

## TABLA DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>106</b>
<b>DISIPACIÓN DE ENERGÍA.....</b>	<b>106</b>
6.1 INTRODUCCIÓN .....	106
6.2 GENERACIÓN DEL RESALTO HIDRÁULICO .....	106
6.3 TIPOS DE RESALTO HIDRÁULICO .....	108
6.4 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL RESALTO HIDRÁULICO .....	110
a.) Pérdida de energía.....	110
b.) Eficiencia .....	110
c.) Altura del resalto.....	110
d.) Longitud del resalto .....	111
e.) Perfil de la superficie del resalto .....	112
f.) Localización del resalto .....	113
6.5 DISEÑO DE UN COLCHÓN HIDRÁULICO .....	114
6.6 COLCHÓN HIDRÁULICO CON UN CUENCO AMORTIGUADOR .....	114
6.7 ESTANQUES AMORTIGUADORES DE LA U.S.B.R. ....	117
6.7.1 Estanque Amortiguador Tipo I.....	117
6.7.2 Estanque Amortiguador Tipo II.....	118
6.7.3 Estanque Amortiguador Tipo III .....	120
6.7.4 ESTANQUE AMORTIGUADOR TIPO IV.....	122
6.8 COLCHÓN HIDRÁULICO SAF .....	123
6.9 DISIPACIÓN POR DISPERSIÓN (SALTO DE SKY).....	125
6.10 EJEMPLOS DE APLICACIÓN .....	127
EJEMPLO 1 .....	127
EJEMPLO 2 .....	128
EJEMPLO 3 .....	129
EJEMPLO 4 .....	131
EJEMPLO 5 .....	133
6.11 SOFTWARE APLICADO AL DISEÑO DE DISIPADORES DE ENERGÍA .....	134
6.11.1 DISENER v.1.01 .....	134
6.11.2 HY8Energy MODEL.....	139
6.12 EJERCICIOS PROPUESTOS .....	143
6.13 BIBLIOGRAFÍA .....	143

## CAPÍTULO 6

### DISIPACIÓN DE ENERGÍA

#### 6.1 INTRODUCCIÓN

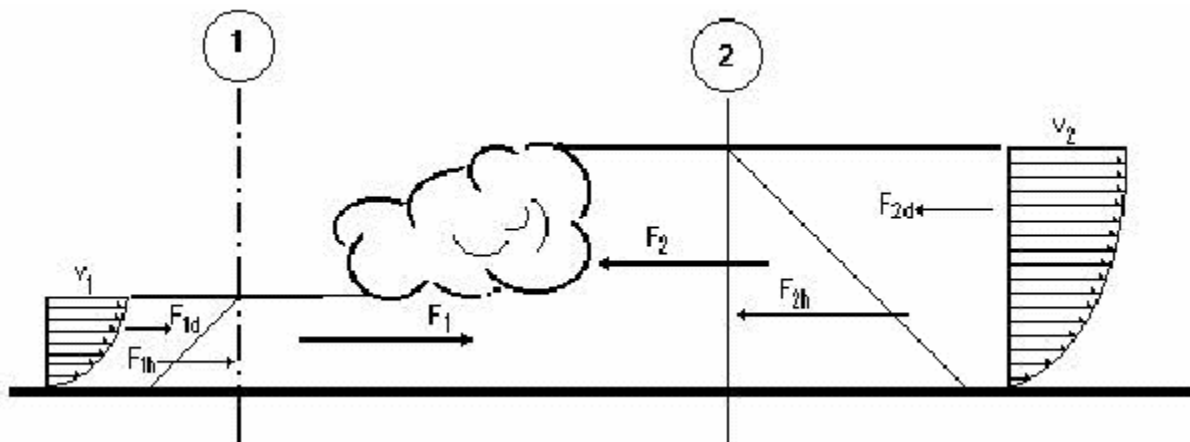
Uno de los aspectos que generalmente merece especial atención en el diseño de obras hidráulicas es la disipación de la energía cinética que adquiere un chorro líquido por el incremento de la velocidad de flujo. Cuando el agua corre por el vertedero y los canales o túneles de descarga contiene gran cantidad de energía y mucho poder destructivo debido a las altas presiones y velocidades. Éstas pueden causar erosión en lecho del río, en el pie de la presa, o en las estructuras mismas de conducción, poniendo en peligro la estabilidad de las estructuras hidráulicas. Por lo tanto se deben colocar disipadores de energía.

Para la selección del tipo de disipador se debe tener las siguientes consideraciones:

1. Energía de la corriente.
2. Economía y mantenimiento ya que éste eleva mucho el costo.
3. Condiciones del cauce aguas abajo (roca, suelo erosionable, etc).
4. Ubicación de las vías de acceso, casa de máquinas, y demás estructuras hidráulicas ya que su seguridad no puede quedar comprometida.
5. Congelamiento.
6. Efecto de las subpresiones y del vapor de agua sobre las instalaciones.
7. Daños causados a la fauna y la flora por la erosión.
8. Proyectos y poblaciones aguas abajo.

