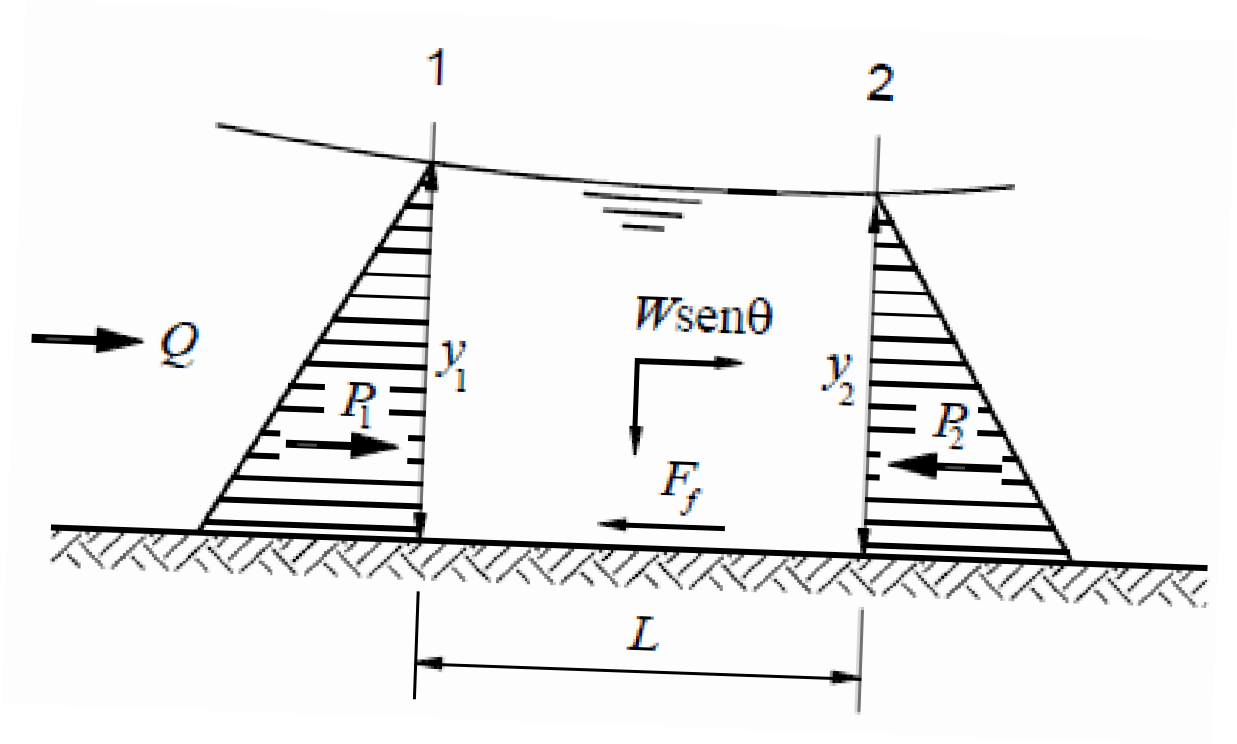
FUERZA ESPECÍFICA

Flujo en Superficie Libre

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA

1. FUERZA ESPECÍFICA (1)

- Para un volumen de control, aplicando la ecuación de momentum:



$$\rho Q(\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) = P_1 - P_2 + W sen\theta - F_f$$

1. FUERZA ESPECÍFICA (2)

- Asumiendo un canal horizontal, y despreciando la fricción:

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

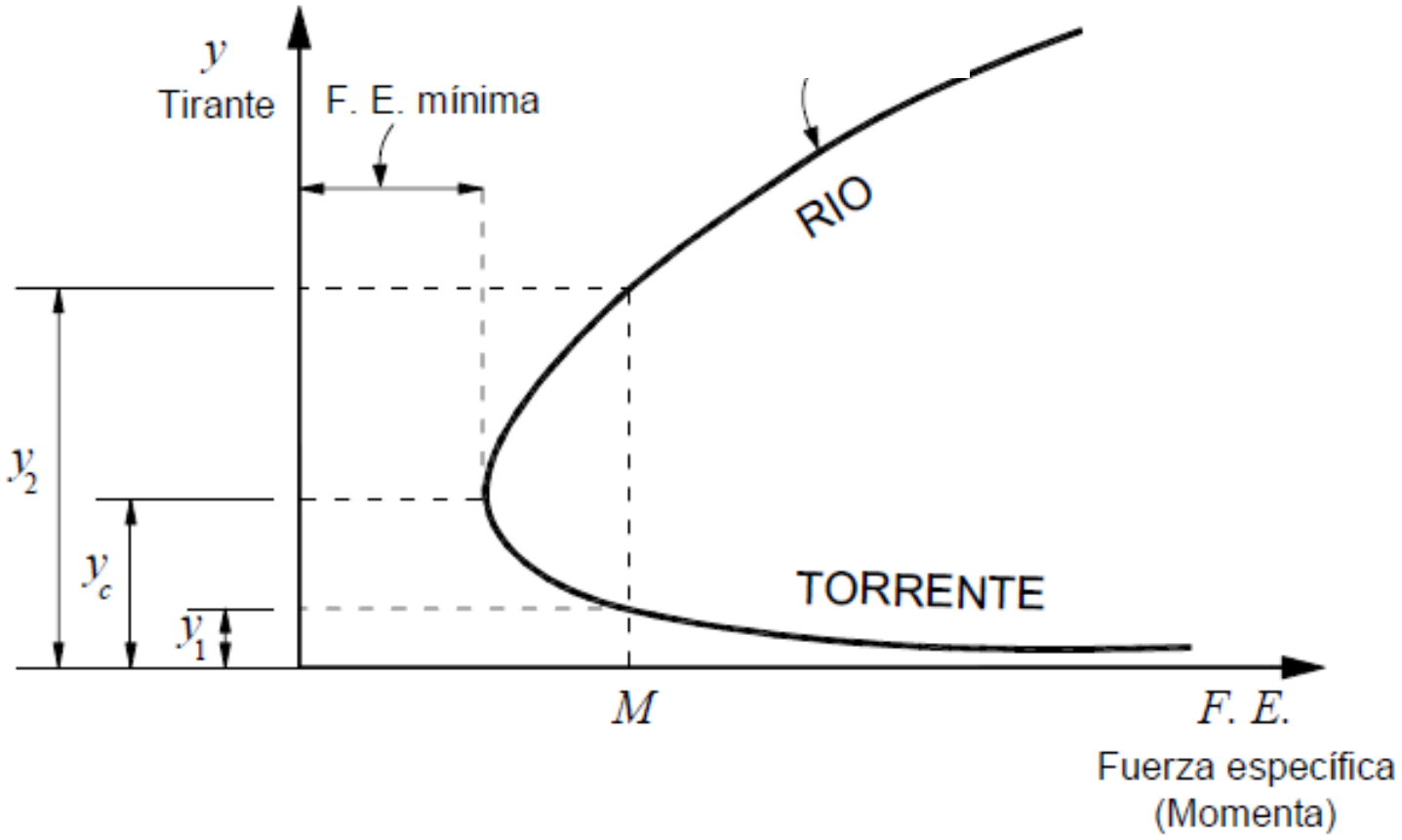
- Ya que las fuerzas de presión hidrostática se estiman como “presión en el centroide por el área”, la ecuación anterior se convierte en:

$$\frac{Q^2}{gA_1} + \bar{y}_1 A_1 = \frac{Q^2}{gA_2} + \bar{y}_2 A_2$$

- A la suma de términos encontrados se les llama “fuerza específica”, y se verifica que ésta se conserva.

- Cada uno de los dos términos de la ecuación de la Fuerza Específica es dimensionalmente una fuerza por unidad de peso de agua.

1. FUERZA ESPECÍFICA (3)



- Para una Fuerza Específica dada hay dos tirantes posibles. Los tirantes que corresponden a la misma Fuerza Específica se denominan conjugados.

1. FUERZA ESPECÍFICA (4)

- Para evaluar el mínimo valor de la fuerza específica, se deriva:

$$\frac{d(F.E.)}{dy} = -\frac{Q^2}{gA^2}\frac{dA}{dy} + \frac{d(\bar{y}A)}{dy} = 0$$

donde se puede demostrar que la fuerza específica mínima corresponde al tirante crítico.

