

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERIA - LABORATORIO DE HIDRAULICA

ESTRUCTURAS DISIPADORAS DE ENERGIA POR RESALTO

AUTORES:

SALOMON E. JAYA QUEZADA
Ingeniero Civil
Profesor de Hidráulica
Jefe del Departamento de Hidráulica
Universidad Central del Ecuador

LUIS G. CASTILLO ELSITDIE
Estudiante de Sexto Curso-Opción Hidráulica
Ayudante de Cátedra de Hidráulica y Laboratorio de
Hidráulica
Universidad Central.

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.

I N T R O D U C C I O N

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, compuertas, vertederos en general, etc.- debe regresar al régimen anterior, o sea al subcrítico en una longitud variable dependiendo de ciertas condiciones; para esto es necesario disipar la gran cantidad de energía cinética ganada anteriormente por la acción de la gravedad. Esta energía puede ser disipada mediante el resalto hidráulico, que es precisamente el paso del flujo supercrítico al subcrítico.

Si el resalto resulta que es rechazado , o sea su formación se presenta lejos del pie de la estructura considerada; toda esa longitud debe ser protegida contra la socavación, lo cual resulta económicamente nada conveniente, razón por la cual acudimos a colocar un cuenco amortiguador en esa zona. Naturalmente el cuenco funcionará de acuerdo al Número de Froude que se tenga en ese sitio.

DESCRIPCION DEL TRABAJO

La realización del mismo se ha desarrollado en un canal de las siguientes características:

- Sección rectangular, $b = 100 \text{ mm}$
- Paredes de vidrio y solera de metal
- Pendiente variable
- Longitud total 3.00 m
- Caudal máximo 10.00 l/s
- Tanque reservorio y sistema de recirculación

El modelo hidráulico consta de un vertedero Creager y un cuenco disipador de energía contruidos en madera.

Se trabajó con un caudal de diseño de 3,14 l/s para el cual fue posible comprobar volumétricamente el caudal medido por el equipo.

Las mediciones se determinaron con el instrumental siguiente:

- Limnómetros: precisión 0,1 mm
- Cronómetro: 0,01 s
- Recipientes volumétricos.

1. CALCULOS TEORICOS

1.1 DATOS:

$Q = 3.14 \text{ l/s} = 0.00314 \text{ m}^3/\text{s}$

$b = 10 \text{ cm} = 0.10 \text{ m}$

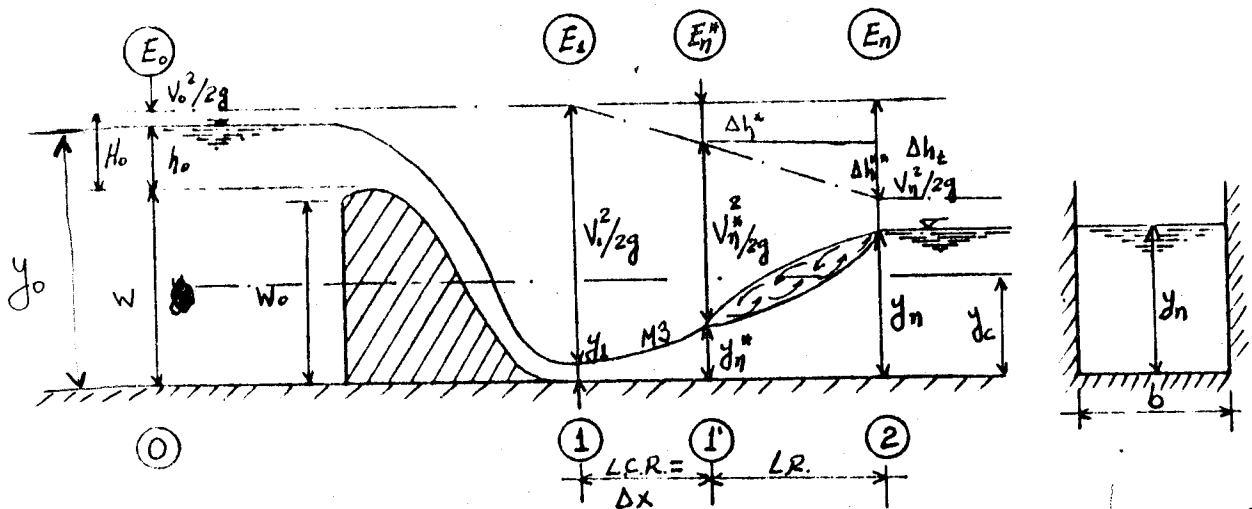
$W = 15 \text{ cm} = 0.15 \text{ m}$

$n \text{ VIDRIO} = 0.010$

$I = 0.001$

$M = 1.99$

1.1.1 CALCULO DE : $y_n, v_n, v_n^2/2g, Fr_n, E_n, y_c, v_c$



$y_n : k = \frac{Q \cdot n}{b^{8/3} \cdot I^{1/2}} = \frac{0.00314 \times 0.010}{(0.10)^{8/3} \cdot (0.001)^{1/2}} = 0.461$

$Q = \frac{1}{n} \cdot A R^{2/3} I^{1/2}; A = b \cdot y_n$
 $R = \frac{A}{P} = \frac{b \cdot y_n}{b + 2y_n}$

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

$y_n = \left[\frac{Q \cdot n}{C} \right]^{3/5} \left[\frac{(b + 2y_n)}{b} \right]^{2/5}$
 $C = \left(\frac{1}{n} \right) b I^{1/2}$

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

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

$$Fr_n: Fr_n = \frac{V_n}{(gY_n)^{1/2}} = 0.334 \Rightarrow \text{REGIMEN SUBCRITICO}$$

$$E_n: Y_n + V_n^2/2g = E_n \Rightarrow E_n = 101.9 \text{ mm.}$$

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

$$V_c: V_c = (gY_c)^{1/2} = 9.81 \times 0.465 = 0.675 \text{ m/s.}$$

1.1.2. CALCULO DE LA CARGA DE DISEÑO H_0

$$Q = MbH_0^{3/2}$$

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

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

$$M = 1.99$$

$$H_0 = \left(\frac{Q}{Mb}\right)^{2/3} = 63.00 \text{ mm.}$$

1.1.3. CALCULO DE Y_1 , V_1 , $V_1^2/2g$, E_1 y Fr_1

Y_1 : 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:

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

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

Hipótesis Simplificatoria:

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

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

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

$$\boxed{0.213 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g}} \quad (1)$$