#### 6.2 GENERACIÓN DEL RESALTO HIDRÁULICO

El resalto hidráulico es el ascenso brusco del nivel del agua que se presenta en un canal abierto a consecuencia del retardo que sufre una corriente de agua que fluye a elevada velocidad. Este fenómeno presenta un estado de fuerzas en equilibrio, en el que tiene lugar un cambio violento del régimen de flujo, de supercrítico a subcrítico. Consideremos el siguiente esquema:



**Figura 6.1 Resalto Hidráulico**

En la sección 1 actúan las fuerzas hidrostática  $F_{1h}$  y dinámica  $F_{1d}$ ; en forma similar, pero en sentido contrario en la sección 2,  $F_{2h}$  y  $F_{2d}$ . En ambas secciones la sumatoria de fuerzas da como resultado  $F_1$  y  $F_2$  respectivamente. En el estado de equilibrio, estas fuerzas tienen la misma magnitud, pero dirección contraria (la fuerza  $F_{1h}$  es menor a  $F_{2h}$ , inversamente  $F_{1d}$  es mayor a  $F_{2d}$ ). Debido a la posición de las fuerzas resultantes, ambas están espaciadas una distancia  $d$ , lo cual genera un par de fuerzas de la misma magnitud, pero de sentido contrario. En razón a la condición de líquido, las partículas que la componen adquirirán la tendencia de fluir en la dirección de las fuerzas predominantes, presentándose la mezcla del agua con líneas de flujo superficiales moviéndose en sentido contrario a la dirección de flujo y de manera inversa en la zona cercana a la solera. El repentino encuentro entre las masas de líquido y el inevitable choque entre partículas provocan la generación de un medio líquido de gran turbulencia que da lugar a la absorción de aire de la atmósfera, dando como resultado una mezcla de agua y aire.

Para un metro de ancho de un canal, se considera el escurrimiento de una masa de fluido por unidad de tiempo.

$$m = \frac{\rho \cdot q}{g} ; \text{ y el retardo de la masa } (v_1 - v_2)$$

El impulso total se expresará

$$F_d = \frac{\rho \cdot q}{g} \cdot (v_1 - v_2)$$

El que deberá estar en equilibrio con la fuerza resultante:

$$Fh_1 - Fh_2 = \frac{\rho \cdot y_2^2}{2} - \frac{\rho \cdot y_1^2}{2}$$

El impulso se expresa ahora:

$$\frac{\rho}{2} (y_2^2 - y_1^2) = \frac{\rho \cdot q}{g} (v_1 - v_2)$$

Considerando la ecuación de continuidad

$$q = y_1 \cdot v_1 = y_2 \cdot v_2$$

y eliminado  $q$  y  $v_2$  se obtiene:

$$\frac{y_1 \cdot v_1}{g} \left[ v_1 - \frac{y_1}{y_2} \cdot v_1 \right] = \frac{1}{2} (y_2^2 - y_1^2)$$

$$\frac{y_1 \cdot v_1^2}{g} = \frac{y_2}{2} (y_2 + y_1)$$

$$y_2^2 + y_2 \cdot y_1 - \frac{2y_1 \cdot v_1^2}{g} = 0$$

Resultando el tirante conjugado (aguas abajo del resalto):

$$y_2 = -\frac{y_1}{2} + \sqrt{\frac{y_1^2}{4} + \frac{2 \cdot v_1^2 \cdot y_1}{g}} \quad (6-1)$$

con:

$$Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g \cdot y_1}} \quad (6-2)$$

La expresión del número de Froude (número adimensional que expresa la relación entre las fuerzas de inercia y de gravedad), permitirá obtener la expresión adimensional de tirantes conjugados:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \quad (6-3)$$

El tirante antes y después del resalto hidráulico resulta función del Número de Froude.

Las características del resalto hidráulico han sido aprovechadas para reducir las velocidades de flujo en canales a valores que permitan el escurrimiento sin ocasionar tensiones de corte superiores a los límites permitidos por los materiales que componen el perímetro mojado. *El lugar geométrico en el que se presenta el resalto se denomina colchón hidráulico.*

Diferentes investigadores han profundizado en el tema de la disipación de la energía a través de un resalto hidráulico; algunos han puesto atención a la relación entre los tirantes y condiciones de flujo antes y después del resalto, los menos han abordado los mecanismos internos que gobiernan este fenómeno hidráulico. Se ha investigado diferentes formas de colchones hidráulicos con el objeto de lograr una mejor disipación de energía en una menor longitud.