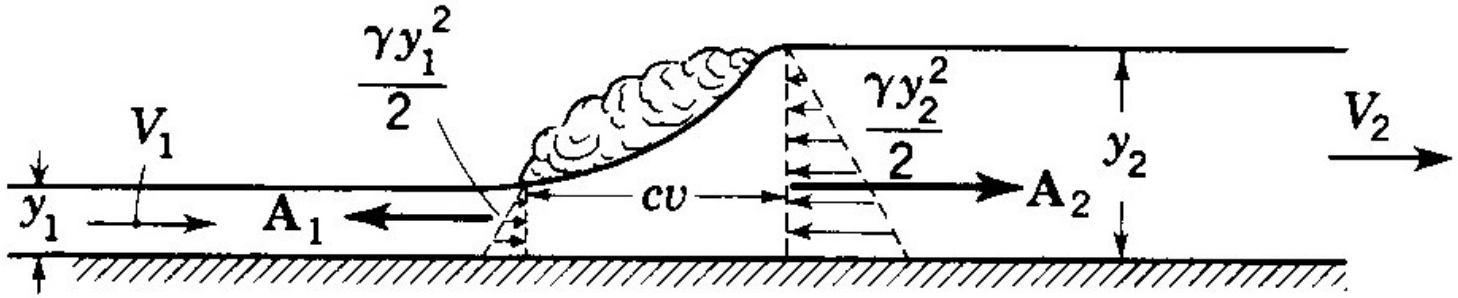
- En un canal rectangular se verifica la siguiente relación entre tirantes conjugados:

$$y_c^3 = \frac{1}{2} y_1 y_2 (y_1 + y_2)$$

2. SALTO HIDRÁULICO (1)

- Cuando en un canal se produce un cambio de régimen de supercrítico (Fr > 1) a subcrítico (Fr <1), se produce un fenómeno conocido como “salto hidráulico” cuyas características dependen básicamente del número de Froude aguas arriba (Fr1).

- Este es un mecanismo efectivo para disipar la energía del flujo y disminuir el potencial de erosión aguas abajo.



2. SALTO HIDRÁULICO (2)

- Si tenemos un canal rectangular y definimos un volumen de control que encierre al salto hidráulico:

- Ecuación de continuidad. $$by_1V_1 = by_2V_2 \Rightarrow y_1V_1 = y_2V_2$$

- Ecuación de momentum

$$F_{P1} - F_{P2} = \dot{m}(V_2 - V_1)$$

$$\frac{\gamma y_1^2 b}{2} - \frac{\gamma y_2^2 b}{2} = \rho V_2 A_2 (V_2) - \rho V_1 A_1 (V_1)$$

$$\frac{\gamma y_1^2 b}{2} - \frac{\gamma y_2^2 b}{2} = \rho V_2 (y_2 V_2) b - \rho V_1 (y_1 V_1) b$$

2. SALTO HIDRÁULICO (3)

- Simplificando “b” y reemplazando la ecuación de continuidad

$$\frac{\gamma y_1^2}{2} - \frac{\gamma y_2^2}{2} = \rho V_2 (y_1 V_1) - \rho V_1 (y_1 V_1)$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{y_2 = -\frac{y_1}{2} + \sqrt{\left(\frac{y_1}{2}\right)^2 + \frac{2V_1^2 y_1}{g}}}$$

- Los tirantes y1 y y2 son tirantes conjugados puesto que tienen la misma fuerza específica.

2. SALTO HIDRÁULICO (4)

- La ecuación de energía para el volumen de control:

$$\frac{V_1^2}{2g} + y_1 = \frac{V_2^2}{2g} + y_2 + \Delta E$$

- Reemplazando V2 y y2 por sus valores encontrados y simplificando:

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

que representa la pérdida de energía en el salto hidráulico.

2. SALTO HIDRÁULICO (5)

- Si el **canal es trapezoidal**, el análisis se hace de manera similar, tomando en cuenta que la momenta debe ser igual antes y después del salto:

:

$$\bar{y}_{CG2}A_2 - \bar{y}_{CG1}A_1 - \frac{Q^2}{g}\left(\frac{A_2 - A_1}{A_2 A_1}\right) = 0$$

- Como las áreas y centroides son:

$$A_1 = by_1 + zy_1^{\ 2}$$

$$A_2 = by_2 + zy_2^{\ 2}$$

$$\bar{y}_{CG1} = \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6}\frac{by_1}{A_1}\right)y_1$$

$$\bar{y}_{CG2} = \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6}\frac{by_2}{A_2}\right)y_2$$

2. SALTO HIDRÁULICO (6)

- Se obtiene la siguiente ecuación de cuarto grado:

$$J^4 + \frac{5t+2}{2}J^3 + \frac{(3t+2)(t+1)}{2}J^2 + \left[\frac{t^2}{2} + (t-6r)(t+1)\right]J - 6r(t+1)^2 = 0$$

donde:

:

Para calcular y_1 teniendo como dato y_2:

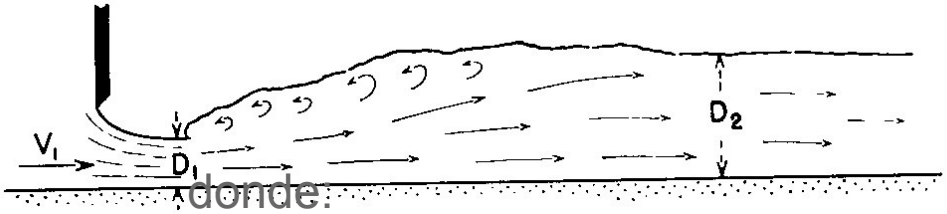
$$J = \frac{y_1}{y_2} \quad t = \frac{b}{zy_2} \quad r = \frac{V_2^2}{2gy_2}$$

Para calcular y_2 teniendo como dato y_1:

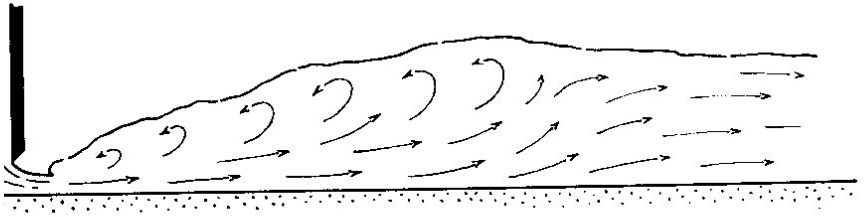
$$J = \frac{y_2}{y_1} \quad t = \frac{b}{zy_1} \quad r = \frac{V_1^2}{2gy_1}$$

2. SALTO HIDRÁULICO (7)

- Clases:

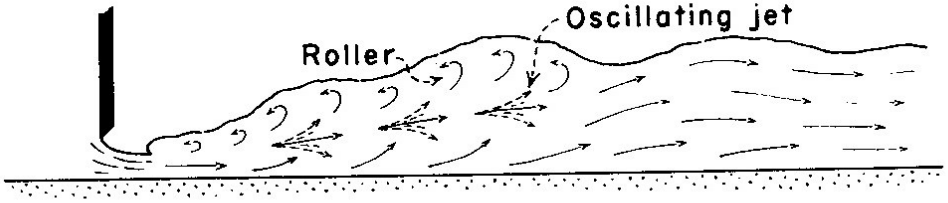


F_1=1.7 to 2.5
A—Pre-jump—very low energy loss

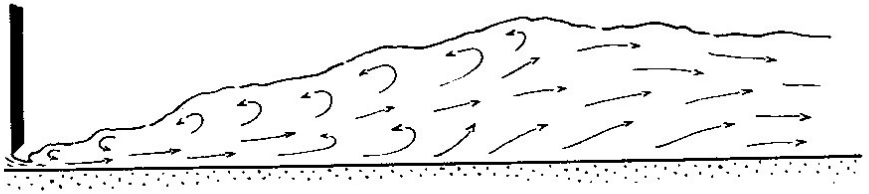


F_1=4.5 to 9.0—range of good jumps
C—Least affected by tail water variations

donde:



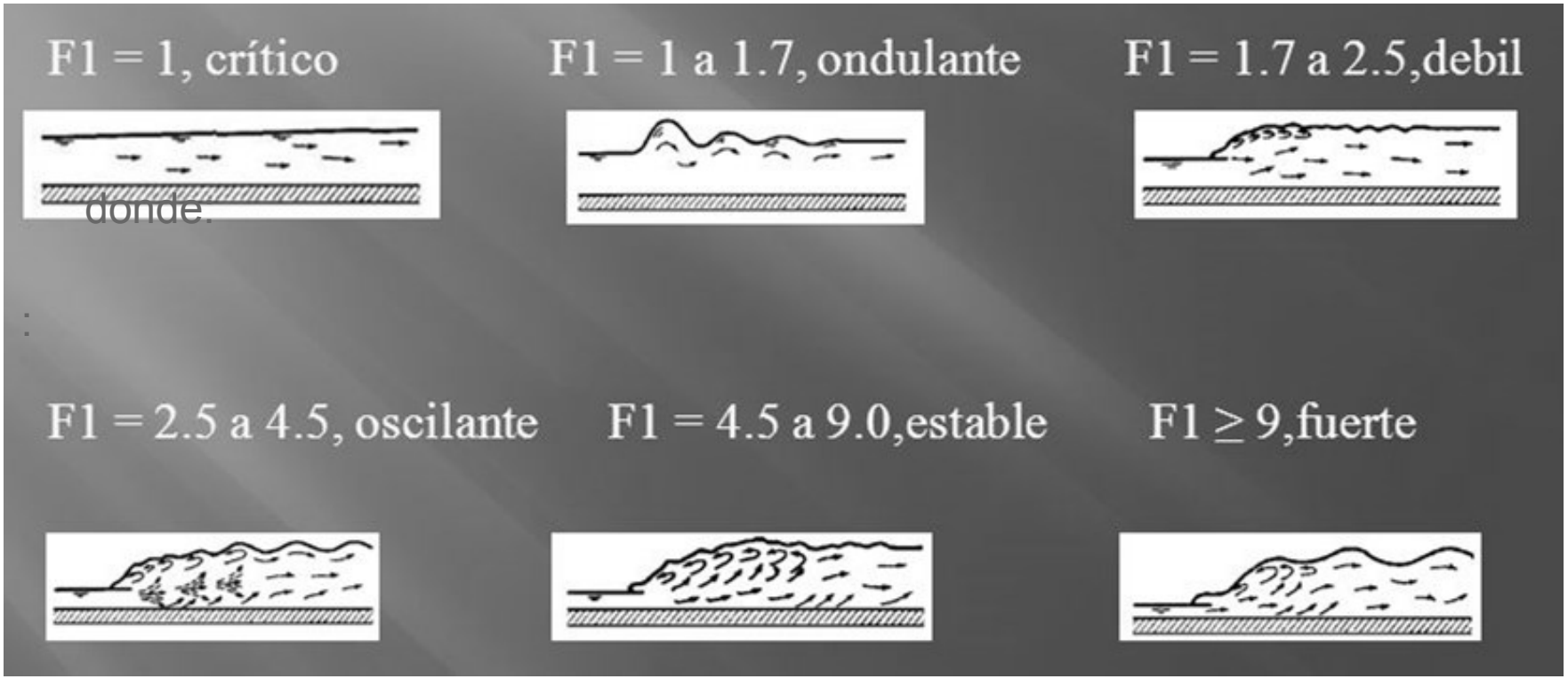
F_1=2.5 to 4.5
B—Transition—rough water surface