Ecuación de la continuidad:

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

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

$$\boxed{V_1 = \frac{0.0314}{y_1}} \quad (2)$$

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

$$\boxed{19.62 y_1^3 - 4.179 y_1^2 + 9.9 \times 10^{-4} = 0}$$

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

RST		-		LRN	
LRN		RCL	20	2ND	PRG 08
2ND	LBL	X ²		0.001	A
2ND	A'	X	4.179	0.003	B
(+	0.00099	0.001	C
STO	20)		0.001	D
Y ^x	3	INV	SBR		E
X	19.62				

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

V_1 : REEMPLAZANDO Y_1 EN LA ECUACION 2, TENEMOS:

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

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

$$E_1: E_1 = Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = 213 \text{ mm}$$

$$Fr_1: Fr_1 = V_1 / (gY_1)^{1/2} = 4.95 \Rightarrow \text{REGIMEN SUPERCRITICO}$$

1.1.4. CALCULO DE E_0 , V_0 , $V_0^2/2g$ e Y_0

$$E_0: E_0 = W + H_0$$

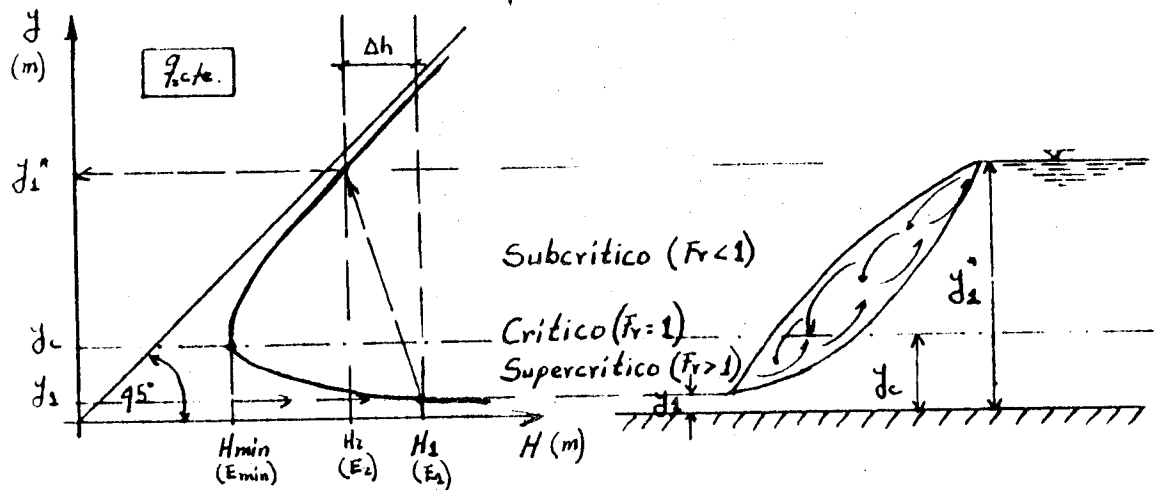
$$E_0 = 150 + 63 = 213 \text{ mm.}$$

$$\begin{aligned}
 V_0: \quad Q &= A_0 V_0 \Rightarrow 0.00314 = 0.10 \times \gamma_0 \times V_0 \\
 &0.0314 = \gamma_0 V_0 \\
 &0.0314 = \left(0.213 - \frac{V_0^2}{2g}\right) \times V_0 \\
 &V_0^3 - 4.179 V_0 + 6.161 \times 10^{-1} = 0 \\
 &\Rightarrow V_0 = 0.148 \text{ m/s.}
 \end{aligned}$$

$$\frac{V_0^2}{2g} = 1.0 \text{ mm.}$$

$$Y_0 = E_0 - \frac{V_0^2}{2g} = 212 \text{ mm.}$$

11.5. CALCULO DEL CALADO CONJUGADO Y_1^*



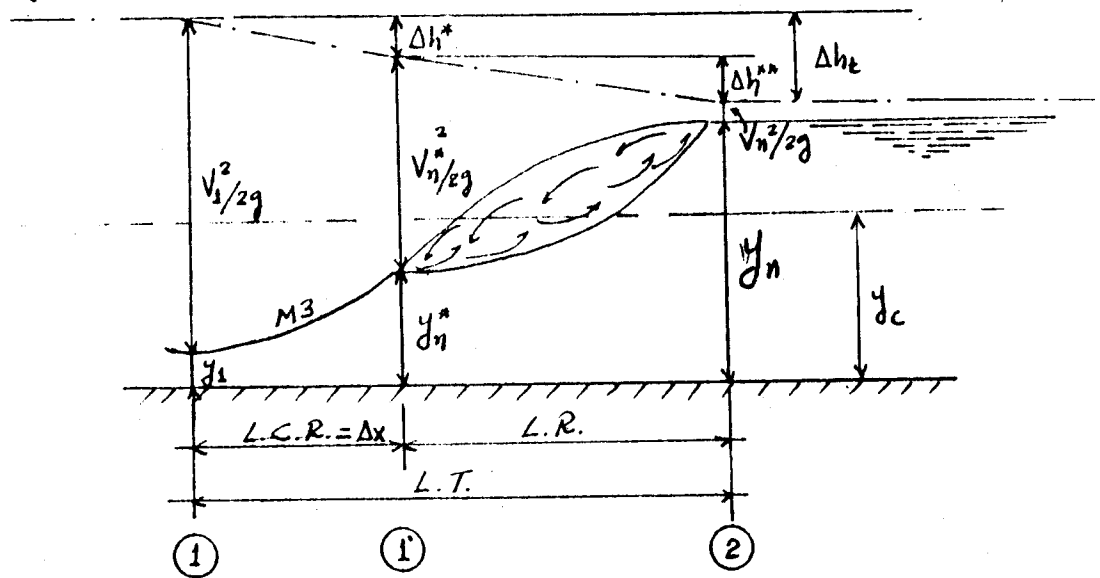
$$Y_1^* = \frac{y_1}{2} \left[\left(1 + 8Fr_1^2\right)^{1/2} - 1 \right]; \text{ Ecuación válida para canales rectangulares e } I \cong 0.$$