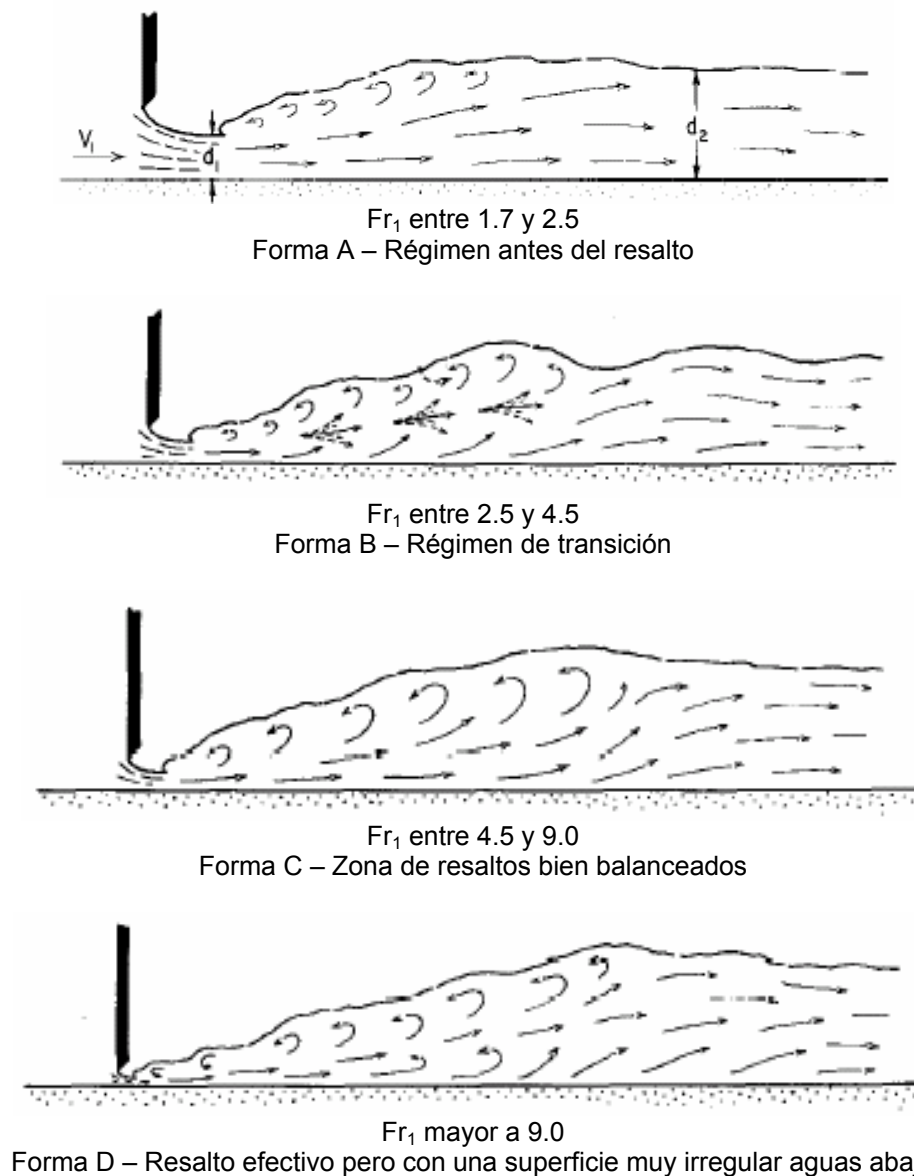
### 6.3 TIPOS DE RESALTO HIDRÁULICO

Cuando el número de Froude de la descarga es igual a 1.0, el régimen es crítico y el resalto no se puede formar. Cuando los números de Froude varían de 1.0 hasta aproximadamente 1.7, la circulación tiene un régimen sólo ligeramente inferior al del tirante crítico, y el cambio de la circulación con un tirante pequeño a uno elevado es gradual y se manifiesta solamente por una ondulación ligera de la superficie del agua. Al aproximarse el número de Froude al valor de 1.7 se comienza a formar en la superficie una serie de pequeñas ondulaciones, que se hacen mayores con los valores más elevados del número. Aparte de las ondulaciones superficiales, prevalece un flujo bastante uniforme hasta que el número de Froude llega aproximadamente a 2.5.

Cuando los números de Froude tienen valores comprendidos entre 2.5 y 4.5 se produce un resalto oscilante, el chorro entrante corre alternativamente cerca de la plantilla y luego a lo largo de la superficie del canal de aguas abajo. Este flujo oscilante produce ondas superficiales perjudiciales que llegan mucho más allá del extremo del colchón amortiguador.

En la variación de números de Froude comprendida entre 4.5 y 9, ocurre un resalto estable y bien equilibrado. La turbulencia está con final al cuerpo principal del resalto, y la superficie de flujo aguas abajo esta comparativamente pareja. Al aumentar el número de Froude a más de 9, la turbulencia dentro del resalto y el remolino de la superficie aumenta en actividad, resultando una superficie del agua irregular con ondas superficiales fuertes aguas abajo del resalto.

En la figura 6.2 se ilustran formas del fenómeno del resalto hidráulico para varias series de valores del número de Froude.



**Figura 6.2 Formas características del resalto hidráulico en relación con el número de Froude**

En la práctica se recomienda mantener el resalto hidráulico en la condición de resalto oscilante, por cuanto se trata de un resalto bien formado y accesible en las condiciones de flujo reales, si bien la disipación que se logra no alcanza los mejores niveles. En los casos de resaltos permanentes y fuertes, las condiciones hidráulicas aguas abajo son muy exigentes y difíciles de cumplir en la práctica.

## 6.4 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL RESALTO HIDRÁULICO

Las principales características del resalto hidráulico en canales horizontales son:

### a.) Pérdida de energía

La pérdida de energía en el resalto hidráulico es igual a la diferencia de las energías específicas antes y después del resalto. La pérdida puede ser escrita como:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4 \cdot y_1 \cdot y_2} \quad (6-4)$$

El índice  $\Delta E/E_1$  es conocido como la *pérdida relativa*

### b.) Eficiencia

El índice de la energía específica después del resalto y la energía específica antes del resalto se define como la *eficiencia del resalto*, y puede ser escrita como:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{(8Fr_1 + 1)^{3/2} - 4Fr_1^2 + 1}{8Fr_1^2(2 + Fr_1^2)} \quad (6-5)$$

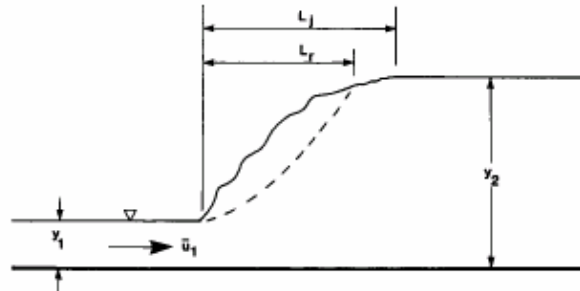
Esta ecuación indica que la eficiencia del resalto es una función adimensional, que depende solamente del número de Froude del flujo. La pérdida relativa igual a  $1 - E_2/E_1$  es también una función adimensional de  $Fr_1$ .