F_1=9.0 upward
D—effective but rough

2. SALTO HIDRÁULICO (8)

- Asimismo, se pueden clasificar como:



donde:

:

2. SALTO HIDRÁULICO (9)

- Otras cantidades importantes a evaluar en un salto hidráulico son:
- Eficiencia

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\left(8Fr_1 + 1\right)^{3/2} - 4Fr_1^2 + 1}{8Fr_1^2\left(2 + Fr_1^2\right)}$$

- Altura:

$$\frac{h_j}{E_1} = \frac{\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^{\,2}} - 3}{Fr_1^{\,2} + 2}$$

- Longitud:

2. SALTO HIDRÁULICO (10)

- Longitud:

Canal Rectangular

- *Schoklitsch* $L = Cte(y_2 - y_1)$

Ec 2.16

para canales con baja pendiente

La constante varía de acuerdo a:

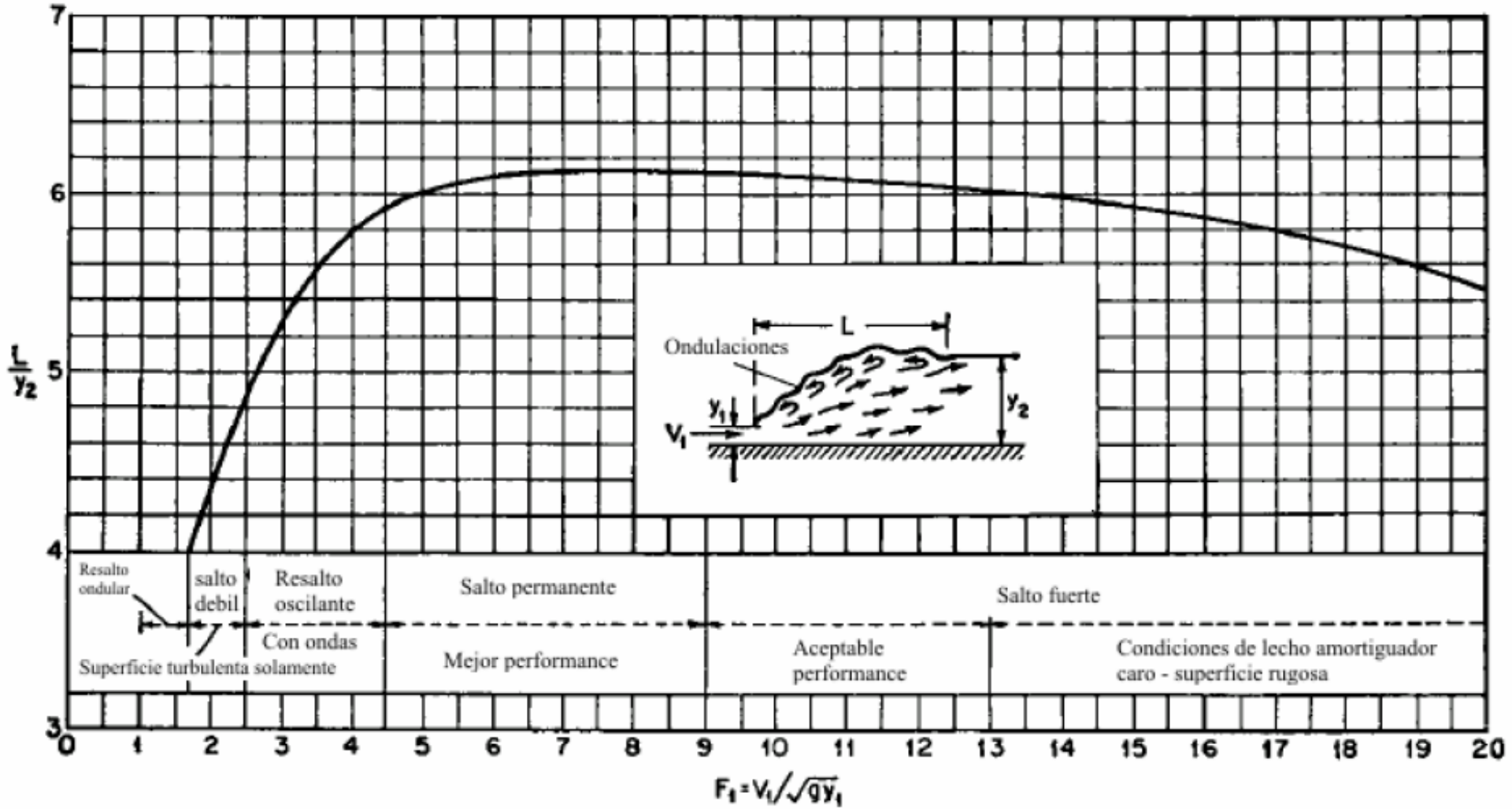
Cte = 5 cuando Resalto no es oscilante ni Fuerte

Cte = 6 cuando Resalto es oscilante ó Fuerte

- *USBR (United States Bureau of Reclamation)*

Fig 2.10: Determinación de L para canal horizontal (L vs. F_1). Los resultados se pueden aproximar también a canales trapezoidales.

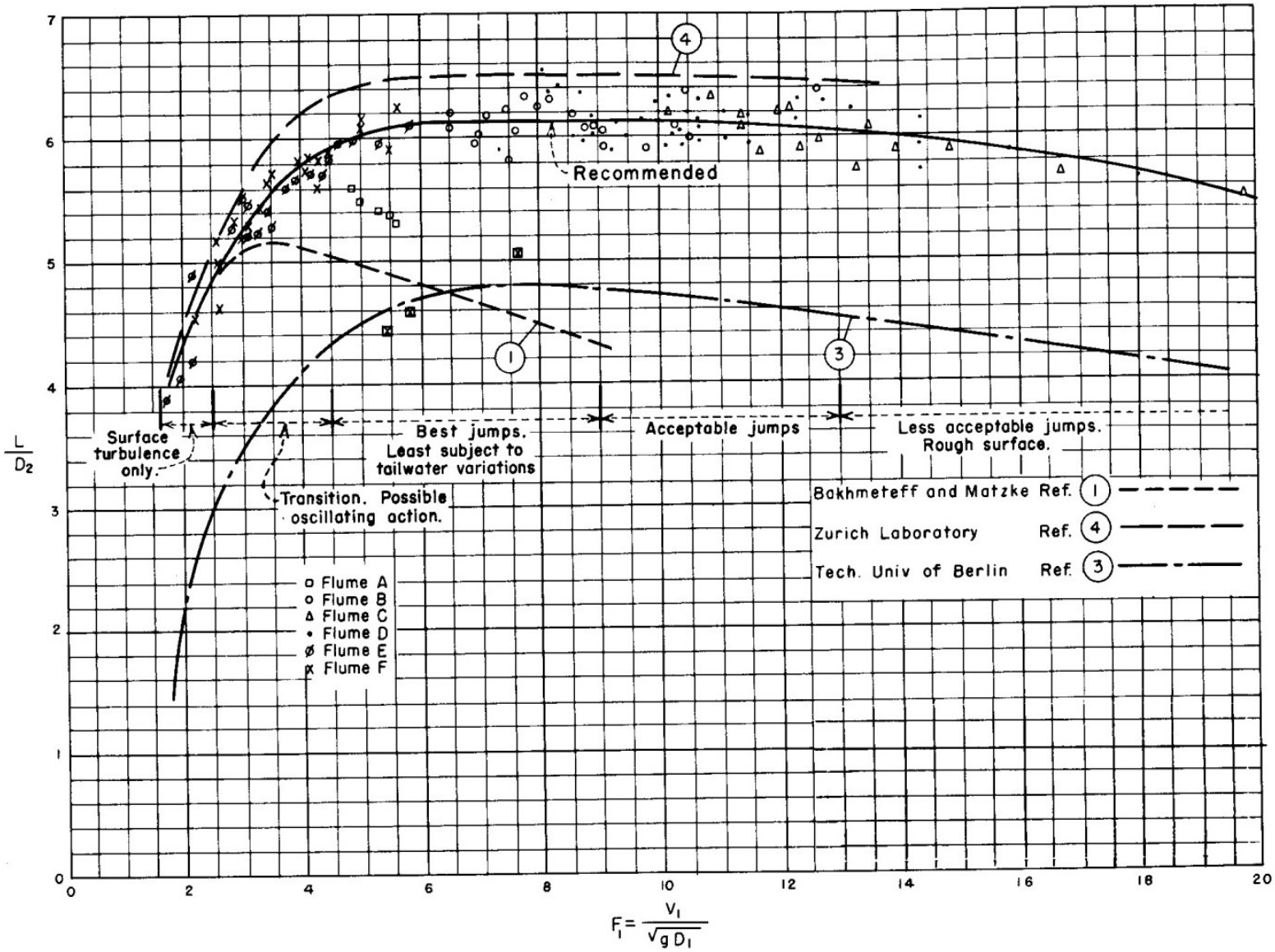
2. SALTO HIDRÁULICO (11)



