



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA**

**E.T.S. DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA MARÍTIMA Y AMBIENTAL  
SECCIÓN DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA**

**DISIPADORES DE ENERGÍA**

**LUIS GERARDO CASTILLO ELSITDIÉ**  
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

---

Barcelona, Junio de 1987

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA**

**E.T.S. DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA MARÍTIMA Y AMBIENTAL  
SECCIÓN DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA**

**DISIPADORES DE ENERGÍA**

**LUIS GERARDO CASTILLO ELSITDIÉ**  
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

---

Barcelona, Junio de 1987

# ÍNDICE

- 1.- GENERALIDADES Y TOPOLOGÍA
- 2.- CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE DISIPADORES DE ENERGÍA

## 2.1 Disipación de Energía por Resalto

- 2.1.1 Resalto Clásico
  - Tipos de resalto
  - Características básicas del resalto
- 2.1.1.1 Crítica de las hipótesis utilizadas para el cálculo de las características del resalto clásico
  - Efecto de la fricción en el contorno
  - Efecto de la distribución de velocidades
  - Efecto de la distribución de presión
- 2.1.2 Condiciones del Calado Aguas Abajo
- 2.1.3 Resalto Sumergido
- 2.1.4 Resalto Sobre Solera Inclinada
  - Resalto totalmente desarrollado sobre solera inclinada
  - Resalto parcialmente desarrollado sobre solera inclinada
- 2.1.5 Resalto en Canales Rectangulares con Expansión
  - Resalto en una expansión brusca
  - Resalto en una expansión gradual
- 2.1.6 Resalto Forzado
  - 2.1.6.1 Resalto sobre una caída abrupta
  - 2.1.6.2 Resalto sobre una subida abrupta
  - 2.1.6.3 Control del resalto por reborde de cresta fina
  - 2.1.6.4 Control del resalto por reborde de cresta ancha
  - 2.1.6.5 Control del resalto por bloques de impacto

- 3.- ESTRUCTURAS NORMALIZADAS PARA LA DISIPACIÓN DE LA ENERGÍA

## 3.1 Deflectores en los Cuencos

- 3.1.1 Deflectores de Paramento
  - Deflectores sin aireación
  - Deflectores aireados

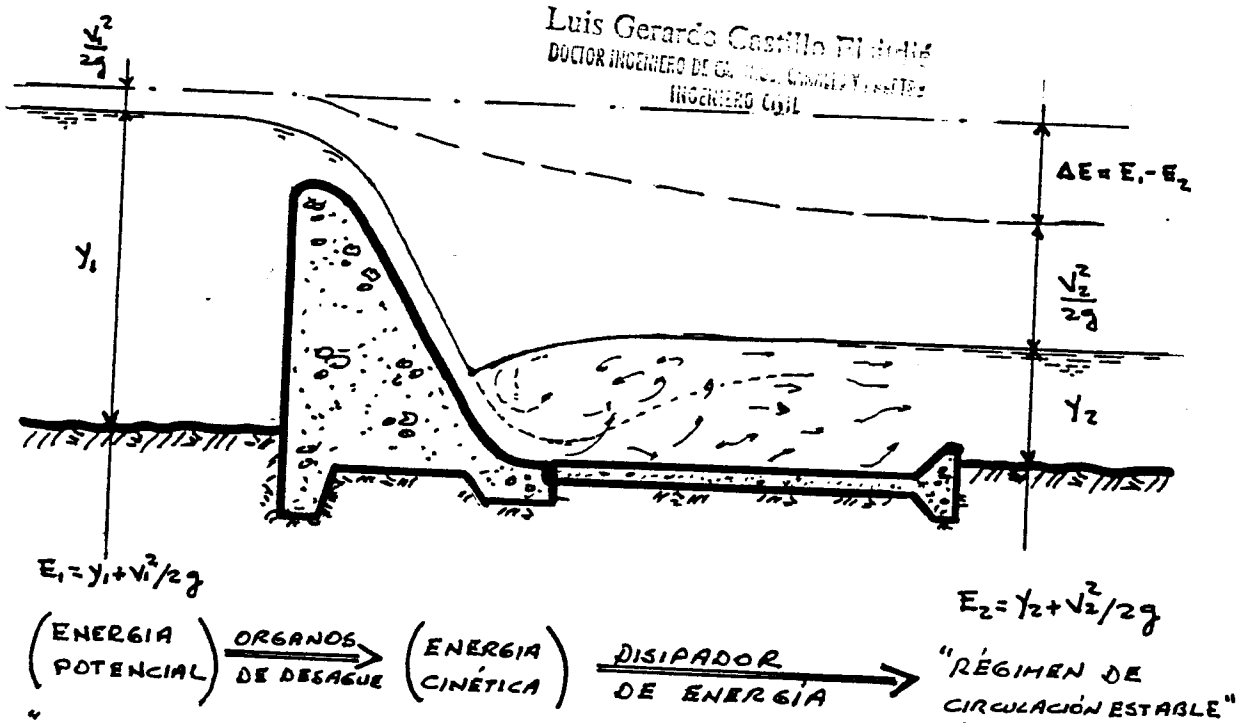
- 3.1.2 Deflectores de Solera
- 3.1.3 Bordillos Terminales
- 3.2 Tipos de Estructuras Normalizadas
  - 3.2.1 Estructuras del Saint Antony Falls “SAF”
  - 3.2.2 Estructuras del Bureau of Reclamation
    - a) Tipo I
    - b) Tipo II
    - c) Tipo III
    - d) Tipo IV
    - e) Dispidadores de Impacto
  - 3.2.3 Estructuras del Illinois State Water Survey “ISWS”
  - 3.2.4 Estructuras del Instituto Hidrotécnico Vedeneev de Leningrado “VNIIG”
    - a) Tipo SIMPLES
    - b) Tipo GUNKO
    - c) Tipo LYAPIN
    - d) Tipo KUMIN
  - 3.2.5 Control de las Erosiones Localizadas
- 3.3 Análisis Comparativo de las Estructuras Normalizadas
  - 3.3.1 Diagrama de Flujo y Cuadro de Selección
  - 3.3.2 Comentarios Adicionales sobre las Estructuras Normalizadas

#### 4.- BIBLIOGRAFÍA

# DISIPADORES DE ENERGÍA

## 1.- GENERALIDADES Y TOPOLOGIA

Un aspecto importante en el proyecto de una presa, sean cualesquiera sus características, es la disipación de la energía cinética del flujo que se produce cuando entran en funcionamiento sus órganos de desagüe, con el fin de que el agua restituida al cauce natural circule en condiciones lo más parecidas posible a las existentes antes de la ejecución de la obra.



"LOS DISIPADORES DE ENERGÍA TIENEN LA MISIÓN DE LIMITAR LAS EROSIONES EN EL PUNTO DE RESTITUCIÓN AL CAUCE Y LA DE PROPORCIONAR UN RÉGIMEN DE CIRCULACIÓN LO MÁS ESTABLE POSIBLE AGUAS ABAJO DE AQUEL"

"DISIPADORES DE ENERGÍA" ASOCIADOS AL TIPO DE PRESA Y AL ÓRGANO DE DESAGUE

MECANISMO DE PÉRDIDA DE ENERGÍA

- |                                      |   |   |
|--------------------------------------|---|---|
| * POR RESALTO HIDRÁULICO             | → | TURBULENCIA   |
| * POR IMPACTO (Resalto forzado)      | → | POR IMPACTO CON BLOQUES O MUROS                                   |
| * POR LANZAMIENTO DE LA VENA LÍQUIDA | → | POR EL ROZAMIENTO CON EL AIRE Y POR IMPACTO EN EL COLCHÓN O CAUCE |
| * VÁLVULAS DE CHORRO HUECO           | → | POR ROCE Y EMULSIÓN (Hollow-Jet)                                  |
| * BORDILLAS DEFLECTORAS              | → | DISPERSIÓN DEL CHORRO (Howell-Bunger)                             |
| * TRAMPOLINES SUMERGIDOS             | → | REMOLINOS DE SENTIDO CONTRARIO                                    |

## 2.- CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE DISIPADORES DE ENERGIA

Se abordará una serie de consideraciones de tipo teórico o experimental que deben tenerse en cuenta para el diseño de los diferentes tipos de DISIPADORES DE ENERGIA.

Se darán, por una parte, los ábacos y formulaciones necesarias para un estudio preliminar de los diversos elementos ya que, en general, y salvo que recurra a disipadores normalizados, suficientemente contrastados experimentalmente, deberá recurrirse a la realización de ensayos en modelo reducido.

Por otro lado, se hará especial hincapié en las hipótesis que han conducido a las diferentes fórmulas de base teórica y a las condiciones establecidas en los ensayos conducentes a tablas y ábacos experimentales.

### 2.1 DISIPACIÓN DE LA ENERGIA POR RESALTO

EL RESALTO HIDRÁULICO PUEDE DEFINIRSE COMO EL FENÓMENO QUE TIENE LUGAR, EN UN RÉGIMEN CON ~~(SUBCRÍTICO)~~ LÁMINA LIBRE, CUANDO SE PASA DEL RÉGIMEN SUPERCRÍTICO O RÁPIDO AL RÉGIMEN SUBCRÍTICO O LENTO.

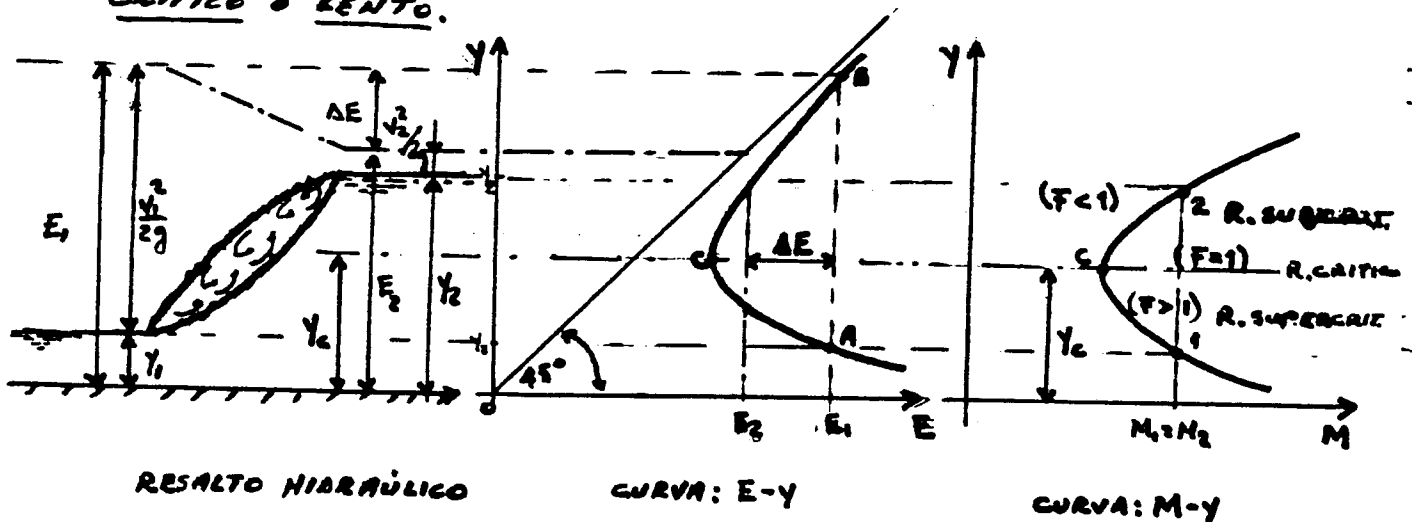


FIGURA N° 1

APLICACIONES DEL RESALTO HIDRÁULICO

- Establecimiento de Sistemas de medida de flujo
- Mezclador de Productos Químicos
- Aireación de Aguas residuales
- Remoción de bolsas de aire en líneas de abastec.
- DISIPADOR NATURAL DE ENERGIA  
[ POR FRICCIÓN INTERNA PROPIA ]

Debido a la pérdida de energía mencionada, no evaluable a priori, el estudio de las características del resalto se efectúa con base en los teoremas sobre CANTIDAD DE MOVIMIENTO, que conducen a la siguiente expresión general:

$$\vec{R} = \rho Q \vec{V}_2 - \rho Q \vec{V}_1$$

(1)

$\vec{R}$ : Resultante de todas las fuerzas que actúan en la masa líquida (Fuerzas de Presión, Peso, Contorno)

$\vec{V}_1$  y  $\vec{V}_2$ : Vectores velocidad media en las secciones anterior y posterior al resalto, en los que el movimiento puede considerarse paralelo y uniforme ( $\beta \approx 1$ )

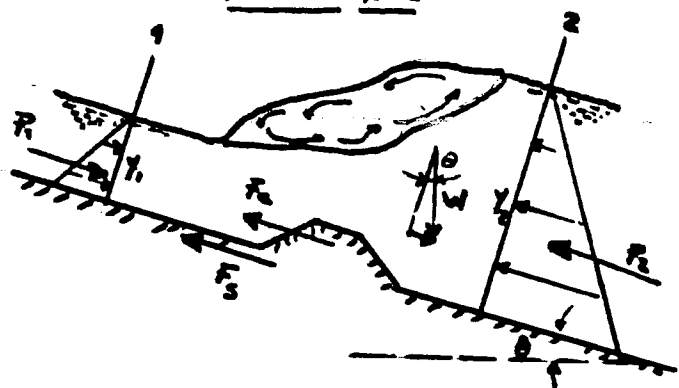
$$\left[ \beta = \frac{1}{Q} \int Q \frac{V_x}{V_x} dQ = \frac{1}{A} \int \frac{V_x}{V_x} \cdot \frac{V}{V} dA = 1 \right]$$

$Q$ : Caudal Circulatoria

$\rho$ : Densidad del agua

$$\left[ \rho = \frac{\gamma}{g} \right]$$

FIGURA N°2



LA PROYECCIÓN EN LA DIRECCIÓN DEL CANAL DE LA ECUACION (1) RESULTA:

$$P_1 - P_2 - F_3 - F_c + W \sin \theta = \rho Q V_2 - \rho Q V_1 \quad (2)$$

DONDE:

$P_1$  y  $P_2$ : Resultantes de las fuerzas de Presión en las secciones 1 y 2.

Distribución Hid. Presiones:

$$P_i = \gamma A_i \bar{y}_i \cos \theta$$

$W \sin \theta$ : Componente longitudinal del Peso del fluido entre las secciones 1 y 2

$F_3$ : Componente en el sentido longitudinal de las fuerzas de fricción sobre el contorno

$F_c$ : Componente en el sentido longitudinal de los esfuerzos que el contorno transmite al fluido.

En función de la importancia de cada uno de los términos que intervienen en la ecuación (2), el resalto presenta características particulares que pasan a analizarse a continuación:

### 2.1.1. RESALTO CLÁSICO.

ES EL QUE SE ORIGINA EN UN CAUCE CILÍNDRICO Y RECTANGULAR CON SOLERA HORIZONTAL. ( $W \text{ sen } \theta = 0$ )

SE CONSIDERA LA FRICCION DESPRECIABLE ( $F_s = F_c = 0$ )

LA ECUACION (2) SE REDUCE A:

$$P_1 - P_2 = \rho Q V_2 - \rho Q V_1 \quad (3)$$

SI REEMPLAZAMOS  $P_i = \frac{1}{2} \gamma y_i^2$  Y AGRUPAMOS CONVENIENTEMENTE, OBTENEMOS LA ECUACION DE BELANGER, QUE RELACIONA LOS CALADOS  $y_1$  Y  $y_2$  EN LAS SECCIONES EXTREMAS, DENOMINADOS CALADOS CONJUGADOS:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1) \quad (4)$$

EN DONDE:

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g y_1}} \quad \text{Número de Froude de aproximación.}$$

LA PÉRDIDA DE ENERGÍA  $E_L = E_1 - E_2$ , QUE SE PRODUCE EN EL RESALTO, PUEDE EVALUARSE RESTANDO LOS VALORES DEL TRINOMIO DE BERNOULLI EN LAS SECCIONES EXTREMAS, DANDO:

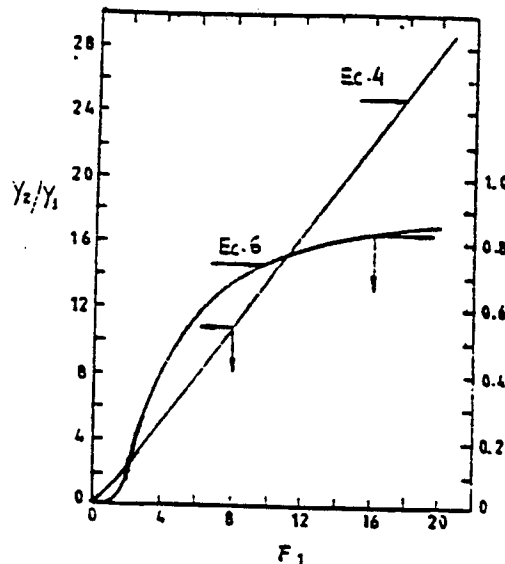
$$E_L = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4 y_2 y_1} \quad (5)$$

O LA PÉRDIDA DE ENERGÍA RELATIVA:

$$\frac{E_L}{E_1} = \frac{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 3)^3}{8(2 + F_1^2)(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)} \quad (6)$$



En la figura (3) se dan los valores  $Y_2/Y_1$  (Ec.4) y  $E_L/E_1$  (Ec.6), en función de  $F_1$



$F_1 = 2 \rightarrow \frac{E_L}{E_1} = 7\%$   
 $F_1 = 1.9 \rightarrow \frac{E_L}{E_1} = 85\%$   
 $F_1 = 8 \rightarrow \frac{E_L}{E_1} = 65\%$   
 $F_1 = 5 \rightarrow \frac{E_L}{E_1} > 50\%$

**FIGURA N°3**

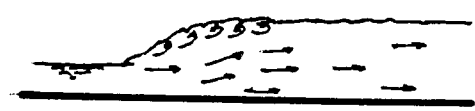
**TIPOS DE SALTO (SEGUN EL BUREAU OF R.)**

**FIGURA N°4**



ONDULAR  
2.0 -  $F_1$  - 1.7

$\Delta E \sim 0$



DEBIL  
1.7 -  $F_1$  - 2.5

$\Delta E$  - bajo  
V - ligeramente uniforme  
Sup. a.a. permanece lisa.



OSCILANTE  
2.5 -  $F_1$  - 4.5

$\Delta E$  - mediano  
Ondas viajeras de periodo irregular (a.a.)



PERMANENTE  
4.5 -  $F_1$  - 9.0

$\Delta E$ : 45-70% (R. bien balanceada y mejor rendimiento)  
El rot y flujo de alta velocidad dejan el flujo en la misma seccion vertical  
Menos sensible a variaciones de  $Y_2$



FUERTE  
 $F_1 > 9.0$

$\Delta E \sim 85\%$  Accion del Salto es áspera pero efectiva  
Golpes intermitentes generados ondas hacia a.a.

## CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL RESALTO

### - PÉRDIDA DE ENERGÍA

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 y_2} \quad (5)$$

### - PÉRDIDA DE ENERGÍA RELATIVA

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{(\sqrt{1+8F_1^2} - 3)^3}{8(2+F_1^2)(\sqrt{1+8F_1^2} - 1)} \quad (6)$$

### - EFICIENCIA

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{3/2} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2+F_1^2)} \quad (7)$$

### - ALTURA DEL RESALTO

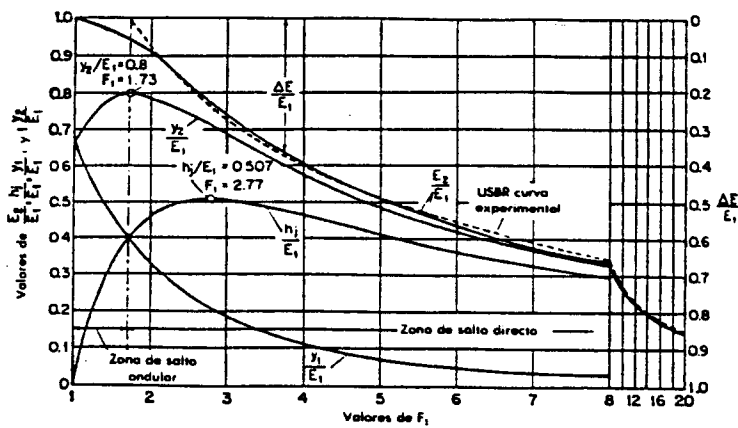
$$h_j = y_2 - y_1$$

### - ALTURA RELATIVA DEL RESALTO

$$\frac{h_j}{E_1} = \frac{y_2}{E_1} - \frac{y_1}{E_1}$$

$$\frac{h_j}{E_1} = \frac{\sqrt{1+8F_1^2} - 3}{F_1^2 + 2} \quad (8)$$

CON ESTAS CARACTERÍSTICAS DIBUJADAS, SE OBTIENE LAS "CURVAS CARACTERÍSTICAS" DEL RESALTO HIDRÁULICO CLÁSICO. VER FIGURA N° 5



Curvas características de saltos hidráulicos en canales rectangulares horizontales.

## FIGURA N°5

### ASPECTOS A DESTACAR

\* Máxima Altura Relativa  $\left\{ \begin{array}{l} \frac{h_j}{E_1} = 0.507 \\ F_1 = 2.77 \end{array} \right.$

\* Máxima Profundidad Relativa  $\left\{ \begin{array}{l} \frac{y_2}{E_1} = 0.8 \\ \frac{y_1}{E_1} = 0.4 \\ F_1 = 1.73 \rightarrow \text{TRANSICIÓN R. ONDULAR-DIRECTO} \end{array} \right.$

\*  $F_1 = 1$  - Flujo Crítico:  $y_1 = y_2 = 2/3 E_{mín.}$

\* Cuando  $F_1$  aumenta los cambios en todas las Relaciones características se hacen graduales.

### COMPROBACION EXPERIMENTAL DE LAS C.C.

BACHMETEFF Y HATZKE (1936)

$$\left. \frac{y_2}{E_1} \text{ y } \frac{h_j}{E_1} \right\} \text{ VALORES TEÓRICOS } > 3-4\% \text{ VALORES EXPERIM. (EFECTO DE ESCALA?)}$$

[ U.S. BUREAU OF RECLAMATION (1955)  
J. N. BRADLEY y A. J. PETERKA (1957)

[  $\frac{y_1}{E_1}$  - PERFECTO ACUERDO ENTRE TEÓRICO Y EXPERIMENTAL

[  $\frac{E_2}{E_1}$  ó  $\frac{\Delta E}{E_1}$  - ADECUADAMENTE BUENO. EXCEPTO  $F_1 < 2$

[  $\frac{y_2}{E_1}$  y  $\frac{h_j}{E_1}$  - BUENO PARA  $F_1$  ALTOS. DATOS DISEMINADOS  $F_1 < 3$

DESDE EL PUNTO DE VISTA DEL DISEÑO DE CUENCOS AMORTIGUADORES, ES NECESARIO CONOCER ALGUNAS CARACTERÍSTICAS ADICIONALES:

**- LONGITUD DEL RESALTO**

- GARANTIZAR QUE EL RESALTO SE PRODUZCA EN EL CUENCO Y EVITAR CON ESTO EROSIONES PELIGROSAS FUERA DE ÉL.

**- PERFIL DE LA SUPERFICIE**

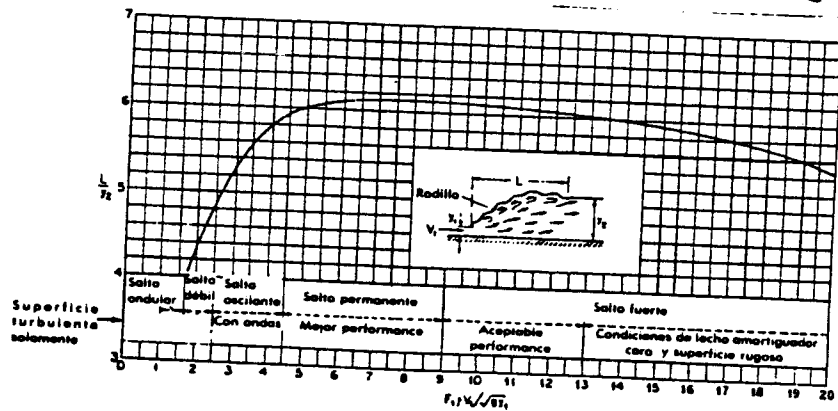
- DISEÑO DE LA MARGEN LIBRE DE LAS PAREDES DE RETENCION
- DETERMINACIÓN DE LA PRESION PARA DISEÑO ESTRUCTURAL DE SOLERA.

LONGITUD DEL RESALTO

DISTANCIA MEDIDA DESDE LA CARA DEL FRENTE DEL SALTO A UN PUNTO DONDE LA SUPERFICIE INMEDIATAMENTE AGUAS ARRIBA DEL RODILLO.

ESTA LONGITUD NO PUEDE SER DETERMINADA FÁCILMENTE POR LA TEORÍA, PERO HA SIDO INVESTIGADA EXPERIMENTALMENTE.

EN EL GRÁFICO DE LA FIGURA (6), DE CARÁCTER EXPERIMENTAL, SE DAN LOS VALORES DE LA LONGITUD DEL RESALTO PROPUESTOS POR EL BUREAU OF RECLAMATION, EN FUNCION DE  $F_2$



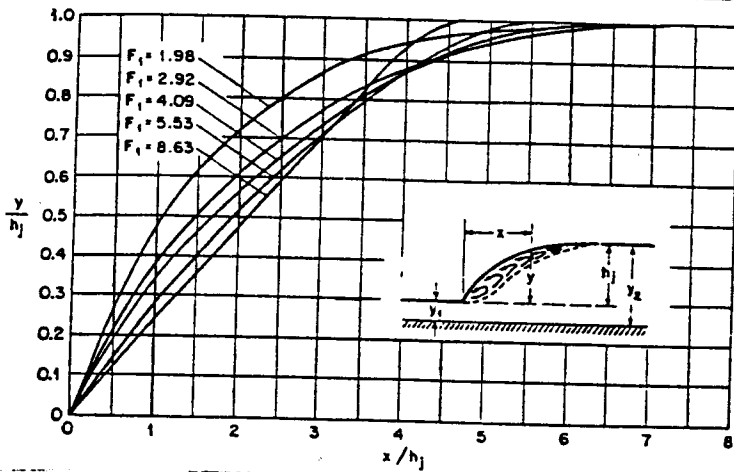
Longitud en términos de profundidad secante  $y_2$  de saltos en canales horizontales. (Basada en datos y recomendaciones del U.S. Bureau of Reclamation [1]). **FIGURA N° 6**

EXISTE DESVIACIONES IMPORTANTES ENTRE LOS VALORES DE ESTA CURVA Y LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR OTROS INVESTIGADORES (BAKHMETEFF-MATZKE).

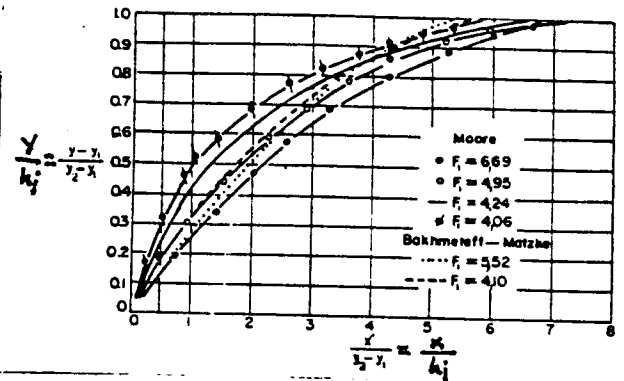
- CAUSAS:
- DIFICULTAD DE LOCALIZACION DE SECCION DONDE FINALIZA RESALTO
  - EFECTO DE ESCALA INCLUIDO EN DATOS EXPERIMENTALES (B-M)

## PERFIL DEL RESALTO

SE HA ESTIMADO EN FORMA EXPERIMENTAL.



**FIGURA N° 7**



**FIGURA N° 8**

- EN LA FIGURA (7) SE DAN LOS PERFILES ADIMENSIONALES PROPUESTOS POR BAKHMETEFF Y MATZKE
- EN LA FIGURA (8) SE DAN LOS PERFILES SIMILARES PARA SALTOS DEBATO DE UN DESBORDE LIBRE, DESARROLLADOS POR MOORE (1943)

PODEMOS ANALIZAR ESTOS RESULTADOS:

- LOS PERFILES DE MOORE SE LEVANTAN MÁS RÁPIDAMENTE AL EMPEZAR
- SE CREE QUE LA DISTRIBUCIÓN "NO HIDROSTÁTICA" DE LA PRESIÓN EN EL SALTO NO FUE REGISTRADA POR LAS MEDIDAS PIEZOMÉTRICAS DE LOS DATOS DE B. y M.
- LA LONGITUD DEL SALTO DE MOORE ES UN 20% MÁS LARGA QUE LA MOSTRADA POR LAS CURVAS DE B. y M.

$$L_j = 6.9 (y_2 - y_1) - M. \text{ (ELEVATORSKI, 1959)}$$

- PUEDE SER CAUSADA POR UNA DIFERENCIA EN EL PERFIL DE LA VELOCIDAD DE FLUJO LANZADO, ENTRANDO AL SALTO. (B y M USARON UNA ESCLOJA REGULADORA).

LAS INVESTIGACIONES DE RAJARATHNAM (1968), BASADOS EN UN ANÁLISIS DE UN NÚMERO CONSIDERABLE DE PERFILES DE LA SUPERFICIE DEL RESALTO Y MEDIDAS DE PRESIÓN SOBRE EL FONDO OBTENIDOS POR VARIOS INVESTIGADORES, INDICA QUE EL PERFIL DE LA SUPERFICIE DEL RESALTO PUEDE SER EXPRESADO DE UNA FORMA ADIMENSIONAL :

$$\eta = f(\lambda) \quad (9)$$

EN LA CUAL :

$$\eta = \frac{h}{0.75(y_2 - y_1)} \quad (10)$$

Table #1 Coordinates of the Non-dimensional Jump Profile:

$\lambda$	$\eta$	$\lambda$	$\eta$	$\lambda$	$\eta$
0.00	0.000	0.60	0.655	1.30	1.140
0.05	0.185	0.70	0.736	1.40	1.180
0.10	0.245	0.80	0.820	1.50	1.215
0.15	0.280	0.90	0.920	1.60	1.245
0.20	0.320	1.00	1.000	1.80	1.290
0.30	0.405	1.10	1.060	2.00	1.320
0.40	0.485	1.20	1.105	2.20	1.333
0.50	0.570			2.40	1.333

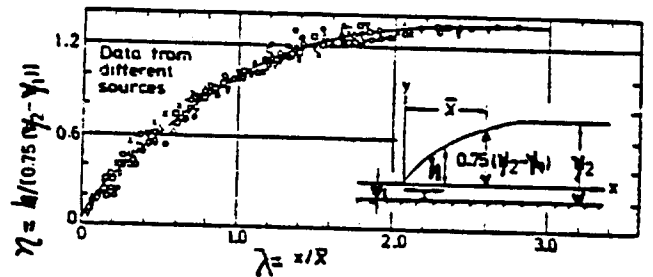


FIGURA N° 9

$$\lambda = \frac{x}{\bar{x}} ; \quad \bar{x} = \text{Escala de longitud definida para } h = 0.75(y_2 - y_1)$$

ESTA DISTANCIA FUE CUANTIFICADA EMPÍRICAMENTE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE FROUDE ( $F_1$ ):

$$\frac{\bar{x}}{y_1} = 5.08F_1 - 7.82 \quad (11)$$

ACONSEJA QUE PARA EFECTOS PRÁCTICOS SE USEN LA COORDENADAS HASTA  $\lambda \approx 1.80$ .