### c.) Altura del resalto

La diferencia entre las profundidades después y antes del resalto es llamada la *altura del resalto*, o  $h_j = y_2 - y_1$ . Esta altura también puede ser calculada como una altura relativa:

$$\frac{h_j}{E_1} = \frac{\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 3}{Fr_1^2 + 2} \quad (6-6)$$

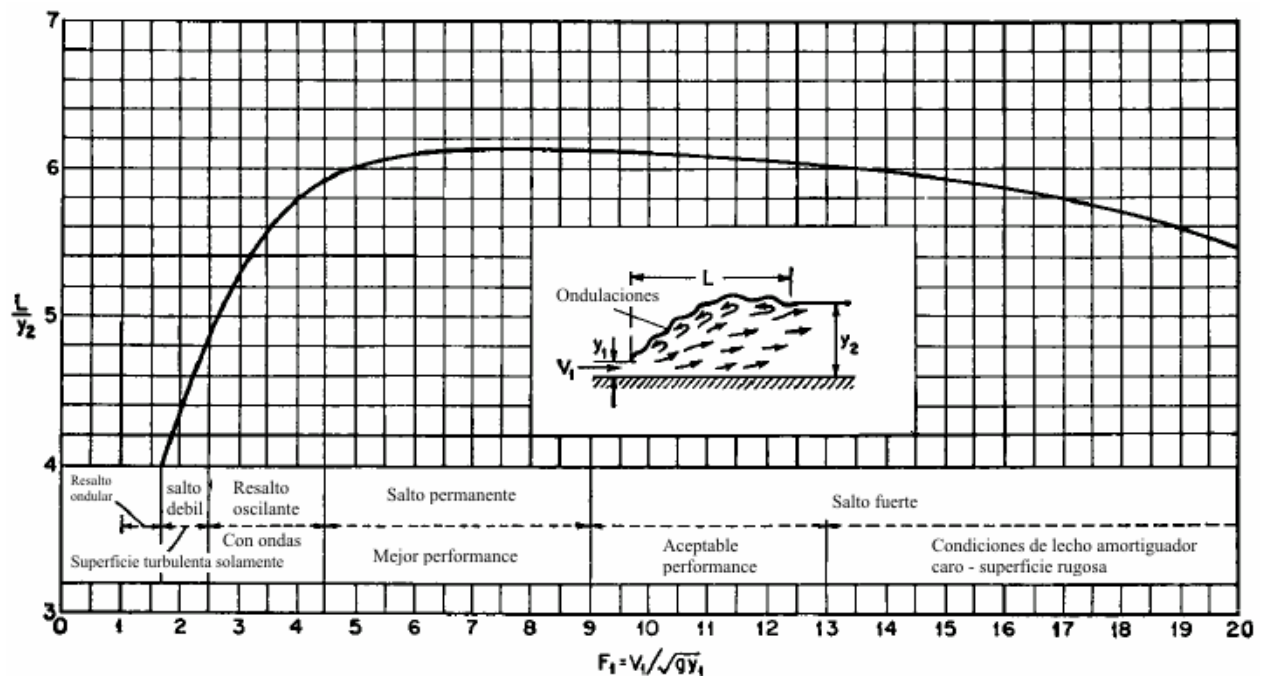
### d.) Longitud del resalto



**Figura 5.3 Esquema de la longitud del resalto (French, 1985)**

Un parámetro importante en el diseño de obras hidráulicas es la longitud del resalto, definirá la necesidad de incorporar obras complementarias para reducir esta longitud y/o aplicar medidas de protección de la superficie para incrementar su resistencia a las tensiones de corte.

Los resultados de pruebas experimentales realizadas por el Bureau of Reclamation, dan los siguientes resultados:



**Figura 6.4 Relación adimensional para la longitud del resalto hidráulico. Bureau of Reclamation**

Por otra parte, French (1985) indica que para canales rectangulares con pendiente moderada, la relación  $\frac{L_j}{y_1}$  es una función del número de Froude supercrítico aguas arriba:

