I)^{1/2}$	4.950	5.450	0.711
$V_n^*$ (m/s)	1.730	1.570	---
$F_{rn}^* = v_n^* / (g y_n)^{1/2}$	4.100	3.540	---
$v_n$ (m/s)	0.325	0.325	0.327
$F_{rn} = v_n / (g y_n)^{1/2}$	0.334	0.334	0.337

### 3.1 Análisis de resultados y conclusiones

De los resultados obtenidos se puede observar lo siguiente:

- Según el Bureau of Reclamation, la velocidad de aproximación a un vertedero es semejante a cero, cuando la relación  $w/h$  es  $> 1.33$ . En el presente trabajo este valor teóricamente es similar a cero, en tanto que experimentalmente el mismo es significativo ( $V^2/2g = 4 \text{ mm}$ ), debido a la corta longitud del canal aguas arriba del vertedero, lo cual implica que el flujo llegue con cierta velocidad por efecto de la bomba del sistema de recirculación.
- Los calados contraídos ( $y_1$ ) sin cuenco amortiguador son similares teórica y experimentalmente, en tanto que con cuenco existe una diferencia muy notable, lo que nos indica que la velocidad en esa sección ha disminuido, y por lo tanto, el Número de Froude  $Fr_1$ ; esto es, la energía hasta esa sección se ha disipado en 11.6 por ciento, debido a los dados de la escarpa mientras que sin cuenco no existe disipación de energía hasta esa sección.
- La mayor parte de la disipación de energía se produce aguas abajo de la sección (1), debido a la presencia de los bloques de impacto y del umbral final, esta pérdida de energía es de 88.4 por ciento, alcanzando con esto el régimen subcrítico, con un Número de Froude  $Fr_n = 0.334$ . Sin la presencia del cuenco disipador, la pérdida de energía es mínima, debido únicamente a la formación parcial de la curva de remanso M3.

Cuando la curva de remanso se ha desarrollado en su totalidad se disipa 37.8 por ciento de energía, en una longitud de 364 mm; inmediatamente se produce el resalto hidráulico en una longitud de 458 mm, disipando 62.2 por ciento de energía.



En las fotografías superior e inferior se observan los resultados obtenidos sin y con cuenco disipador de energía, respectivamente.

— Analizando la longitud total necesaria para disipar el 100 por ciento de energía, sin el cuenco amortiguador, esto es de 822 mm, mientras que con cuenco se reduce a 241 mm; es decir, en un 70.7 por ciento.

— La reducción del 70.7 por ciento de la longitud total redundará directamente en la parte económica puesto que se deberá proteger tanto la solera como las márgenes del cauce en una menor longitud.

### SIMBOLOGIA

Q	Caudal
q	Caudal unitario
b	Ancho del canal
w	Altura del vertedero
n	Coefficiente de rugosidad de Manning
I	Pendiente del canal
M	Coefficiente de descarga del vertedero Creager
$Y_0$	Calado en la sección cero
$E_0, E_1, E_n$	Energías totales
$h_0$	Carga sobre el vertedero
$V_0^2/2g, V_1^2/2g, V_n^2/2g$	Cargas de velocidades
$H_0$	Carga total sobre el vertedero
$d_1 = Y_1$	Calado contraído
$Y_1^*$	Calado conjugado del contraído
$Y_n^*$	Calado conjugado del normal
$Y_n$	Calado normal
M3	Curva de remanso
$\Delta x$	Longitud de la curva de remanso

LR	Longitud del resalto hidráulico
LT	Longitud total
$L_c$	Longitud del cuenco disipador
$\Delta h^*, \Delta h^{**}, \Delta h_t$	Pérdidas de energía
$Y_c$	Calado crítico
$v_c$	Velocidad crítica
$Fr_1, Fr_n, Fr_n^*, Fr_0$	Números de Froude
$v_1, v_n^*, v_n, v_0$	Velocidades
$\rho$	Densidad del agua
$r$	Peso específico del agua
A	Area
R	Radio hidráulico

### NOTA

Este trabajo fue presentado y expuesto por los autores en el III Congreso Nacional de Hidráulica, realizado en la ciudad de Cuenca entre el 9 y 11 de junio de 1983, en representación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central del Ecuador.

## REFERENCIAS

1. Peterka, A.J. "Hydraulic Design of Stilling Basis and Energy Dissipators". Engineering Monograph 25, U.S.B.R. 1974
2. Ven Te Chow, "Open Channel Hydraulics". International Student Edition. 1959.
3. Elevatorsky E. A. Hydraulic Energy Dissipators.
4. "Proyecto de Presas Pequeñas" Bureau of Reclamation U.S.A. Editorial Dosset.— Madrid 1970.
5. Julián Aguirre Pe, "Hidráulica de Canales" CIDIAT.— Venezuela 1974.
6. Henderson "Open Channel Flow" Macmillan Series in Civil Engineering. 1966

# METALURGIA