2.1.1.1. CRÍTICA DE LAS HIPÓTESIS UTILIZADAS PARA EL CÁLCULO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL RESALTO CLÁSICO

PARA LA OBTENCIÓN DE LA ECUACIÓN DE LOS CALADOS CONJUGADOS  $\left[ \frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1+8F_1^2} - 1) \right]$  SE PARTIERON DE LAS SIGUIENTES HIPÓTESIS:

- FUERZAS DE FRICCIÓN CON EL CONTORNO  $F_s = 0$
- DISTRIBUCIÓN UNIFORME DE VELOCIDADES
- DISTRIBUCIÓN HIDROSTÁTICA DE PRESIONES

\* EFFECTO DE LA FRICCIÓN EN EL CONTORNO DENTRO DEL RESALTO SOBRE LA RELACIÓN DE LOS CALADOS CONJUGADOS

RAJARAMAN (ASCE 1965) HIZO MEDIDAS CON UN TUBO DE PRESTON Y DEMOSTRÓ QUE LAS FUERZAS DE FRICCIÓN NO SON DESPRECIABLES. EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN  $C_f = \tau_0 / \frac{\rho V^2}{2}$  fue encontrado únicamente con relación a  $x/y_2$ , como se indica en la figura (10.1)

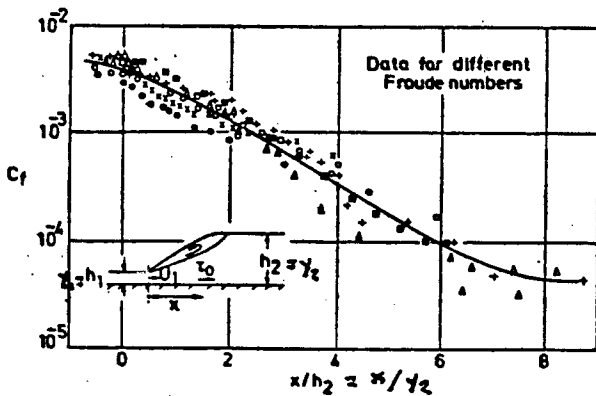


FIGURA Nº 10.1

$\tau_0$  = Esfuerzo de corte en el fondo a una distancia  $x$  desde el inicio del Resalto

$\rho = \frac{\gamma}{g}$  Densidad del agua

$h_2 = y_2$  Calado Conj. Subcrítico

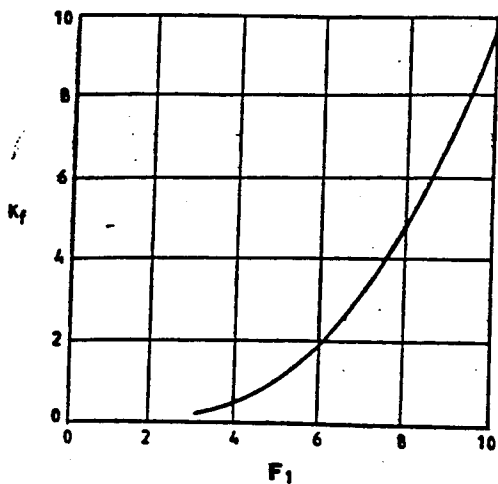
$U_1$  = Velocidad Supercrítica a la entrada del r.h.

Medidas para R.H. formado aguas abajo de una compuerta ( $\beta = 1$ )

ENCOTRÓ LA FUERZA DE CONTORNO POR UNIDAD DE ANCHO POR LA INTEGRACIÓN DE LOS PERFILES MEDIDOS DE LOS ESFUERZOS DE CORTE, COMO  $F_B = \int_0^{L_1} \tau_0 dx$  EXPRESANDO  $F_B$  COMO:

$$F_B = K_f \rho g y_1^2 / 2 \quad (12.1)$$

$K_f$  - Coeficiente de fricción en el contorno, evaluado como una función de  $F_1$ , como se indica en la fig. (10.2).



**FIGURA N° 10.2**

No es muy lógico que  $K_f$  esté solamente relacionado con  $F_1$ .

Sería de esperar que  $K_f$  debería estar relacionado con  $R$  al menos en un cierto rango.

\* "POR TANTO ESTE ASPECTO NECESITA UN MÁS AMPLIO ESTUDIO"

INCLUYENDO LA FRICCIÓN DEL CONTORNO EN LA ECUACIÓN DEL MOMENTUM PARA UN CANAL RECTANGULAR Y HORIZONTAL, TENEMOS:

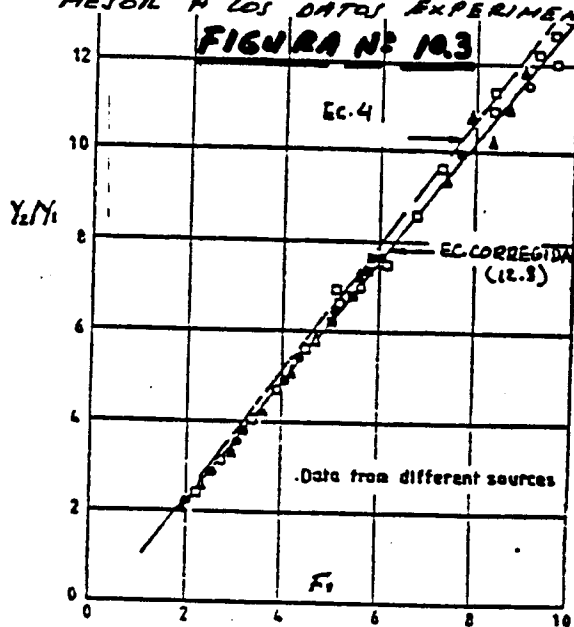
$$\frac{\rho g y_1^2}{2} - \frac{\rho g y_2^2}{2} - F_B = \rho g (y_2 - y_1) \quad (12.2)$$

COMBINANDO LAS EC. (12.1) y (12.2) y SIMPLIFICANDO:

$$\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^3 - \frac{y_2}{y_1} (1 - K_f + 2F_1^2) + 2F_1^2 = 0 \quad (12.3)$$

Esta Ec. se reduce a la Ec. (4) si  $K_f = 0$

RAJARATNAM PROPONE EL USO DE ESTA ECUACIÓN CORREGIDA QUE AJUSTA MEJOR A LOS DATOS EXPERIMENTALES. VER FIG. (10.3).



Sin embargo Bahkmeteff y Natzke, Nagaratnam, Siao, Bliss y Chu, y otros investigadores, trabajando aparentemente con una distribución de velocidades a la entrada diferentes a los experimentos de Rajaratnam, encuentran un buen acuerdo de los datos experimentales con la Ec. (4).

POR ESTA RAZÓN SE USA CORRIENTEMENTE LA EC. (4) PARA LOS CÁLCULOS DEL RESALTO HIDRÁULICO.



\* EFECTO DE LA DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES SOBRE LA RELACIÓN DE LOS CALADOS

EN EL CUERPO DEL RESALTO SE PRODUCEN ACCIONES DE ESFUERZO CORTANTE, TANTO EN LA PARTE SUPERIOR (TURBULENCIA), COMO EN EL FONDO (EFECTO DEL CONTORNO). POR TANTO EL PERFIL DE VELOCIDADES PRESENTA DOS ZONAS MUY DIFERENCIADAS: FLUJO HACIA ATRÁS Y FLUJO HACIA ADELANTE, COMO PUEDE VERSE EN LA FIG. (11.1)

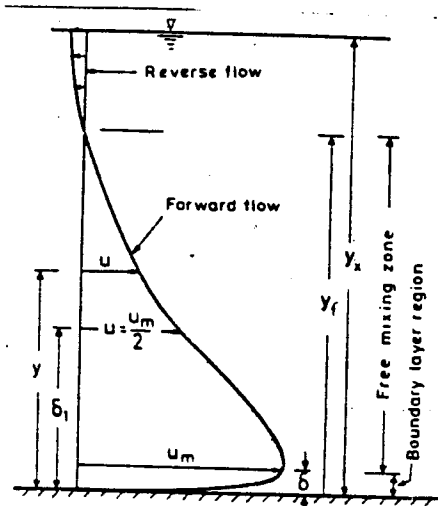


FIGURA Nº 11.1

ZONA DE FLUJO HACIA ADELANTE  
REGIÓN DE LIBRE MEZCLA ( $\delta < y < y_f$ )

$$\frac{u}{u_m} = f(y/\delta) \left[ \begin{array}{l} u = \frac{u_m}{2} \text{ cuando } y = \delta \\ \frac{u_m}{v_i} = f\left(\frac{x}{y_i}\right); \frac{\delta_i}{y_i} = f\left(\frac{x}{y_i}\right) \end{array} \right.$$

REGIÓN DE CAPA DEL CONTORNO ( $0 < y < \delta$ )

$$\frac{u - u_m}{u^*} = f(y/\delta) \left[ \begin{array}{l} u^* = \sqrt{C_0/\rho} \\ u = u_m \text{ cuando } y = \delta \approx 0,16 \delta_i \end{array} \right.$$

EN LA REGIÓN DE LIBRE MEZCLA EL AIRE ESTÁ ENTRANDO AL RESALTO DEBIDO AL ROMPIMIENTO DE LAS ONDAS SOBRE LA SUPERFICIE DE LOS RONLLOS. ESTE AIRE DEJA EVENTUALMENTE EL FLUJO AGUAS ABAJO DEL RESALTO EN FORMA DE BUBUJAS.

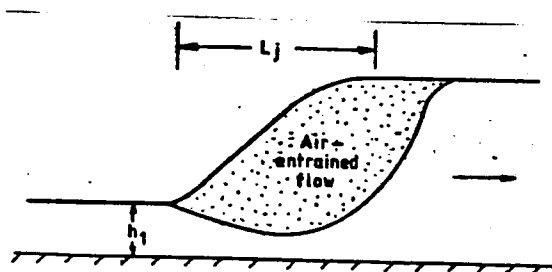


FIGURA Nº 11.2

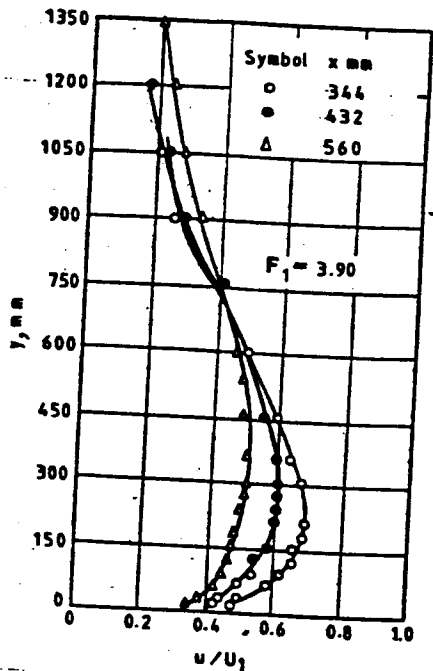
MEDICIONES DE RAJARATNAM INAICAN QUE LA REGIÓN DE FLUJO CON AIRE ES MÁS GRANDE QUE LA LONGITUD DEL RESALTO, COMO SE INAICA EN LA FIGURA (11.2). LA CONCENTRACIÓN PROMEDIO DE AIRE EN UNA SECCIÓN VERTICAL SE INCREMENTA RÁPIDAMENTE DESDE EL COMIENZO DEL RESALTO HASTA UN VALOR MÁXIMO  $C_m$  EN UNA SECCIÓN

APROXIMADAMENTE DE  $\frac{h_2}{2}$  A  $2\frac{h_2}{2}$  Y LUEGO DECAECE HASTA CERO CASI LINEALMENTE EN UNA SECCIÓN UN POCO POR DEBAJO DEL FINAL DEL RESALTO. ESTA MÁXIMA CONCENTRACIÓN  $C_m$  EN PORCENTAJE DE VOLUMEN LA EXPRESA COMO:

$$C_m = F_1^{1.35} \quad (13.1)$$

SECCIONES

LOS PERFILES DE VELOCIDAD SOBRE DIFERENTES DENTRO DEL RESALTO SE MUESTRAN PARA UN  $F_1 = 3.90$  EN LA FIG. (11.3)

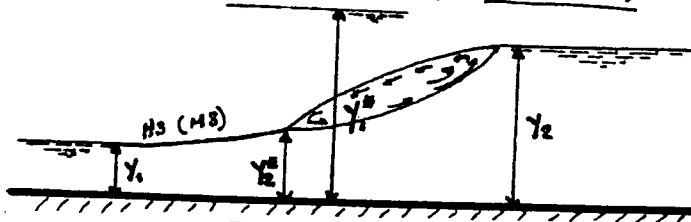


PODEMOS OBSERVAR:

- No uniformidad considerable, aunque cuando se aproxima al final del resalto tiende a ser menos no uniforme
  - $\beta = 1$  en la sección de entrada es razonable para flujo completamente desarrollado en esta sección.
  - En la sección final del resalto es evidente que  $\beta > 1$ . Pero no se cometen grandes errores si suponemos  $\beta = 1$ , puesto que la contribución al flujo del momentum en esta sección es pequeña.
- \*\* SE CUMPLE HIPÓTESIS DE DISTRIBUCIÓN UNIFORME DE VELOCIDADES EN EL RESALTO CLÁSICO \*\*

**FIGURA Nº 11.3**

- RESALTO RECHAZADO ( $y_1^* > y_2$ )



**FIGURA Nº 11.4**

- Líneas de flujo no son paralelas en la sección de entrada  $\Rightarrow$  Distribución no uniforme de velocidad  $\Rightarrow \beta \neq 1$
  - Deben considerarse Efectos de Fluctuación Turbulenta.
- \* ESTAS CONSIDERACIONES TIENEN EFECTOS ONUSOS \*

LEUTNEUSER Y KARTHA (ASCE 1972) LLEVARON A CABO UN ESTUDIO SEMIEMPIRICO DE RESALTOS HIDRÁULICOS RECHAZADOS AGUAS ABAJO DE UNA COMPUERTA. LA LONGITUD DE LA CURVA M3 FUE CONTROLADA CON EL PROPÓSITO DE OBTENER PERFILES DE FLUJO TOTALMENTE DESARROLLADOS EN LA SECCIÓN DE ENTRADA. DE ESTOS EXPERIMENTOS OBTUVIERON LA EXPRESIÓN QUE INCLUYE LOS EFECTOS DE FLUCTUACIÓN TURBULENDA EN LA DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDAD EN LAS SECCIONES EXTREMAS DEL RESALTO.

$$F_1^2 = \frac{y_2}{y_1} \left( \frac{y_2^2}{y_1^2} - 1 \right) \frac{1}{2.06 \left( \frac{y_2}{y_1} - 1 \right) - 0.0244 \frac{y_2^2}{y_1^2}}$$

(13.2)

- ESTA EXPRESIÓN (EC. 12.2) PROPORCIONA VALORES INFERIORES DE  $y_2$  A LOS DADOS POR LA EC. (4).

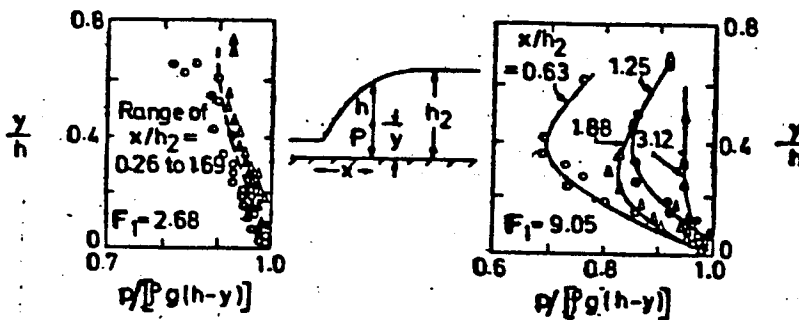
$$\text{Si } F_1 = 12 \Rightarrow y_2 \approx 10\% y_2 \text{ (EC. 4)}$$

- ESTA DIFERENCIA ES TANTO MÁS PEQUEÑA CUANTO MENOR ES EL  $F_1$
- PARA RESALTOS HIDRÁULICOS CON FLUTO SIN DESARROLLO LOS DATOS DE LEUTHEUSSER Y KARTHA MUESTRAN UN MEJOR ACUERDO CON LA EC. (4) QUE CON LA EC. (12.3) PROPUESTA POR RAJARAMAN.

\* "LOS EFECTOS DE FRICCIÓN EN EL CONTORNO Y LA DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES ESTÁN RELACIONADOS EN ALGUNA FORMA, PERO SIN EMBARGO NO ESTÁN COMPLETAMENTE ENTENDIDOS."

\* EFFECTO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA PRESIÓN SOBRE LA RELACIÓN DE LOS CALADOS

LA FIGURA (12.1) INDICA LA VARIACIÓN DE LA PRESIÓN EN ALGUNOS PUNTOS DENTRO DEL RESALTO, EN FORMA ADIMENSIONAL PARA DOS NÚMEROS DE FROUDE DIFERENTES. LAS MEDIDAS SE HAN TOMADO A LO LARGO DE DIFERENTES SECCIONES VERTICALES Y A DIFERENTES LONGITUDES DEL RESALTO.



**FIGURA N° 12.1**

PODEMOS OBSERVAR:

$\frac{p}{\rho g(h-y)} = 1$  En toda la vertical si la distribución de presiones fuera hidrostática (hipótesis asumida para las secciones inicial y final del resalto en la deducción de la Ec. (4))

- La distribución hidrostática de presiones se cumple para zonas muy cercanas al fondo.

- Hay desviaciones muy grandes de la distribución hidrostática para valores de:

\*  $F_1$  altos

\*  $x/h_2$  pequeños

- La presión es más pequeña que la Hidrostática, e indican un valor mínimo entre  $y = 0.2h$  a  $0.5h$  para  $F_1$  altos

- La distribución tiende a ser hidrostática hacia la sección final del Resalto.

- La máxima intensidad de fluctuación de presión dentro del Resalto ocurre entre  $8h_1$  a  $16h_1$  desde su inicio.

Su máximo valor es tan alto como:

$$\sqrt{p'^2} \approx 0,085 \rho U_1^2 / 2$$

[Abdul Khandev, M.H. and ELANCO K. "Journ. of Hyd. Research 1974"]

#### CONCLUSIONES:

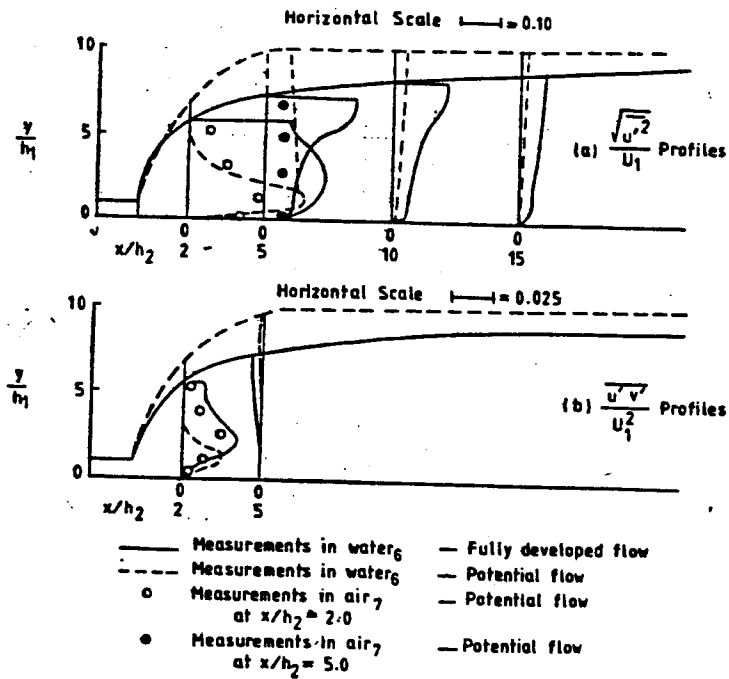
\* LA HIPÓTESIS DE DISTRIBUCIÓN HIDROSTÁTICA DE PRESIONES PARA LA DEDUCCIÓN DE LA EC.(4) ES RAZONABLE PARA LA SECCIÓN INICIAL DEL RESALTO.

\*\* ES CUESTIONABLE EN LA SECCIÓN AGUAS ABAJO DEL RESALTO. PERO NO INTRODUCE GRANDES ERRORES PORQUE LA CONTRIBUCIÓN DE LOS TÉRMINOS DE PRESIÓN EN ESTA SECCIÓN EN LA EC. DEL MOMENTUM ES PEQUEÑA.

\*\*\* " SE CUMPLE LA HIPÓTESIS DE DISTRIBUCIÓN HIDROSTÁTICA DE PRESIONES EN EL RESALTO CLÁSICO."

MEASUREMENTS OF THE TURBULENCE FLUCTUATIONS OF THE VELOCITIES AND OF THE STRESS CUTS IN A HYDRAULIC JUMP AGUAS ABAJO DE UNA COMPUERTA TANTO PARA FLUJO POTENCIAL Y TOTALMENTE DESARROLLADO EN LA SECCIÓN DE ENTRADA, FUERON REALIZADOS POR RISH Y LEUTSUNER USANDO "ANEMOMETRIA DE FILMO CALIENTE" (HOT-FILM ANEMOMETER) [JOURN. OF HYD. RESEARCH. VOL 10, Nº 4, 1972].

LAS VARIACIONES DE LAS CANTIDADES ADIMENSIONALES  $\sqrt{u'^2}/U_1$  Y  $u'v'/U_1^2$  SOBRE LAS DIFERENTES ALTURAS LOCALIZADAS DENTRO DEL RESALTO PARA  $F_1=6$ , SE INDICAN EN LA FIG. (12.2)



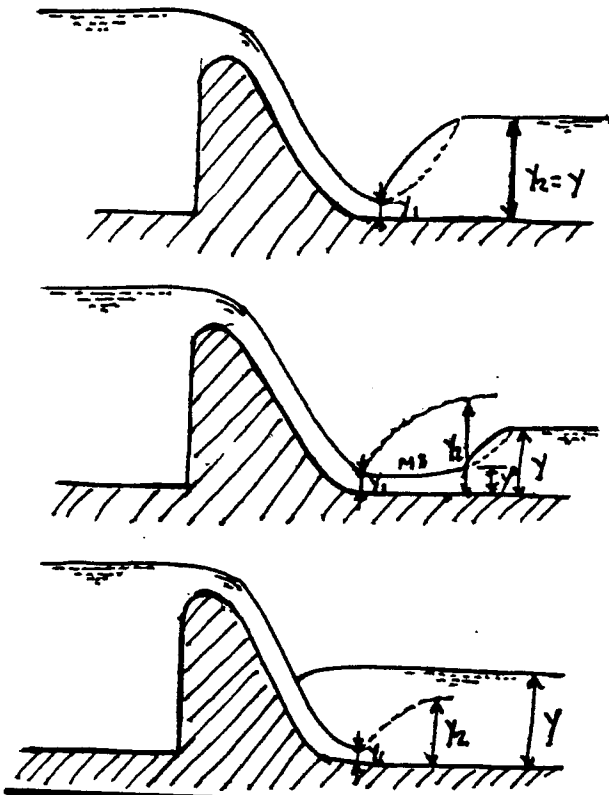
**FIGURA 12.2**

**\* OBSERVACIONES:**

- LAS INTENSIDADES DE TURBULENCIA DE FLUJO POTENCIAL SON MÁS PEQUEÑAS QUE CON FLUJO TOTALMENTE DESARROLLADO EN TODAS LAS SECCIONES
- EN AMBOS CASOS PARA  $x/h_2 \geq 5$  EL ESFUERZO DE CORTE ES PRÁCTICAMENTE CERO SOBRE UNA MAYOR PARTE DE LOS CALADOS. (LA SUPERFICIE FUERTE DE LOS ADBILLOS CAUSAN UNA MAYOR TURBULENCIA CERCA DE LA SUPERFICIE QUE CERCA DEL FONDO.)
- LAS MEDIDAS DE ROUSE, H, SIAO, T.T Y NAGARATNAM, S [ASCE VOL. 124, 1959] DE LAS CARACTERÍSTICAS TURBULENTAS DEL RESALTO, SIMULADO EN UN TÚNEL DE VIENTO PARA UN  $F_1=6$ , INDICAN SOLAMENTE UN ACUERDO CUALITATIVO CON LAS MEDIDAS DE RESH Y LEUTHEUSSER. LAS DIFERENCIAS CUANTITATIVAS SE DEBERÍAN ENTRE OTRA CAUSAS:
  - DIFERENTE NÚMERO DE REYNOLDS EN LOS DOS EXPERIMENTOS
  - INCOMPLETA SIMULACIÓN DEL RESALTO EN EL MODELO DEL TÚNEL DE VIENTO.

## 2.1.2 CONDICIONES DEL CALADO AGUAS ABATO

**FIGURA N° 13**



### RESALTO IDEAL

"DIRECTAMENTE CON EC. N° 4"

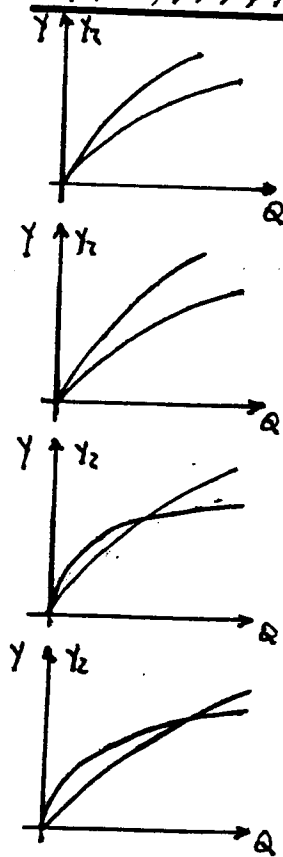
- Pequeña diferencia en valores actuales y Coef. Hid. Supuestos puedan causar que el resalto se mueva hacia abajo
- ⇒ Necesario alguna herramienta para controlar la posición del resalto.

### RESALTO RECONSTRUIDO

Mecanismo de pérdida de Energía por medio de una CUR (M3), hasta encontrar al conjugado de  $y$  ( $y^2$ ).  
"DEBE EVITARSE"

### RESALTO SUMERGIDO

- CASO MÁS SEGURO EN EL DISEÑO
- Poca Eficiencia?



USO DE ESCALONES PARA FORMAR UN LECHO AMORTIGUADOR

PARA AFISCAR EL PULSO:

- LOSA INCLINADA SOBRE EL NIVEL DEL LECHO DEL CANAL
- CAIDA EN EL PISO DEL CANAL
- $y > y_2$  → DISIPACIÓN DE ENERGÍA CON TRANSPÓN SUMERGIDO

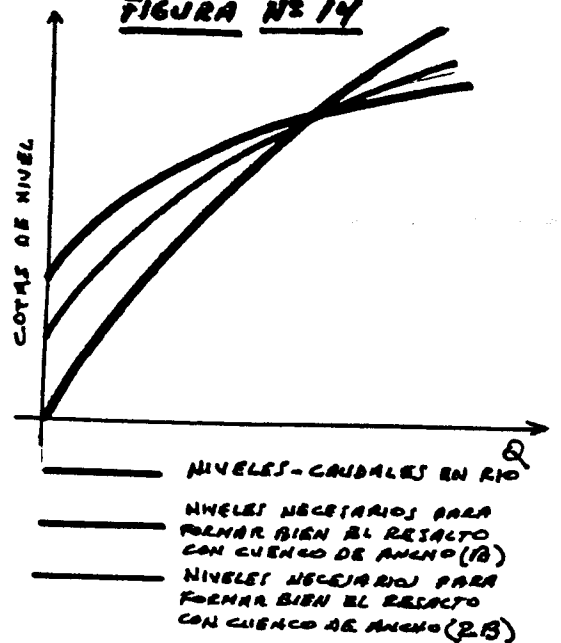
- LECHO AMORTIGUADOR PARA DESCARGAS BAJAS

- LOSA INCLINADA COMBINADA CON EL LECHO PARA DESCARGAS ALTAS

- INCREMENTAR LA PROFUNDIDAD AGUAS ABATO PARA PROVEER UN COLCHÓN AMORTIGUADOR PARA DESCARGAS ALTAS.