$$Y_1^* = \frac{0.01603}{2} (13.036)$$

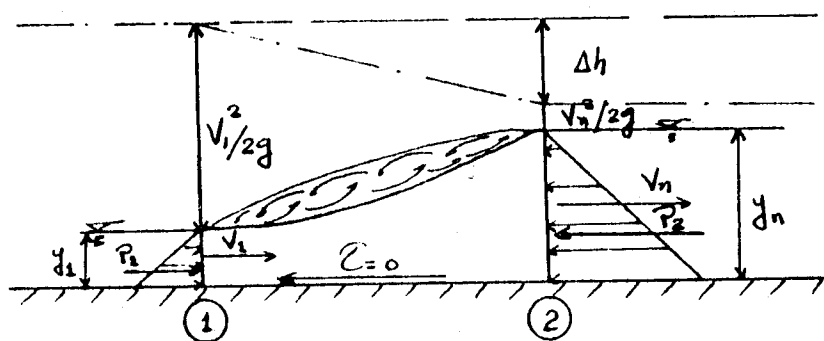
$$Y_1^* = 104.5 \text{ mm.}$$

Como: $Y_1^* > Y_n$; $104.5 \text{ mm} > 96.5 \text{ mm} \Rightarrow$ El resalto es rechazado.

El resalto ha sido rechazado por que 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 logran 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.



$$\Sigma F_x = \rho Q (\beta_2 V_{x2} - \beta_1 V_{x1}) \quad \text{ECUACION GENERAL}$$

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

La cantidad $\beta \rho Q V$ representa una rata o tasa de flujo de momentum en una seccion dada.

$\beta_1 = \beta_2 = 1$ Hipotesis simplificadora

$\Rightarrow \frac{\gamma y_1^2}{2} + \rho V_1^2 y_1 = \frac{\gamma y_2^2}{2} + \rho V_2^2 y_2$ Ecuación para canales rectangular y $I \cong 0$

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 :

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

Cantidad de movimiento	>	Cantidad de movimiento
+		+
Σ Fuerzas ext. en ①		Σ Fuerzas ext. en ②
$6.406 \text{ Kg/m} > 5.696 \text{ Kg/m}$		

\Rightarrow el resalto es rechazado.

1.1.6. CALCULO DE Y_n^* , V_n^* , $(V_n^*)^2/2g$ y E_n^*

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

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

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

$$E_n^* : E_n^* = Y_n^* + (V_n^*)^2/2g = 170.9 \text{ mm.}$$

1.1.7. CALCULO DE LAS PERDIDAS DE ENERGIA ENTRE:

$$\textcircled{1} \text{ y } \textcircled{1^*} : (\Delta h^*) ; \textcircled{1^*} \text{ y } \textcircled{2} : (\Delta h^{**}) \text{ y TOTAL : } \Delta h_t$$

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

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

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

1.1.8. CALCULO DE LA LONGITUD DE LA CURVA DE REMANSO

M3 : (Δx) .

$$\Delta x : \Delta x = \frac{E_n^* - E_1}{I - \bar{I}} \quad ; \text{ ECUACION DE INCREMENTOS FINITOS.}$$

$$R_1 = \frac{Y_1 \cdot b}{2Y_1 + b} = 0.0121 \text{ m}$$

$$I_1 = \left[\frac{V_1 \cdot \eta}{(R_1)^{2/3}} \right]^2 = 0.1382 \text{ m/m.}$$

$$R_1' = \frac{Y_n^* \cdot b}{2Y_n^* + b} = 0.01331 \text{ m}$$

$$I_1' = \left[\frac{V_n^* \cdot \eta}{(R_1')^{2/3}} \right]^2 = 0.09488 \text{ m/m.}$$

$$\bar{I} = \frac{I_1 + I_1'}{2} = 0.11654 \text{ m/m}$$

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

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

1.1.9. CALCULO DE LA LONGITUD DEL RESALTO: L_R

$$\text{Calculamos: } Fr_n^* = \frac{V_n^*}{(g Y_n^*)^{1/2}} = 4.10$$

Con Fr_n^* entramos al siguiente abaco y determinamos la relación L_R/Y_n .

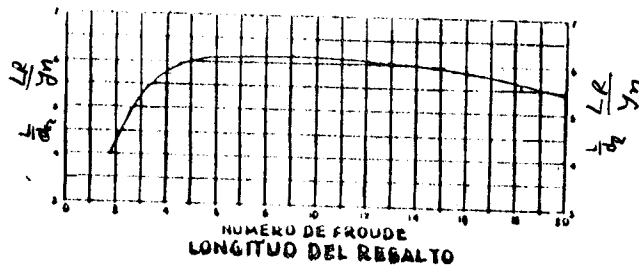


Figura B-15. Relación de las características del resalto con el número de Froude.

$$LR/Y_n = 4.75 \Rightarrow LR = 4.75 \cdot Y_n = 4.75 \cdot 0.0965$$

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

1.1.10. CALCULO DE LA LONGITUD TOTAL DE LA DISIPACION DE ENERGIA: L_T .

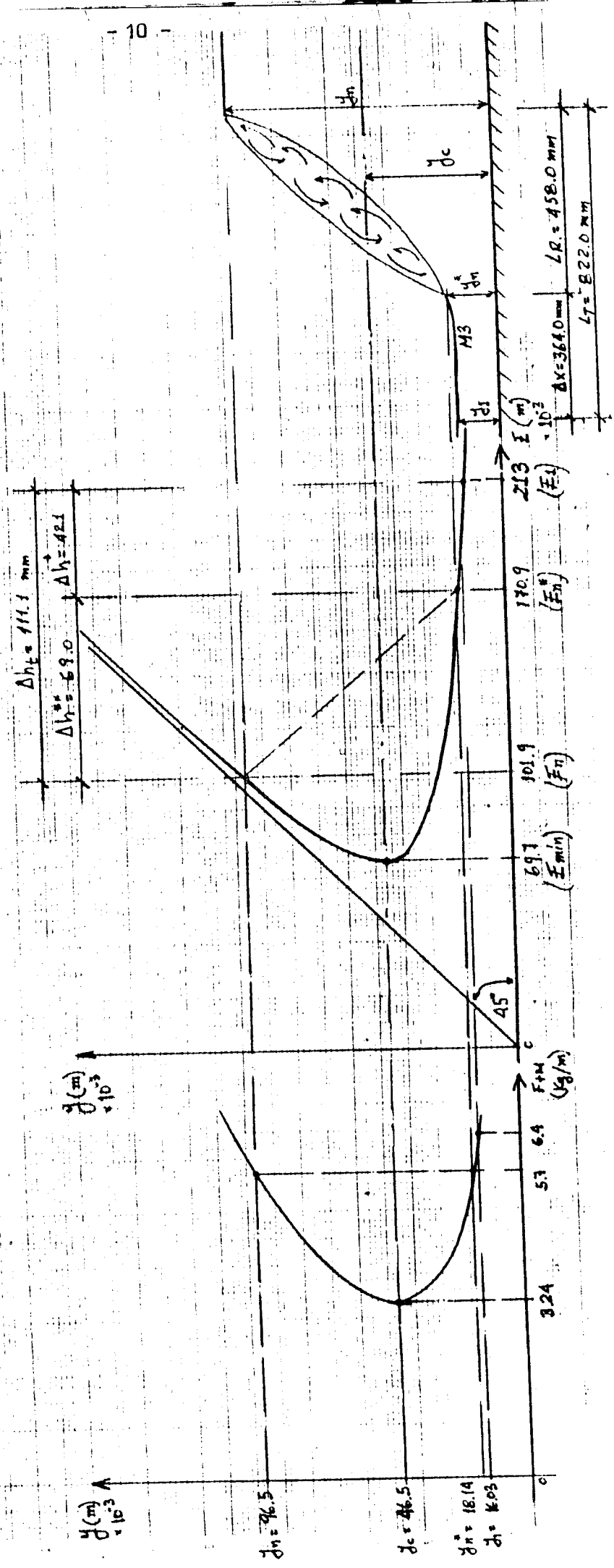
$$L_T = \Delta x + L_R = 364.0 + 458.0$$