2. SALTO HIDRÁULICO (10)

- L es función del Número de Froude antes del salto, Fr_1.
- En general, se acepta:

$L = 6\ y_2$



2. SALTO HIDRÁULICO (12)

Canal Trapezoidal

La longitud del resalto es mayor debido a la simetría que se produce por efecto de la distribución no uniforme de las velocidades.

- *Sieñchin* $L = A\,(y_2 - y_1)$

Ec 2.17

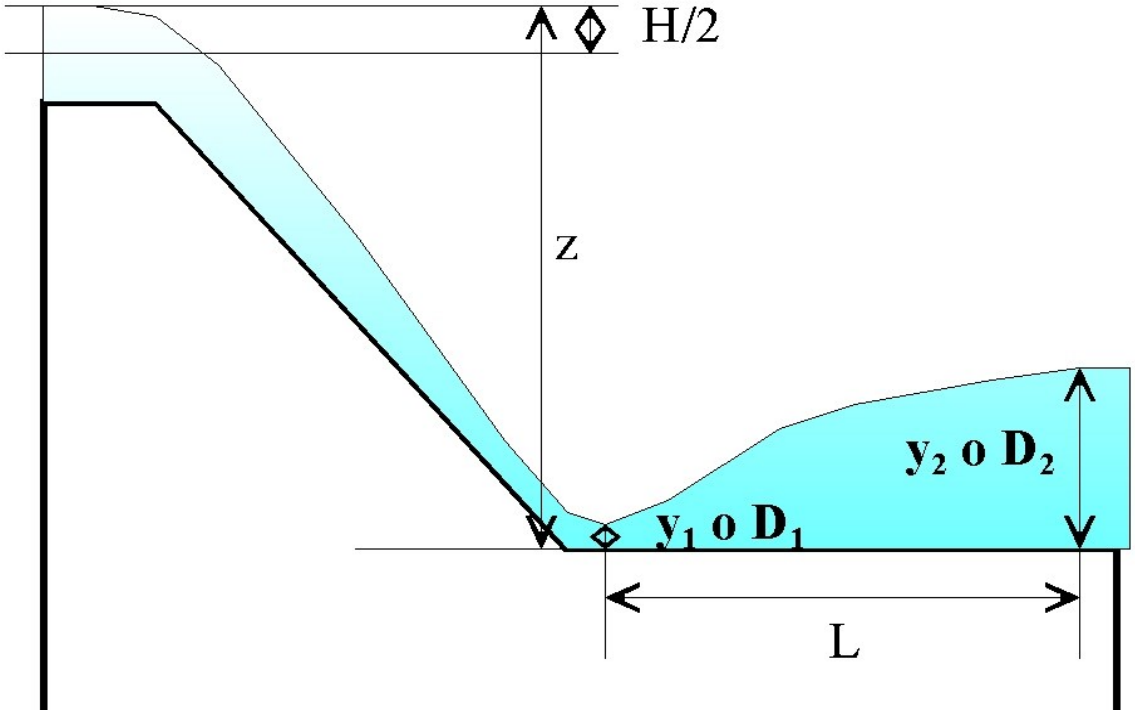
***A** depende del talud **z** del canal.*

z	*0*	*0.5*	*0.75*	*1.0*	*1.25*	*1.5*
A	*5*	*7.9*	*9.2*	*10.6*	*12.6*	*15.0*

3. VELOCIDAD Y TIRANTE AL PIE DE UNA PRESA / RÁPIDA (1)

- V_T es la velocidad teórica al pie de la presa, en función de Z y H.

$$V_T = \sqrt{2g\left(Z - \frac{H}{2}\right)}$$



3. VELOCIDAD Y TIRANTE AL PIE DE UNA PRESA / RÁPIDA (2)

- Esta velocidad debe ser corregida. La velocidad real es:

$$V_1 = K.V_T$$

donde K depende de Z y H, y sus valores están entre 0 y 1.

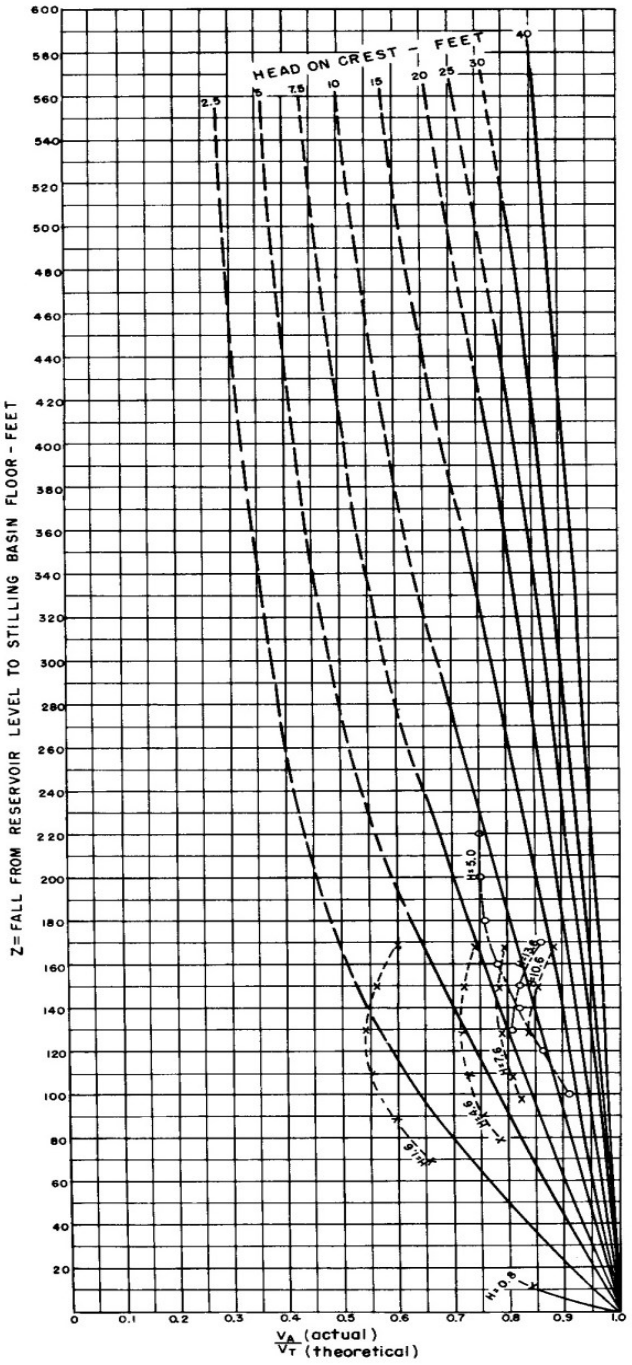
- Conociendo V_1, calculamos y_1:

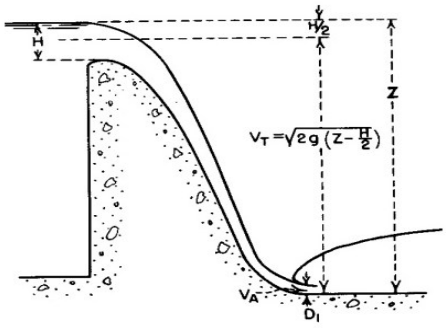
$$y_1 = \frac{Q}{bV_1}$$

- El número de Froude antes del salto es:

$$Fr = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}}$$

FACTOR K





PROTOTYPE TESTS
x Shasta Dam
o Grand Coulee Dam

Fuente:
US Bureau of Reclamation, 1984

FIGURE 15.—*Curves for determination of velocity entering stilling basin for steep slopes 0.8:1 to 0.6:1.*