**FIGURA N° 15**

**FIGURA N° 14**



NIVELES-CAUDALES EN RÍO

NIVELES NECESARIOS PARA FORMAR BIEN EL RESALTO CON CUENCO DE ANCHO (A)

NIVELES NECESARIOS PARA FORMAR BIEN EL RESALTO CON CUENCO DE ANCHO (B)

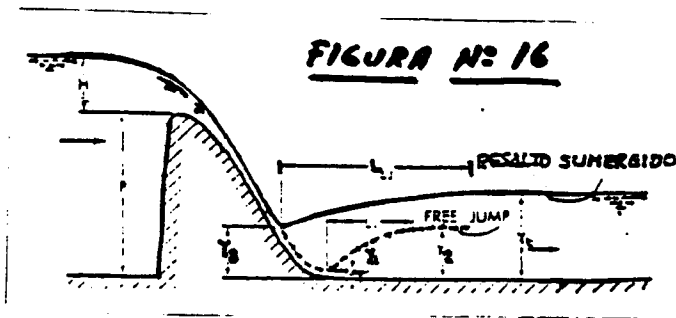
(B):  $Q_{req.}$  PARA NUEVO CALADO

$Q > Q_{req.}$  . Calado INSUFICIENTE

(2A): SE ADAPTA MEJOR A NIVELES DEL RÍO

$Q > Q_{req.}$  . ~~RESALTO~~

### 2.1.3 RESALTO SUMERGIDO



$$y_2 < y_t$$

$y_2 \rightarrow$  Conjug. de  $y_1$

$y_t \rightarrow$  Cond. Aguas Abajo

$y_3 \rightarrow$  Calad. Sumergencia

HA SIDO COMPROBADO QUE EL RESALTO SUMERGIDO VIENE ESPECIFICADO POR EL  $F_1$  Y UN FACTOR DE INMERSIÓN, DADO POR:

$$S = \frac{y_t - y_2}{y_2} \quad (14)$$

DE ESTA FORMA, POR APLICACIÓN DEL TEOREMA DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO QUEDA DEFINIDO EL FACTOR  $\psi = y_3/y_1$  POR LA SIGUIENTE ECUACIÓN:

$$\psi = \left( \frac{(1+S)^2}{4} (\sqrt{1+8F_1^2} - 1)^2 - 2F_1^2 + \frac{4F_1^2}{(1+S)(\sqrt{1+8F_1^2} - 1)} \right)^{1/2} \quad (15)$$

HIPÓTESIS: DISTRIBUCIÓN HIDROSTÁTICA DE PRESIONES EN LAS PROXIMIDADES DEL LECHO (CONTRASTADO EXPERIMENTALMENTE)  
SUFICIENTEMENTE VALIDA PARA CUALQUIER VALOR DE "S".  
(ES MÁS EXACTA LA N. CUANTO MAYOR ES "S")

#### - LONGITUD DEL RESALTO

PUEDE OBTENERSE POR MEDIO DE LA SIGUIENTE ECUACIÓN EMPÍRICA, QUE INDICA LA CONSIDERABLE MAYOR LONGITUD DE ESTE TIPO DE RESALTOS RESPECTO A LA DE LOS RESALTOS CLÁSICOS.

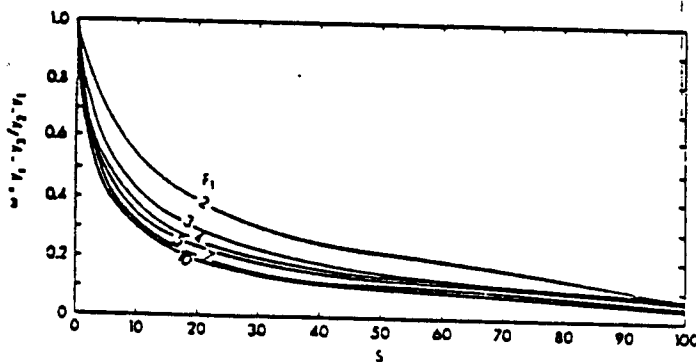
$$\frac{L_s}{y_2} = 4.95 + 6.1 \quad (16)$$

**- ALTURA RELATIVA DEL RESALTO**

SE DEFINE POR EL FACTOR  $\omega = \frac{Y_2 - Y_3}{Y_2 - Y_1}$

Y QUE VIENE DADA POR LA ECUACIÓN N° 17, O LO QUE ES IGUAL POR EL GRÁFICO DE LA FIGURA N° 17.

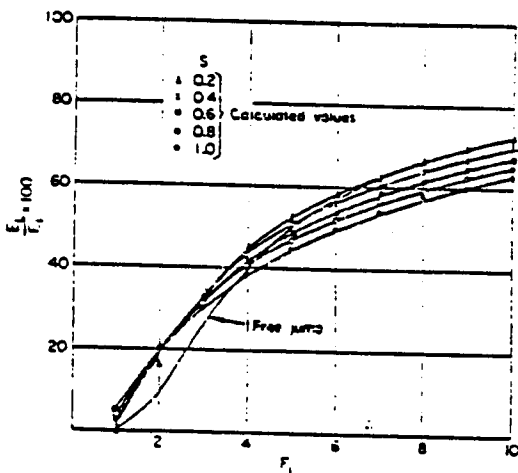
$$\omega = \frac{(1+s)(\sqrt{1+8F_1^2}-1)-2\psi}{(\sqrt{1+8F_1^2}-3)} \quad (17)$$



**FIGURA N° 17**

**- ENERGÍA RELATIVA DISIPADA**

$$\frac{E_L}{E_1} = \frac{\left(\psi - \frac{(1+s)}{2}(\sqrt{1+8F_1^2}-1)\right) - \frac{F_1^2}{2} \left(1 - \frac{4}{(1+s)^2(\sqrt{1+8F_1^2}-1)^2}\right)}{\psi + \frac{F_1^2}{2}} \quad (18)$$



**FIGURA N° 18**

- SEGÚN SE OBSERVA EN LA FIGURA N° 18 SE AJUSTA EXCELENTEMENTE A LOS DATOS EXPERIMENTALES.
- CONTRA LO QUE ANTIGUAMENTE SE VENÍA SUPONIENDO, LA PÉRDIDA DE ENERGÍA EN UN RESALTO SUMERGIDO PUEDE SER MAYOR QUE LA CORRESPONDIENTE A UN RESALTO CLÁSICO.

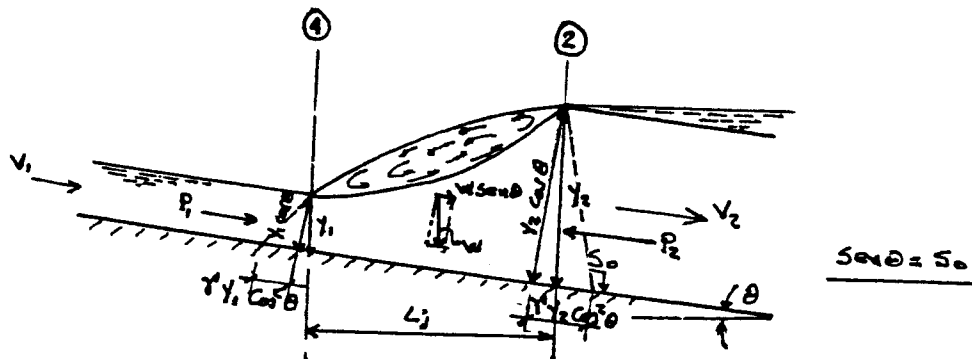


### 2.1.4. RESALTO SOBRE SOLERA INCLINADA

PARA CONSEGUIR QUE EL CALADO DE AGUAS ABAJO CONCIDA SIEMPRE CON EL DE APROXIMACIÓN, ALCUNAS VECES SE DISPONE EL CUENCO DE FORMA QUE EN LA PRIMERA PARTE DE SU SOLERA NO SEA HORIZONTAL SINO INCLINADA. DE ESTA FORMA, EL PARAMENTO DE LA PRESA VETEDERO ENLAZA CON UN PLANO DE MENOR PENDIENTE, PARA DESPUÉS ACABAR CON SOLERA HORIZONTAL.

POR TANTO CONSIDERAMOS  $W \sin \theta$  DEL PESO EN LA EXPRESIÓN N° 2 (CANT. MOV.).

#### - RESALTO DESARROLLADO TOTALMENTE SOBRE LA SOLERA INCLINADA



**FIGURA N° 19**

LA ECUACIÓN N° 2 DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO CONDUCE A LA SIGUIENTE EXPRESIÓN DE CALADOS CONJUGADOS:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8G_1^2} - 1) \quad (19)$$

EN DONDE:

$$G_1 = \frac{F_1}{\sqrt{\cos \theta - K L_j \tan \theta} (y_2 - y_1)}$$

$$W = K \rho g L_j \left( \frac{y_1 + y_2}{2} \right) \cos \theta$$

$F_1$  = Froude en Sección ①

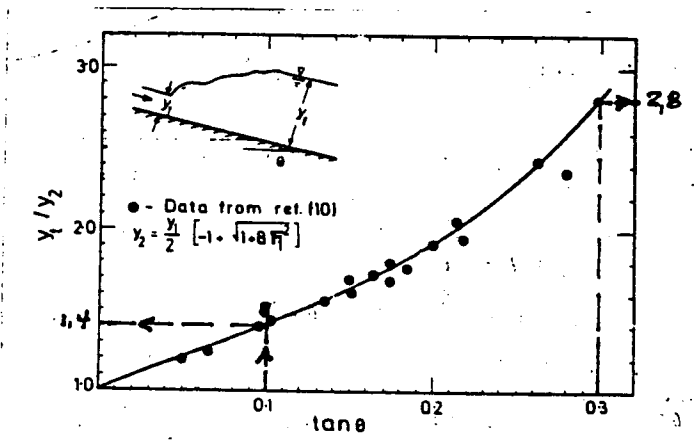
$K$  - Considera el efecto de la curvatura del flujo. Estimarse experimentalmente.

- CALADO CONJUGADO ( $y_t$ )

BAJADOS EN LOS ESTUDIOS DEL USBR, SE HA LLEGADO A ESTABLECER UNA FUNCIÓN ENTRE LA RELACIÓN DE LOS CONJUGADOS DE SOLERA ENCLINADA ( $y_t$ ) Y SOLERA HORIZONTAL ( $y_2$ ), CON EL ÁNGULO DE ENCLINACIÓN:

$$\frac{y_t}{y_2} = f(\theta)$$

LA VARIACIÓN Y VALORES CARACTERÍSTICOS PUEDEN VERSE EN LA FIGURA Nº 20



$$\frac{y_t}{y_2} = 1,4 \rightarrow \tan \theta = 0,10$$

$$\frac{y_t}{y_2} = 2,8 \rightarrow \tan \theta = 0,30$$

FIGURA Nº 20

- LONGITUD DEL REJALTO ( $L_j$ )

PARA RANGOS DE  $F_1$  entre 4 y 13  $L_j/y_2$  SON INDEPENDIENTES DE  $F_1$

$$4 < F_1 < 13 \Rightarrow \frac{L_j}{y_2} = f(\theta)$$

APROXIMADAMENTE  $\rightarrow \frac{L_j}{y_2} = 6,1 + 4,0 \tan \theta$  (20)

( $4,5 < F_1 < 13$ )

LOS ANÁLISIS DE ELEVATORSKI EN FUNCIÓN DE LOS DATOS DEL USBR, INDICAN QUE:

$$L_j = m_s (y_t - y_1) \quad (21)$$

$$m_s = f(\theta)$$

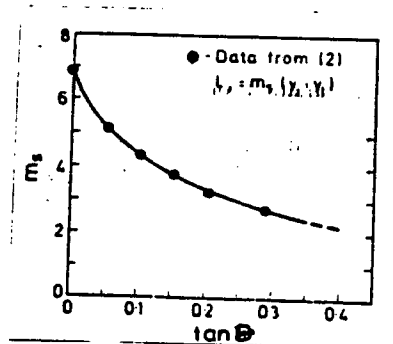
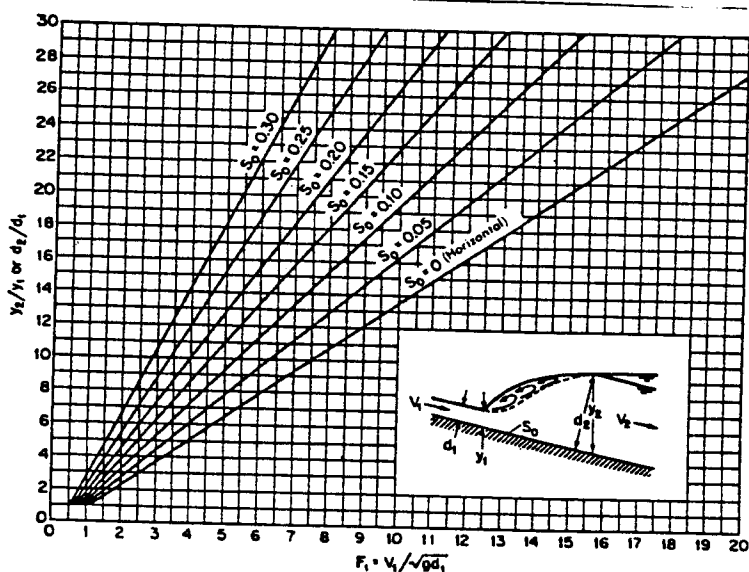


FIGURA 21

EN RESUMEN, LAS CARACTERÍSTICAS DEL RESALTO PUEDEN OBTENERSE MEDIANTE LOS GRÁFICOS EXPERIMENTALES DE LAS FIGURAS NRS. 22 y 23 (YARNELL: 1936 y KINSLATER: 1938), O BIEN MEDIANTE LAS ECUACIONES EMPÍRICAS SIGUIENTES DEVIDAS A RAJARATNAM:

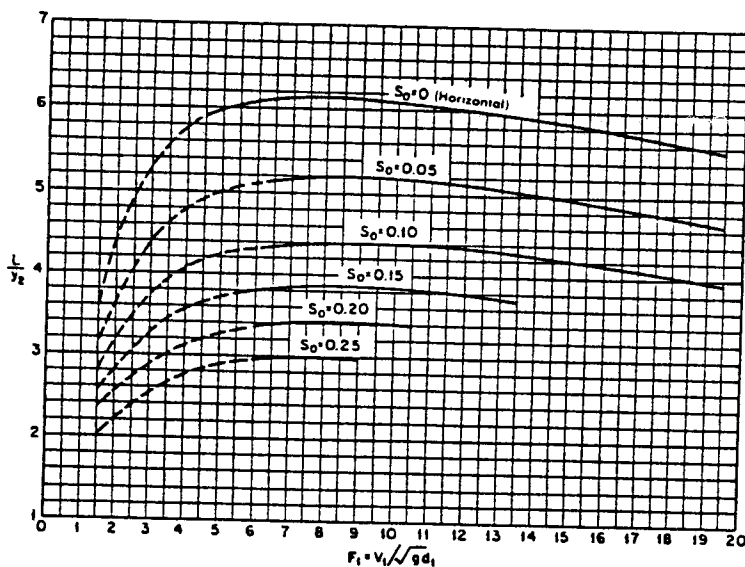
$$G^2 = K_1^2 \times F_1^2 \quad (22)$$

$$K_1 = 10.0^{0.027 \theta} \quad [\theta \text{ en GRADOS}] \quad (23)$$



Relaciones experimentales entre  $F_1$  e  $y_2/y_1$  o  $d_2/d_1$  para saltos en canales con pendiente.

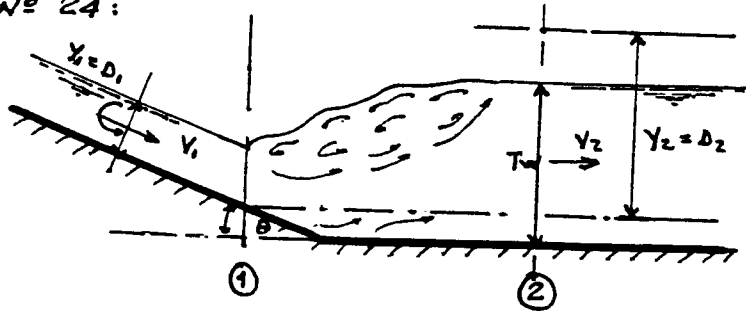
**FIGURA N° 22**



Longitud en términos de profundidad secante de saltos en canales en pendiente. (U.S. Bureau of Reclamation [34].)

**FIGURA N° 23**

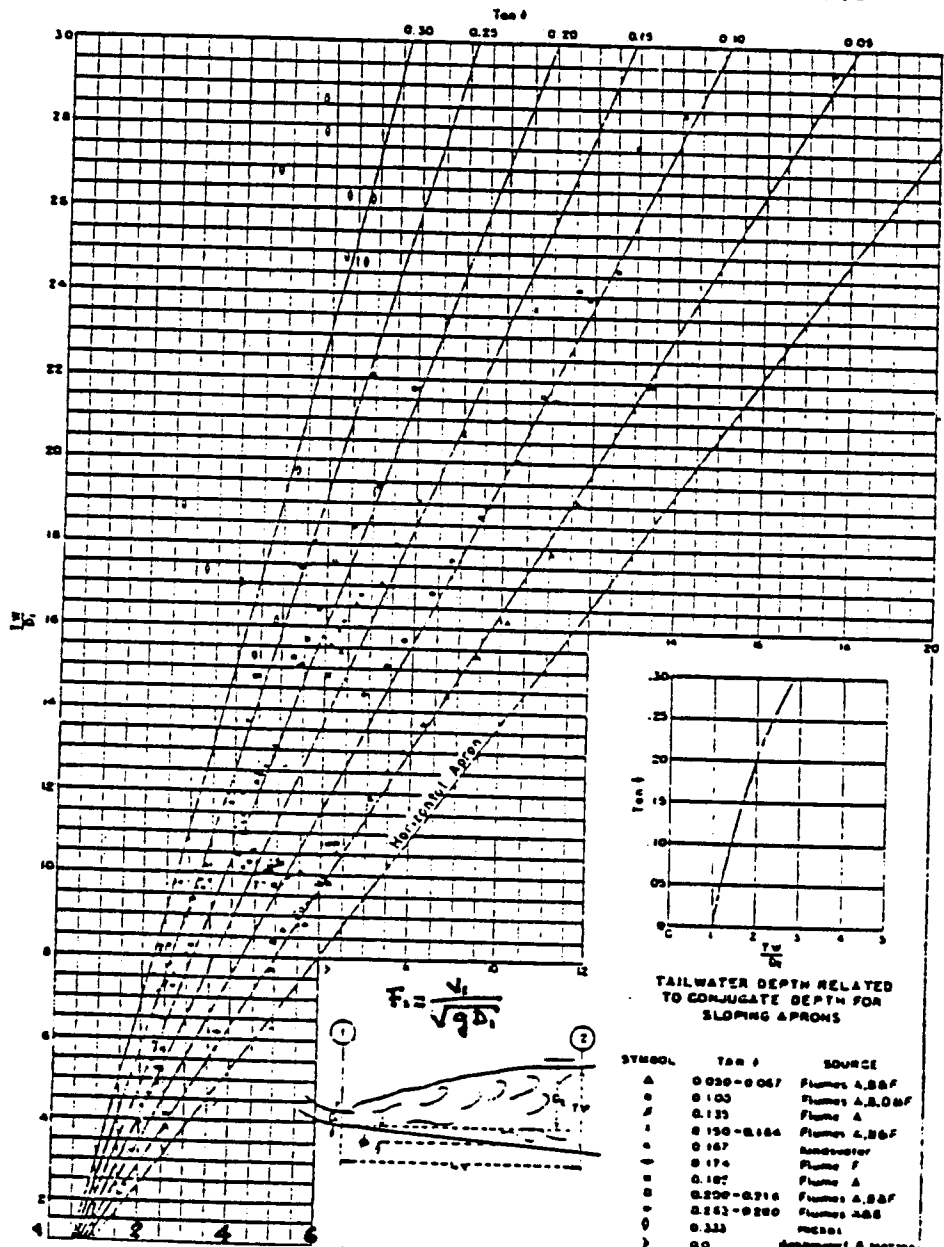
- RESALTO DESARROLLADO PARCIALMENTE EN EL TRAMO DE SOLERA HORIZONTAL  
 EL RESALTO EN UN CUENCO DE AMORTIGUACIÓN INCLINADO NO TIENE PORQUÉ  
 PRODUCIRSE EN LA CONDICIONES YA ESPECIFICADAS, YA QUE PUEDE  
 PRODUCIRSE EN EL TRAMO DE SOLERA HORIZONTAL, SEGÚN SE INDICA EN  
 LA FIGURA N° 24:

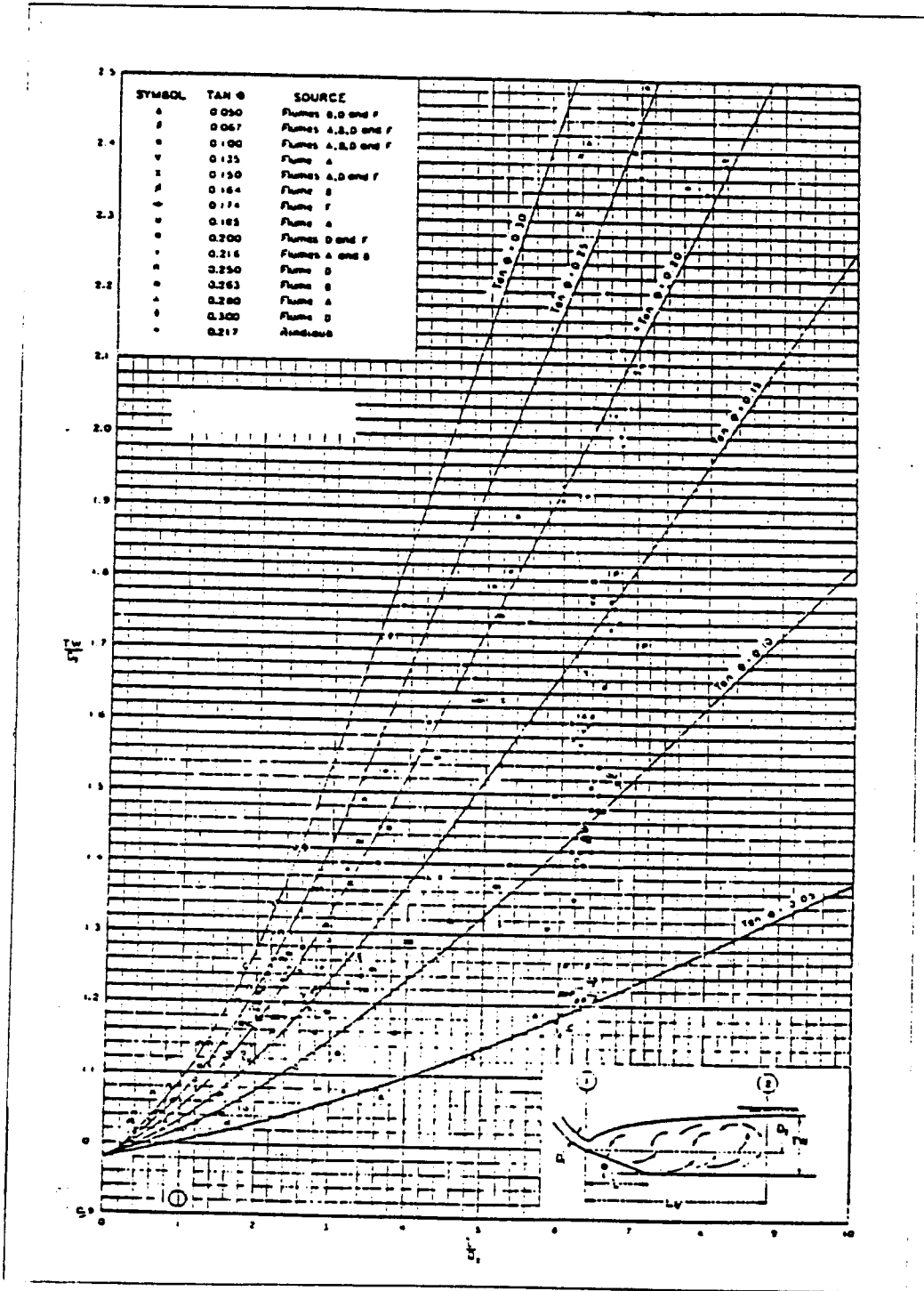


**FIGURA N° 24**

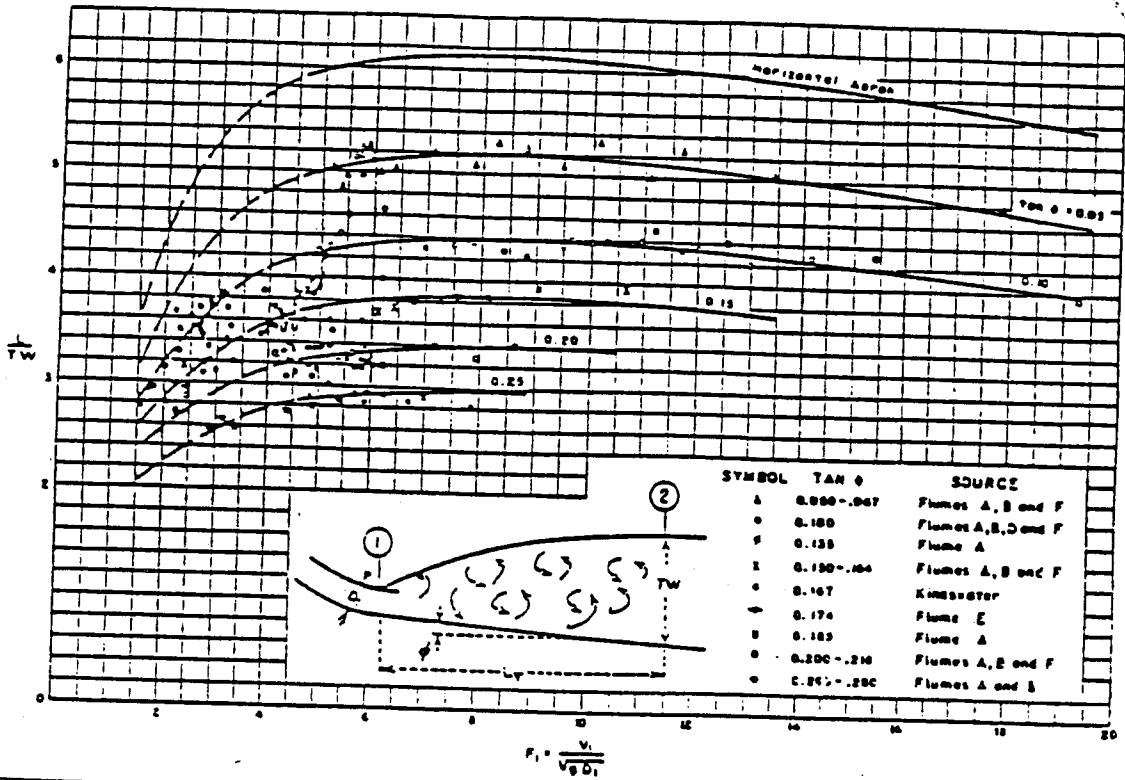
POR ELLO, PARA LA RESOLUCIÓN DEL RESALTO EN CUENCO INCLINADO, SUELE  
 RECURRIRSE A LAS FIGURAS 25, 26, 27 y 28 PROPUESTAS POR EL USBR

**FIGURA N° 25**

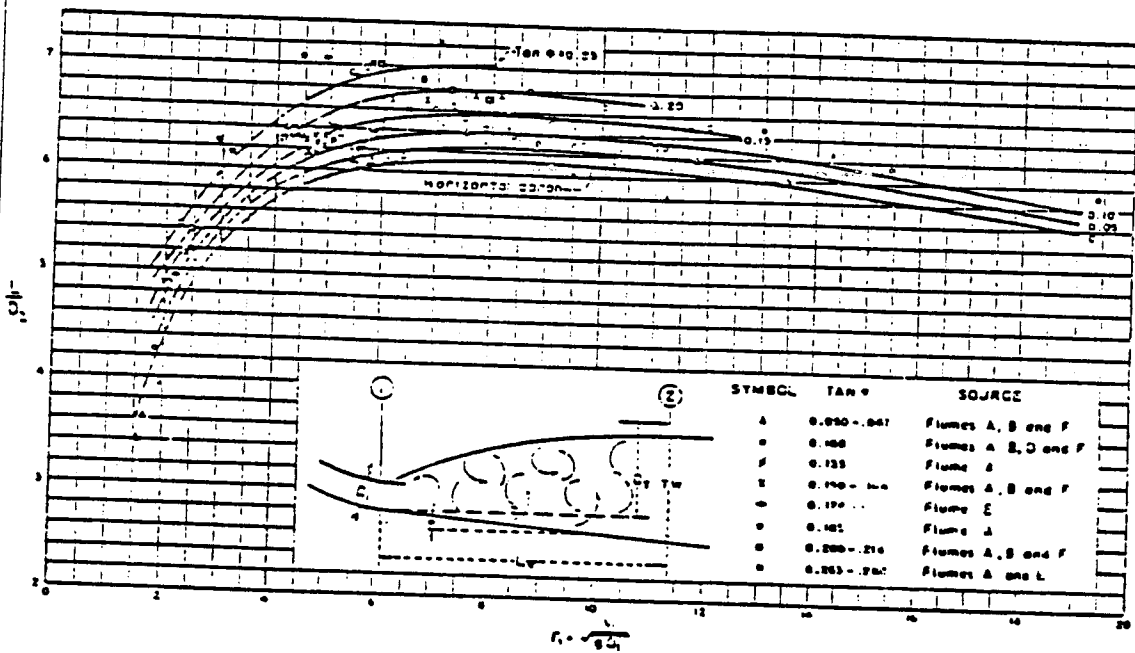




**FIGURA N°26**



**FIGURA Nº 27**

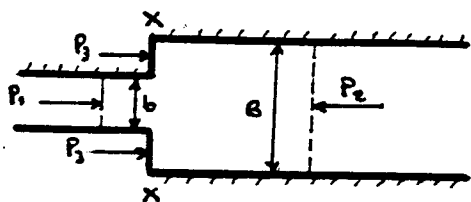


**FIGURA Nº 28**

### 2.1.5.1 RESALTO EN CANALES RECTANGULARES CON EXPANSIÓN

CUANDO LAS CARACTERÍSTICAS DEL CAUCE SON TALES QUE NO PROPORCIONAN SUFICIENTE CALADO PARA UN CORRECTO DESARROLLO DEL RESALTO, PUEDE RECURRIRSE A EXCAVACIONES EN EL CUENCO O A LA DISPOSICIÓN EN EL MISMO DE BIENTES REFLECTORES, BLOQUES DE IMPACTO, ETC. INCLINACIÓN DEL PILO. NO OBTANTE, SICHAS MEDIDAS A VECES RESULTAN INSUFICIENTES O ECONÓMICAMENTE INVIALES, POR LO QUE SE RECURRE AL DISEÑO DE CUENCOS DIVERGENTES.