$$\underline{\underline{L_T = 822.0 \text{ mm.}}}$$

Curva de Remanso y R. Hidráulico

Curva: $y = f(E)$

Curva: $y = f(Fr)$



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:

$4.5 < Fr_1 < 9$
$V_1 < V_{ADMISIBLE}$
$1.959 < 15 \text{ m/s.}$

Corresponde diseñar el cuenco convencional Tipo III del Bureau Reclamation.

2.2 DADOS DE LA ESCARPA :

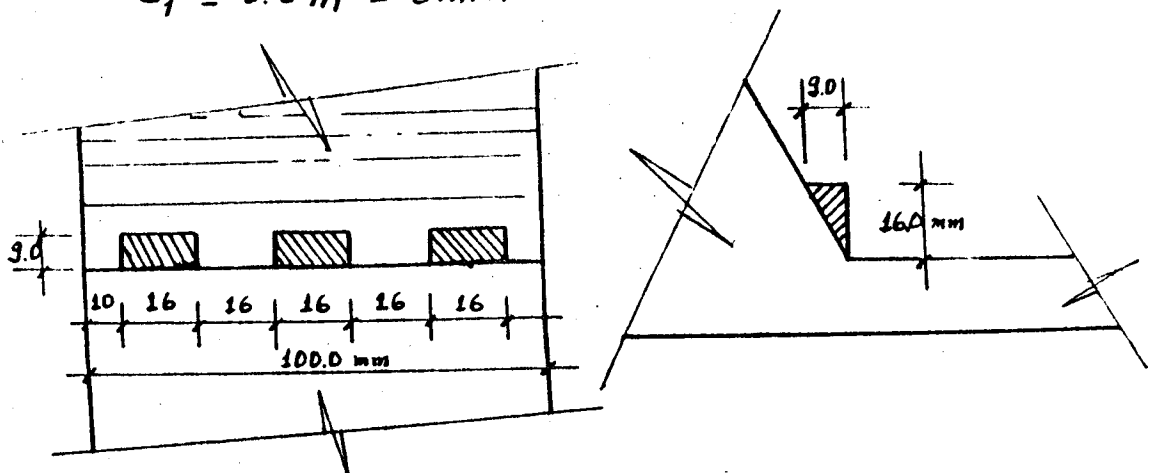
$$h_1 = Y_1 = 16.03 \text{ mm} \cong 16.00 \text{ mm.}$$

$$\text{Espaciamiento} = \text{Ancho} = h_1$$

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

$$\text{Espaciamiento de los extremos} : e_1'$$

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



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

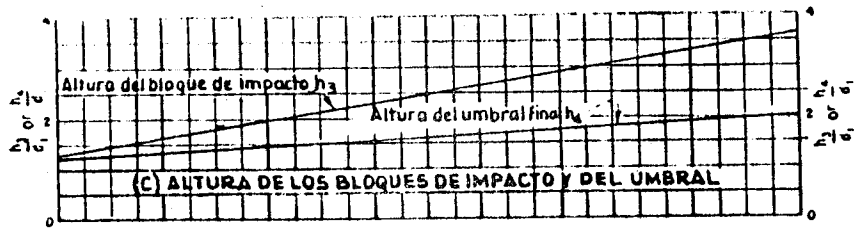
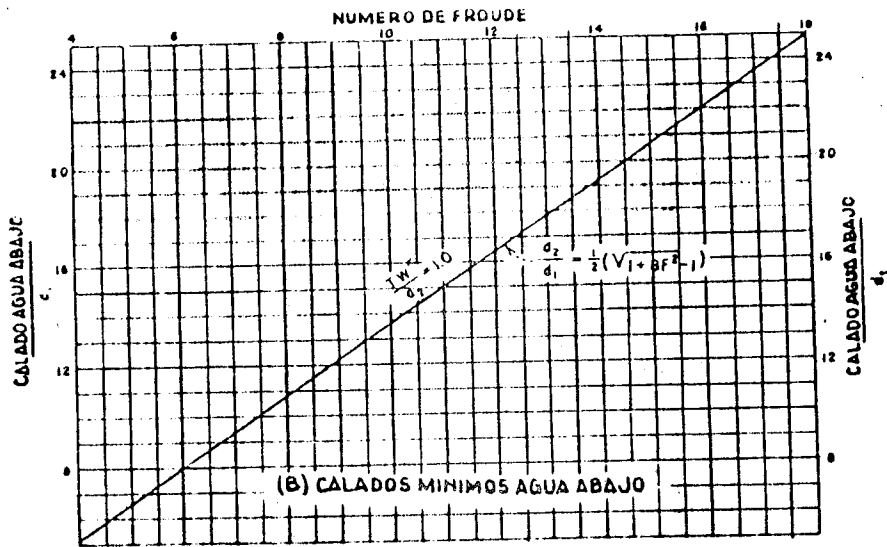
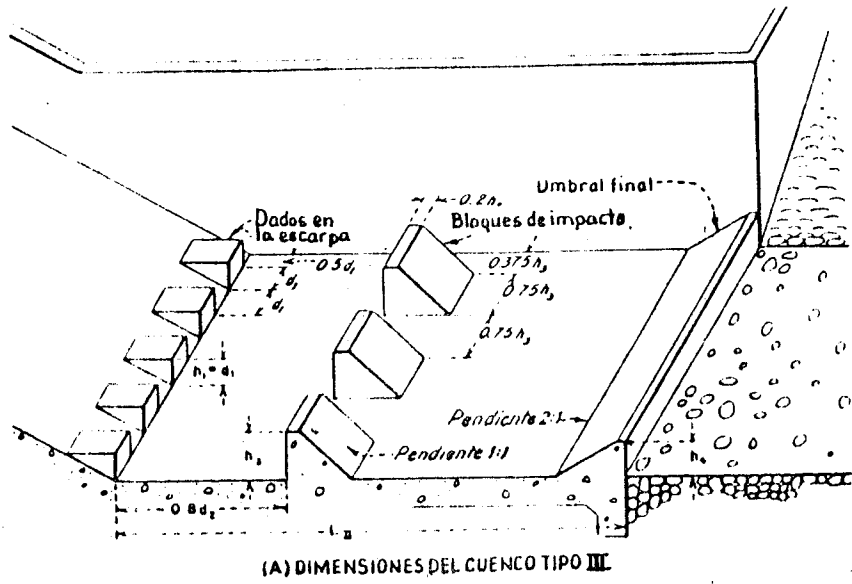