$$\frac{L_j}{y_1} = 9.75 \cdot (Fr_1 - 1)^{1.01} \quad (6-7)$$

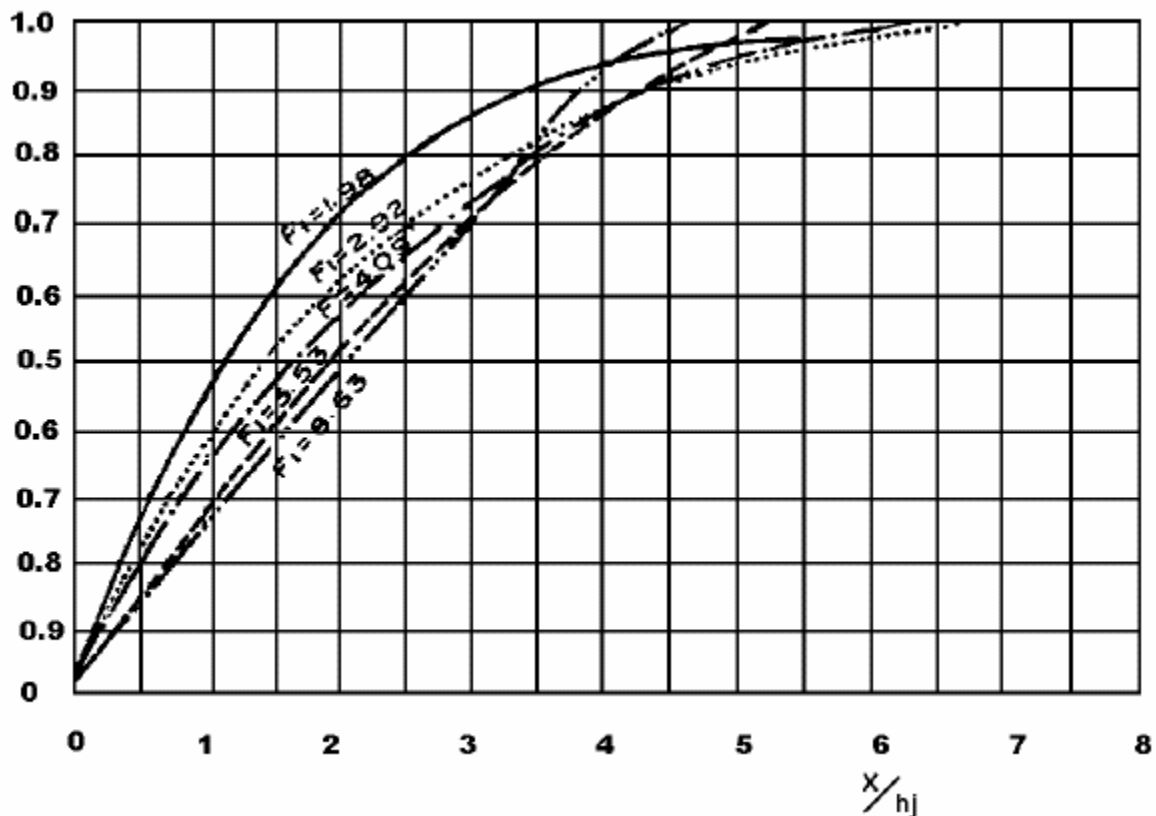
Además, en el caso de canales anchos ( $B/y > 10$ ), Chanson (1999) presenta una correlación para estimar la longitud del resalto, en términos de las condiciones aguas arriba:

$$\frac{L_r}{y_1} = 160 \cdot \tanh\left(\frac{Fr_1}{20}\right) - 12 \quad 2 < Fr_1 < 16 \quad (6-8)$$

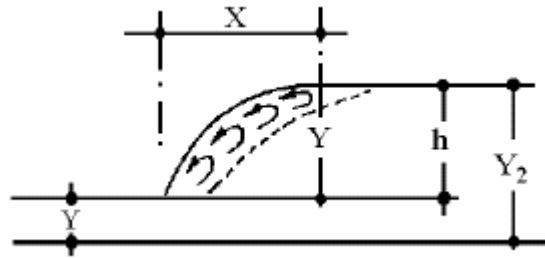
dónde  $L_r$  es la longitud del rizo. La ecuación 6-8 es válida para canales con pendiente moderada de sección rectangular con  $2 < Fr_1 < 16$ .

#### e.) Perfil de la superficie del resalto

Este dato tiene utilidad para el diseño de las paredes laterales de la obra, tanto en lo que se refiere a su altura como a su estabilidad. Bakhmeteff y Matzke encontraron que el perfil de la superficie de un resalto hidráulico se puede representar por curvas adimensionales en función de  $Fr_1$ , como se muestra en la figura 6.5.



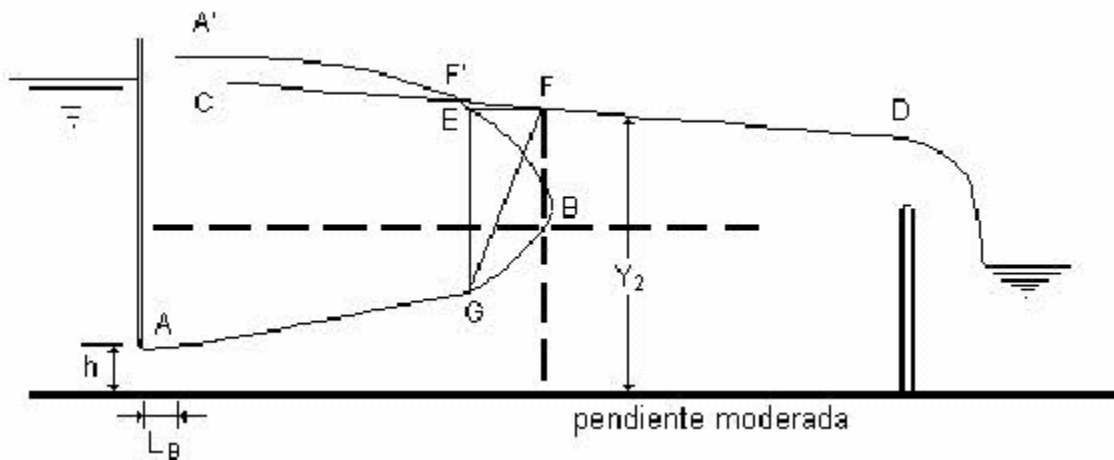




**Figura 6.5 Diagrama de Bakhmeteff y Matzke**

#### f.) Localización del resalto

La ubicación del resalto hidráulico depende de las condiciones de flujo tanto aguas arriba como aguas abajo. Para la explicación de este aspecto consideremos el caso de flujo a través de un conducto inferior, a manera de un desfogue de fondo. Aguas abajo, el nivel de agua es influenciado por algún elemento de control, como por ejemplo una estructura de caída.