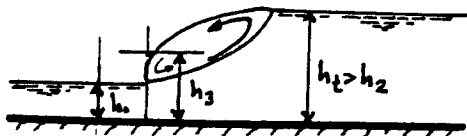
#### RESALTO EN UNA EXPANSIÓN BRUSCA



PLANTA DE LA EXPANSIÓN



(a) RESALTO LIBRE



(b) RESALTO SUMERGIDO

**FIGURA Nº 29.1**

LA FIGURA 29.1 MUESTRA UNA EXPANSIÓN BRUSCA DESDE UN ANCHO  $b$  A  $B$ . EL RESALTO LIBRE CON SU PIÉ A LO LARGO DE  $X-X$  OCURRIRÁ PARA UN CALADO PARTICULAR  $h_2$ ; VER FIG. (29.1.a). ESTE CALADO PUEDE SER CALCULADO CON LAS ECUACIONES DEL MOMENTUM Y DE LA CONTINUIDAD COMO SIGUE:

$$P_1 + P_3 - P_2 = \rho Q (U_2 - U_1) \quad \text{EC. MOMENTUM}$$

REEMPLAZANDO LOS VALORES PARTICULARES Y APLICANDO LA EC. DE CONTINUIDAD:

$$\frac{\rho g h_1^2}{2} b + \frac{\rho g h_1^2}{2} (B - b) - \frac{\rho g h_2^2}{2} B = \rho Q \left( \frac{Q}{B h_2} - \frac{Q}{b h_1} \right) \quad (29.1)$$

LA ECUACIÓN (24.1) REGRUPADA COMO SIGUE:

$$(h_2^2 - h_1^2) = 2 \left( \frac{U_1^2 b^2 h_1^2}{g B^2 h_2} - \frac{U_1^2 b^2 h_1^2}{g b h_1 B} \right)$$

$$\left( \frac{h_2^2}{h_1^2} - 1 \right) = 2 \left( -F_1^2 \frac{b^2}{B^2} \frac{h_1}{h_2} + F_1^2 \frac{b}{B} \right)$$

DEFINIENDO:

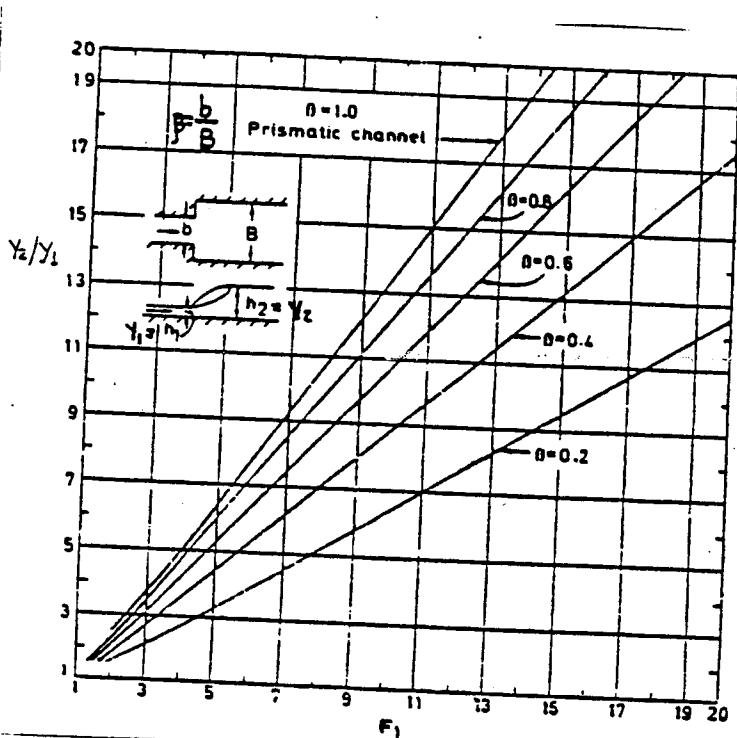
$$\eta_B = h_2/h_1; \quad \beta = b/B$$

$$\eta_B^2 - 1 = 2 F_1^2 (\beta - \beta^2/\eta_B)$$

QUEDANDO FINALMENTE:

$$\eta_B^3 - \eta_B (1 + 2 F_1^2 \beta) + 2 F_1^2 \beta^2 = 0 \quad (24.2)$$

LA SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN (24.2) SE MUESTRA EN FORMA GRÁFICA EN LA FIGURA (29.2)



**FIGURA Nº 29.2**

EL GRÁFICO PONE DE MANIFIESTO LA CONSIDERABLE REDUCCIÓN QUE EXPERIMENTAN LOS CALADOS CONTIGUOS RESPECTO A LOS CUENCOS PRISMÁTICOS.



HERBRAND, K [ "THE SPATIAL HYBRULIC JUMP", JOUR. OF HYD. RESEARCH, VOL. 11, Nº 3, 1973 ] ENCONTRÓ LA SIGUIENTE RELACIÓN EMPÍRICA PARA DETERMINAR EL CALADO CONJUGADO EN UN CANAL CON EXPANSIÓN:

$$\frac{h_2}{h_{2b}} = \beta^{3/8} \quad (24.3)$$

$$\left[ \begin{array}{l} h_{2b} - \text{Calado conjugado para} \\ \text{canal prismático de ancho "b"} \\ \beta = b/B \end{array} \right.$$

ESTA ECUACIÓN PUEDE SER USADA COMO UNA ALTERNATIVA A LA EC. (24.2) Ó A LA FIGURA (29.2).

SI EL CALADO AGUAS ABAJO ES MÁS GRANDE QUE EL CONJUGADO DE  $h_1$ , EL RESALTO SE MOVERÁ HACIA AGUAS ARRIBA. ESTE MOVIMIENTO PUEDE SER IMPEDIDO SI SE COLOCA UNA COMPUERTA EN LA SECCIÓN XX.

EL RESALTO SUMERGIDO COMO SE INDICA EN LA FIGURA (29.1.6) SE OBTENDRÁ EN ESTE CASO. EL CALADO  $h_3$  PUEDE ENTONCES SER OBTENIDO DE LA ECUACIÓN DEL MOMENTUM COMO SIGUE:

$$\frac{\rho g h_3^2}{2} B - \frac{\rho g h_t^2}{2} B = \rho Q \left( \frac{Q}{B h_t} - \frac{Q}{b h_1} \right)$$

$$h_3^2 = h_t^2 - \frac{2Q^2}{gB} \left( \frac{B h_t - b h_1}{B b h_1 h_t} \right)$$

$$\frac{h_3}{h_t} = \sqrt{1 - 2F_t^2 \left( \frac{1}{\beta} \frac{h_t}{h_1} - 1 \right)} \quad (24.4)$$

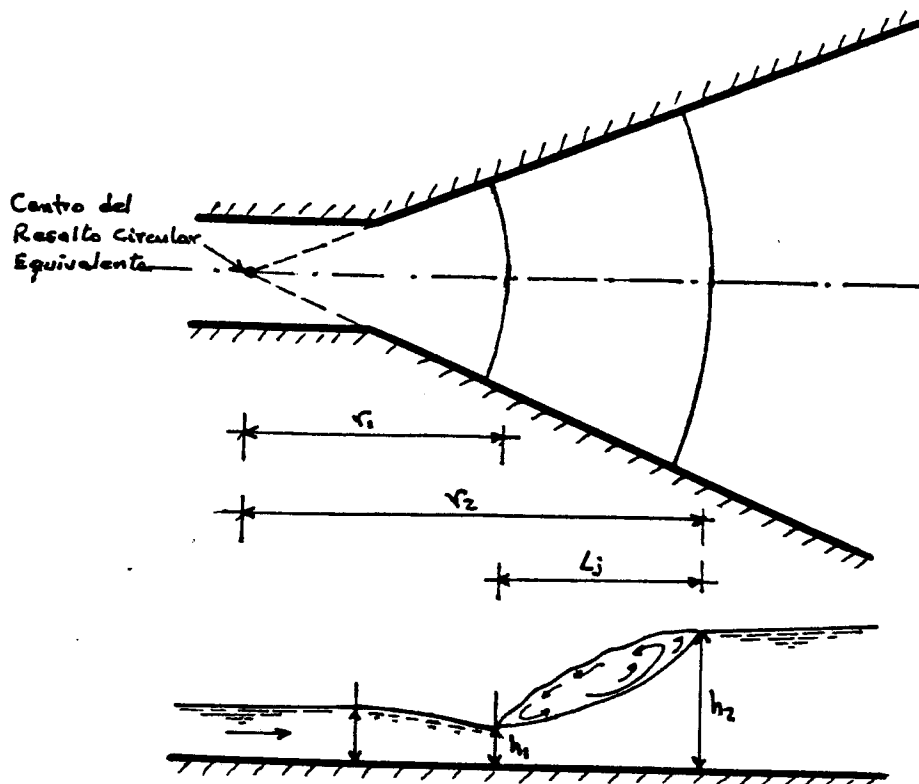
EN LA CUAL:

$$\left[ \begin{array}{l} F_t = \frac{V_t}{\sqrt{g h_t}} - \text{Número de Froude en sección aguas abajo} \\ \beta = b/B - \text{Relación de anchos.} \end{array} \right.$$

### RESALTO EN UNA EXPANSIÓN GRADUAL

EL RESALTO EN UNA EXPANSIÓN GRADUAL Y PAREDES VERTICALES RECTAS, PUEDE SER TRATADO COMO UNA REGIÓN DE UN RESALTO HIDRÁULICO CIRCULAR. MIRAR LA FIGURA (29.3).

EN OTRAS PALABRAS, LAS LINEAS DE FLOJO PUEBEN SER ASUMIDAS RADIALES.



**FIGURA N° 29.3**

CONSIDERANDO ADEMÁS LA SUPERFICIE DEL AGUA DENTRO DEL RESALTO CON FORMA DE UN CUARTO DE ELIPSE (COMO HAN INDICADO LOS EXPERIMENTOS) Y APLICANDO LAS ECUACIONES DEL MOMENTUM Y DE LA CONTINUIDAD, ARGHABHIRAMA Y ABELLA [ASCE, JAN. 1971], DEMOSTRARON QUE:

$$\gamma_0 h_0 = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + B F_c^2} - 1 \right) \quad (24.5)$$

Aquí:  $\gamma_0 = r_2/r_1$ ;  $h_0 = h_2/h_1$ ;  $F_c^2 = (F_1^2 \gamma_0 + C_p)$

DONDE  $C_p$ , ES EL FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA PRESIÓN EN LAS CARAS Y ESTÁ DADO COMO:

$$C_p = \frac{\gamma_0 h_0 (\gamma_0 - 1) \left[ \gamma_0 \left( \frac{h_0^2}{3} + 0.118 h_0 + 0.0480 \right) + 0.5 \right]}{(\gamma_0 h_0 - 1)} \quad (24.6)$$

LA ECUACIÓN EMPÍRICA:

$$L_j / h_1 = 3.70 F_1^{1.35} \quad (24.7)$$

SE AJUSTA CLARAMENTE BIEN CON LOS DATOS EN EL RANGO  $3 \leq F_1 \leq 10$ .

## 2.1.6 RESALTO FORZADO

EL RESALTO HIDRÁULICO PUEDE SER CONTROLADO O AFECTADO POR ESCALONES O UMBRALES DE DIVERSOS DISEÑOS, TALES COMO CAIDAS O SOBREELEVACIONES EN EL FONDO DEL CANAL, POR LA ACCIÓN DE REBORDES DE CRESTA AGUDA O ANCHA, Y POR LA LOCALIZACIÓN DE DIENTES, BLOQUES, EN UN CUENCO DE AMORTIGUACIÓN, ENTRE OTROS.

TEÓRICAMENTE, EL CONTROL DEL RESALTO SE PUEDE ANALIZAR POR LA TEORÍA DEL MOMENTUM, PERO DEBIDO A LA FALTA DE UN CONOCIMIENTO SEGURO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VELOCIDAD, LA CUAL ES NO UNIFORME Y VARÍA DE UN EXTREMO AL OTRO DEL RESALTO, PRODUCIENDO UNA VARIACIÓN DE LA FUERZA SOBRE EL UMBRAL; ESTA TEORÍA NO PREDECE UN RESULTADO MUY AJUSTADO A LA REALIDAD EN LA MAYORÍA DE LOS CASOS, SIENDO NECESARIO PARA EL DISEÑO APOYARSE SOBRE ESTUDIOS EXPERIMENTALES.

DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL SE OBTIENE LA SIGUIENTE FUNCIÓN PARA LOS UMBRALES:

$$\frac{h}{y_1} = f \left( F_1, \frac{x}{y_2}, \frac{y_3}{y_1} \right) \quad (31)$$

$F_1$  = Número de Froude a la entrada

$x$  = Distancia desde el pie del resalto al umbral

$y_1$  = Calado Superc. a la entrada

$y_2$  = Calado aguas arriba del umbral

$y_3$  = Calado aguas abajo del umbral

- Esta función se determina cuantitativamente en modelos
- La posición exacta del resalto  $x$ , controlada por el umbral no se puede determinar analíticamente
- En el estudio del modelo se toma  $\frac{x}{y_2} = \text{cte}$  en cada ensayo.

### 2.1.6.1 RESALTO SOBRE UNA CAIDA ABRUPTA

Si el calado aguas abajo ( $y_3$ ) es más grande que el calado conjugado ( $y_1^*$ ), una caída en el piso del canal puede ser usada para efectar de asegurar un resalto (Esta condición ocurre generalmente al extremo de la expansión de un flujo supercrítico).

Para un número de Froude de llegada, la profundidad aguas abajo de una caída, el resalto puede caer en cualquiera de las cinco regiones como se muestra en la fig. (31.1).

TENEMOS LOS SIGUIENTES CASOS:

LA CAIDA  
NO CONTROLA  
EL RESALTO [ REGIÓN 1 → Resalto viaja hacia aguas arriba  
 REGIÓN 5 → Resalto viaja hacia aguas arriba.

LA CAIDA  
CONTROLA  
EL RESALTO [ REGIÓN 2 → RESALTO TERMINA EN LA CAIDA  
 REGIÓN 4 → RESALTO EMPIEZA EN LA CAIDA

REGION IN-  
TERMEDA (2 y 4) [ REGIÓN 3 → RESALTO ONDULAR SIN UN FRENTE DE RUPTURA

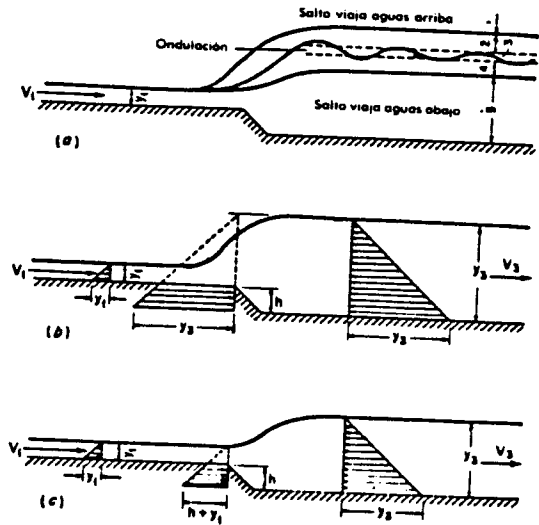
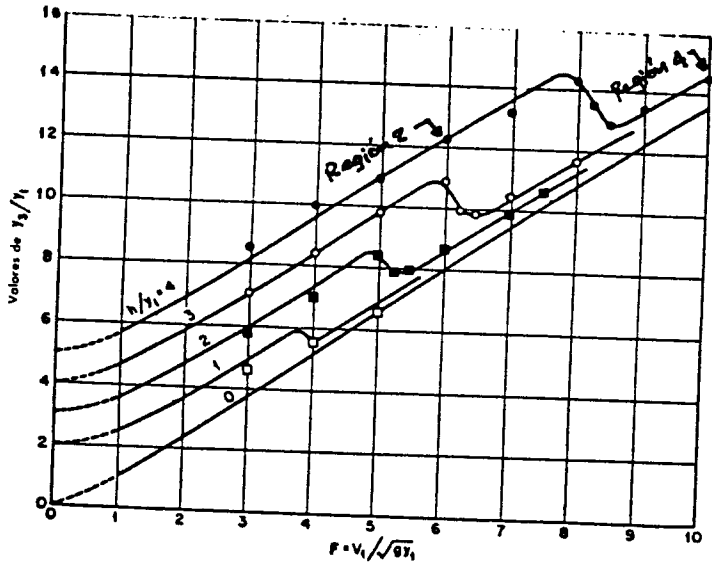


FIGURA  
Nº 31.1



Relaciones experimentales y analíticas entre  $F$ ,  $y_3/y_1$  y  $h/y_1$  para una caída abrupta.  
 (Según E. Y. Hsu [47].)

PARA LOS CASOS 2 y 4 PUEDEN SER FÁCILMENTE ANALIZADOS USANDO LAS ECUACIONES DEL MOMENTUM Y DE LA CONTINUIDAD:

$$P_1 + P_2 - P_3 = \rho g (v_3 - v_1) \quad (31.1)$$

$$q = v_1 y_1 = v_3 y_3 \quad (31.2)$$

$$P_1 = \rho g y_1^2 / 2 \quad (31.3)$$

$$P_3 = \rho g y_3^2 / 2 \quad (31.4)$$

$$P_2 = \rho g \left( y_3 - \frac{h}{2} \right) h \quad (31.5) \quad \text{PARA CASO 2}$$

$$P_2 = \rho g \left( y_1 + \frac{h}{2} \right) h \quad (31.6) \quad \text{PARA CASO 4}$$

REEMPLAZANDO LAS EC. (31.2) a (31.6) Y ORDENANDO, EL NÚMERO DE FROUDE SOBRE LA PRIMERA SECCIÓN PUEDE SER ESCRITO COMO:

$$F_1^2 = \frac{y_3/y_1}{2(1-y_3/y_1)} \left[ 1 - \left( \frac{y_3}{y_1} - \frac{h}{y_1} \right)^2 \right] \quad (31.7) \quad \text{REGION 2}$$

$$F_1^2 = \frac{y_3/y_1}{2(1-y_3/y_1)} \left[ \left( \frac{h}{y_1} + 1 \right)^2 - \left( \frac{y_3}{y_1} \right)^2 \right] \quad (31.8) \quad \text{REGION 4}$$

1  
 \* Aunque la presión sobre la cara de la caída puede ser más pequeña que la obtenida por las Ec. (31.5) y (31.6), por la separación del flujo, los datos experimentales indican un buen acuerdo con las Ec. (31.7) y (31.8). Ver figura (31.1).

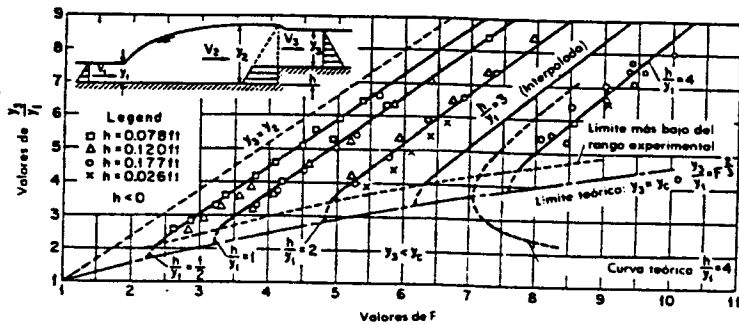
\* LAS ECUACIONES (31.7) Y (31.8) DEBEN SER RESUELTAS POR TANTEOS Y CON LA AYUDA DE LA FIG. (31.1).

$$\left. \begin{matrix} F_1 \\ h/y_1 \end{matrix} \right\} \Rightarrow y_3/y_1 ; \left. \begin{matrix} F_1 \\ y_3/y_1 \end{matrix} \right\} \Rightarrow h/y_1$$

## 2.1.6.2 RESALTO SOBRE UNA SUBIDA ABRUPTA

EL CONTROL DEL RESALTO POR MEDIO DE UNA SUBIDA ABRUPTA ES ÚTIL SI EL CALADO AGUAS ABAJO ( $y_3$ ), ES MÁS PEQUEÑO QUE EL CALADO CONTRAERADO ( $y_1$ ). EN AUSENCIA DE ÉSTA JURADA, EL RESALTO ES RECHAZADO AGUAS ABAJO A TRAVÉS DE UNA CURVA M3 (H3).

FOSTER Y ESKRINDE ["CONTROL OF HYDRAULIC JUMP BY SILLS", PROC. AM. SOC. CIVIL ENGRS., ABRIL 1949] EN BASE A DATOS EXPERIMENTALES HAN DESARROLLADO UN DIAGRAMA (FIG. 31.2), MOSTRANDO LAS RELACIONES ENTRE  $F_1$ ,  $y_3/y_1$  Y  $h/y_1$ , PARA  $X=5(h+y_3)$ .



Relaciones experimentales entre  $F$ ,  $y_3/y_1$ , y  $h/y_1$  para una subida abrupta. (Según Förster y Skrinde [23].)

### FIGURA Nº 31.2

LA CONSISTENCIA DE LAS RELACIONES SE VERIFICA CON LA TEORÍA DEL MOMENTUM, LA CUAL DA VALORES DE ( $y_3$ ) MAYORES A LOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE.

- Esta discrepancia puede explicarse por el hecho de que el chorro de aproximación no se uniformiza completamente después del Resalto y produce un impacto sobre la grada, el cual genera una fuerza mayor que la hidrostática (supuesta al aplicar la Ec. del Mom.)

#### ANÁLISIS DEL DIAGRAMA

- Punto  $(F_1, y_3/y_1)$  sobre línea  $(y_3 = y_2) \Rightarrow y_3 > y_2$  Subida aumenta el efecto de ahogamiento.
- Puntos dentro del rango  $(y_3 = y_2)$  y  $(y_3 = y_c)$ 
  - Si  $(F_1, y_3/y_1)$  cae sobre cualquier curva  $\Rightarrow$  Resalto con  $X=5(h+y_3)$
  - \* A la izquierda  $\Rightarrow$  Subida muy alta  $\Rightarrow$  Resalto hacia aguas arriba y puede ahogar la fuente.
  - \* A la derecha  $\Rightarrow$  Subida demasiado baja  $\Rightarrow$  Resalto forzado hacia aguas abajo, pudiendo finalmente desbordar la subida abrupta.

- Punto  $(F_1, y_3/y_1)$  bajo línea  $(y_3 = y_c)$

⇒ Flujo normal supercrítico aguas abajo de la subida abrupta.

• La subida abrupta actúa como sección crítica, su funcionamiento hidráulico corresponde a un Reborde de Cresta fina (Fig. 31.3)

PARA PROPÓSITOS DE DISEÑO, EL DIAGRAMA (FIG. 31.2) SE PUEDE USAR PARA DETERMINAR LA LONGITUD  $(x)$  DEL CUENCO Y SU PROFUNDIDAD  $(h)$ .

\* Se define el punto  $(F_1, y_3/y_1)$  para condiciones en o cerca de la descarga máxima ⇒  $h/y_1$  se determina por interpolación.

\*\* Repetiendo este procedimiento para otras descargas dentro del rango esperado, se puede obtener un valor más grande requerido de  $h$

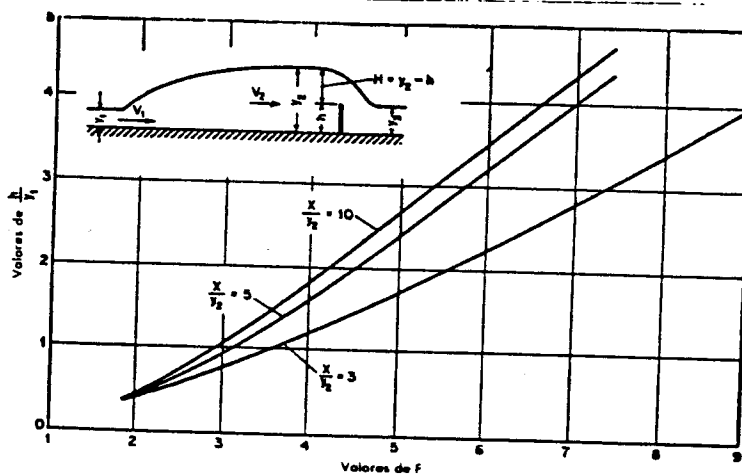
### 2.1.6.3 CONTROL DEL RESALTO POR REBORDE DE CRESTA FINA

SOBRE LA BASE DE DATOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS TEÓRICOS,

FOSTER Y SKRINDE HAN DESARROLLADO UN DIAGRAMA (FIG. 31.3) QUE PER-

MITE UN ANÁLISIS DEL EFECTO DE UN REBORDE DE CRESTA FINA DADO,

PARA CONDICIONES CONOCIDAS DE LLEGADA Y AGUAS ARRIBA.



Relaciones experimentales entre  $F$ ,  $h/y_1$ , y  $X/y_2$  para un dique de cresta afilada. (Según Foster y Skrinde [23]).

### FIGURA Nº 31.3

EL DIAGRAMA ES VÁLIDO PARA CONDICIONES DE DESCARGA NO SUMERGIDA ( $y_3 < y_2 - 0.75h$ ). SI OCURRE SUMERGENCIA, EL RESALTO ES FORZADO HACIA AGUAS ARRIBA CON UN POSIBLE ANOGAMIENTO COMO RESULTADO.

### ANÁLISIS DEL DIAGRAMA:

- Punto  $(F_1, h/y_1)$  cae dentro de las curvas
- ⇒ Resalto hidráulico con posición relativa indicada por  $x/y_2$  interpolada.
- \* Puntos quedando arriba y a la izquierda de una curva interpolada, representa las condiciones bajo las cuales el reborde es demasiado alto ⇒ Resalto forzado hacia aguas arriba y posiblemente ahogando la fuente.
- \* A la derecha y abajo de la curva interpolada, el reborde es demasiado bajo ⇒ Resalto forzado hacia aguas abajo y posiblemente desbordado (formando una onda permanente).

PARA PROPÓSITOS DE DISEÑO SE PROPONE EL USO DE LA CURVA  $x/y_2 = 5$

- \* La experiencia de laboratorio ha mostrado que la mayor altura  $(h)$  de reborde requerido no ocurre necesariamente para las condiciones de máxima descarga [GUIDO NERSSIA. "SU DISIPATORI A SALTO DI BORDO": RICERCA SPERIMENTALE, L'Energia Elettrica, MILANO, VOL. 17, N° 6, 1940]
- ⇒  $h$  SE OBTENDRÁ DEL ANÁLISIS DE TODAS LAS DESCARGAS.

#### 2.1.6.4 CONTROL DEL RESALTO POR REBORDE DE CRESTA ANCHA

PARA UN REBORDE DE CRESTA ANCHA, SI EL CALADO AGUAS ABAJO ES MÁS PEQUEÑO QUE EL CALADO CRÍTICO SOBRE EL TOPE DEL REBORDE, ES DECIR, SI  $y_3 < (2y_2 + h)/3$ , EL NIVEL DE AGUAS ABAJO NO AFECTARÁ APRECIABLEMENTE LA RELACIÓN ENTRE LA COTA DE ALTURA DE AGUA Y LA DESCARGA.

ASÍ, LA DESCARGA SOBRE UN ANCHO UNITARIO DEL REBORDE PUEDE SER CALCULADO APLICANDO EL TEOREMA DEL MOMENTUM Y CONSIDERANDO  $(y_2 = h = 2y)$ , SE TIENE:

$$q = 0.433 \sqrt{2g} \left( \frac{y_2}{y_2 + h} \right) H^{3/2} \quad (31.9)$$



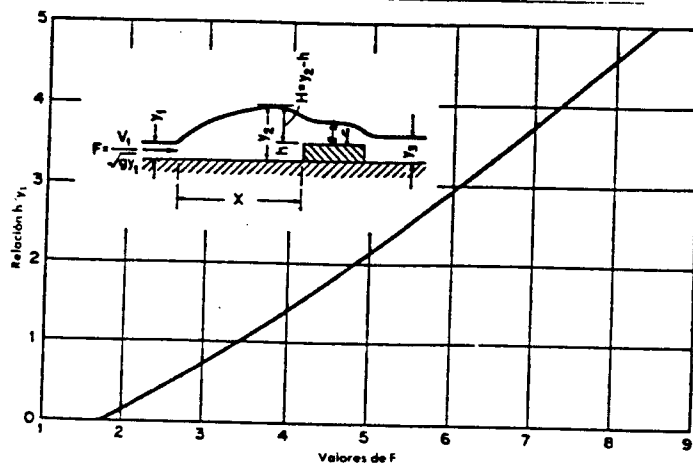
YA QUE  $q = v_1 y_1$ ,  $H = y_2 - h$  y  $F_1 = v_1 / \sqrt{g y_1}$ , LA ECUACION (31.9) PUEDE REDUCIRSE A:

$$2,667 F_1^2 \left( 1 + \frac{h/y_1}{y_2/y_1} \right) = \left( y_2/y_1 - h/y_1 \right)^3 \quad (31.10)$$

RELACIONANDO  $y_2/y_1$  CON EL  $F_1$  A TRAVÉS DE LA EC. (4), ENTONCES LA EC. (31.10) SE NACE:

$$\frac{2,667 F_1^2}{\sqrt{1 - 8F_1^2} - 1} = \frac{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 - 2h/y_1)^3}{(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 + 2h/y_1)} \quad (31.11)$$

ESTA ECUACION DA LA RELACION ENTRE  $h/y_1$  y  $F_1$  y SE PUEDE DIBUJAR COMO LA CURVA MOSTRADA EN LA FIG. (31.4)



Relaciones analíticas entre  $F$  y  $h/y_1$  para un dique de cresta ancha. (Según Forster y Skrinde [23].)

### FIGURA 31.4

- \* FORSTER Y SKRINDE han encontrado que esta curva coincide con los datos experimentales para un levantamiento abrupto con  $y_3 = y_c$  para  $x = 5(h + y_3)$
- \*\* El Reborde de cresta ancha tiene ciertas ventajas en comparación con algunos otros tipos de control:
  - Mayor estabilidad estructural que el reborde de cresta fina
  - Normalmente requiere un costo más bajo de excavación que un levantamiento abrupto.

### 2.1.6.5. CONTROL DEL RESALTO POR BLOQUES DE IMPACTO

LOS BLOQUES DE IMPACTO SON FRECUENTEMENTE USADOS PARA CONTROLAR EL RESALTO HIDRÁULICO DENTRO DEL CUENCO, CUANDO EL CALADO AGUARRATO ES DEFICIENTE. SE USAN DE FORMA TRAPEZOIDAL Y COLOCADOS EN UNA O DOS FILAS. SE SITUAN ESCALONADAMENTE CUANDO SE COLOCAN DOS FILAS.

LAS ECUACIONES DEL MOMENTUM Y DE LA CONTINUIDAD PUEDEN SER APLICADAS PARA OBTENER LAS ECUACIONES QUE GOBIERNAN EL RESALTO HIDRÁULICO FORZADO BAJA LA INFLUENCIA DE LOS BLOQUES DE IMPACTO.