6. POZAS DE DISIPACION (1)

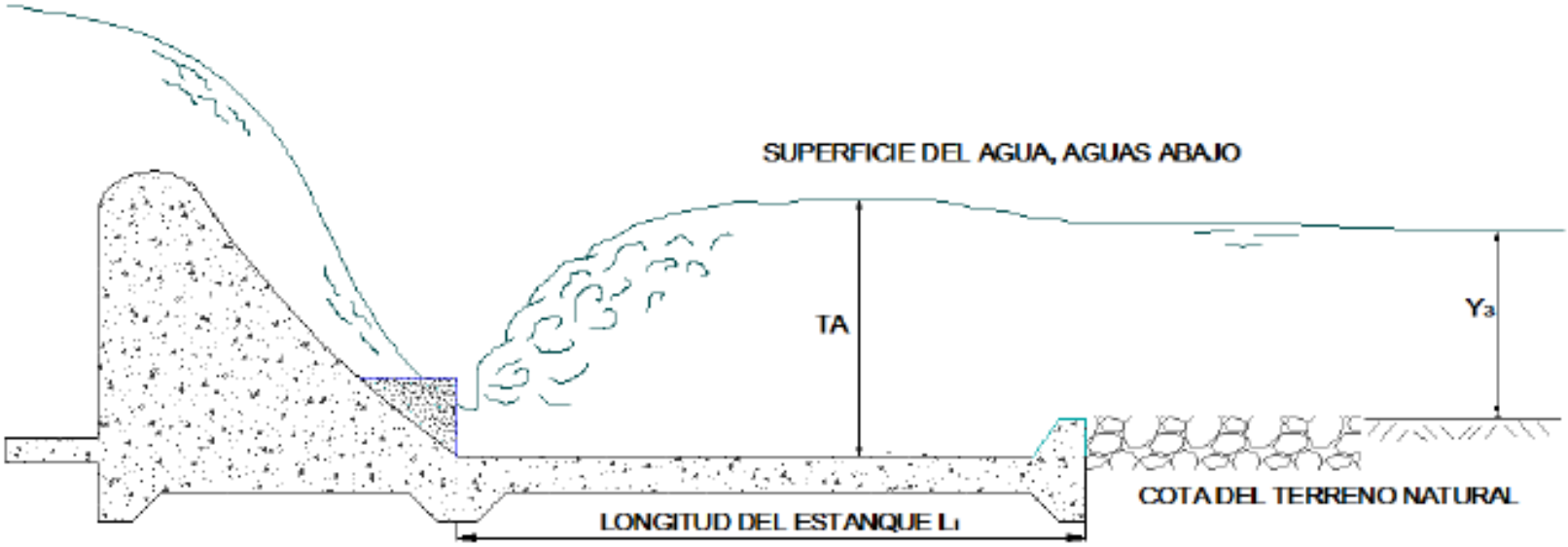
- Son estructuras diseñadas para inducir la disipación de energía mediante el salto hidráulico. Para su diseño se trata de reducir la longitud de la poza.

- El Bureau of Reclamation propone 5 tipos de estanques:
  - **TIPO I** Para canales con pendiente moderada.
  - **TIPO II** Estanques amortiguadores para vertederos de presas grandes y de tierra con canales extensos,
  - **TIPO III** Pequeños estaques amortiguadores para estructuras de canal, pequeñas estructuras de salida, y vertederos menores.
  - **TIPO IV** Utilizado en estructuras de canal y en presas de derivación. Este diseño reduce las ondas excesivas creadas en resaltos imperfectos.
  - **TIPO V** Estanques amortiguadores con pendientes pronunciadas. El principal objetivo en el diseño hidráulico de un estanque amortiguador es la determinación del ancho y elevación del estanque para formar un resalto hidráulico estable. Esto se obtiene cuando el nivel del agua de la altura conjugada es igual al nivel del tirante aguas abajo.

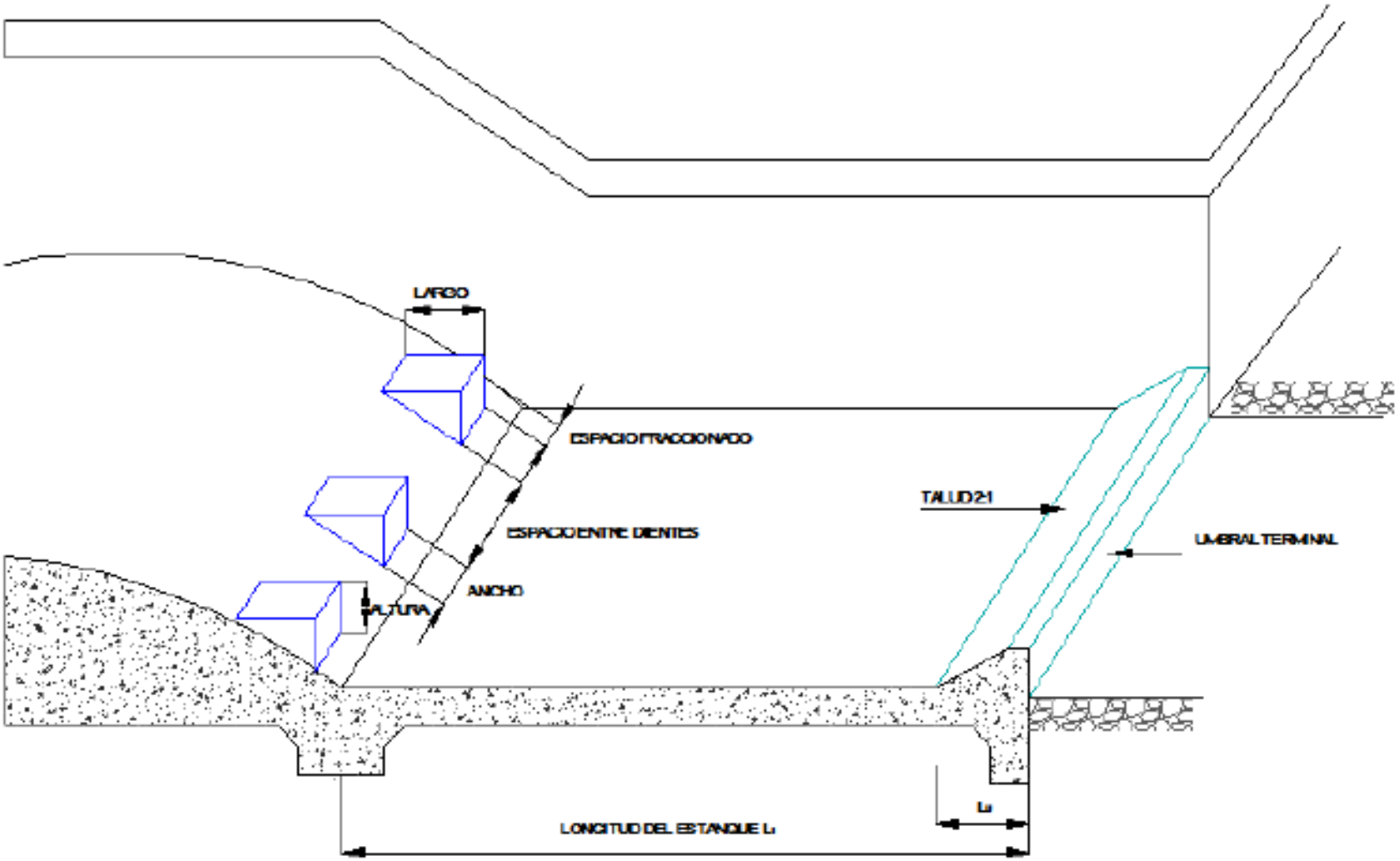
6. POZAS DE DISIPACION (2)

- Para Fr entre 2.5 y 4.5.

- En la poza de amortiguación se produce un resalto oscilante el cual genera una onda que es difícil de atenuar. **La poza tipo I** se diseña para combatir el problema eliminando la onda en su fuente, esto se lleva a cabo intensificando el remolino, que aparece en la parte superior del resalto utilizando grandes bloques en la rápida.



6. POZAS DE DISIPACION (3)



6. POZAS DE DISIPACION (4)

- Para dimensionar una poza:

  - ✓ Calcular el valor del tirante de agua en el estanque (TA).

$$TA = Y_1.(1{,}539.F_{R1} - 0{,}471)$$

  - ✓ Cálculo del tirante conjugado y2.