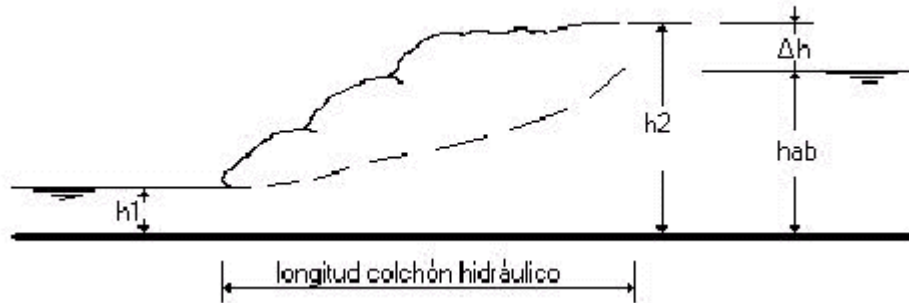
**Figura 6.6 Esquema de un resalto hidráulico en un sistema formado por una compuerta y un elemento de control**

Por un lado, el tirante alcanza su mínimo valor inmediatamente después de la compuerta, este se incrementa gradualmente en régimen supercrítico en dirección aguas abajo. Por otro lado, el tirante aguas abajo se desarrolla a través de una curva de depresión incrementándose hacia aguas arriba en régimen subcrítico.

En alguna sección A, el chorro que se desplaza desde la compuerta tiene tirante  $h_{1A}$  requiere para la formación del resalto un tirante conjugado  $h_{2A}$ , sin embargo, el tirante real en esta sección es menor al requerido. Bajo estas condiciones, el chorro supercrítico continúa avanzando hacia aguas abajo, incrementando su tirante y por lo tanto reduciendo su energía cinética. En una sección G, el tirante conjugado requerido  $h_{2A}$  alcanzará una magnitud equivalente al tirante existente, presentándose las condiciones para la formación de un resalto hidráulico.

## 6.5 DISEÑO DE UN COLCHÓN HIDRÁULICO

Un colchón hidráulico se hace necesario cuando no es posible lograr la disipación de energía deseada de manera natural, es decir, cuando el tirante conjugado necesario es menor al tirante existente aguas abajo.



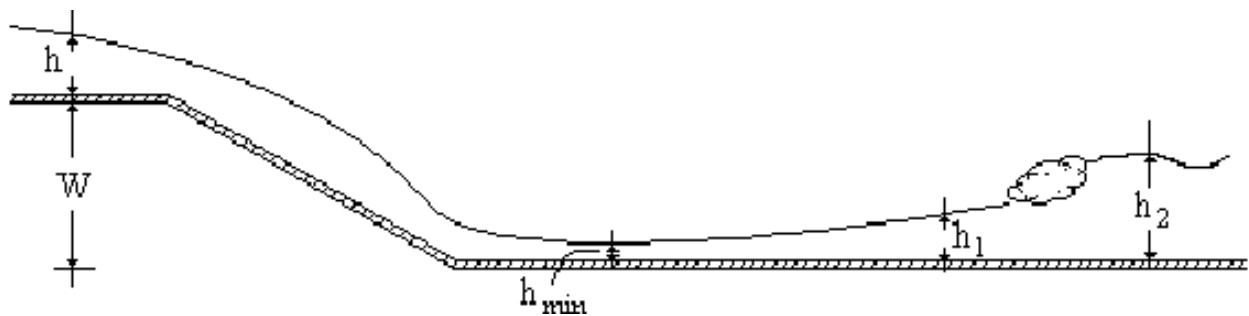
**Figura 6.7 Tirante conjugado necesario < tirante existente aguas abajo. No se forma resalto hidráulico**

En muy pocos casos el tirante conjugado  $h_2$  del resalto hidráulico será idéntico al tirante disponible aguas abajo  $h_{ab}$ ; en general  $h_2$  será mayor a  $h_{ab}$ , presentándose un déficit  $\Delta h$ . Para superar el déficit  $\Delta h$  se considera la alternativa de forzar a la disipación a través de la incorporación de elementos complementarios como ser la formación de un cuenco artificial, bloques de impacto, incremento de la rugosidad aguas abajo, etc. obligando a desarrollar un resalto hidráulico en un tramo definido que sea lo más corto posible.

## 6.6 COLCHÓN HIDRÁULICO CON UN CUENCO AMORTIGUADOR

Tiene su aplicación en vertederos de excedencias, rápidas y estructuras de caída libre. Al pie de la estructura se presenta el tirante mínimo  $h_{min}$  y por lo tanto la energía específica máxima.