CONSIDERANDO UN ANCHO UNITARIO DE CANAL, LA ECUACIÓN DEL MOMENTUM PUEDE SER ESCRITA COMO:

$$P_1 - F_B - P_2 = \rho q (v_2 - v_1)$$

ó:

$$F_B = \rho q (v_1 - v_2) - \rho q \frac{(y_2^2 - y_1^2)}{2} \quad (32)$$

$F_B$  — Es la fuerza ejercida por los bloques de impacto por unidad de ancho del canal.

LA FUERZA EJERCIDA POR LOS BLOQUES DE IMPACTO TRAPEZOIDALES COLOCADOS EN UNA SOLA FILA PUEDE SER ESCRITA EN FORMA FUNCIONAL COMO:

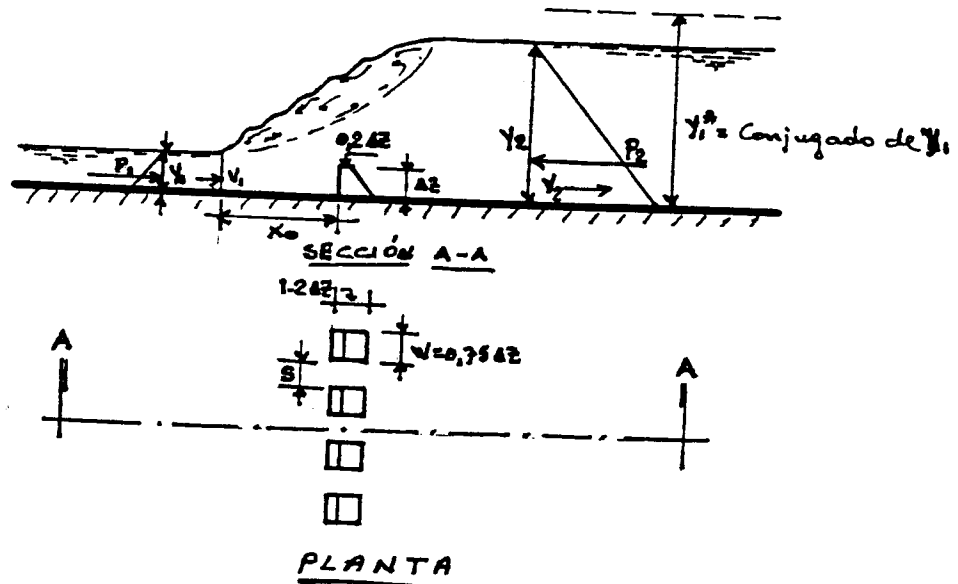
$$\frac{F_B}{F_2'} = f \left( \frac{x_0}{y_1}, \frac{\Delta z}{y_1}, F_1, \eta \right) \quad (32.1)$$

Aquí:

$$\left[ \begin{array}{l} F_2' = \rho q y_1^3 / 2 ; y_1^* = \text{Calado conjugado de } y_1 \\ x_0 = \text{Distancia desde el inicio del Resalto a la cara aguas arriba del bloque.} \\ \Delta z = \text{Altura del bloque de impacto} \\ \eta = \text{Blockage ratio} = \frac{wl}{wl + s} ; \left[ \begin{array}{l} wl = \text{Ancho de la cara del bloque} \\ s = \text{Separación entre bloques.} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

\* MIRAR FIGURA N° (32)

BASCO y ADAMS [ 'DRAG FORCES ON RAFFLE BLOCKS IN HYDRAULIC JUMPS',  
 JOUR. OF HYD. DIV. PROG. ASCE, Dec. 1971 ] realizaron una serie exten-  
 siva de medidas de  $F_B$  sobre bloques trapezoidales indicados en  
 la figura (32).

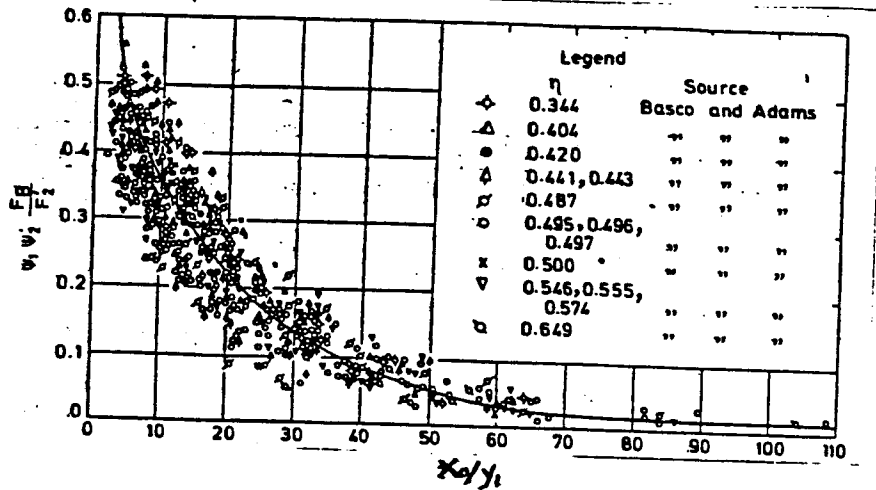


**FIGURA Nº 32**

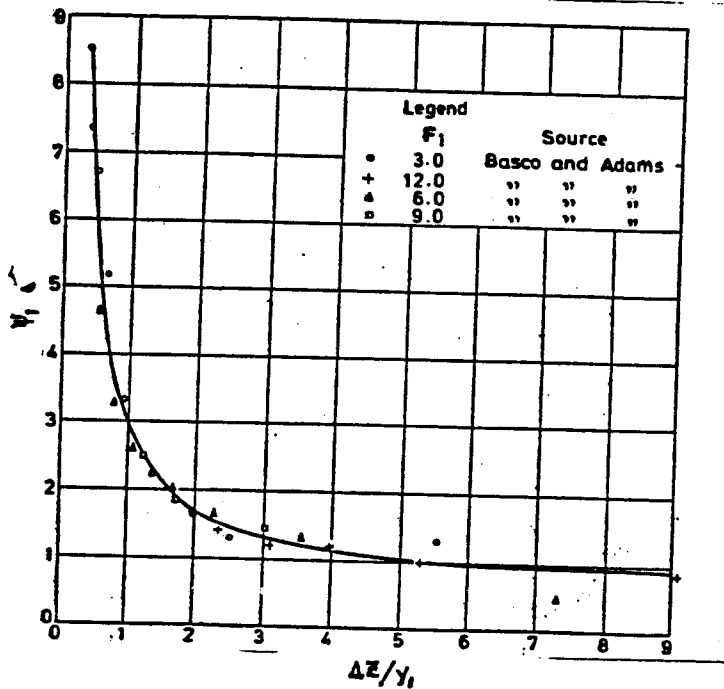
RANGA RAJU y OTROS [ 'ANÁLISIS OF FLOW OVER RAFFLE BLOCKS AND END SILLS',  
 JOUR. OF HYD. RESEARCH, Vol. 18, Nº 2, 1980 ] analizaron estos datos y con-  
 cluyeron lo siguiente:

- $F_1$  no es importante en la Ec. (32.1), por tanto se puede eliminar.
- $(\psi_1 \psi_2 F_B / F_2')$  está únicamente relacionado a  $(X_0 / y_1)$  como se in-  
 dica en la figura (32.1)
- $\psi_1$  y  $\psi_2$  son factores de corrección empíricos
  - $\psi_1 = f(Az / y_1)$  Ver fig. (32.2)
  - $\psi_2 = f(\eta)$  Ver tabla 1
- $F_B$  no cambia para una ubicación de bloques:
  - $2.5 \leq \frac{Y}{Az} \leq 5$  ;  $\tau$  = espaciamiento entre dos filas de bloques
  - Este efecto se nota más para valores bajos de  $X_0 / y_1$

- PARA UN VALOR FIJO DEL REPTO DE UN-RIABLES
- Valor máximo de  $F_B / F_2' \approx 0,35$  (HARLEMAN INDICA QUE  $F_B / F_2' \approx 0,20$ )
  - $F_B$  aumenta cuando  $X_0 / y_1$  decrece (CONFIRMA CONCLUSIONES DE HARLEMAN)
  - $F_B$  disminuye cuando  $F_1$  aumenta
  - $F_B / F_2'$  aumenta cuando  $Az / y_1$  aumenta
  - $F_B / F_2'$  aumenta cuando  $\eta$  aumenta.



**FIGURA N° 32.1**



**FIGURA N° 32.2**

TABLE 7.1  
Variation of  $\psi_2$  with  $\eta$

$\eta$	0.34	0.40	0.50	0.60	0.70
$\psi_2$	1.00	0.80	0.64	-0.54	0.47

\* LA COMBINACIÓN DE  $(\Delta z, \eta, x_0)$  PUEDE SER ELEGIDO TAL QUE  $(F_0)$  CALCULADO CON AYUDA DE LAS FIGURAS (32.1) (32.2) Y LA TABLA (7.1) SE IGUAL A  $(F_0)$  CALCULADO CON LA EC. (32).

\*\* EL VALOR DE  $(F_0)$  PODRÁ SER USADO PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE LOS BLOQUES.

### 3. ESTRUCTURAS NORMALIZADAS PARA LA DISIPACIÓN DE LA ENERGÍA

LA TÉCNICA ACTUALMENTE ADOPTADA EN EL DIMENSIONAMIENTO DE CUENCOS DE DISIPACIÓN, CONSISTE EN MODIFICAR LAS CARACTERÍSTICAS DEL RESALTO, EN PARTICULAR REDUCIENDO SU LONGITUD Y EN CONSECUENCIA DE LA ESTRUCTURA QUE LO CONTROLA. ESTE OBJETIVO SE CONSIGUE CON LA UTILIZACIÓN DE ELEMENTOS DISIPADORES CUYA EFICIENCIA PUEDE EVALUARSE POR LA ACCIÓN QUE TIENEN EN LA DISMINUCIÓN DE LA LONGITUD, ESTABILIZACIÓN Y FIJACIÓN DEL RESALTO. DEL CORRECTO EMPLEO DE ESTA TÉCNICA, RESULTAN LAS ESTRUCTURAS NORMALIZADAS PARA LA DISIPACIÓN DE LA ENERGÍA POR RESALTO.

ESTOS DISEÑOS SE PUEDEN DESARROLLAR A TRAVÉS DE AÑOS DE EXPERIENCIA Y OBSERVACIONES SOBRE ESTRUCTURAS EXISTENTES, O MEDIANTE INVESTIGACIONES DE MODELOS, O DE AMBOS.

#### 3.1. DEFLECTORES EN LOS CUENCOS

SON LOS DISPOSITIVOS DISIPADORES LOS CUALES SE DIVIDEN EN:

##### a) DEFLECTORES DE PARAMENTO ("CHUT BLOCKS")

Conocidos también como: - Bloques de caída  
- Dados de Escarpa

##### b) DEFLECTORES DE SOLERA ("BAFFLE PIERS")

Conocidos también como: - Bloques de piso  
- Bloques de impacto

##### c) DEFLECTORES Ó BORDILLOS TERMINALES ("END SILLS")

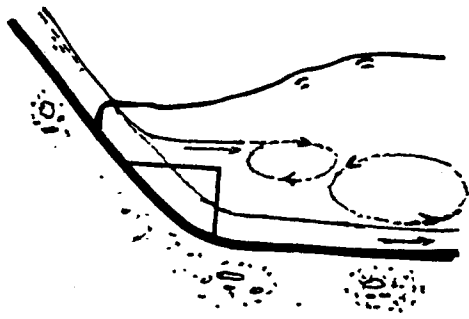
Conocidos también como: - Escalón final  
- Umbral final

##### a) DEFLECTORES DE PARAMENTO

SU FUNCIÓN ES CANALIZAR EL CHORRO QUE LLEGA Y LEVANTARLE UNA PORCIÓN DESDE EL PISO, PRODUCIENDO UNA LONGITUD MÁS CORTA DEL RESALTO. TAMBIÉN TIENDEN A ESTABILIZARLO, MEJORANDO SU PERFORMANCE.

A SU VEZ SE CONSIDERAN DOS TIPOS DE DEFLECTORES DE PARAMENTO SEGÚN FUNCIONAN JIN A REACCIÓN Ó AIREADOS

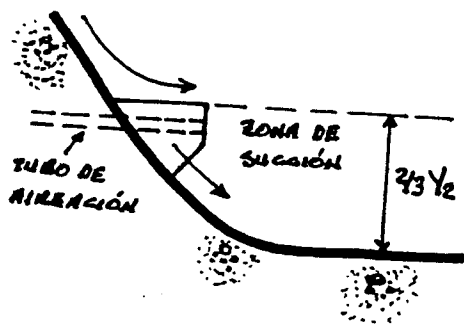
## 2.1) DEFLECTORES SIN AIREACIÓN ("CHUT BLOCKS")



ACTÚAN DIVIDIENDO EL FLUJO EN UNA SERIE DE CORREOS, PARTE DE LOS CUALES SIGUE SU DIRECCIÓN, ELEVÁNDOSE EL RESTO, CON LO CUAL SE INCREMENTA LA TURBULENCIA CREÁNDOSE FUERTES GRADIENTES TRANSVERSALES DE VELOCIDAD Y CON ELLO AUMENTANDO LA DISIPACIÓN DE LA ENERGÍA. ESTOS BLOQUES SUELEN SER

TRIANGULARES Y COLOCARSE PARALELOS A LA DIRECCIÓN DEL FLUJO, ACTUANDO SUMERGIDOS PARA LOS CAUDALES DE PROYECTO. PUEDEN UTILIZARSE BLOQUES CON LAS CARAS LATERALES DIVERGENTES, EN EL CASO DE CATEROS DIVERGENTES. SE ACOSTUMBRA A SITUARLOS EN LA INTERSECCIÓN DEL PARAMENTO INCLINADO CON LA ZONA HORIZONTAL DEL CUENCO, OTRAS VECES, POR EL CONTRARIO, CONVIENE SITUARLOS MÁS ARRIBA EN EL PROPIO PARAMENTO INCLINADO PUES, DADAS LAS CARACTERÍSTICAS DEL RESALTO, PUEDE LOGRARSE EN DICHA POSICIÓN MAYOR DISIPACIÓN DE ENERGÍA. EN GENERAL, Y SEGÚN SE DESPRENDE DE LOS ENSAYOS, ESTOS BLOQUES NO FUNCIONAN BIEN SI LO HACEN MUY ANEGADOS. EN OCASIONES SE HA DISPUESTO UN BLOQUE ÚNICO QUE, POR TANTO, NO DIVIDE EL FLUJO SINO QUE LO ELEVA CREANDO UN REMOLINO INFERIOR QUE CONTRIBUYE EN EL PROCESO DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA. UN CASO PARTICULAR LO CONSTITUYE EL PEQUEÑO ESCALÓN (DE UNO O DOS METROS) EN EL MISMO PIE DE LA PRESA, QUE UTILIZAN LOS TÉCNICOS RUSOS PARA REDUCIR LA LONGITUD DEL CUENCO AMORTIGUADOR (CHERTOUJOV)

## 2.2) DEFLECTORES AIREADOS (Dientes de pavimento)



ESTOS DEFLECTORES ACTÚAN DIVIDIENDO EL FLUJO DE FORMA QUE LA PORCIÓN QUE CIRCULA ENTRE LOS DIENTES SE EXPANDE Y FORMA MÁS TARDE EN EL CUENCO EL TÍPICO REMOLINO "SINEXTROSUM", MIENTRAS QUE LA PARTE POR ENCIMA DE LOS MISMOS ES LANZADA CONTRA ESE REMOLINO PROVOCANDO UN IMPACTO CON GRAN TURBULENCIA QUE AUMENTA GRANDEMENTE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN UNA MENOR LONGITUD, REDUCIÉNDOSE EN UN 50%

DE LA LONGITUD TEÓRICA, SEGÚN SE DESPRENDE DE LOS RESULTADOS DE NUMEROSOS ENSAYOS.

PARA UN BUEN FUNCIONAMIENTO DE ESTE DISPOSITIVO NO INTERESA QUE LOS DIENTES FUNCIONEN SUMERGIDOS, DEBIENDO ESTAR SUFICIENTEMENTE AIREADOS Y ADEMÁS, EL CUENCO DEBE TENER LONGITUD SUFICIENTE PARA QUE EL IMPACTO DE LOS CHORROS QUEDE SITUADO DENTRO DEL MISMO. ESTO LLEVA A SITUAR EL BORDE DE DESPEGUE A UNA COTA LIGERAMENTE INFERIOR AL MÁXIMO NIVEL AGUAS ABATO, QUE SE FIJARÁ (COMO EL RESTO DE LOS PARÁMETROS DEL DIENTE) MEDIANTE ENSAYO, ESTANDO RELACIONADO CON EL CAUDAL PARA EL QUE SE DESEA UN MEJOR FUNCIONAMIENTO; COMO ORDEN DE MAGNITUD PUEDEN INICIARSE LOS TANTEOS SITUANDO DICHO BORDE A UNA ALTURA SOBRE EL CUENCO DE  $2/3 \times 1/2$ . SI BIEN, COMO YA HEMOS DICHO, PUEDE CONTARSE CON UNA DISMINUCIÓN SUSTANCIAL DEL RESALTO, NO DEBE CONTARSE CON LA DEL CAJADO CONJUGADO, PUES ESTA HIPÓTESIS PUEDE RESULTAR PELIGROSA.

LOS DIENTES DAN LUGAR A UNA SUCCION AGUAS ABATO DEL BORDE DE DESPEGUE, PRODUCIDA POR LA ALTA VELOCIDAD DEL AGUA, QUE NORMALMENTE DA  $(V^2/2g)$  MUY SUPERIOR A LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA, POR LO QUE SE PUEDEN PRODUCIR CAVITACIONES IMPORTANTES. PARA EVITARLAS, CONVIENE DAR UNA AIREACIÓN A ESA ZONA, LO QUE SE LOGRA PONIENDO UN TUBO QUE APORTE AIRE DEL EXTERIOR. ES PREFERIBLE EVITAR ÁNGULOS AGUDOS EN LAS FORMAS, PARA NO PRODUCIR ZONAS DÉBILES.

LOS DIENTES DEBEN IR FUERTEMENTE ARMADOS Y BIEN ANCLADOS A LA MASA DE LA PRESA O DE LA SOLERA (SEGÚN DONDE ESTÉN) PUES LOS ESFUERZOS SON CONSIDERABLES Y, ADEMÁS, LA ARMADURA AYUDA A SU CONSERVACIÓN.

DE TODAS FORMAS, ES FRECUENTE QUE LOS DIENTES SUFRAN DAÑOS Y HAY QUE REPARARLOS, PERO ESTO NO PRESENTA DIFICULTAD ESPECIAL, PUES SE PUEDEN APROVECHAR LAS TEMPORADAS EN QUE EL EMPALSE ESTÁ BAJO O EN EL RÍO NO SE ESPERAN AVENIDAS.

b) DEFLECTORES DE SOLERA ("Baffle piers")

ESTOS ACTÚAN POR IMPACTO Y DIFUSIÓN DEL CHORRO INCIDENTE LOGRANDO UN GRAN INCREMENTO DE TURBULENCIA QUE CONTRIBUYE A LA ESTABILIZACIÓN DEL RESAZO, PRODUCE UN ACORTAMIENTO DE LA LONGITUD DEL MISMO Y, SIMULTÁNEAMENTE, PERMITE UNA REDUCCIÓN EN LA PROFUNDIDAD DEL CAZADO CONJUGADO SEGÚN PUEDE OBSERVIARSE DE LA APLICACIÓN DEL TEOREMA DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO, TENIENDO EN CUENTA LA FUERZA  $F_B$  EJERCIDA POR ELLOS. (Ec. N° 32)

EL ESTUDIO DE LA EFECTIVIDAD Y PROYECTO DE ESTOS DEFLECTORES DEBE SER REALIZADO UTILIZANDO MODELOS REDUCIDOS Y APROVECHANDO LA EXPERIENCIA DEL COMPORTAMIENTO EN EL PROTOTIPO DE LAS YA DISEÑADAS, PUES UN ESTUDIO TEÓRICO EXACTO RESULTARÍA ENABORRABLE. EL PARÁMETRO MÁS UTILIZADO HASTA AHORA PARA CARACTERIZAR LA EFECTIVIDAD DEL COMPORTAMIENTO DE LOS DEFLECTORES DE SOLERA HA SIDO ( $C_d$ ) DEFINIDO COMO:

$$C_d = \frac{F_B}{\frac{1}{2} \rho v^2 A_B}$$

(33)

$\rho$  = densidad del fluido  
 $v$  = Velocidad característica (suele tomarse la de entrada)  
 $A_B$  = Área característica (se toma la del bloque).

POR RAZONAMIENTOS FÍSICOS O POR CONSIDERACIONES DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL PUEDE DEMOSTRARSE QUE:

$$C_d = f (Re, F, \text{Geometría del bloque, Perfil del flujo})$$

TENIENDO EN CUENTA LA ALTA TURBULENCIA EXISTENTE PUEDE SER DESPRECIADO EL EFECTO DE LA VISCOSIDAD Y, DE LOS ENSAYOS EFECTUADOS SE OBTIENE QUE:

$$C_d = f \left( F_1, \frac{\Delta Z}{y_1}, \frac{x_0}{y_2}, \frac{W}{\Delta Z}, \frac{S}{\Delta Z}, \text{forma} \right) \quad (33.1)$$

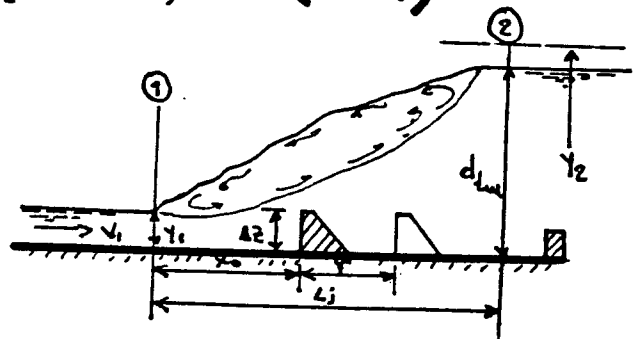
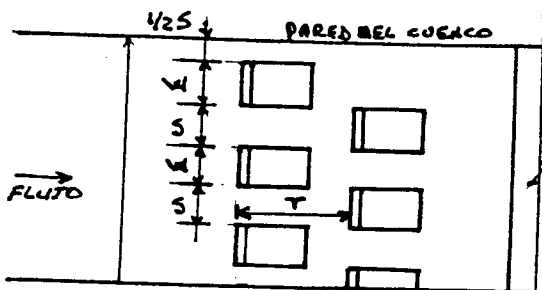


FIGURA N° 33.1



SIN EMBARGO, ACTUALMENTE HAY AUTORES (RASCO Y ADAMS) QUE PROPONEN COMO MÁS REPRESENTATIVO EL PARÁMETRO ADIMENSIONAL  $(F_B/F_2')$ .

ESTE DEPENDE DE LAS MISMAS VARIABLES QUE  $(C_d)$ , ASÍ PUES:

$$\frac{F_B}{F_2'} = \psi \left( F_1, \frac{\Delta z}{y_1}, \frac{x_0}{y_2}, \frac{w}{\Delta z}, \frac{s}{\Delta z}, \text{forma} \right) \quad (33.2)$$

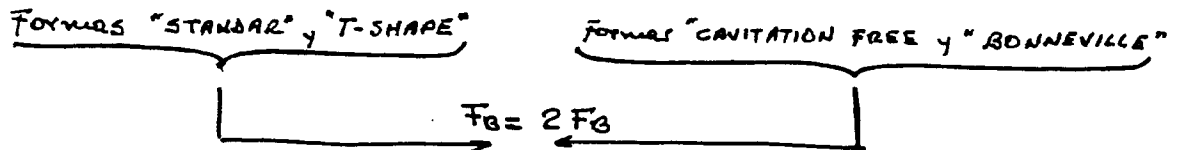
(ESTA EXPRESIÓN ES EQUIVALENTE A LA FUNCIONAL INDICADA COMO EC. (32.1), ANALIZADA EN LA SECCIÓN ANTERIOR.)

SE HAN EFECTUADO NUMEROSOS ENSAYOS CON GRAN NÚMERO DE FORMAS NORMALIZADAS, RESUMIENDO LAS PRINCIPALES CONCLUSIONES:

\* HARLEMAN Y OTROS EN EL ITM OBTUVIERON EXPERIMENTALMENTE CON PILAS DEL TIPO "STEPPED" Y "CAVITATION FREE", PARA RELACIONES  $(0,75 < \frac{\Delta z}{y_1} < 1,12)$

- } - Geometría dada }  $F_B$  aumenta cuando  $x_0$  decrece
- } - Geometría dada }  $F_B$  incrementa cuando  $F_1$  incrementa
- } -  $x_0$  dado }  $F_2'$
- } VALOR MÁXIMO DE  $F_B/F_2' \approx 0,20$

\* ENSAYOS EN EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DEL S.A.F INDICAN QUE: LAS FORMAS "STANDARD" Y "T-SHAPE" PRODUCAN EL DOBLE DE  $F_B$  QUE LA "CAVITATION FREE" Y "BONNEVILLE".



\* POSTERIORMENTE, RASCO Y ADAMS OBTUVIERON UNA SERIE DE CONCLUSIONES QUE FUERON ANALIZADAS EN LA SECCIÓN ANTERIOR. RESUMIENDO:

- Valor máximo de  $F_b/F_2' = 0,35$

- PARA UN VALOR FIJO DEL RESTO DE VARIABLES
- $F_B$  aumenta cuando  $x_0/y_1$  decrece
  - $F_B$  disminuye cuando  $F_1$  aumenta
  - $F_B/F_2'$  aumenta cuando  $\Delta z/y_1$  aumenta
  - $F_B/F_2'$  aumenta cuando  $\eta$  aumenta

LAS CONCLUSIONES ANTERIORES SE REFIEREN ÚNICAMENTE A UNA FILA DE DEFLECTORES. OBSERVARON ASÍ MISMO, QUE, SI SE COLOCAN DOS FILAS LA RELACIÓN  $(F_1/F_2)$  DISMINUYE CUANDO LA DISTANCIA ENTRE AMBAS FILAS AUMENTA HASTA LLEGAR A UN CIERTO VALOR DE  $(\frac{Y}{AR} \approx 5)$ , A PARTIR DE LA CUAL PRÁCTICAMENTE SE COMPORTA COMO SI SE TRATASE DE UNA SOLA FILA; ESTE EFECTO SE NOTA MÁS CUANDO MENOR SEA EL VALOR DE  $(X_0/Y_2)$

ADEMÁS DE ESTAS INVESTIGACIONES DE LABORATORIO, ES FUNDAMENTAL APROVECHAR LAS EXPERIENCIAS SURGIDAS DE LA OBSERVACIÓN DEL COMPORTAMIENTO REAL DE ESTAS ESTRUCTURAS:

- Si se usan dos filas de bloques, la segunda fila se debe colocar entre los espacios de la primera fila, para provocar el impacto del flujo que deja pasar la primera fila, provocando con esto un aumento de las corrientes turbulentas que absorben una considerable energía.
- BLAISDELL indica que los bloques deben ocupar un ancho entre el 40 y 55% del ancho del cuenco y es más favorable cuando se colocan perpendiculares a la dirección del flujo entrante.

POR OTRA PARTE, PARA  $V_1 > 15 \text{ m/s}$  EXISTE PELIGRO DE CAVITACIÓN, SOBRE TODO EN LOS LADOS DE LOS BLOQUES Y EN LA PRIMERA FILA DE ÉSTOS.

OTRA CAUSALIDAD DE DAÑO SON LAS GRAVAS Y MATERIALES DEL RÍO ARRASTRADOS EN LAS CRECIDAS, ETC.

PARA DISMINUIR LAS EROSIONES POR CAVITACIÓN:

- REDONDEAR LAS ARISTAS (ejemplo: bloques "CAVITATION FREE")
- COLOCARLOS SUFICIENTEMENTE LEJOS AGUAS ABAJO, PARA QUE SUMERGIDOS NO RECIBAN UN IMPACTO DIRECTO DE LOS CHORROS DE ALTA VELOCIDAD
- CONVIENE USAR UNA SOLA FILA DE BLOQUES.
- \* PARA EVITAR DAÑOS PROVOCADOS POR LOS CUERPOS ARRASTRADOS, A VECES SE BUNBAN CIERTAS ZONAS DEL BLOQUE.

INVESTIGACIONES DEL LABORATORIO DE HIDRODINÁMICA DEL I.T.M. INDICAN QUE SOLO SON POSIBLES REDUCCIONES APRECIABLES DEL CALADO CONJUGADO DEBIDO A LOS ALDQUES, SI  $(10Q < X_0 < 20QZ)$ . PARA LOS CAUDALES MÁXIMOS LOS ALDQUES NO PUEDEN SER COLOCADOS GENERALMENTE DENTRO DE ESTAS CONDICIONES SIN SOMETERLOS A POSIBLES DAÑOS POR CAVITACIÓN. SE DEUCE POR TANTO, QUE ESTA REDUCCIÓN SÓLO DEBE SER CONSIDERADA COMO UNA SEGURIDAD FRENTE A DESPLAZAMIENTOS DEL RESALTO DENTRO DEL CUENCO, CAMBIOS DEL NÚMERO DE FROUDE O DE LA PROFUNDIDAD DEL NIVEL DEL RÍO.

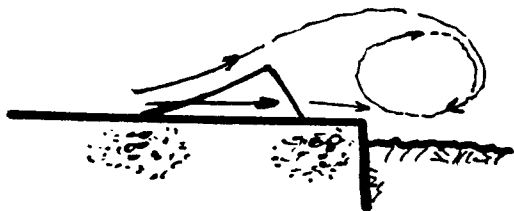
#### D) DEFLECTORES O BORDILLOS TERMINALES ("END SILLS")

LOS DEFLECTORES TERMINALES SE DISPONEN EN FORMA DE MURO CONTINUO O DENTADO AL FINAL DEL CUENCO PROVOCANDO UN AUMENTO DE TURBULENCIA POR CHOQUE Y DIFUSIÓN DEL CHORRO RESIDUAL (EN EL CASO DE SER DENTADOS), PRODUCIENDO SIMULTÁNEAMENTE UNA ELEUACIÓN DEL FLUJO QUE PROVOCA A LA SALIDA UN REMOLINO APORCADOR, QUE APORTANDO MATERIAL DISMINUYE LA EROSIÓN AL PIÉ DEL CUENCO. TAMBIÉN CONTRIBUYE A ESTABILIZAR EL FLUJO Y DISMINUIR LA PROFUNDIDAD DEL CALADO CONJUGADO.