Figura 206. Características del cuenco amortiguador para números de Froude superior a 4,5 y velocidad de llegada inferior a 15 m/seg.

2.3. BLOQUES DE IMPACTO.

Del ábaco 206, tenemos:

Con $F_{r1} = 4.95 \Rightarrow \frac{h_3}{y_1} = 1.5 \Rightarrow \underline{h_3 = 24.0\text{mm.}}$

Ancho del bloque = espaciamiento intermedio:

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

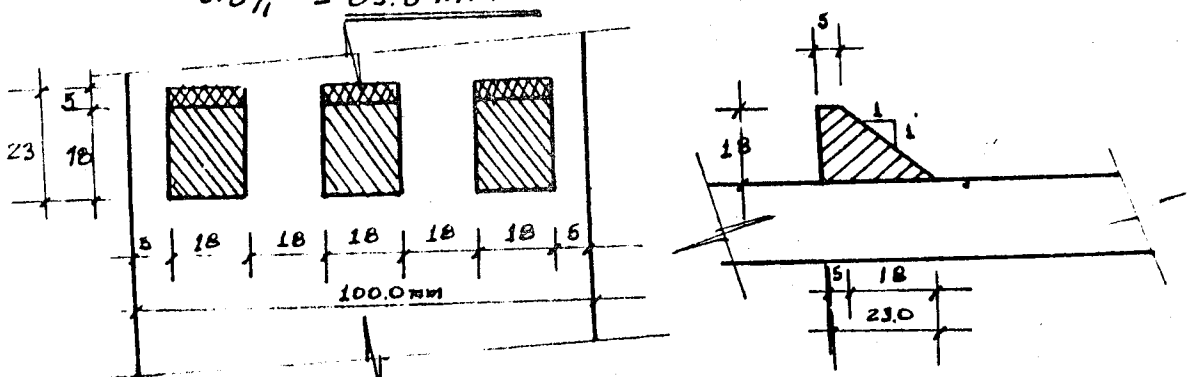
Espaciamiento de los extremos:

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

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

Distancia entre los dados de escarpa y bloques de impacto:

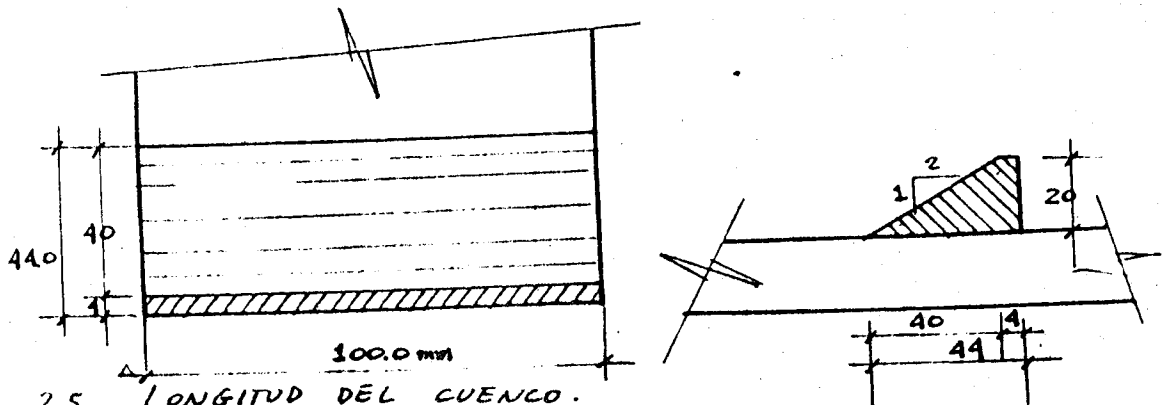
$0.8 y_1^* = \underline{83.6\text{mm.}}$