Para la formación del hidráulico será necesario contar con un tirante aguas abajo  $h_{ab}$  de magnitud similar al tirante conjugado  $h_2$ , que deberá desarrollarse por efecto de las condiciones de escurrimiento existente aguas abajo.



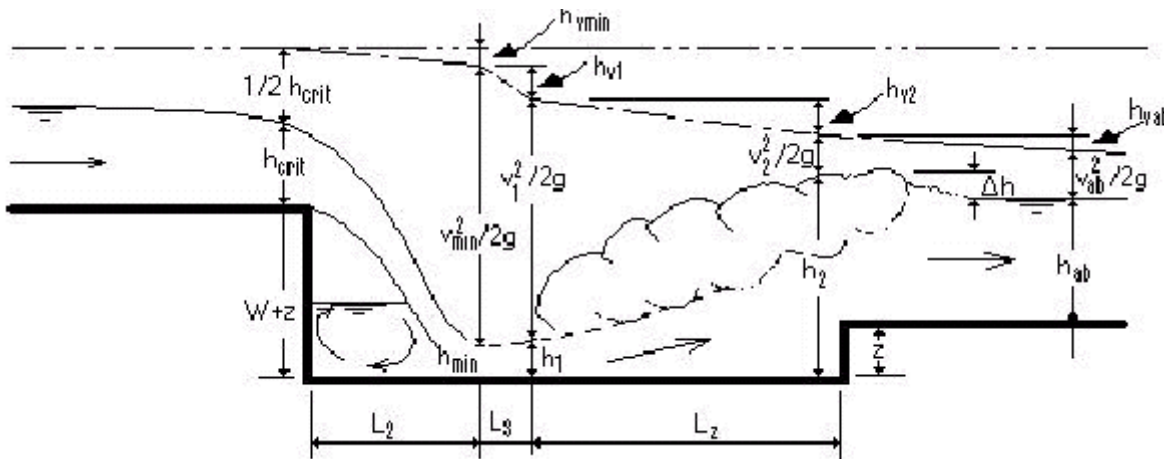
**Figura 6.8 Resalto Hidráulico para  $h_{min} < h_1$**

Si  $h_{ab} < h_2$ , el resalto hidráulico no se formará en la sección 1, si no que por efecto de su energía cinética, la zona de régimen subcrítico se desplazará hacia aguas abajo, hasta encontrar un tirante que sea próximo al tirante conjugado; en este caso  $h_{min} < h_1$ . Además, la zona de régimen supercrítico alcanzará una longitud apreciable que será mayor a la longitud máxima definida por las condiciones límite del proyecto en cuestión.

Para incrementar el tirante de aguas abajo existen varias posibilidades, a saber: profundizar la solera o construir un travesaño de fondo, incrementar la rugosidad de la solera, reducir el ancho de la sección, reducir la pendiente de la solera, etc.

Las tres últimas posibilidades son normalmente difíciles de lograr por lo que se considera únicamente la primera o segunda de las posibilidades.

La profundización de la solera en la zona del colchón hidráulico incrementará la altura de caída y en consecuencia la disminución del tirante  $h_{min}$  y un tirante conjugado  $h_2$  mayor. Afortunadamente en el colchón hidráulico no sólo se presenta una compensación geométrica del déficit de la altura en el tirante aguas abajo, sino que la confinación del resalto hidráulico genera una mayor intensidad de choques entre las partículas de agua, contra las paredes laterales del cuenco y principalmente contra la pared frontal que se logra por la profundización del lecho, lo cual da lugar a pérdidas de carga compatibles con las necesidades de disipación de energía.



**Figura 6.9 Colchón hidráulico profundizando el nivel de la solera**

Investigaciones realizadas en modelos hidráulicos ofrecen (Norma Alemana DIN 1961) una expresión para determinar la altura de profundización necesaria para el confinamiento de un resalto hidráulico plenamente formado; esta expresión admite aún la permanencia de un déficit de tirante en la salida del cuenco  $\Delta h$ .

Para el cálculo de la profundidad del colchón hidráulico  $z$ , que alcance la menor longitud posible, se puede asumir  $h_{min} \cong h_1$ ; a continuación se determina el tirante conjugado  $h_2$  mediante la expresión 6-3. El tirante  $h_{ab}$  dependerá de las condiciones hidráulicas del canal aguas debajo de la estructura de caída.  $\Delta h$  se obtiene de la diferencia entre el tirante conjugado y el tirante existente aguas abajo; este valor deberá adquirir una magnitud significativamente menor a la original.

La expresión que determina la profundidad necesaria  $z$  del colchón hidráulico será:

$$Z = \Delta h \left[ n + \frac{1-n}{W/h_{crit}(1-n)+1} \right] \quad (6-9)$$

Donde:

$$n = 0.65 - 0.5Fr_{ab} \quad (Fr_{ab} \text{ N° de froude aguas abajo}) \quad (6-10)$$

Se recomienda adoptar  $L_z = 10 \cdot z$  como longitud para el desarrollo del resalto hidráulico; este valor deberá compararse con el que resulte del cálculo correspondiente.