LAS DIMENSIONES MÁS IMPORTANTES DE ESTAS ESTRUCTURAS SON SU ALTURA Y FORMA. SIETE HAN SIDO LOS TIPOS UTILIZADOS EN EL DISEÑO DE CUENCOS: RECTANGULAR, TRIANGULAR, TRAPEZOIDAL, HORNSBY, SMETANA, SCHOKLITSCH Y REHBOCK, ESTE ÚLTIMO DENTADO.

NORMALMENTE SE UTILIZAN LOS DE FORMA TRIANGULAR, BIEN CON CARA VERTICAL AGUAS ABAJO (TRIANGULAR) O BIEN CON AMBAS CARAS INCLINADAS (SCHOKLITSCH), AUNQUE A VECES SE UTILIZA EL TRAPEZOIDAL CON CARA VERTICAL AGUAS ARRIBA (TRAPEZOIDAL) PUESTO QUE SUFRE MENOS QUE LOS ANTERIORES ANTE EL ATAQUE DE CUERPOS O GRAVAS ARRASTRADOS.

SIN EMBARGO EN MUCHAS OCASIONES CONVIENE UTILIZAR UN DEFLECTOR



DENTADO DEL TIPO "REHBOCK" O SIMILARES, POR SU BUEN COMPORTAMIENTO Y EFICACIA DE DIVIDIR EL FLUJO, PARTE DEL CUAL CHOCA CON LA PARED VERTICAL Y EL RESTO PASA A TRAVÉS DE LOS DIENTES.

SI LA PROFUNDIDAD DE LA LÁMINA EN EL RÍO AGUAS ABATO DEL CUENCO (OBTENIDA POR LA CURVA CARACTERÍSTICA) ES MENOR QUE LA PROFUNDIDAD DEL CALADO CONJUGADO, LA DISPOSICIÓN DE UNA ESTRUCTURA FINAL HACE QUE LA EXCAVACIÓN NECESARIA SEA MENOR. SIN EMBARGO, LA ALTURA DE DICHA ESTRUCTURA CONTUNTAMENTE CONJUNTAMENTE CON LA PROFUNDIDAD DE EXCAVACIÓN NO PUEDE SER OBTENIDA TEÓRICAMENTE, PUESTO QUE ANÁLOGAMENTE A LO OBSERVADO POR FOSTER Y SKRINDE EN EL ESTUDIO DE UN LEVANTAMIENTO ABRUPTO, EL CHORRO INFERIOR DEL RESALTO NO PIERDE SU IDENTIDAD Y LAS PROFUNDIDADES DEDUCIDAS DE LA APLICACIÓN DEL TEOREMA DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO SON MAYORES QUE LAS REALES.

SI EL RÉGIMEN AGUAS ABATO DEL CUENCO FUERA RÁPIDO (LO QUE NO ES NORMAL), EL PASO POR ESTA ESTRUCTURA DEBE SERVIR DE TRANSICIÓN DEL RÉGIMEN SUBCRÍTICO EN EL INTERIOR DEL CUENCO AL RÉGIMEN SUPERCRÍTICO EN EL RÍO SIN PRODUCIR FUERTES EROSIONES, PARA LO QUE DEBERÁ CONTARSE EN CUALQUIER CASO CON LA PRODUCCIÓN DE UN REMOLINO APROXIMADOR. [ SI EL RÍO TUVIERA UNA PENDIENTE FUERTE Y PRODUCIERA UN RÉGIMEN SUPERCRÍTICO PARA TODOS LOS CAUALES O AL MENOS PARA LA MAYOR PARTE DE ELLOS, ENTONCES PODRÍA RESULTAR FICTICIO EL HACER UN RESALTO POR DICHO PROCEDIMIENTOS ARTIFICIALES, PUES, A CONTINUACIÓN, EL RÉGIMEN TENDRÍA QUE VOLVER A PASAR DE SUBCRÍTICO A SUPERCRÍTICO, POR LO QUE CABE PENSAR SI ES NECESARIO HACER EL RESALTO. SOLUCIONES: HACER EL RESALTO POR MEDIO DE UNA CORRECCIÓN DE PENDIENTES Ó LANZAMIENTO EN TRAMPOLÍN LIBRE ]

LA SALIDA DEL "SILL" DEBE BEJARSE A COTA ALGO SUPERIOR A LA DEL TERRENO AGUAS ABATO, A FIN DE FACILITAR LA FORMACIÓN DE DICHO REMOLINO Y DIFICULTAR LA ENTRADA DE ACARREOS EN LA OBRA A LO QUE TAMBIÉN CONTRIBUYE LA EXISTENCIA DE BIENTES.

LA FORMACIÓN DE ESTE REMOLINO APROXIMADOR ES BASTANTE IMPORTANTE INCLUSO PARA LA ESTABILIDAD DEL RESALTO EN UN CUENCO CORTO, PUES SE HA COMPROBADO EXPERIMENTALMENTE EN ENSAYOS REALIZADOS CON LECHO FITO, EN DONDE NO SE PODÍA FORMAR, QUE SE PRODUCÍA EL ARRASTRE DEL REMOLINO SUPERFICIAL QUEDANDO EL PIÉ DE PRESA EN CONDICIONES CRÍTICAS Y RÉGIMEN SUPERCRÍTICO; LA SIMPLE EXCAVACIÓN DEL ESPACIO NECESARIO PARA RETENER EL REMOLINO APROXIMADOR ASEGURÓ POSTERIORMENTE LA ESTABILIDAD DEL RESALTO.

SIN EMBARGO, SIEMPRE QUE SE CUENTE CON EL REMOLINO APORTADOR DEBE GARANTIZARSE LA EXISTENCIA DE MATERIAL QUE APORTAR PUES PUEDE OCURRIR QUE EL LECHO ESTÉ CONSTITUIDO DE LERNALES O EROSIONABLES QUE DEN LUGAR A FANGOS, NO PRODUCIÉNDOSE ENTONCES LA REQUERIDA PROTECCIÓN DEL PIÉ DE LA CIMENTACIÓN.

LA EXISTENCIA DE "SILL" DENTADOS (O SIN DENTAR) COMBINA A VECES SATISFACTORIAMENTE CON EL EFECTO DE LOS DIENTES DE PARAMENTO, PUES COMPLETAN LOS FENÓMENOS DE SEPARACIÓN Y LA CREACIÓN DE TURBULENCIA Y CONSTITUYEN POR OTRA PARTE UNA GARANTÍA PARA AQUELLOS CASOS EN LOS QUE LOS CALAZOS AL PIE DE LA OBRA RESULTAN EN LA REALIDAD INFERIORES A LOS PREVISTOS.

### ENTRADA DEL FLUJO A LOS CUENCOS

Se debe evitar que el flujo llegue en forma asimétrica o concentrada, debiendo ser su distribución lo más uniforme posible. En estas condiciones la pendiente de llegada tiene poco efecto en la formación del resalto. De todas maneras, se recomienda que para pendientes superiores a 1:1 se efectúe un acuerdo circular entre la rápida y la solera del cuenco. ( $R \geq 4y_1$ )

### 3.2 TIPOS DE ESTRUCTURAS NORMALIZADAS

EL ESTUDIO CONJUNTO DE LOS DEFLECTORES PARA OBTENER FUNCIONAMIENTOS ÓPTIMOS, HAN DADO LUGAR A ESTRUCTURAS NORMALIZADAS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA QUE HAN SIDO DESARROLLADOS EN ALGUNOS CENTROS ESPECIALIZADOS. TODAS ESTAS ESTRUCTURAS MUESTRAN COMO CARACTERÍSTICA QUE LAS DIMENSIONES SE FIJAN EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE FROUDE DEL FLUJO ENTRANTE Y DE LOS CALAZOS CONJUGADOS. SIN EMBARGO, NO SE PUEDE ASEGURAR EL CORRECTO FUNCIONAMIENTO DEL CUENCO, MIENTRAS NO SE HAYA REALIZADO UN ENSAYO EN MODELO HIDRÁULICO. SOLO SE PUEDE PENSAR EN PRESCINDIR DEL MODELO SI LAS DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA SON MUY REDUCIDAS, Y TAMBIÉN LO ES EL PRESUPUESTO DE LA OBRA. EN ESTOS CASOS, PARTIENDO DE UN CUENCO SOBRADEAMENTE CONSERVADOR, HABRÁ QUE PENSAR SI EL AHORRO QUE PUEDE LOGRARSE, AL REDUCIR LAS DIMENSIONES COMO CONSECUENCIA DE UNOS ENSAYOS EN MODELO HIDRÁULICO, COMPENSA LOS GASTOS DE ÉSTOS.

### 3.2.1 ESTRUCTURA "SAF"

ESTA ESTRUCTURA FUE DESARROLLADA EN EL LAB. DE HIDRÁULICA "St. Anthony Falls" DE LA UNIVERSIDAD DE MINESOTA POR EL INVESTIGADOR Fred W. Blaisdell [American Society of Civil Engineers, Vol 113, 1948]. ESTÁ RECOMENDADA PARA USO EN PEQUEÑAS ESTRUCTURAS TALES COMO VERTEDEROS PEQUEÑOS, OBRAS DE SALIDA Y PEQUEÑAS ESTRUCTURAS DE CANAL. LA REDUCCIÓN DE LA LONGITUD ES ALREDEDOR DE 80%

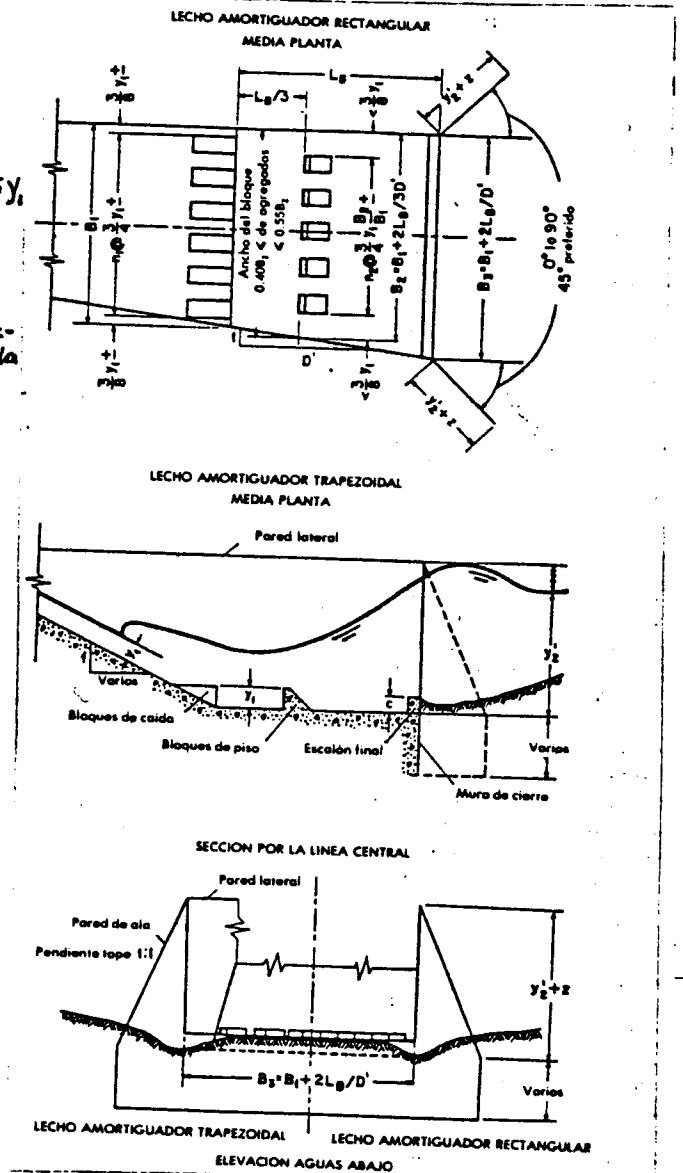
• CAMPO DE APLICACIÓN  $\begin{cases} 1.7 \leq F_1 \leq 17 \\ V_1 < 15 \text{ m/s} \end{cases}$

#### • CARACTERÍSTICAS

- 1) Longitud del cuenco  $L_B = 4,5 Y_2 / F_1^{0,76}$
  - 2) Bloques de caída y Piso  $\begin{cases} \text{Altura} = Y_1 \\ \text{Ancho y espac.} = 0,75 Y_1 \end{cases}$
  - 3) Distancia a bloques de piso =  $L_B/3$
  - 4) Mínima distancia de pared a bloque de piso =  $\frac{3 Y_1}{8}$
  - 5) Los bloques de piso deben colocarse en la dirección de los espaciamentos de los bloques de caída y deben ocupar entre el 40 y 55% del ancho del Cuenco.
  - 6) Altura del umbral final  $C = 0,07 Y_2$
  - 7) Profundidad del cuenco con respecto a la lámina de aguas abajo:
 
$$Y_2' = (1,10 - \frac{F_1^2}{120}) Y_2 \quad \text{si: } (1,7 \leq F_1 \leq 5,5)$$

$$Y_2' = 0,85 Y_2 \quad \text{si: } (5,5 < F_1 \leq 11)$$

$$Y_2' = (1,00 - \frac{F_1^2}{800}) Y_2 \quad \text{si: } (11 < F_1 \leq 17)$$
  - 8) Borde libre  $Z = Y_2/3$
  - 9) Los muros de ala deberían ser de igual altura que los cajeros del cuenco y con pendiente 1:1 y ángulo de 45° respecto a la línea central de salida.
  - 10) Los cajeros del cuenco pueden ser Paralelos (Cuenco rectangular) o Divergentes como una extensión de las paredes laterales de la transición (Cuenco trapezoidal)
  - 11) Una pared de cierre de profundidad nominal debería ser usado en el extremo del cuenco.
  - 12) El efecto de aire arrastrado debería despreciarse en el diseño del cuenco.
- \* LA ESTRUCTURA "SAF" ES MÁS CORTA CORTA Y MÁS ECONÓMICA QUE LA ESTRUCTURA "TIPO III" DEL BUREAU OF RECLAMATION, PERO, EN CONSECUENCIA, TIENE UN FACTOR DE SEGURIDAD MÁS BAJO.



**FIGURA N° 33.2**

### 3.2.2 ESTRUCTURAS DEL BUREAU OF RECLAMATION

VARIOS HAN SIDO LOS TIPOS DE ESTRUCTURAS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR RESALTO DESARROLLADOS Y PERFECCIONADOS POR EL BUREAU OF RECLAMATION EN DENVER, COLORADO, USA. [ U.S. B.O.R., Hyd. Lab. Report N° Hyd. 399, 1955 ] ( J.N. Bradley y A. Peterka. Proceedings, American Society of Civil Engineers, Journal, Hyd. Division, Vol. 83, 1957 ). A CONTINUACIÓN SE PRESENTAN LAS MÁS IMPORTANTES.

#### a) TIPO I

LA ESTRUCTURA TIPO I SE HA DISEÑADO PARA UN RESALTO SOBRE UN PISO PLANO Y SIN DEFLECTORES. CORRESPONDE A CONDICIONES DE DISIPACIÓN DEL RESALTO CLÁSICO.

#### • CAMPO DE APLICACIÓN

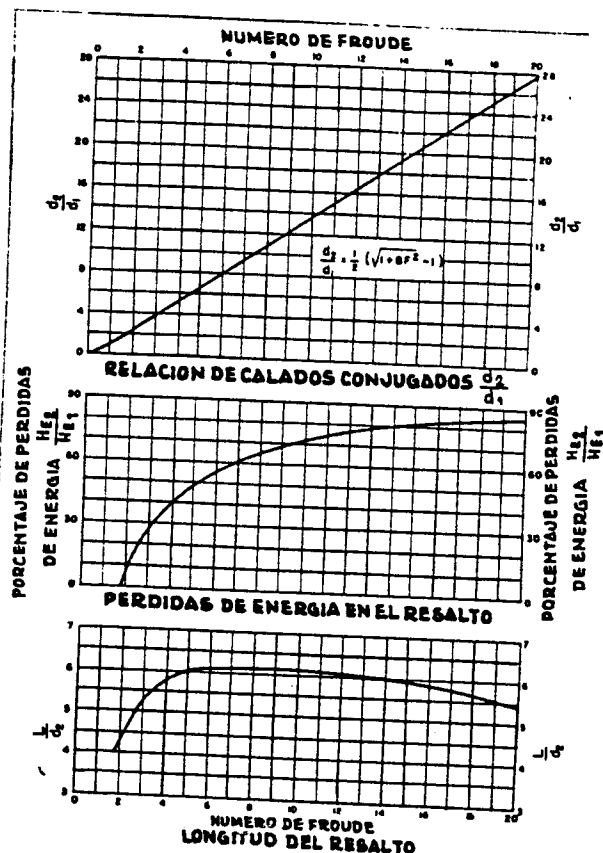
ALTURAS DE CAIDA:  $H > 60 \text{ m}$

CAUDAL UNITARIO:  $q > 45 \text{ m}^2/\text{s}$

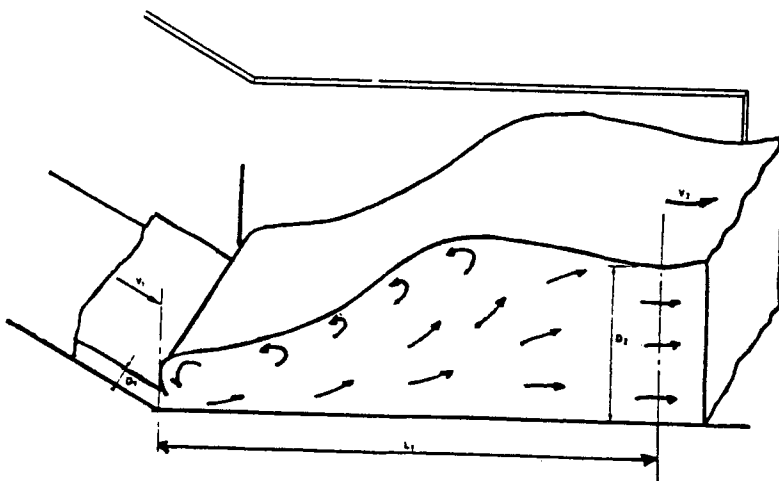
NÚMERO DE FROUDE:  $4,5 \leq F_1 \leq 9$

#### • CARACTERÍSTICAS

LONGITUD DEL CUENCO:  $L_1 \approx 6,42$



\* ESTA ESTRUCTURA NO ES MUY PRÁCTICA A CAUSA DE SU LONGITUD GRANDE Y FALTA DE CONTROL



**FIGURA N° 32.3**

## b) TIPO II

DESARROLLADO PARA VERTEDEROS DE PRESAS ALTAS Y ESTRUCTURAS DE GRANDES CANALES, PROVISTO DE DADOS EN LA ESCARPA Y UN UMBRAL DENTADO. NO SE UTILIRAN BLOQUES DE IMPACTO EN LA SOLERA DEBIDO A QUE LAS ALTAS VELOCIDADES PODRÍAN CAUSAR CAVITACIÓN.

### • CAMPO DE APLICACIÓN

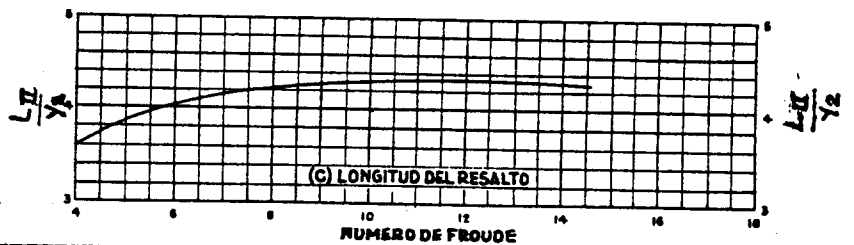
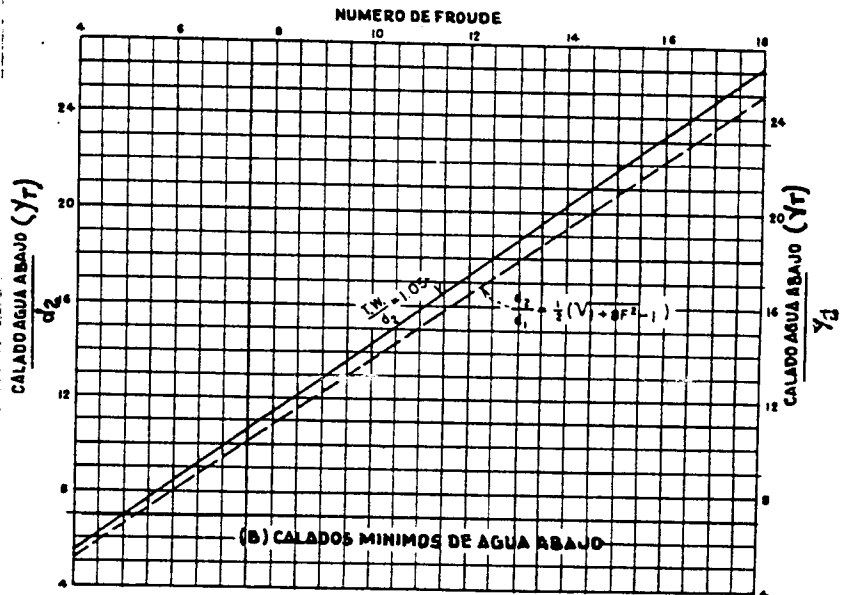
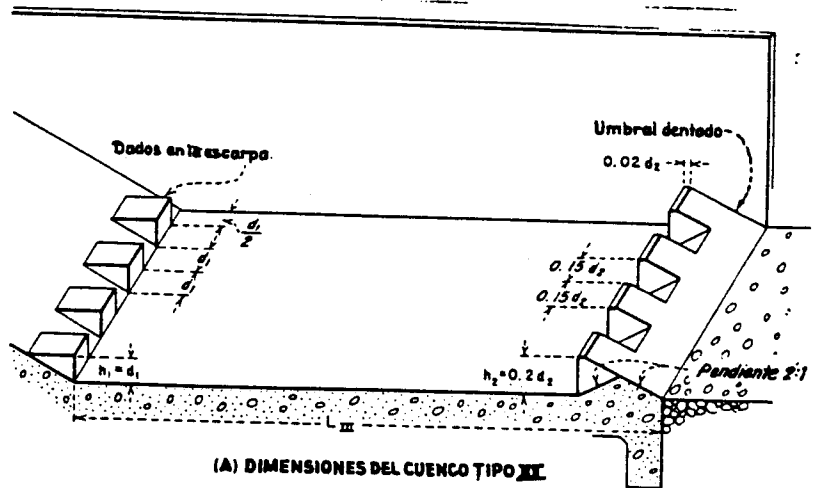
Números de Froude:  $F_1 > 4.5$

Caudales unitarios:  $q < 45 \frac{m^3}{s}$

Alturas de caída:  $H < 60 m$   
 $v_1 > 15 \frac{m}{s}$

### • CARACTERÍSTICAS

- Profundidad del Cuenco:  $y_T = 1.05 y_2$   
Por seguridad a que el Resalto se salga fuera del cuenco
- Longitud del cuenco:  $L_T \approx 0.7 L_T \approx 4.2 y_2$
- Bloques de escarpa:
  - Altura  $h_1 = y_1$
  - Se puede variar, para Ancho y esp. =  $y_1$
  - eliminar la necesidad de bloq. Fractales.
- Espacio desde la pared =  $0.5 y_1$   
Para reducir la difusión y mantener las presiones deseables.
- Umbral dentado:
  - Altura  $h_2 = 0.2 y_2$
  - Ancho y esp. =  $0.15 y_2$
  - Pendiente 2:1
  - Se recomienda un bloque adyacente a cada pared lateral
- En caso de Cuencos angostos, es recomendable reducir el ancho y espaciado de los dentados, proporcionalmente, para aumentar el número de éstos y mejorar por tanto la performance.
- No es necesario colocar en forma alternada los bloques de escarpa y los umbrales dentados.



**FIGURA Nº 32.4**



**C) TIPO III**

SE HA DISEÑADO PARA UN PROPÓSITO SIMILAR A LA DE LA ESTRUCTURA "SAF", PERO TIENE UN FACTOR DE SEGURIDAD MÁS ALTO, YA QUE REDUCE LA LONGITUD DEL RESALTO EN UN 60%, FRENTE AL 80% DE LA ESTRUCTURA "SAF". ESTÁ PROVISTO DE BLOQUES DE ESCARPA, BLOQUES DE IMPACTO EN LA SOLETA Y UN UMBRAL FINAL CONTINUO.

**CAMPO DE APLICACIÓN**

- Números de Froude :  $F_1 \geq 4.5$
- Velocidad de entrada :  $V_1 < 15 \text{ m/s}$
- Caudal unitario :  $q < 18 \text{ m}^2/\text{s}$
- Los valores de  $V_1$  y  $q$  pueden ser aumentados introduciendo ligeras modificaciones a la geometría de los bloques (REALIZAR MODELO HIDRÁULICO)

**CARACTERÍSTICAS**

- Profundidad del cuenco :  $Y_T = Y_2$
- Longitud del cuenco :  $L_{III} \approx 0.45L_1 \approx 2.7 Y_2$
- Bloques de la escarpa {
  - Altura :  $h_1 = Y_1$
  - Ancho y Esp. =  $Y_1$
  - Espacio desde pared =  $Y_1/2$
- Bloques de impacto {
  - Altura =  $f(F_1)$
  - Ancho y Esp. =  $f(F_1)$
  - Ubicación =  $0.8 Y_2$
  - Pendiente 1:1
- Umbral final continuo {
  - Altura =  $f(F_1)$
  - Pendiente 2:1

**FUERZA DINÁMICA EQUIVALENTE :**

Para el diseño estructural de los bloques se puede usar éste criterio.

$$F_{eq} = \frac{1}{1645} \gamma A (y_1 + h_{v1})$$

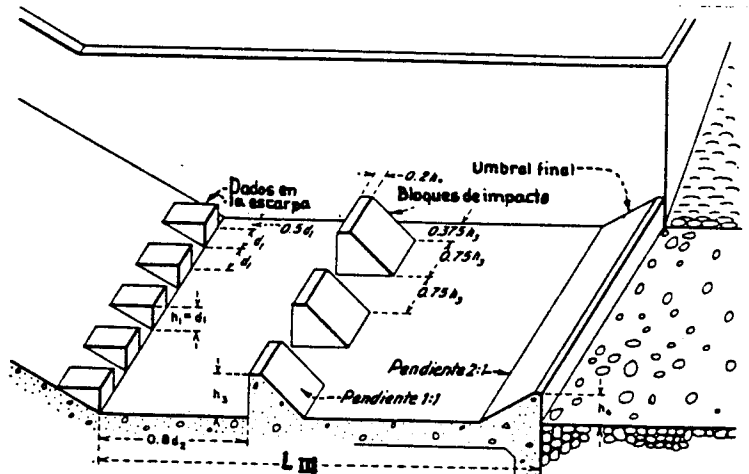
Donde:

$F_{eq}$  = Fuerza Dinámica Equivalente ( $\frac{Kg}{cm^2}$ )

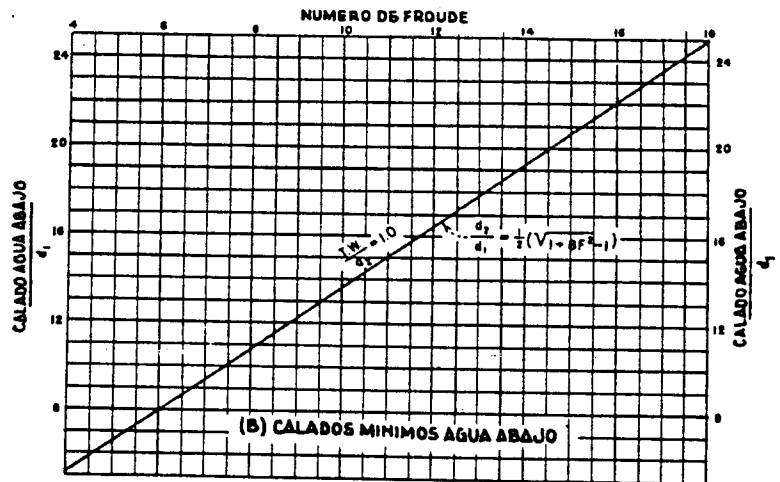
$\gamma$  = Peso Específico del agua ( $\frac{gr}{cm^3}$ )

$A$  = Area del bloque ( $cm^2$ )

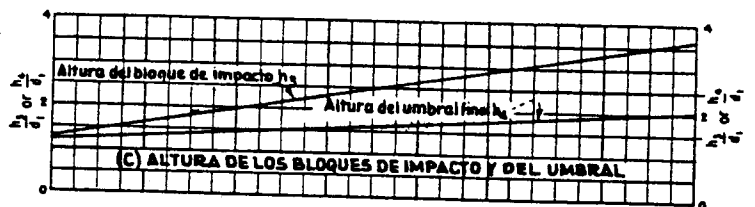
$(y_1 + h_{v1})$  = Energía Específica (m)



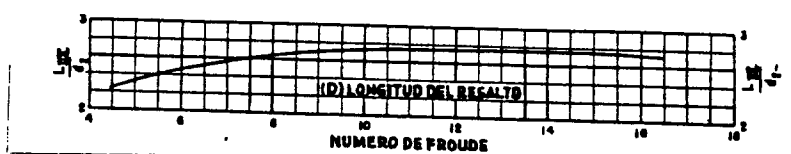
(A) DIMENSIONES DEL CUENCO TIPO II



(B) CALADOS MINIMOS AGUA ABAJO



(C) ALTURA DE LOS BLOQUES DE IMPACTO Y DEL UMBRAL



(D) LONGITUD DEL RESALTO

**FIGURA Nº 33.5**

d) TIPO IV

EST ESTRUCTURA ESTÁ DISEÑADA PARA COMBATIR EL PROBLEMA DE LAS ONDAS DEL RESALTO OSCILANTE ( $2.5 < F_1 < 4.5$ ) EN SU FUENTE. ESTO ES LOGRADO MEDIANTE LA INTENSIFICACIÓN DEL ROLO, CON CHORROS DIRECCIONADOS DEFLECTADOS, DESDE GRANDES BLOQUES DE CAIDA QUE COMO MÍNIMO SERÁN EN UN NÚMERO DE TRES. PARA MEJORAR EL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO, ES RECOMENDABLE CONSTRUIR ESTOS BLOQUES CON UNA SEPARACIÓN ( $S = 0.75 Y_1$ ) Y ESTABLECER LA PROFUNDIDAD DEL CUENCO EN ( $Y_T = 1.10 Y_2$ ).