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{8Fr_1{}^2 + 1} - 1\right)$$

  - ✓ Cálculo de la longitud del estanque amortiguador tipo I

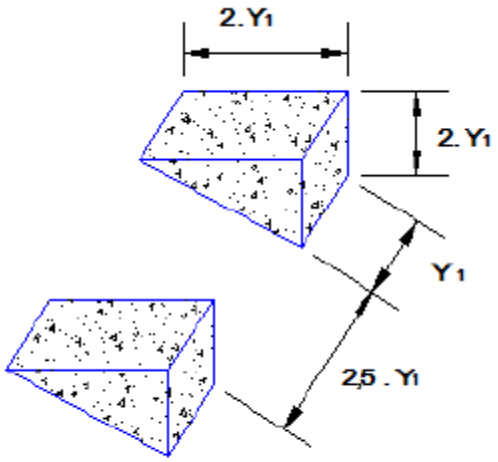
$$L_I = Y_2.(1{,}5 + 1{,}768.F_{R1} - 0{,}471.F_{R1}{}^2)$$

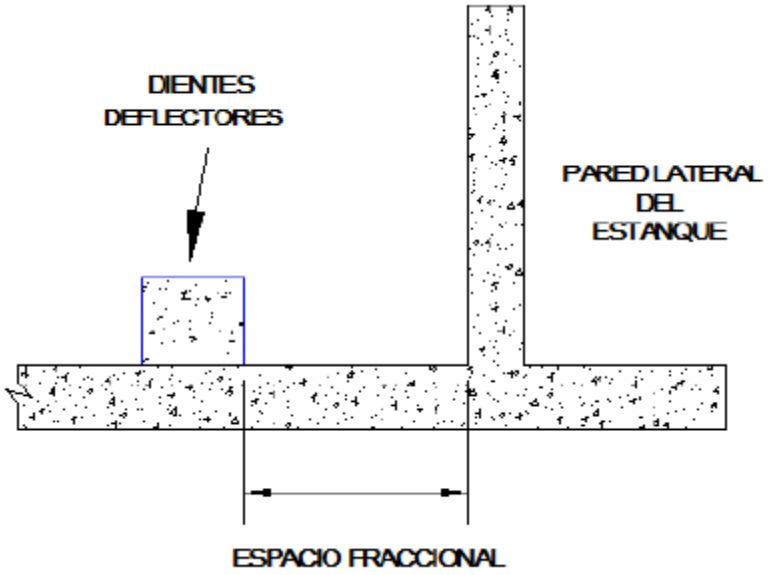
  - ✓ Calcular el número de dientes (n):

$$n = \frac{(b + 2{,}5.Y_1)}{3{,}5.Y_1}$$

6. POZAS DE DISIPACION (5)

- ✓ Dimensionar dientes:

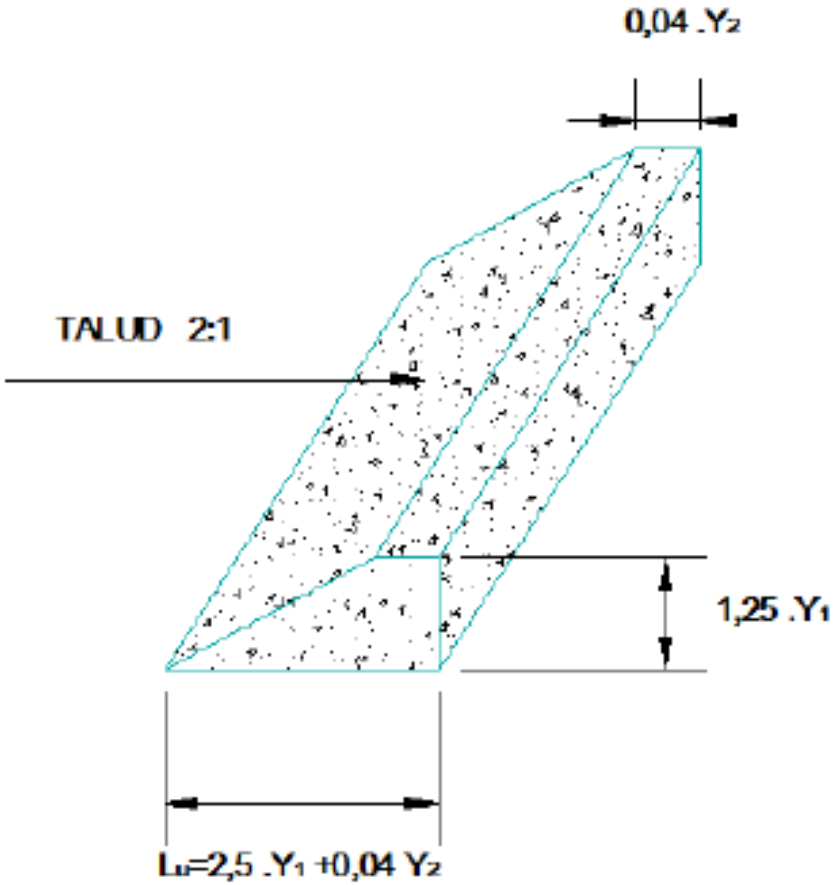




- Altura = $2{,}0.Y_1$
- Ancho= Y_1
- Largo =$2{,}0.Y_1$
- Espacio entre dientes =$2{,}5.Y_1$
- Espacio fraccional= $\frac{[b-(3{,}5.Y_1.n-2{,}5.Y_1)]}{2}$

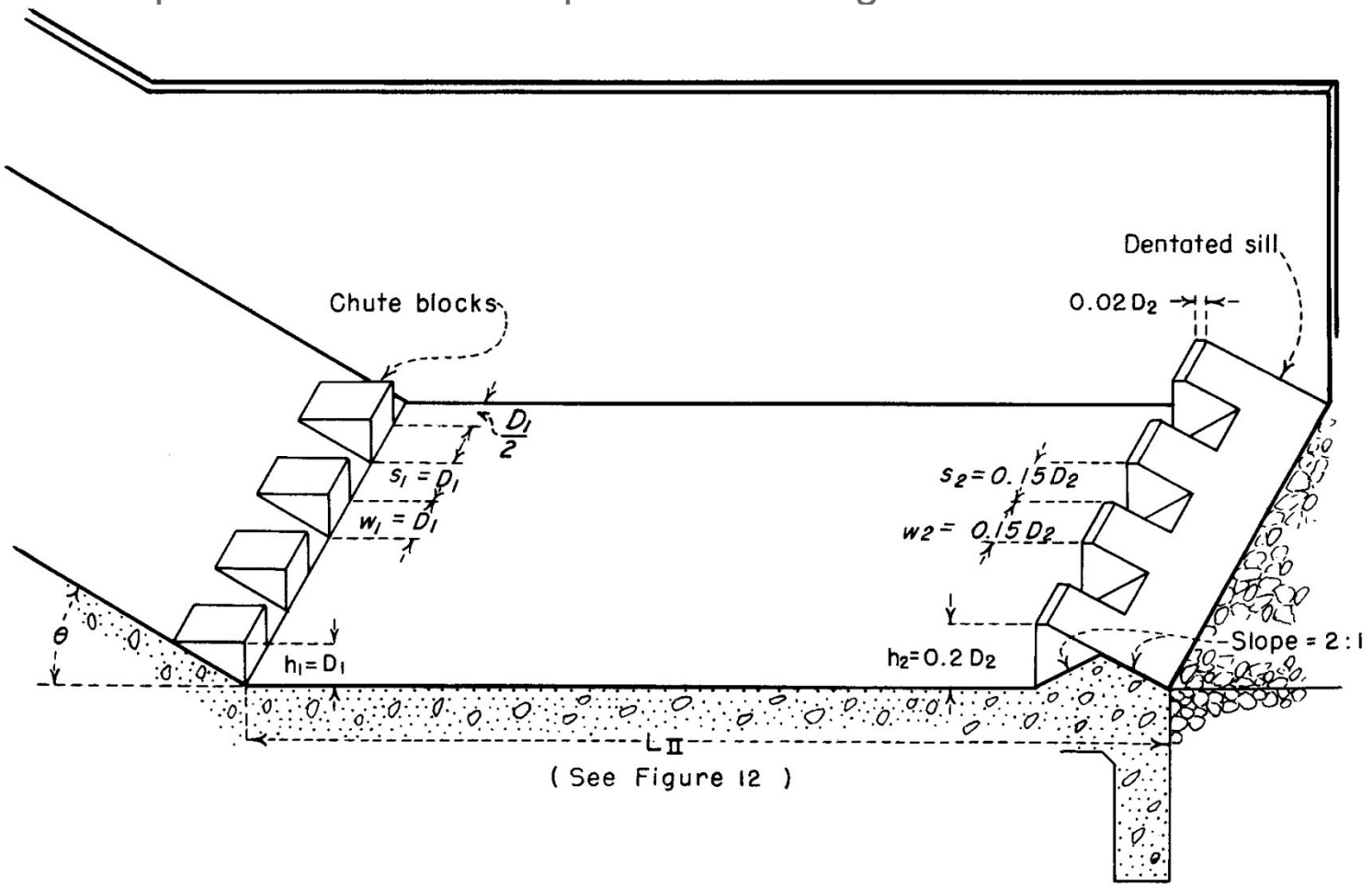
6. POZAS DE DISIPACION (6)

- ✓ Dimensionar el umbral de salida:



6. POZAS DE DISIPACION (2)

- **La poza tipo II** consiste de una superficie horizontal en la que se colocan “dados” triangulares agua arriba sobre el pie de la rápida y un murete dentado para favorecer la disipación de energía.



6. POZAS DE DISIPACION (3)

- Para dimensionar una poza, es suficiente con seguir las proporciones mostradas en la figura:

  - ✓ Se calculan y1 (D1 en la figura) e y2 (D2 en la Figura), y en base a dichos valores se calculan las dimensiones de la poza.

  - ✓ Ancho de los dados ubicados al final de la rápida, w1 = y1 (o D1). Espaciamiento de los dados, s1 = y1 (o D1).

  - ✓ Ancho de los dientes del murete: w2 = 0.15 y2 (ó 0.15 D2). Espaciamiento de los dientes del murete, s2 = 0.15 y2 (ó 0.15 D2). Altura del murete = 0.2 y2 (o D2, en la Figura 6)

  - ✓ La longitud, LII, se halla con la ayuda de la siguiente Figura.