2.4. UMBRAL FINAL.

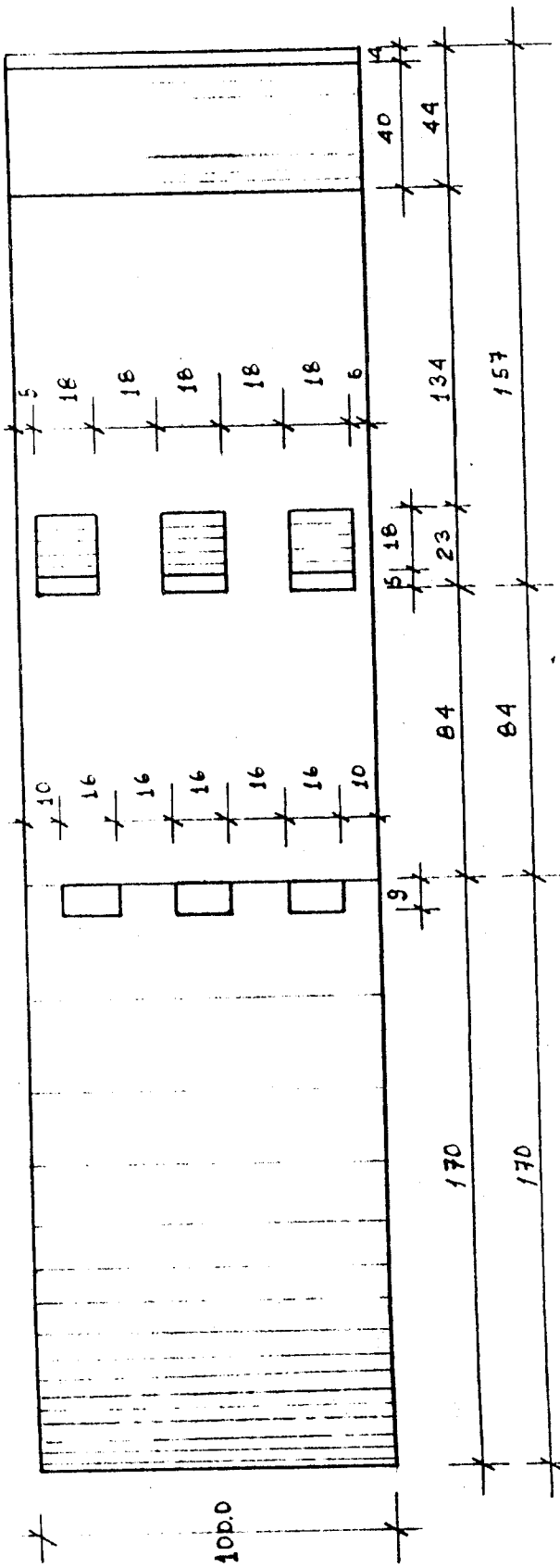
Con $F_{r1} = 4.95 \Rightarrow \frac{h_4}{y_1} = 1.25 \Rightarrow \underline{h_4 = 20.0\text{mm.}}$