"ESTA ESTRUCTURA ES APLICABLE SOLAMENTE A SECCIONES RECTANGULARES."

• CAMPO DE APLICACIÓN

- Números de Froude:  $2.5 < F_1 < 4.5$

• CARACTERÍSTICAS

- Profundidad del cuenco:  $Y_T = 1.10 Y_2$

- Contrarrestar la tendencia del Resalto a salir fuera del cuenco
- Reducir la acción del oleaje

- Longitud del cuenco:  $L_{cu} \approx L_T \approx 5 a 6 Y_2$

- Bloques de escarpa {  
 Altura =  $2 Y_1$   
 Ancho máx. =  $Y_1$   
 Largo mín. =  $2 Y_1$   
 Separac. ópt. =  $0.75 Y_1$   
 Angulo con horiz =  $5^\circ$

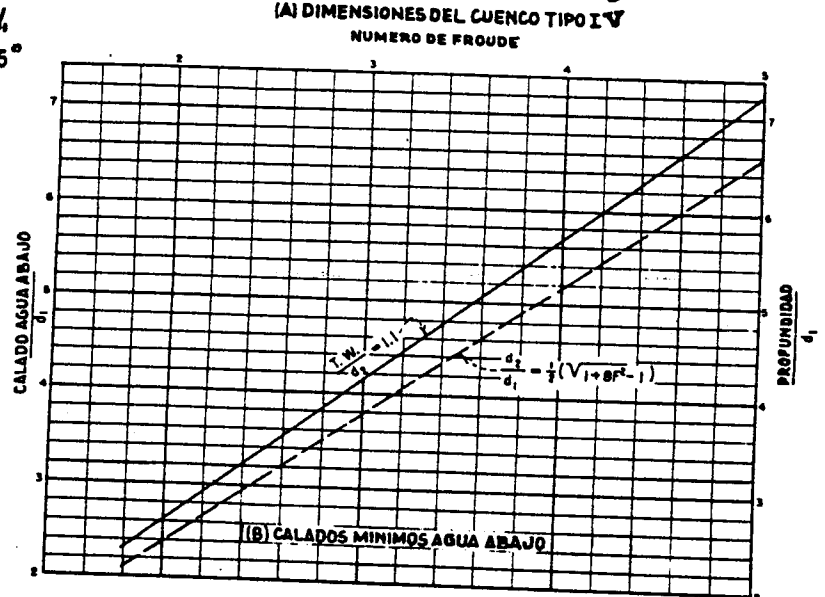
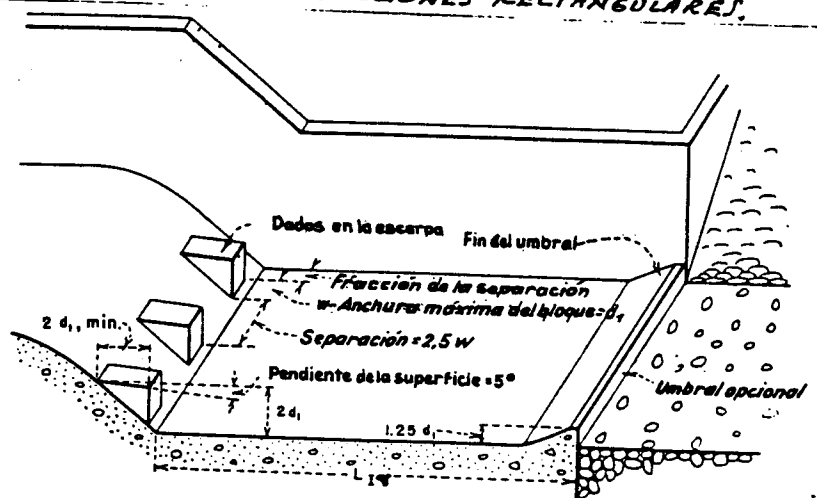
- Umbral final continuo {  
 Es opcional {  
 Altura =  $1.25 Y_1$   
 Pendiente = 2:1

\* Se puede evitar el diseño de esta estructura, dimensionando de manera que el  $F_1$  salga del intervalo de Resalto Oscilante.

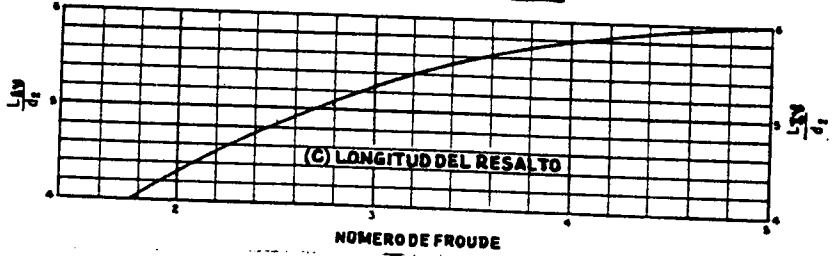
• Estructuras alternativas al TIPO IV:

- Del BUREAU {  
 Tipo Impacto  
 Disipador de Caída  
 Supresoras de Onda

- Del ISWS {  
 Cuenco Tipo 'L'  
 (Illinois State Water Survey)



**FIGURA Nº 33.6**



## e) DISIPADOR DE IMPACTO

ESTE DISIPADOR FUNCIONA CON RESULTADOS SATISFACTORIOS, INCLUSO CUANDO LA CONDICIONES DEL CALADO AGUAS ABAJO SON DEFICIENTES. SE USAN FRECUENTEMENTE EN LAS TOMAS Y DESCARGAS DE LAS PRESAS, ALIVIADEROS DE CANAL, ETC.

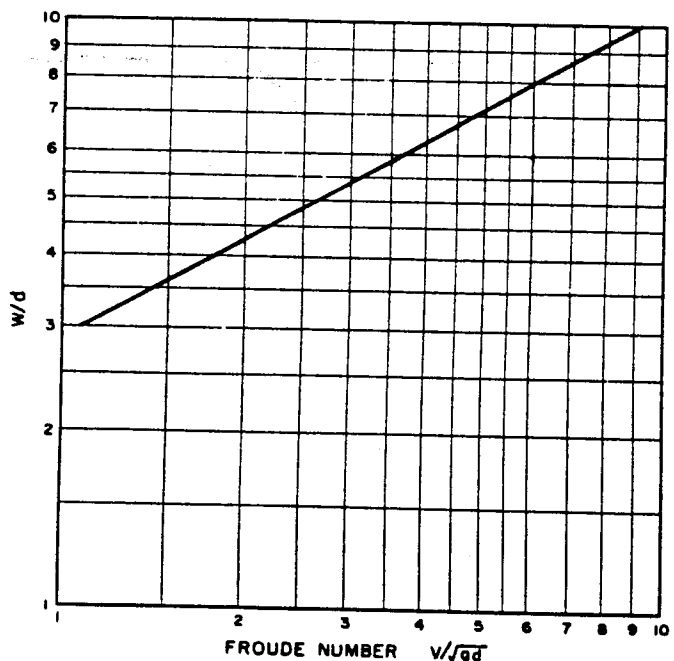
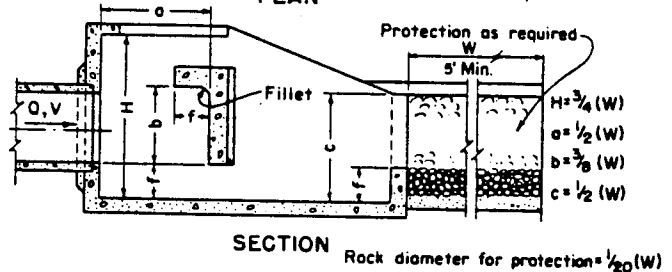
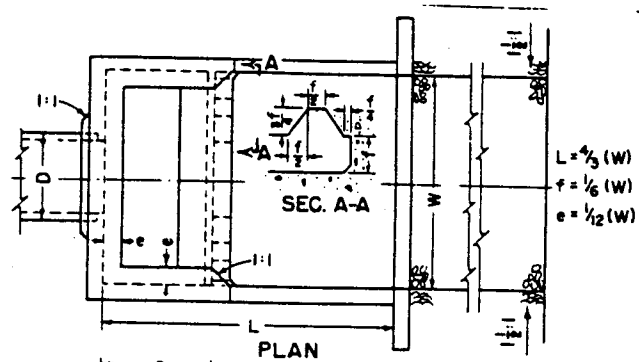
LA DISIPACIÓN DE ENERGIA SE PRODUCE POR EL CHOQUE DEL CHORRO CON EL MURO DE IMPACTO Y POR LOS REMOINOS QUE SE FORMAN AL CAMBIAR LA DIRECCIÓN EL CHORRO DESPUÉS DE SU CHOQUE.

### • CAMPO DE APLICACIÓN

- Números de Froude:  $F_1 < 9$
- Velocidad de entrada:  $V_1 < 9 \frac{m}{s}$
- Caudales:  $Q < 11 \text{ m}^3/s$

### • CARACTERÍSTICAS

- Longitud del cuenco:  $L_{\text{mo}} \approx 0,50 L_{\text{W}}$
- LAS PRINCIPALES DIMENSIONES SE MUESTRAN EN LA FIGURA ADJUNTA.
- La parte inferior del deflector debe colocarse al mismo nivel que al canal o tubo de entrada.
- Para descargas ( $Q > 11 \text{ m}^3/s$ ) pueden utilizarse varios disipadores en paralelo.
- La solera y los laterales del canal de salida deben revestirse con escollera para reducir la erosión, sobre todo cuando el calado aguas abajo es muy pequeño.



**FIGURA No. 33.7**

### 3.2.3 ESTRUCTURA DEL "ISWIS"

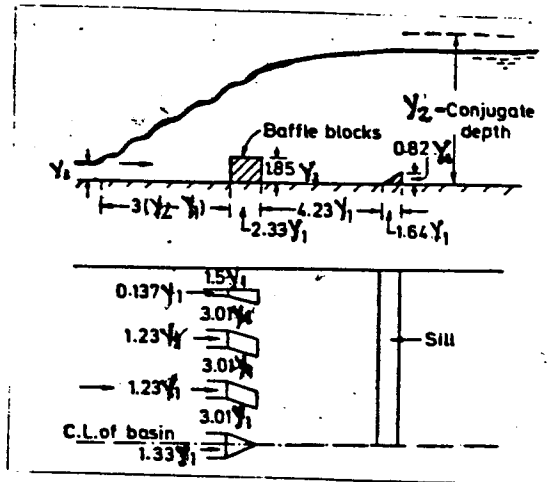
EL ILLINOIS STATE WATER SURVEY (ISWIS) HA DESARROLLADO UNA ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN PARA DESCARGAS DE ALIVIAERO, DENOMINADO "TIPO L", CON FUNCIONAMIENTO ENTRE NÚMEROS DE FROUDE ( $2,5 \leq F_1 \leq 4,5$ ). PRESENTA UNA EFICACIA SIMILAR AL "TIPO IV" DEL BUREAU OF RECLAMATION, PERO EXIGE UNA LONGITUD BASTANTE MENOR.

#### • CAMPO DE APLICACIÓN

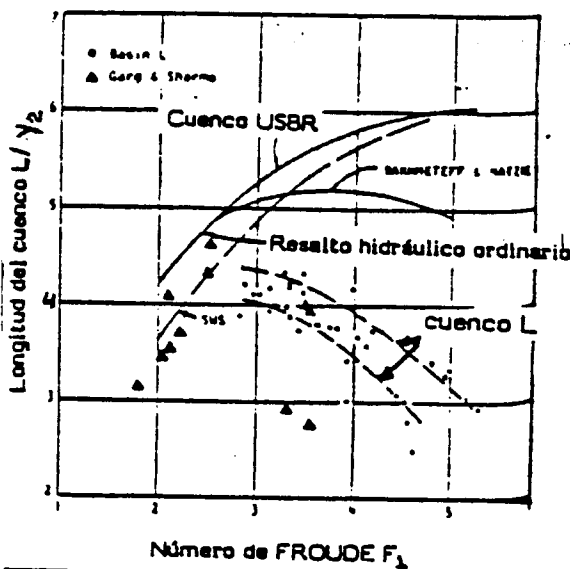
- Números de Froude:  $2,5 \leq F_1 \leq 4,5$
- Velocidad:  $V_1 < 15 \frac{m}{s}$

#### • CARACTERÍSTICAS

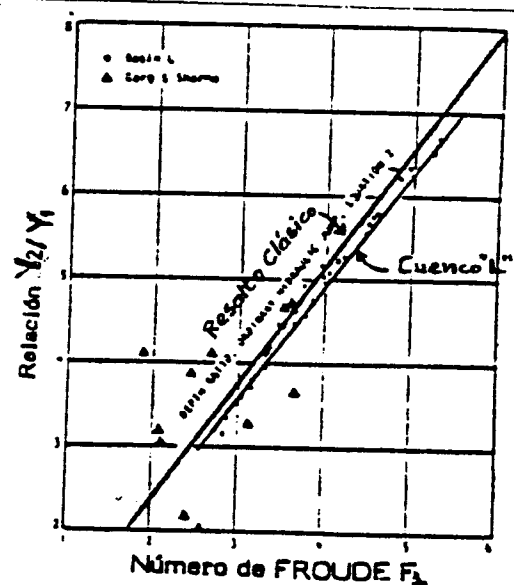
- Longitud del cuenco:  $L_2 \geq (0,60 - 0,80) L_{IV}$
- Bloques de impacto
  - Ubicación =  $3(Y_2 - Y_1)$
  - Altura =  $1,85 Y_1$
  - Ancho =  $1,23 Y_1$
  - Con deflexión hacia el centro del cuenco, para provocar el choque de los flujos
  - Largo =  $2,33 Y_1$
  - Separación =  $3,01 Y_1$
- Umbral final continuo
  - Altura =  $0,82 Y_1$
  - Ancho =  $1,64 Y_1$



**FIGURA N° 34.1**



**FIGURA N° 34.2**



**FIGURA N° 34.3**

### 3.2.4 ESTRUCTURAS DEL "VNIIG"

VARIOS SON LOS TIPOS DE ESTRUCTURAS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR RESALTO DESARROLLADOS POR EL "INSTITUTO HIDROTÉCNICO VEDENEEV" (VNIIG), EN LENINGRADO, UNIÓN SOVIÉTICA. LOS MÁS RECOMENDADOS SON LOS QUE A CONTINUACIÓN SE INDICAN Y SU USO PUEDE SER CONSIDERADO PARA NÚMEROS DE FROUDE VARIANDO ENTRE 2,5 Y 10

#### a) TIPO SIMPLES

- Análogo al "TIPO I" del B.R., con una longitud ligeramente mayor e igual a siete veces la diferencia de los calados conjugados

- Longitud del cuenco =  $L_1 = 7(y_2 - y_1)$

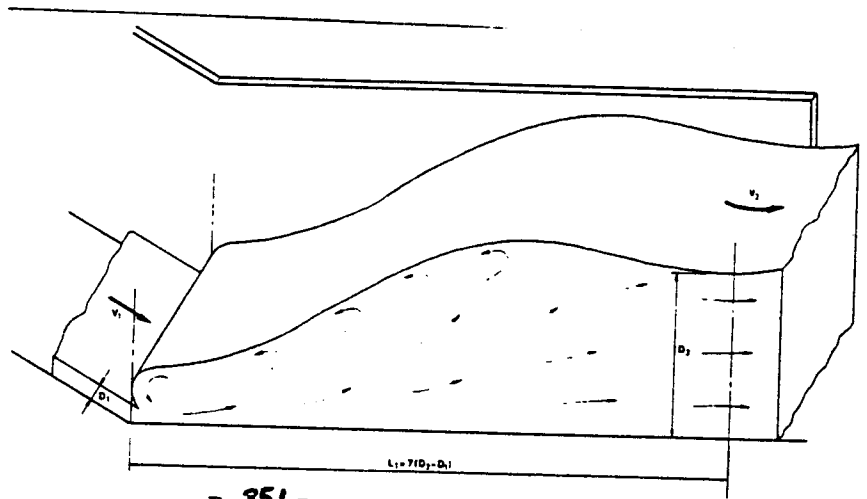


FIG. 351 Estructura tipo VNIIG - SIMPLES

#### b) TIPO GUNKO

Es una estructura compacta, provista de una contrabarrera continua con una altura "C" variable con el número de Froude.

##### • CAMPO DE APLICACIÓN

- Números de Froude:  $2,5 \leq F_1 \leq 10$
- Caudal unitario:  $q < 80 \frac{m^2}{s}$
- Altura de caída:  $H \leq 40 m$

##### • CARACTERÍSTICAS

- Altura contrabarrera:  $1,5 \leq C \leq 2 y_1$
- Ubicación d' contrabarreras  $3/2$

\* Introduciendo alguna modificación a la geometría de la contrabarrera puede aumentarse hasta una altura de caída de 64 m

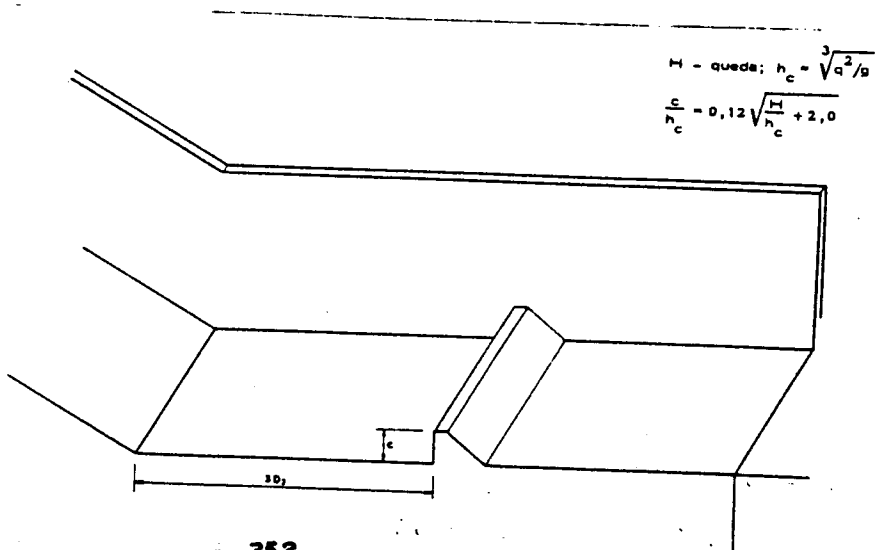


FIG. 352 Estructura tipo VNIIG - GUNKO

### c) TIPO LYAPIN

Es una estructura compacta provista de una fila de bloques con altura "d" variable con el número de Froude.

#### • CAMPO DE APLICACIÓN

- Números de Froude:  $2,5 \leq F_1 \leq 10$
- Caudal unitario:  $q < 80 \frac{m^3}{s}$
- Altura de caída:  $H \leq 19 m$

#### • CARACTERÍSTICAS

- Altura de bloques:  $1,5\% \leq d \leq 3,5\%$
  - Relación ancho-separación:  $\frac{a}{b} = 3,4$
  - Relación cresta-ancho:  $\frac{e}{a} = 1$
  - Relación altura-ancho:  $1 \leq \frac{d}{a} \leq 2,4$
  - Ubicación de los bloques:  $3\gamma_2$
- \* Modificando la geometría de los bloques puede aumentarse hasta un  $H = 40 m$ .

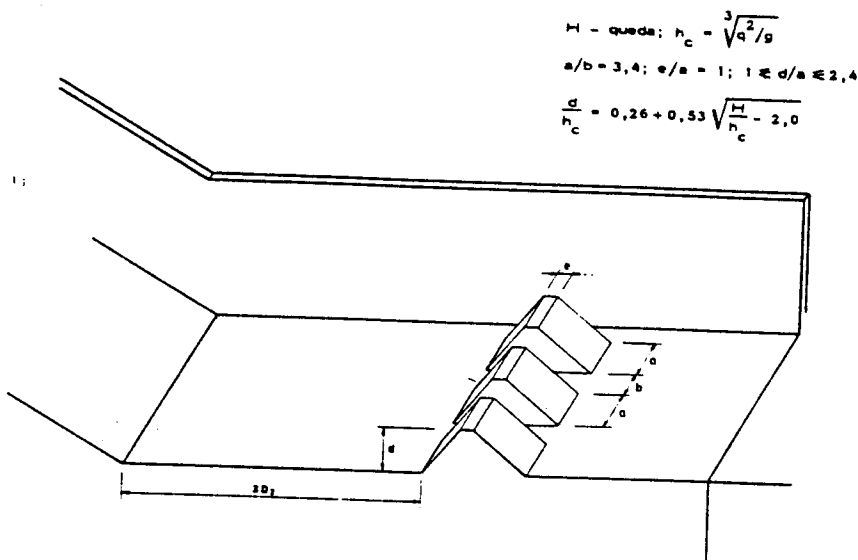


FIG. 353 Estructura tipo VNIIG — LYAPIN

### d) TIPO KUMIN

Es una estructura compacta, provista de bloques disipadores de geometría un tanto compleja. Las alturas de los bloques no son constantes, aumentando desde la parte central a los extremos. Es considerada la estructura más eficiente para la disipación de energía.

#### • CAMPO DE APLICACIÓN

- Números de Froude:  $2,5 \leq F_1 \leq 10$
- Caudal unitario:  $q < 100 \frac{m^3}{s}$
- Altura de caída:  $H \leq 30 m$

#### • CARACTERÍSTICAS

- Altura de bloques:  $\begin{cases} \text{Centro: } 0,35 \gamma_c \\ \text{extremos: } 0,7 \gamma_c \end{cases}$
- Ancho de bloques:  $(0,6 - 0,8) \gamma_c$
- Ancho de coronación:  $0,11 \gamma_c$
- Ubicación:  $1,30 \gamma_c$

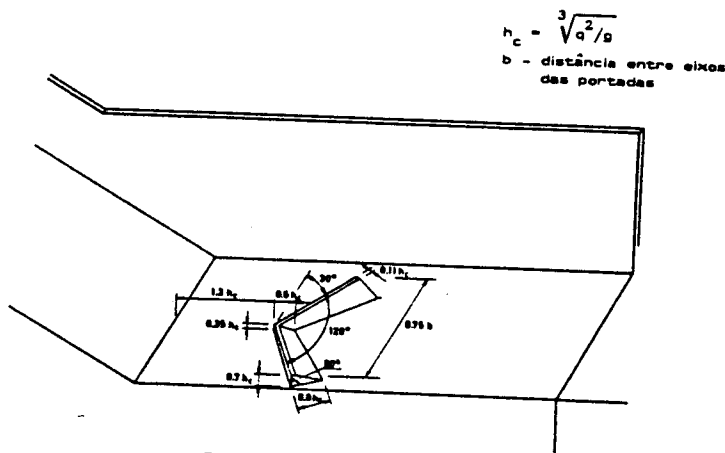


FIG. 354 Estructura tipo VNIIG — KUMIN

### 3.2.5 CONTROL DE LAS EROSIONES LOCALIZADAS

PARA LAS ESTRUCTURAS NORMALIZADAS: SAF, BUREAU OF RECLAMATION (LOS CUATRO TIPOS) Y TIPO "L" (ISWS), RECOMIENDAN QUE CUANDO LA NATURALEZA DEL TERRENO LO NECESITE, SE UTILICE ENROCAMIENTO DE PROTECCIÓN PARA CONTROLAR LAS EROSIONES PRODUCIDAS POR LA MACROTURBULENCIA RESIDUAL DEL RESALTO.

PARA EL DISIPADOR DE "IMPACTO" DEL BUREAU, SE ACONSEJA QUE LA SOLERA Y LOS LATERALES DEL CANAL DE SALIDA SE REVISTAN CON ESCOLLERA PARA REDUCIR LA EROSIÓN, QUE PUEDE PRODUCIR EL AGUA AL ABANDONAR EL DIVIDOR, SOBRE TODO CUANDO EL CALADO DE AGUAS ABATO ES MUY PEQUEÑO. ESTO TAMBIÉN SE CONSIGUE CON MUROS EN VUELTA A 45°, REDUCIÉNDOSE ADEMÁS LAS CONCENTRACIONES DEL FLUJO AGUAS ABATO.

EN LAS ESTRUCTURAS DEL "VNIIG" ACONSEJAN EL CONTROL DE LAS EROSIONES LOCALIZADAS POR MEDIO DEL ENROCAMIENTO DE PROTECCIÓN. SIN EMBARGO, ALCUNAS VECES LAS DIMENSIONES EXIGIDAS PARA EL ENROCAMIENTO SON TAN GRANDES POR EFECTO DE LA MACROTURBULENCIA RESIDUAL, QUE ES MÁS ECONÓMICO UTILIZAR UNA SOLERA CONTÍNUA.

ES FRECUENTE, EN CASO DE VERTEDEROS CONSTRUIDOS SOBRE FUNDACIONES NO ROCOSAS, EXIGIR UNA SOLERA DONDE SE INSERTAN LOS BLOQUES DISIPADORES, SEGUIDO DE UN ENSCLERAMIENTO, A SU VEZ PROTEGIDO POR UN ENROCAMIENTO COLGADO AL FINAL.

### 3.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS ESTRUCTURAS NORMALIZADAS

COMO YA SE HA VISTO LAS ESTRUCTURAS NORMALIZADAS TIENEN UN CAMPO DE APLICACIÓN DEFINIDO POR EL NÚMERO DE FROUDE Y UNA COMBINACIÓN CON EL CAUDAL, VELOCIDAD Y/O ALTURA DE CAIDA.

UNA VEZ UBICADOS EN UN CIERTO CAMPO DE APLICACIÓN, DEFINIDO POR EL CASO PARTICULAR EN ESTUDIO, TENEMOS LA ALTERNATIVA DE ESCOGER ENTRE VARIOS TIPOS DE ESTRUCTURAS NORMALIZADAS, LA ELECCIÓN DE LA SOLUCIÓN DEFINITIVA RESULTARÁ DEL ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO COMPARATIVO DE LAS DIFERENTES VARIANTES.

POR CONSIDERAR DE INTERÉS SE PRESENTA A CONTINUACIÓN LAS CONCLUSIONES DE UN ESTUDIO EXPERIMENTAL, REALIZADO POR OLIVEIRA LEMOS F. Y LOGO FERREIRA J. [LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL DE LISBADA, MEMORIA Nº 502, 1978], LOS CUALES COMPARAN LA ESTRUCTURA "TIPO III" DEL BUREAU CON LA "KUMIN" DEL "VNIIG". (Fig. Nº 36.1)

EL ESTUDIO INCIDE SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS GENERALES DE FUNCIONAMIENTO (fig. 36.2-36.3) Y DE LAS EROSIONES LOCALIZADAS AL FINAL (fig. 36.4-36.5)

LAS CONCLUSIONES DEL ESTUDIO SON LAS SIGUIENTES:

- \* Una estructura Tipo "KUMIN" con una longitud igual a la estructura del Tipo III ( $L_{III} = 0,41 L_1 = 2,43 Y_2$ ) denota mayor turbulencia residual del resalto, provocando por tanto erosiones localizadas substancialmente más profundas y extensas. (Ver fig. 36.4)
- \*\* Para que las erosiones sean equivalentes es necesario dar una solera a la estructura "KUMIN" de una longitud ( $L_K = 0,74 L_1 = 4,42 Y_2$ ) (Ver fig. 36.5)
- \*\*\* Dada la configuración del resalto (fig. 36.2-36.3), es más estable la producida por la tipo III, en consecuencia la altura de los muros de ésta estructura serán más pequeños que la Tipo "KUMIN".
- \*\*\*\* El poder de fijación del resalto en los dos tipos de estructuras es análogo y se tornan particularmente aptos para niveles bajos aguas abajo



- \* La estructura Tipo "KUMIN" produce mayor emulsionamiento de aire en el resalto, en particular junto a los dos bloques disipadores por lo que se recomienda su uso cuando existe riesgo de cavitación.
- \* Las solicitaciones dinámicas verticales son más intensas en la estructura Tipo "KUMIN", en cuanto que a las horizontales son sobre la estructura Tipo "III".