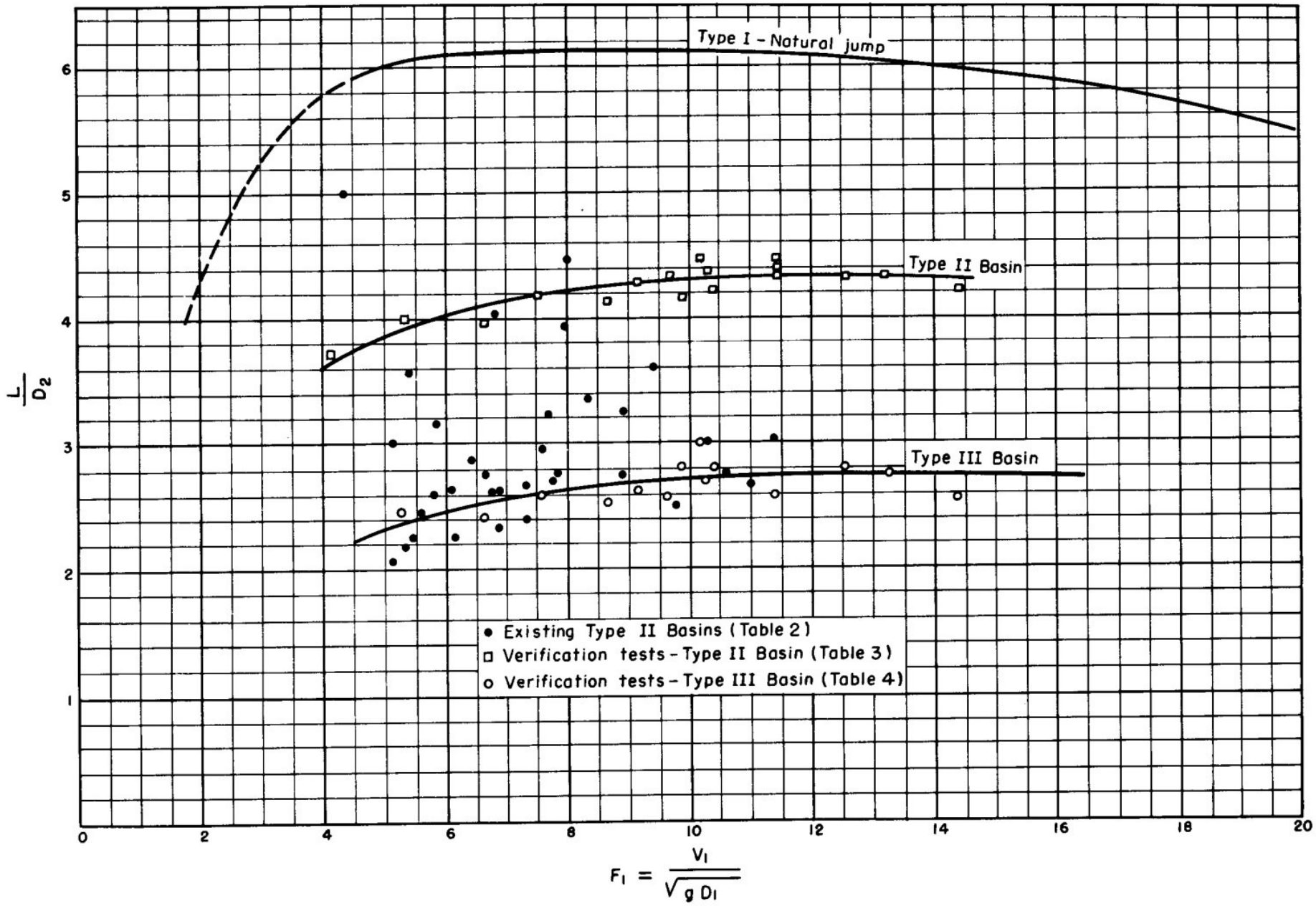


FIGURE 12.—*Length of jump on horizontal floor (Basins I, II, and III).*

6. POZAS DE DISIPACION (5)

- **La poza tipo III** tiene además de los dados al pie de la rápida, un murete no dentado al final de la poza y una fila de dados en una sección intermedia ubicados a 0.8 y_2 del pie de la rápida, como se ve en la Figura 17.

- La longitud de la poza, L (o LIII en la figura), es menor a la longitud de la poza tipo II y se le considera por tanto más económica y deseable para el diseño de obras hidráulicas.

- El ancho de los dados ubicados al pie de la rápida, su espaciamiento y altura son iguales a y1.

- La altura de los dados centrales es igual a h3, que se calcula usando la Figura 18 y es función de Fr1. Tanto el ancho como el espaciamiento son iguales a 0.75 h3. El espesor de la corona es igual a 0.2 h3.

- La altura del murete al final de la poza es igual a h4 y es función de Fr1(se calcula usando la Figura 18).