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

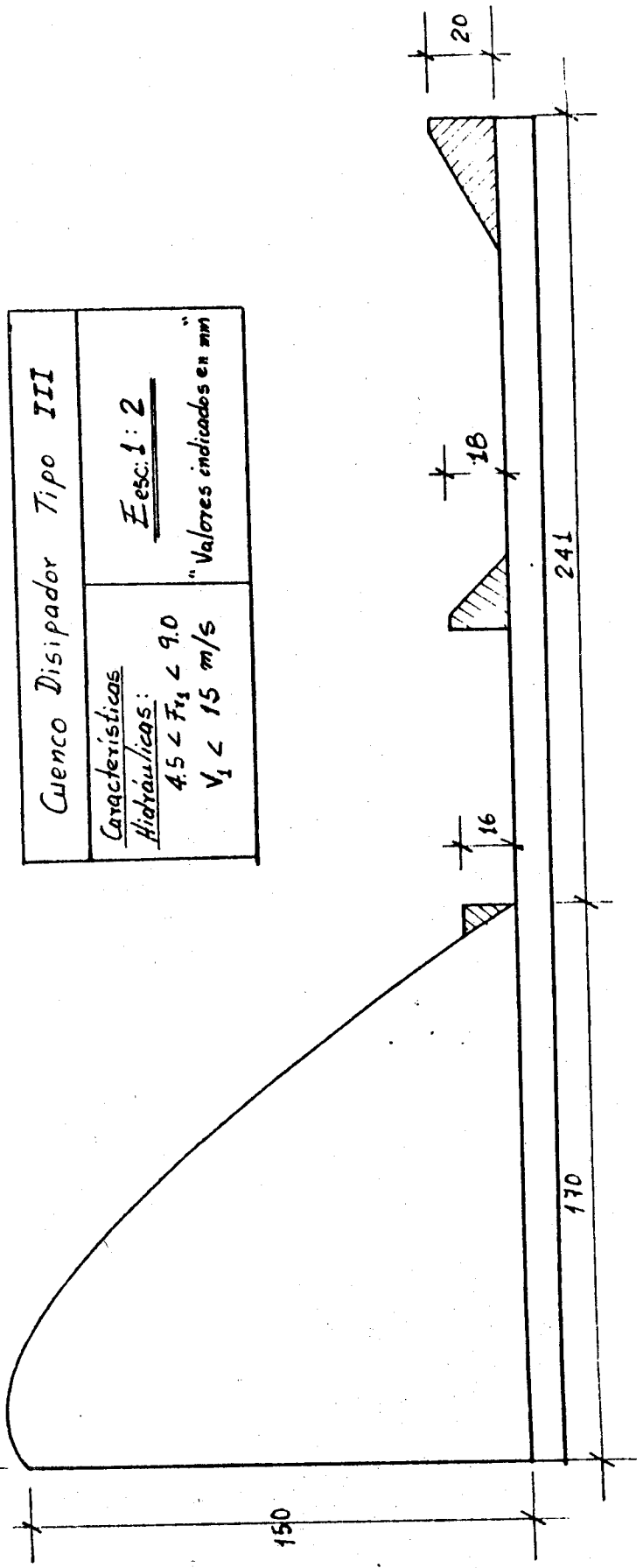


2.5. LONGITUD DEL CUENCO.

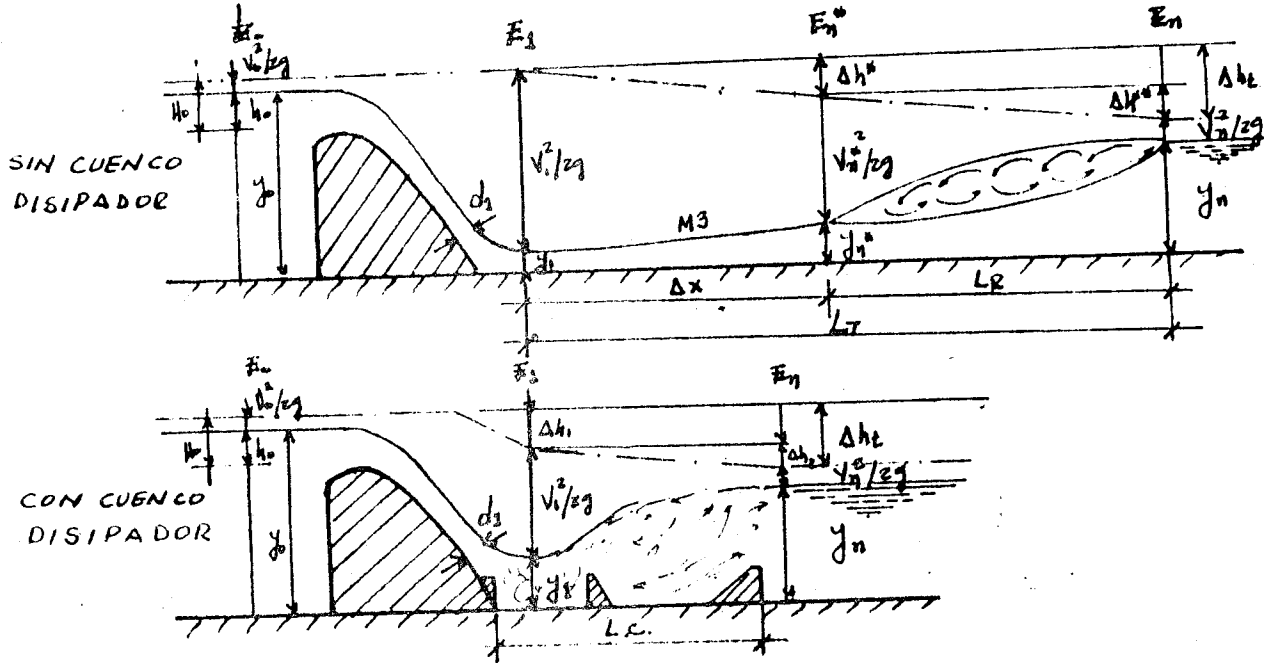
Con $F_{r1} = 4.95 \Rightarrow \frac{L}{y_2^*} = 2.30 \Rightarrow \underline{L = 240.35\text{mm.}}$



Cuenca Disipador Tipo III	
<i>Características Hidráulicas:</i> $4.5 < Fr_1 < 9.0$ $V_1 < 15 \text{ m/s}$	Eesc. 1: 2
<i>"Valores indicados en mm"</i>	



3.- RESUMEN DE RESULTADOS..



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

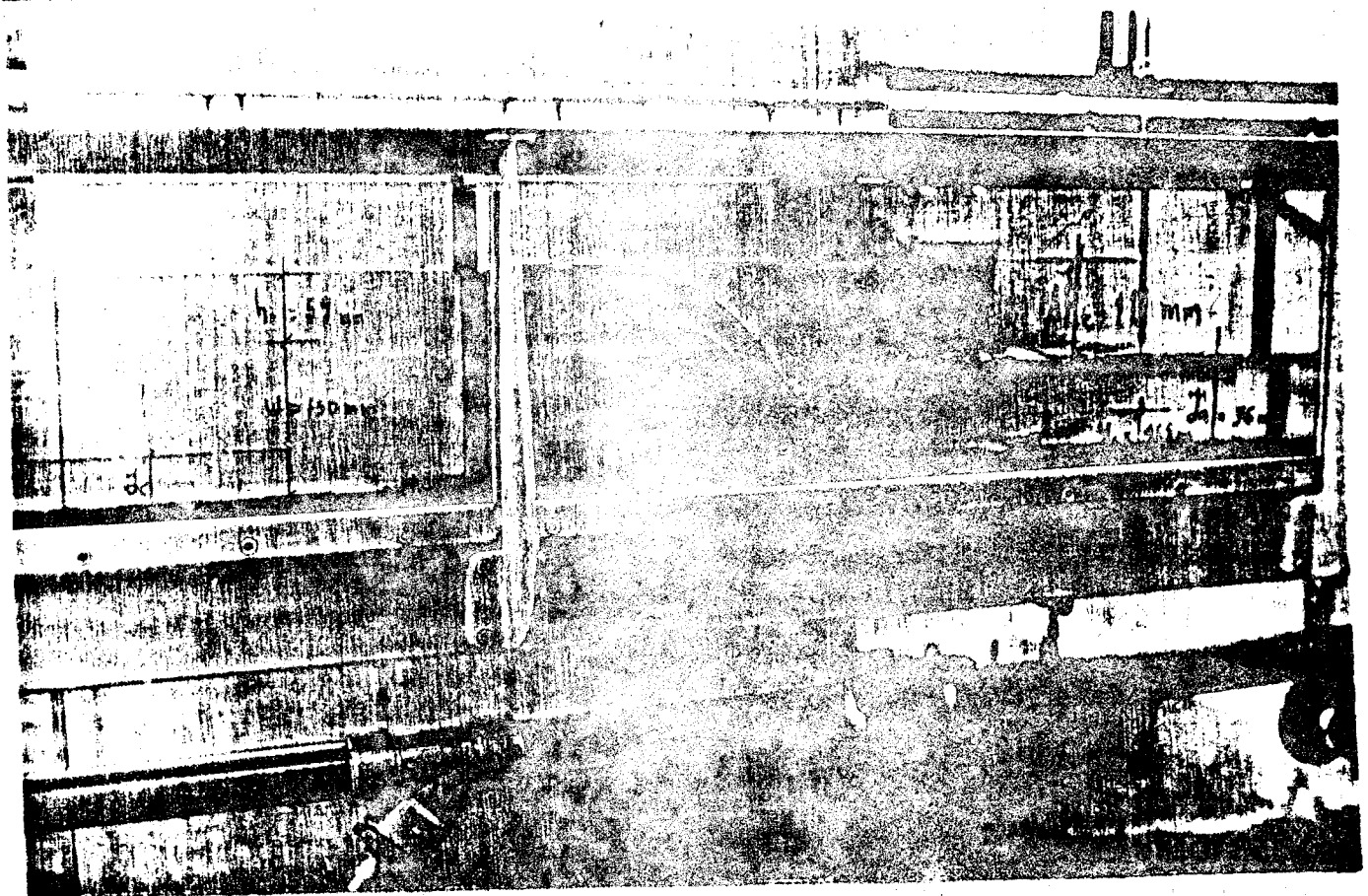
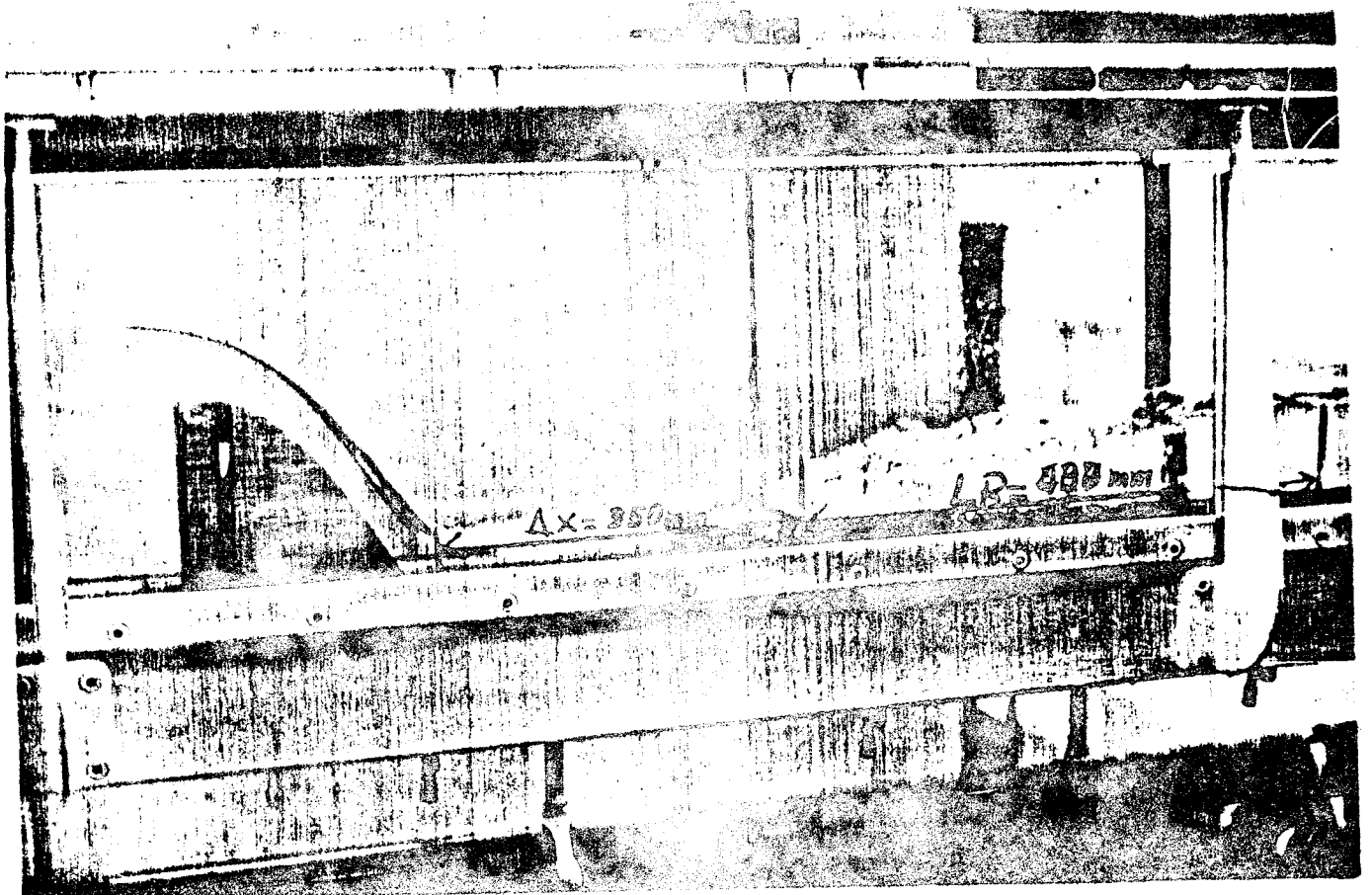
SIMBOLO	SIN CUENCO		CON CUENCO
	TEORICOS(mm)	EXPERIM.(mm)	EXPERIMEN.(mm)
h_0	62.00	59.00	59.00
$V_0^2/2g$	1.00	4.00	4.00
H_0	63.00	63.00	63.00
Y_0	213.00	209.00	209.00
E_0	213.00	213.00	213.00
d_1	16.03	15.00	15.00
Y_1	16.03	15.00	57.00
$V_1^2/2g$	196.97	198.00	143.00
E_1	213.00	213.00	200.00
Y_n^*	18.14	20.00	—
$(V_n^*)^2/2g$	152.50	154.00	—
E_n^*	170.64	174.00	—