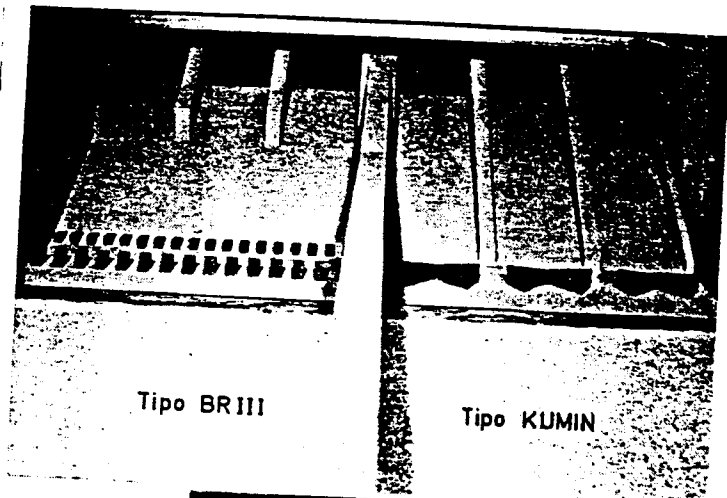


FIG. 36.1  
Estructuras ensaiadas

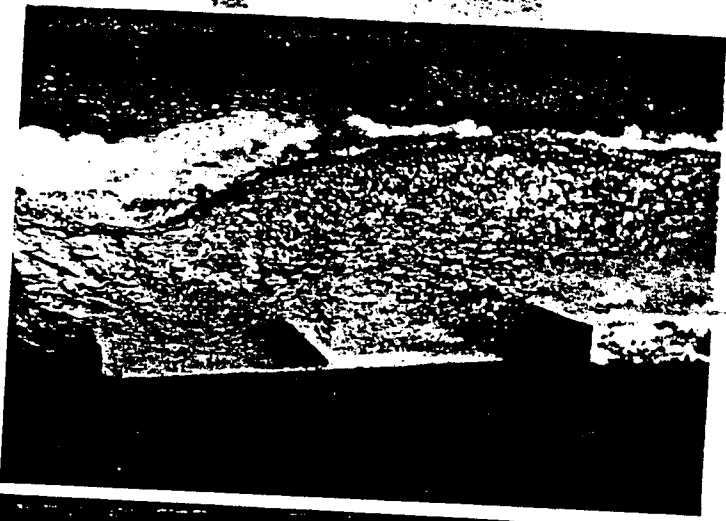


FIG. 36.2  
Funcionamiento do tipo BR III

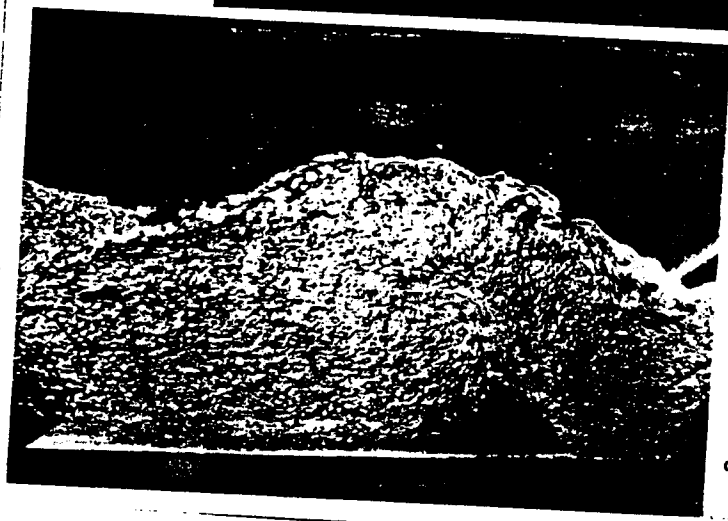


FIG. 36.3  
Funcionamiento do tipo KUMIN

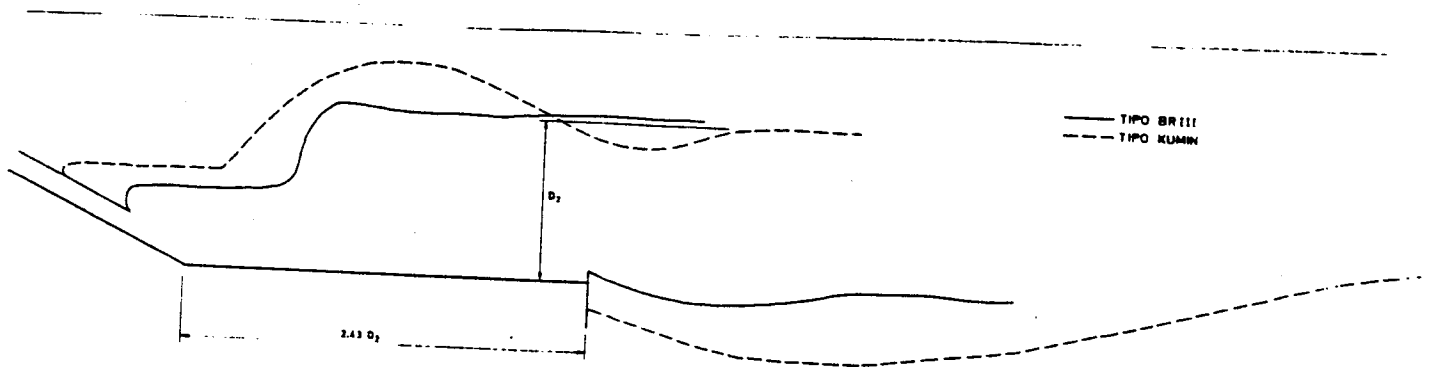


FIG. 364 Erosões produzidas com estruturas de igual comprimento

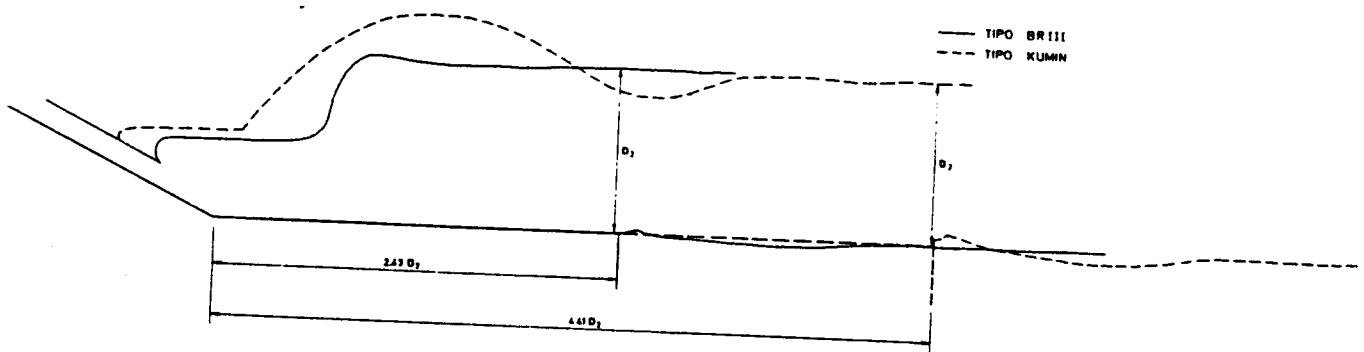


FIG. 365 Estruturas que originam erosões equivalentes

RESUMIENDO DIREMOS QUE LOS PARÁMETROS COMPARATIVOS DE LA EFICIENCIA DE LAS ESTRUCTURAS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA SON LA LONGITUD DEL CUENCO, ESTABILIZACIÓN, FIJACIÓN Y TURBULENCIA RESIDUAL DEL RESALTO. ADEMÁS SE DEBE CONSIDERAR LAS ACCIONES DINÁMICAS DEL FLUJO, QUE INFLUYERÁN EN EL COSTO DE LAS ESTRUCTURAS.

Con el fin de orientar el uso de estas estructuras normalizadas, se presenta a continuación un Diagrama de Flujo que ubica en una primera aproximación el tipo de dissipador de energía más conveniente, en función del número de Froude y velocidad a la entrada de la estructura (condiciones supercríticas). Además se da la prioridad de uso en función de la longitud del cuenco, que es solamente uno de los parámetros que caracteriza la eficiencia de los dissipadores.

# ESTRUCTURAS NORMALIZADAS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA

$F_1, V_1, \eta$

No Si

$F_1 > 4,5$

SAF  
TIPO IV  
IMPACTO  
TIPO L  
GUNKO  
LYAPIN  
KUMIN

SAF  
TIPO I  
TIPO II  
TIPO III  
IMPACTO  
SIMPLES  
LYAPIN  
GUNKO  
KUMIN

No Si

$F_1 > 2,5$

SAF  
IMPACTO  
 $1,7 < F_1 < 2,5$

SAF  
TIPO IV  
IMPACTO  
TIPO L  
GUNKO  
LYAPIN  
KUMIN  
 $2,5 < F_1 < 4,5$

No Si

$V_1 > 9$

IMPACTO  
 $L_0 = (4V_1 - 0,60) \frac{1}{2}$   
SAF  
 $L_0 = (2,2 - 2,0) \frac{1}{2}$   
 $1,7 < F_1 < 2,5$   
 $V_1 < 9$

SAF  
 $L_0 = (2,2 - 3,0) \frac{1}{2}$   
 $1,7 < F_1 < 2,5$   
 $9 < V_1 < 15$

No Si

$V_1 > 9$

(1) (2)

No Si

$F_1 > 10$

SAF  
TIPO I  
TIPO II  
TIPO III  
IMPACTO  
SIMPLES  
LYAPIN  
GUNKO  
KUMIN  
 $4,5 < F_1 < 10$

SAF  
TIPO II  
TIPO III  
 $F_1 > 10$

No Si

$V_1 > 15$

SAF  
TIPO III  
 $F_1 > 10$   
 $V_1 < 15$

TIPO II  
 $L = 4,3 \frac{1}{2}$   
 $F_1 > 10$   
 $V_1 > 15$

No Si

$V_1 > 9$

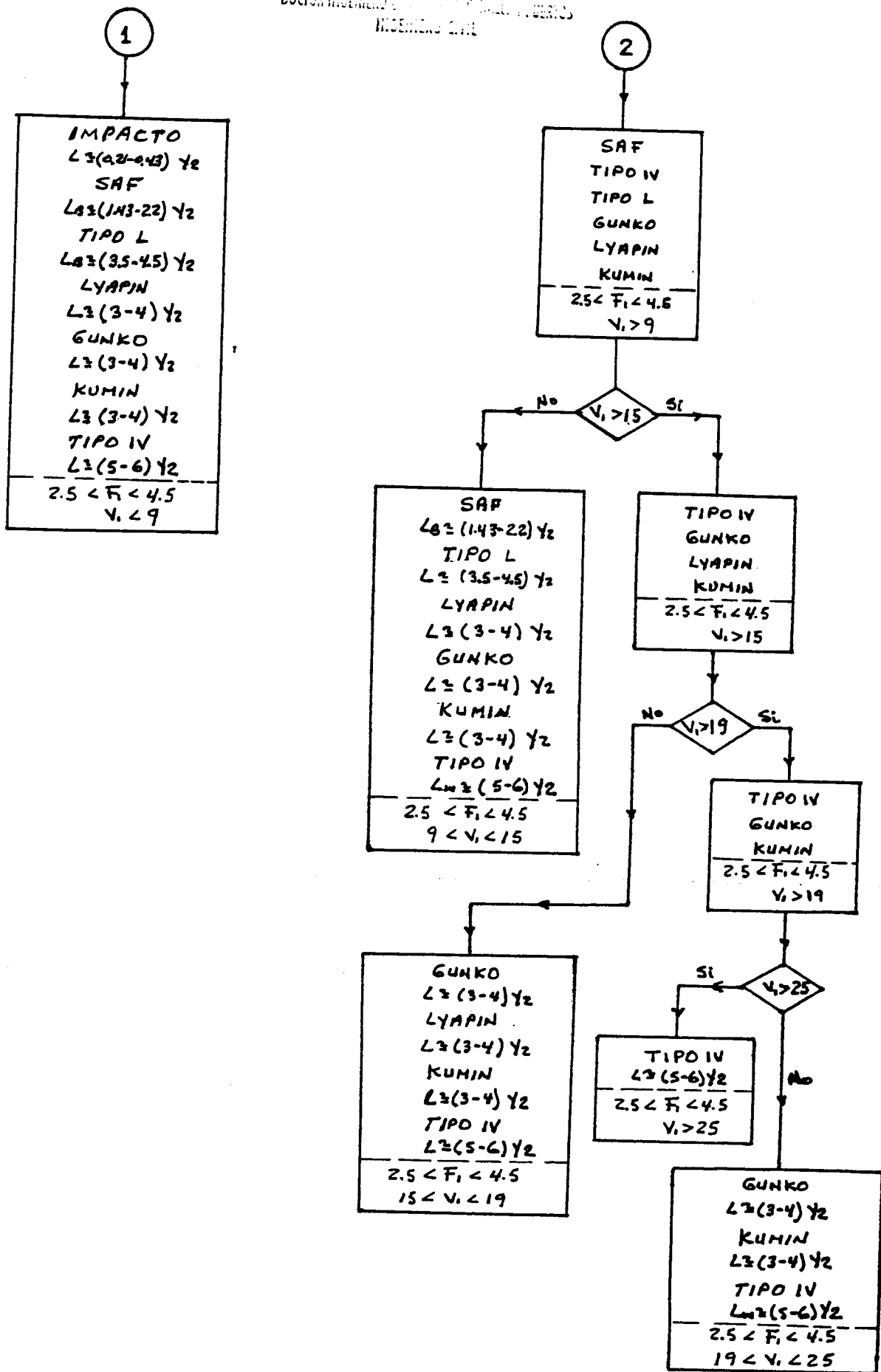
(3) (4)

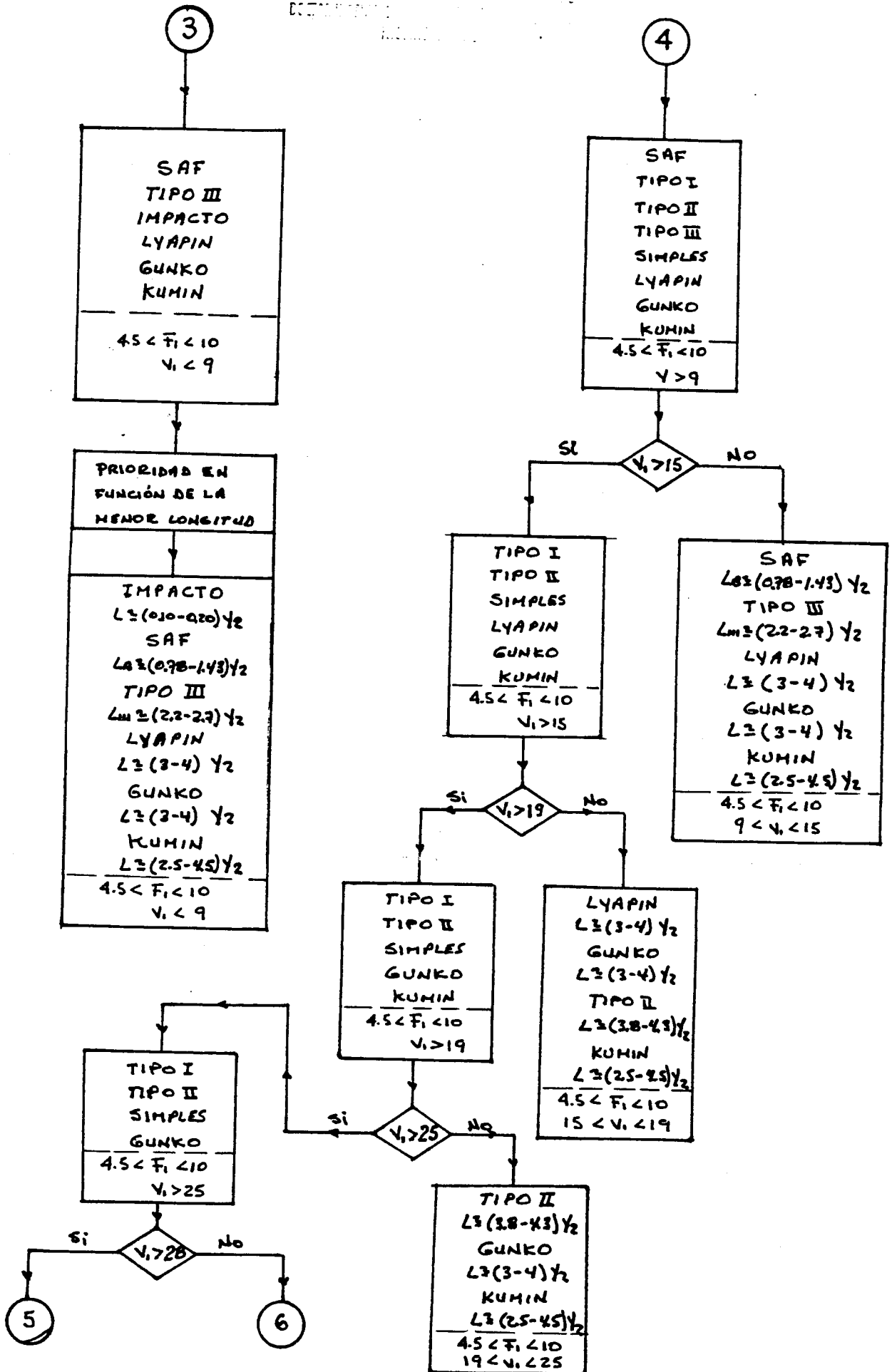
SAF  
 $L_0 = \frac{1}{2}$   
 $F_1 > 10$   
 $V_1 < 15$   
F.S. BAJO

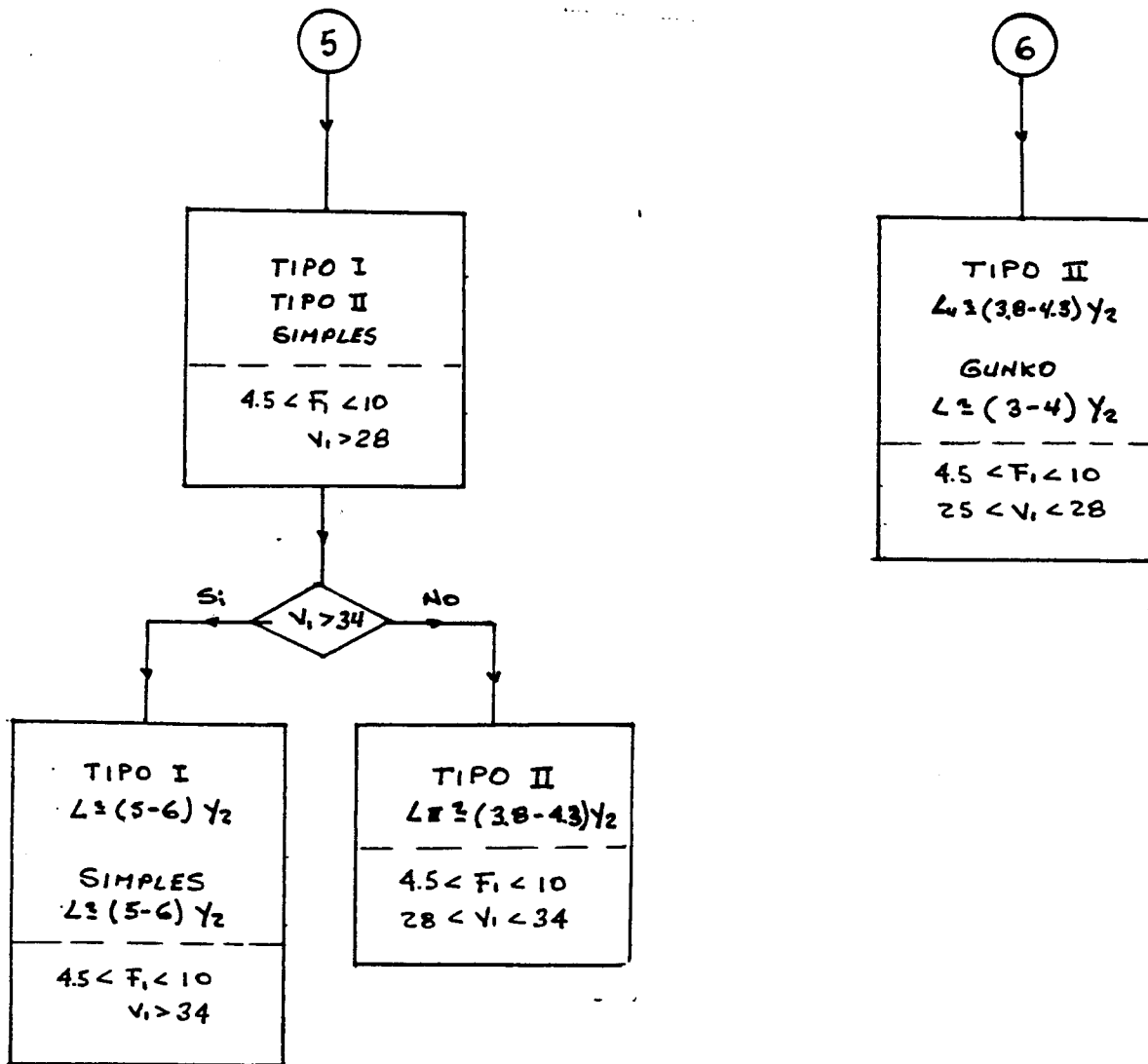
TIPO III  
 $L_0 = 2,8 \frac{1}{2}$   
 $F_1 > 10$   
 $V_1 < 15$   
FACTOR SEG. ALTO

No Si

F.S. ALTO







Como una consecuencia del "Diagrama de Flujo", se presenta a continuación un cuadro de resumen de las Estructuras Normalizadas de Disipación de Energía, clasificados en función de los intervalos de variación de los Números de Froude y Velocidad, así como también, de las longitudes de las cuencas.

**ESTRUCTURAS NORMALIZADAS DE DISIPACIÓN**

NÚMEROS DE FROUDE	VELOCIDAD (m/s)	TIPOS DE DISIPADORES	LONGITUD DE LA ESTRUCTURA	OBSERVACIONES
1.7 < F <sub>r</sub> < 2.5	V <sub>i</sub> < 9	IMPACTO SAF	(0.43-0.68) 1/2 (2.2-3.0) 1/2	
	9 < V <sub>i</sub> < 15	SAF	(2.2-3.0) 1/2	
2.5 < F <sub>r</sub> < 4.5	V <sub>i</sub> < 9	IMPACTO	(0.21-0.43) 1/2	
		SAF	(1.43-2.2) 1/2	
		LYAPIN	(3.0-4.0) 1/2	
		GUNKO	(3.0-4.0) 1/2	
		KUMIN	(3.0-4.0) 1/2	
		TIPO L	(3.5-4.5) 1/2	
	TIPO IV	(5.0-6.0) 1/2		
	9 < V <sub>i</sub> < 15	SAF	(1.43-2.2) 1/2	
		LYAPIN	(3.0-4.0) 1/2	
		GUNKO	(3.0-4.0) 1/2	
KUMIN		(3.0-4.0) 1/2		
15 < V <sub>i</sub> < 19	TIPO L	(3.5-4.5) 1/2		
	TIPO IV	(5.0-6.0) 1/2		
19 < V <sub>i</sub> < 25	GUNKO	(3.0-4.0) 1/2		
	KUMIN	(3.0-4.0) 1/2		
V <sub>i</sub> > 25	TIPO IV	(5.0-6.0) 1/2		
4.5 < F <sub>r</sub> < 10	V <sub>i</sub> < 9	IMPACTO	(0.10-0.20) 1/2	
		SAF	(0.78-1.43) 1/2	
		TIPO III	(2.20-2.70) 1/2	
		LYAPIN	(3.0-4.0) 1/2	
		GUNKO	(3.0-4.0) 1/2	
	9 < V <sub>i</sub> < 15	KUMIN	(2.5-4.5) 1/2	
		SAF	(3.0-4.0) 1/2	
		TIPO III	(2.2-2.7) 1/2	
	15 < V <sub>i</sub> < 19	LYAPIN	(3.0-4.0) 1/2	
		GUNKO	(3.0-4.0) 1/2	
19 < V <sub>i</sub> < 25	TIPO II	(3.8-4.3) 1/2		
	KUMIN	(2.5-4.5) 1/2		
25 < V <sub>i</sub> < 28	GUNKO	(3.0-4.0) 1/2		
	TIPO II	(3.8-4.3) 1/2		
28 < V <sub>i</sub> < 34	GUNKO	(3.0-4.0) 1/2		
	TIPO II	(3.8-4.3) 1/2		
V <sub>i</sub> > 34	TIPO I	6 1/2		
	SIMPLES	7 (1/2-1)		
F <sub>r</sub> > 10	V <sub>i</sub> < 15	SAF	1e	
	V <sub>i</sub> > 15	TIPO III	2.8 1/2	
		TIPO II	4.3 1/2	

3.3.1 COMENTARIOS ADICIONALES SOBRE LAS ESTRUCTURAS NORMALIZADAS  
ANALIZANDO EL CUADRO RESUMEN, PODEMOS CONCLUIR:

- \* LA estructura SAF tiene un campo de aplicación muy grande y con prioridad clara sobre las demás para  $(1.7 < F_i < 17)$  y  $(9 < V_i < 15)$
- \* La estructura IMPACTO tiene prioridad sobre las demás para  $(F_i < 9)$  y  $(V_i < 9)$
- \* Las estructuras LYAPIN, GUNKO y KUMIN tienen prioridad para  $(2.5 < F_i < 10)$  y  $(15 < V_i < 19)$ . Además la estructura GUNKO tiene prioridad sobre las otras estructuras para  $(25 < V_i < 28)$
- \* La estructura KUMIN tendrá prioridad sobre las demás estructuras para  $(2.5 < F_i < 10)$  y  $(V_i > 15)$ , cuando se presenten problemas de Ca-  
uitación.
- \* La estructura TIPO II tiene prioridad para  $(4.5 < F_i < 10)$  y  $(28 < V_i < 34)$ ;  $(F_i > 10)$  y  $(V_i > 15)$ .
- \* La estructura TIPO III tiene prioridad para  $(F_i > 17)$  y  $(V_i < 15)$ . Es una muy buena alternativa para  $(4.5 < F_i < 10)$  y  $(V_i < 15)$ .
- \* Las estructuras TIPO I y SIMPLES tienen prioridad para  $(4.5 < F_i < 10)$  y  $(V_i > 34)$ , además de ser la únicas aptas para este campo de aplicación.
- \* La estructura TIPO IV tiene prioridad para  $(2.5 < F_i < 4.5)$  y  $(V_i > 25)$ . Es una alternativa para  $(2.5 < F_i < 4.5)$  y  $(V_i < 25)$ , pero con desventaja con respecto a las otras estructuras.
- \* La estructura TIPO L tiene un campo de aplicación para  $(2.5 < F_i < 4.5)$  y  $(V_i < 15)$ , pero con desventaja con respecto a las otras estructuras.



Si dos estructuras de disipación tienen igual poder de control sobre las erosiones localizadas, esto es proporcionan igual protección al lecho del río, entonces deberá escogerse aquella cuya construcción sea más económica.

En principio será más barata una estructura que tiene menos dimensiones, puesto que las cantidades de materiales a emplear y el volumen de excavaciones a efectuar serían también más reducidas.

Debe aclararse que este criterio de definición de índice económico para las estructuras de disipación, a partir de los volúmenes de sus elementos básicos y de las excavaciones necesarias para la ejecución de la obra, es solamente aproximado.

En rigor es necesario conocer la acción dinámica del flujo sobre los dispositivos de disipación, el cual origina esfuerzos concentrados, que es preciso absorber por medio de refuerzos de acero; por peso propio o por ambos.

Estando los elementos de la estructura de disipación sometidos a la acción de flujos con alta velocidad y elevada turbulencia, no puede dejarse de considerarse el riesgo de la cavitación, puesto que si llega a surgir, implicará reparaciones en general muy caras, y para ser evitado, obliga al empleo de materiales especiales, consecuentemente más caros.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Abdul Khander, M.H. and Elango, K. (1974).** “Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump”. Journal of Hydraulic Research, Delft. Vol. 12, N° 4, pp. 469-489
- Arbhabhrama, A. and Abella, A.U. (1971).** Hydraulic jump within gradually expanding channel”. Journal of Hydraulic Div., Proc. ASCE, Jan.
- Bakhmeteff, B.A. and Matzke, A.E. (1936).** “The hydraulic jump in terms of dynamic similarity”. Trans. American Society Civil Engineers, Vol. 101, pp. 630-647.
- Basco, D.R. and Adams, J.R. (1971).** “Drag Forces on Baffle Blocks in Hydraulic Jumps”. Journal of Hydraulic Research. Proc. ASCE, Dec.
- Chow, V. T. (1959).** “Open Channel Hydraulics”. Ed. McGraw-Hill, Inc. New York. USA
- Bureau of Reclamation (1973).** “Desing of Small Dams”, U.S. Department of the Interior, Washington D.C.
- Bureau of Reclamation (1955).** “Research studies on stilling basins, energy dissipators and associated appurtenances”. Hydraulics Laboratory. Report N° Hyd-399, June.
- Elevatorsky, E.A; (1959).** “Hydraulic energy dissipators”. McGraw-Hill. New York. USA.
- Foster, J.W. and Skrinde, R.A. (1949).** “Control of Hydraulic Jump by Sills”. Proc, American Society Civil Engineers, April.
- Fred, W. And Blaisdell (1948).** “SAF Structure”. ST. Anthony Fall Laboratory. Journal of Hydraulic Research. Vol 113.
- Gunko, F.G. (1967).** “ Macroturbulence of flows below spillways of medium head dams and their protection against undermining. 12<sup>th</sup> IAHR.
- Harleman, D.R.F. (1959).** “Discusión of turbulence characteristics of the hydraulic jump”. Trans. ASCE, Vol. 124.
- Herbrand, K. (1973).** “ The Spatial Hydraulic Jump”. Journal of Hydraulic Research. Vol 11, N°3.
- Kindsvater, C.E. (1944).** “The hydraulic jump in sloping channels”. Trans. ASCE, Vol. 109, pp. 1107-1120.
- Leutheusser, H.J. and Kartha, V.C. (1972).** “Effect of inflow condition on hydraulic jump”. Journal of Hydraulic Divition, Proc. ASCE, Aug.
- Moore, W.L. (1943).** “Energy loss at the base of a free overall”. Transactions, ASCE, Vol. 108, pp. 1343-1360.
- Nebbia, G. (1940).** “Sui Dissipattori a Salto di Bidone”. Ricerca Sperimentali. L'Energia Elettrica. Milano. Vol. 17, N° 6.

- Oliveira Lemos, F. Y Lobo Ferreira, J. (1978).** “Estruturas compactas para dissipacao de energia por ressalto”. Laboratorio Nacional de Engenharia Civil de Lisboa. Memoria N° 502.
- Peterka, A. J. (1974).** Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators”. Engineering Monograph N° 25. Bureau of Reclamation. U.S. Department of the Interior. Washington.
- Rajaratnam, N. (1976).** “Turbulent Jets”. Elsevier Scientific Publishing C. Amsterdam.
- Rajaratnam, N. and Subramanya, K. (1968).** “Profile of the hydraulic jump”. Journal of Hydraulic Div., Proc. ASCE, May.
- Rajaratnam, N. (1965).** “The hydraulic jump as a wall jet”. Journal of Hydraulic Div., Proc. ASCE, Sept.
- Ranga Raju, K.G. (1988).** “Flow trough open channels”. Tata Mc-Graw Hill. New Delhi.
- Ranga Raju, K.G. (1980).** “Analysis of Flow Over Baffle Blocks and End Sills”. Journal of Hydraulic Research. Vol 18, N°2.
- Resh, F.J. and Leuteusser, H.J. (1972).** “Reynolds stress measurements in hydraulic jumps”. Journal of Hydraulic Research. Vol 10, N°4.
- Rouse, H., Siao, T.T. and Nagaratnam, S. (1959).** “Turbulence characteristics of the hydraulic jump”. Trans. ASCE, Vol. 124.
- Schoklitsch, A. (1952).** “Handbuch des Wasserbaues” (“Handbook of Hydraulic Engineering”). Springer-Verlag, Viena, Vol. 2, pp. 816-825.
- Taraimovich, I.I. (1978).** “Deformations of channels below high-head spillways on rock foundations”. Hydrotechnical Construction, N° 9, Sept. Moscow, USSR.
- U.S. Army corps of Engineers (1952).** “Hydraulic design criteria”. Waterways Experimental Station, Vicksburg, Miss.
- Yuditskii, G.A. (1963).** “Fluctuacao da carga hidrodinamica na soleira e no ensoleiramento de proteccao de leito a jusante de uma barragem descarregadora de varios vaos com dissipadores de energia. Izvestiya VNIIG, vol. 73.
- Zvorklin, K.A. et. al. (1975).** “Scour of rock bed by a jet spillway from an overflow dam. Proc. of the XVI Congress of IAHR, Vol. 2, B. 52, Sao Paulo, Brazil.