6. POZAS DE DISIPACION (6)

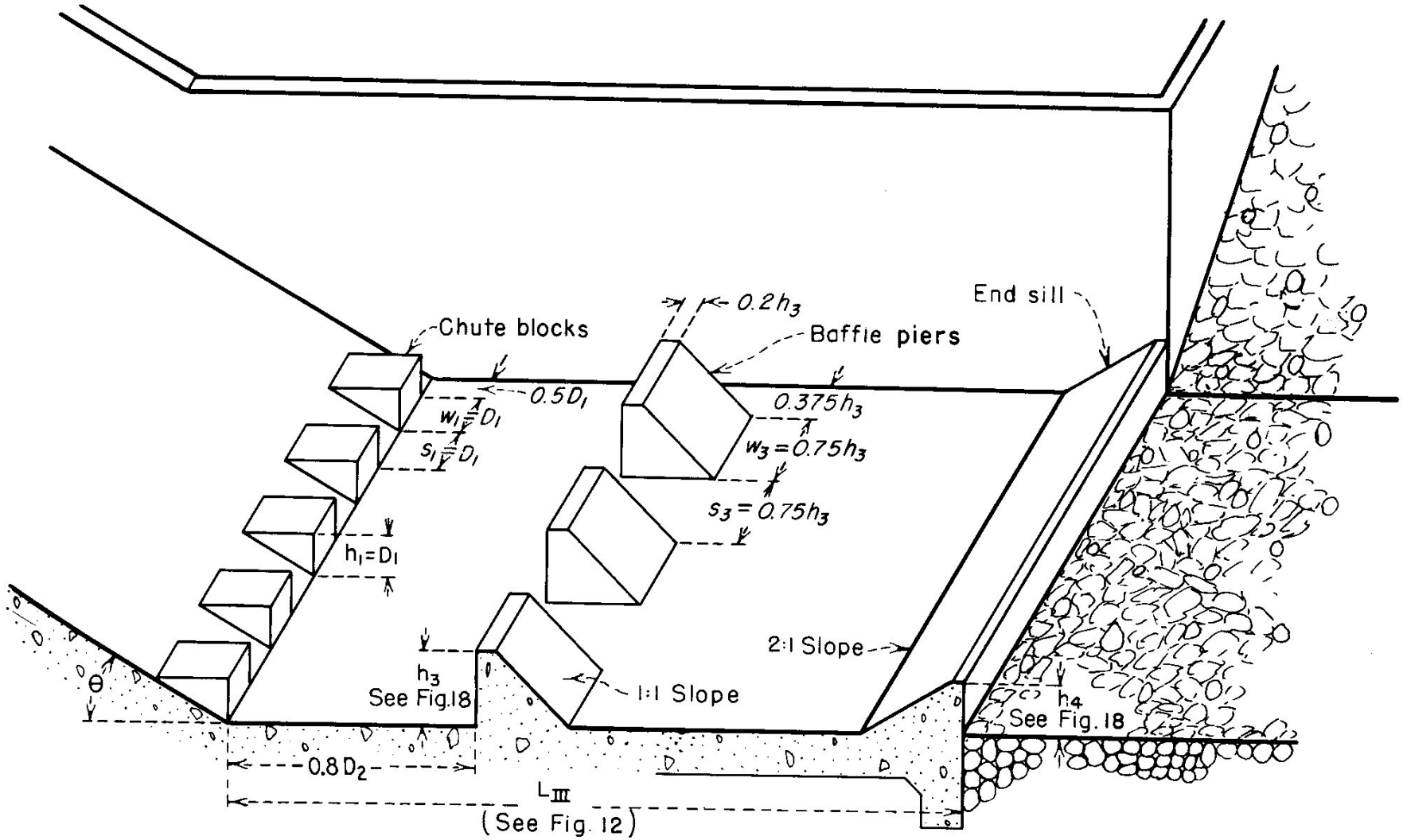


FIGURE 17.—*Recommended proportions (Basin III).*

6. POZAS DE DISIPACION (7)

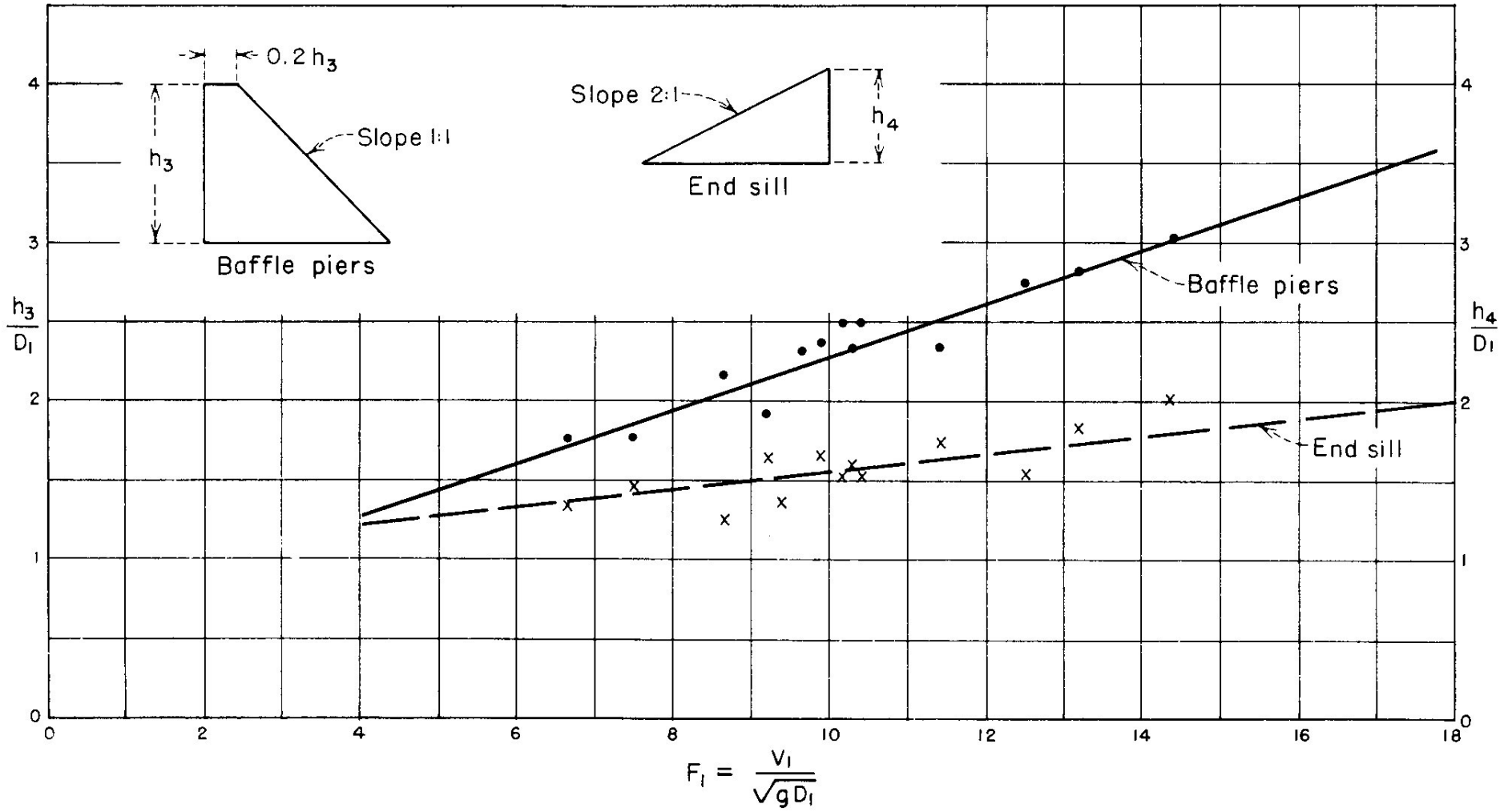


FIGURE 18.—*Height of baffle piers and end sill (Basin III).*

6. POZAS DE DISIPACION (8)

- El perfil aproximado del salto es:

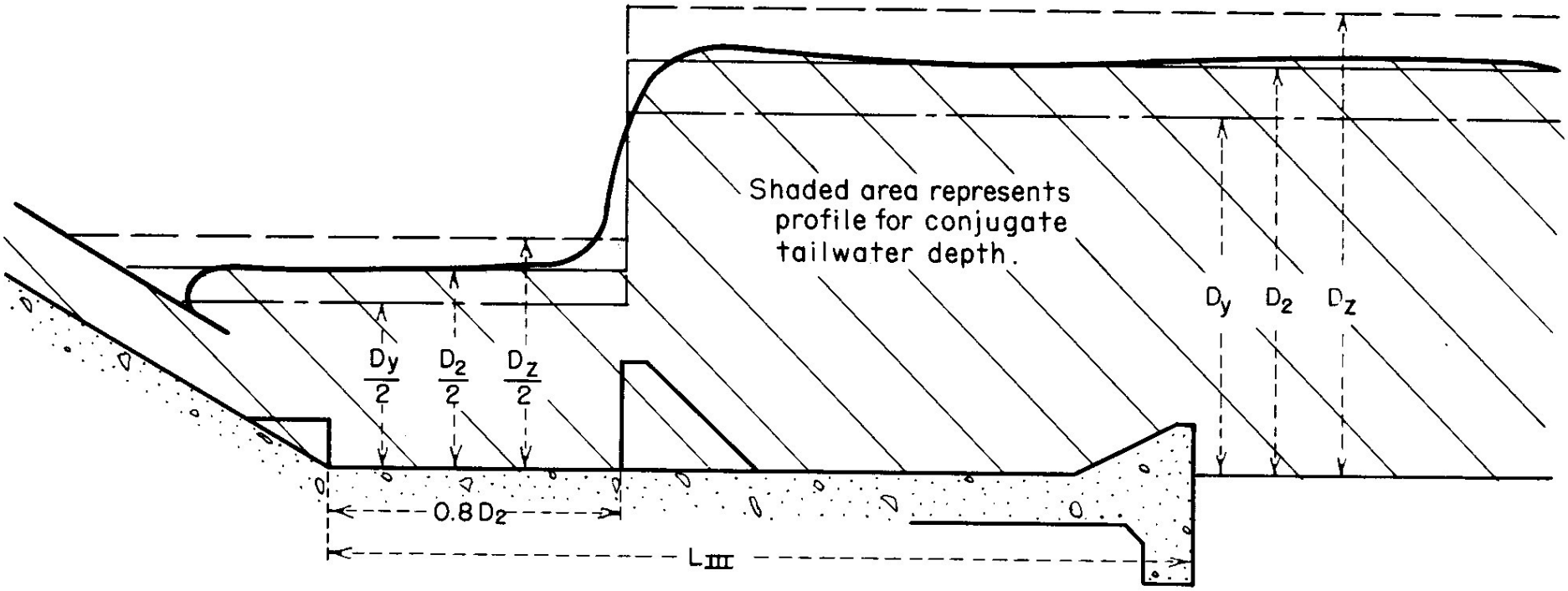
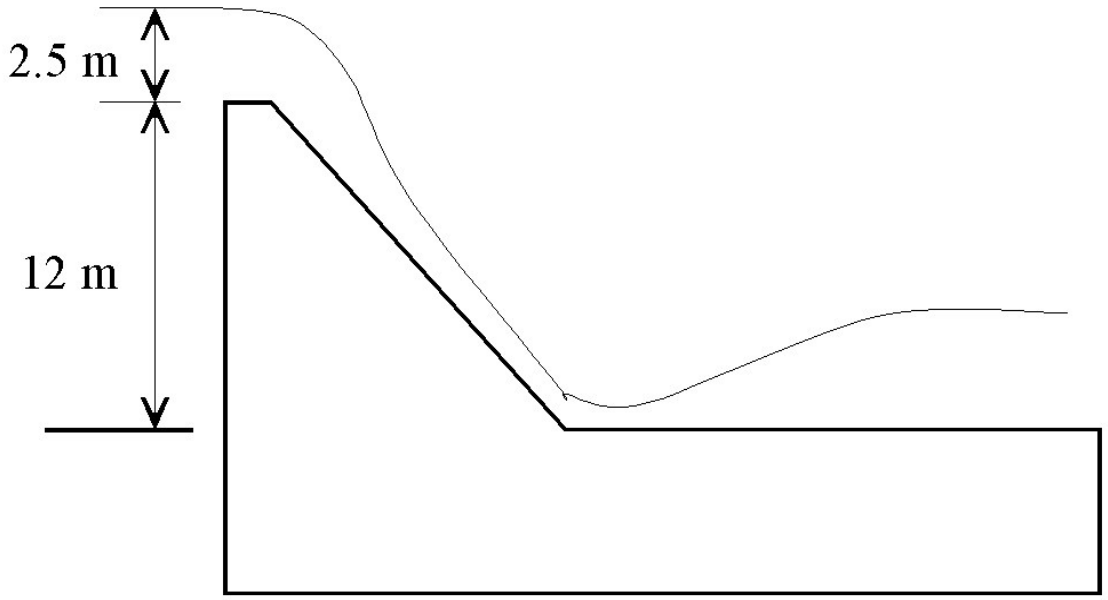


FIGURE 19.—*Approximate water surface and pressure profiles (Basin III).*

EJEMPLO

- Para las condiciones de flujo dadas en la figura, diseñar la poza de disipación más corta (Considerar sólo los dos tipos de pozas (II y III) explicadas en clase). El ancho de la rápida y del canal es de 16 m.