CONTINUA...

Y_n	96.50	96.50	96.00
$V_n^2/2g$	5.40	5.00	5.00
E_n	101.90	101.50	101.00
Δh^*	42.36	39.00	$\Delta h_1 = 13.00$
Δh^{**}	68.80	72.50	$\Delta h_2 = 99.00$
Δh_t	111.10	111.50	112.00
Δx	364.00	350.00	—
LR	458.00	437.00	—
LT	822.00	787.00	$L_c = 241.00$

RESULTADOS DE LAS VELOCIDADES, Y NUMEROS DE FROUDE

SIMBOLO	SIN CUENCO		CON CUENCO
	TEORICOS	EXPERIMEN.	EXPERIMENT.
V_0 (m/s)	0.147	0.150	0.150
$F_p = \frac{V_0}{\sqrt{gY_0}}^{1/2}$	0.102	0.105	0.105
V_1 (m/s)	1.959	2.090	0.532
$F_{r1} = \frac{V_1}{\sqrt{gY_1}}^{1/2}$	4.950	5.450	0.711
V_n^* (m/s)	1.730	1.570	—
$F_{rn}^* = \frac{V_n^*}{\sqrt{gY_n}}^{1/2}$	4.100	3.540	—
V_n (m/s)	0.325	0.325	0.327
$F_{rn} = \frac{V_n}{\sqrt{gY_n}}^{1/2}$	0.334	0.334	0.337



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

5.1. ANALISIS 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%, debido a los datos 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%, alcanzando con esto el régimen subcrítico, con un Número de Froude $Fr = 0.334$. 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% de energía, en una longitud de 364 mm; inmediatamente se produce el resalto hidráulico en una longitud de 458 mm, disipando 62.2% de energía.
- Analizando la longitud total necesaria para disipar el 100% 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%.
- La reducción del 70.7% de la longitud total redundará directamente en la parte económica puesto que se deberá proteger tanto la solera como los márgenes del cauce en una menor longitud.

S I M B O L O G I A

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
$v_0^2/2g, v_1^2/2g, (v_n^*)^2/2g, v_n^2/2g$	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
Δx	Longitud de la curva de remanso
L_R	Longitud del resalto hidráulico
L_1	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
ρ	Densidad del agua
γ'	Peso específico del agua
A	Area
R	Radio hidráulico

R E F E R E N C I A S

1. Peterka, A.J. "Hydraulic Design of Stilling Bassis 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.