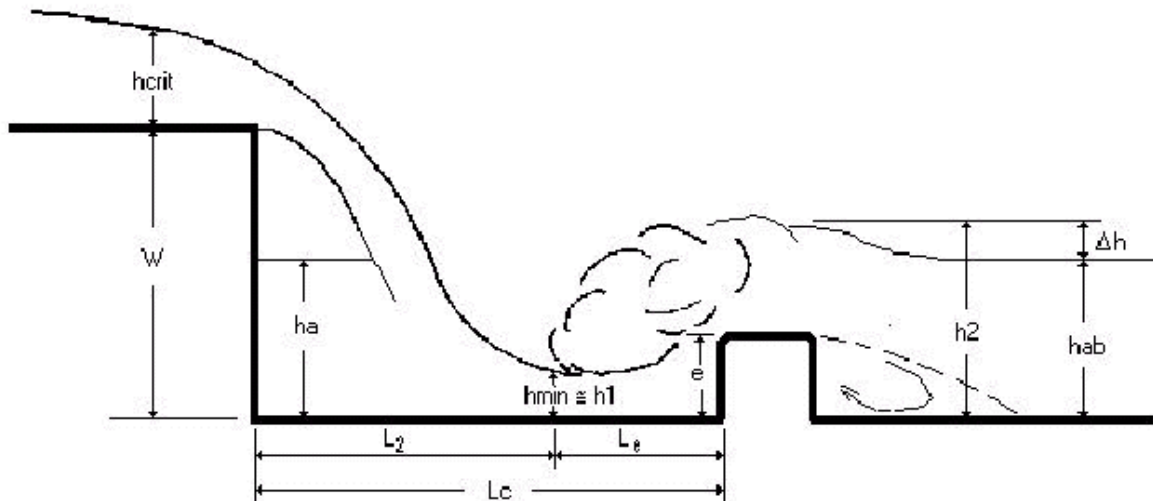
Dependiendo de las condiciones que presenta la obra, también es posible la formación de un colchón hidráulico con la aplicación de un travesaño de fondo, cuya misión será elevar el tirante aguas abajo hasta niveles que compensen el déficit del tirante conjugado.

La altura necesaria  $e$  para alcanzar el objetivo indicado puede ser calculada por medio de la siguiente expresión:

$$e = 0.75 \cdot \Delta h \cdot \left( \frac{h_{ab}}{h_{crit}} \right)^3 \cdot \frac{h_{min}}{h_{crit}} \quad (6-11)$$

Donde:

$\Delta h$ : Diferencia de nivel entre el tirante conjugado del resalto hidráulico y el tirante aguas abajo.



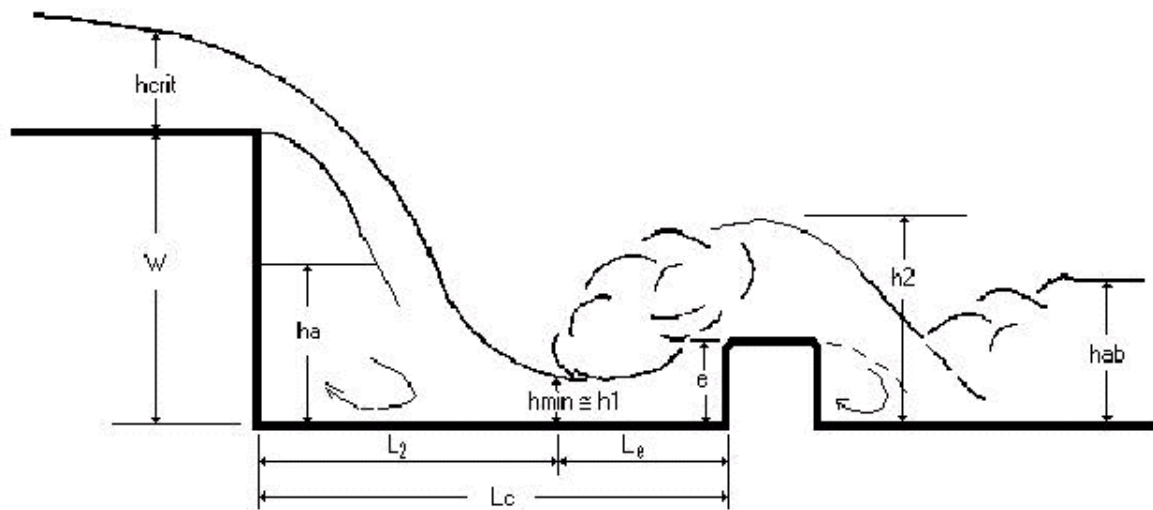
**Figura 6.10 Colchón hidráulico por aplicación de un travesaño de fondo**

Como en el caso anterior, se puede adoptar  $L_c = 10 \cdot e$ . (6-12)

La altura de travesaño  $e$  tiene como altura máxima la altura de caída mínima necesaria para la formación del resalto hidráulico, ya que podría generarse un nuevo resalto hidráulico.

En estructuras de elevada pendiente se desarrollan estados de flujo con gran velocidad que requieren condiciones hidráulicas muy exigentes que son difíciles de alcanzar; la profundización del lecho o la construcción de un travesaño de fondo pueden resultar insuficientes. La

necesidad de estructuras disipadoras de energía de mayor eficiencia ha motivado la investigación de diversos tipos de colchones hidráulicos.



**Figura 6.11 Formación de resalto hidráulico adicional por  $e > w_{lim}$**

## 6.7 ESTANQUES AMORTIGUADORES DE LA U.S.B.R.

De acuerdo a la clasificación del U.S. Bureau of Reclamation, existen cinco tipos de estanques amortiguadores:

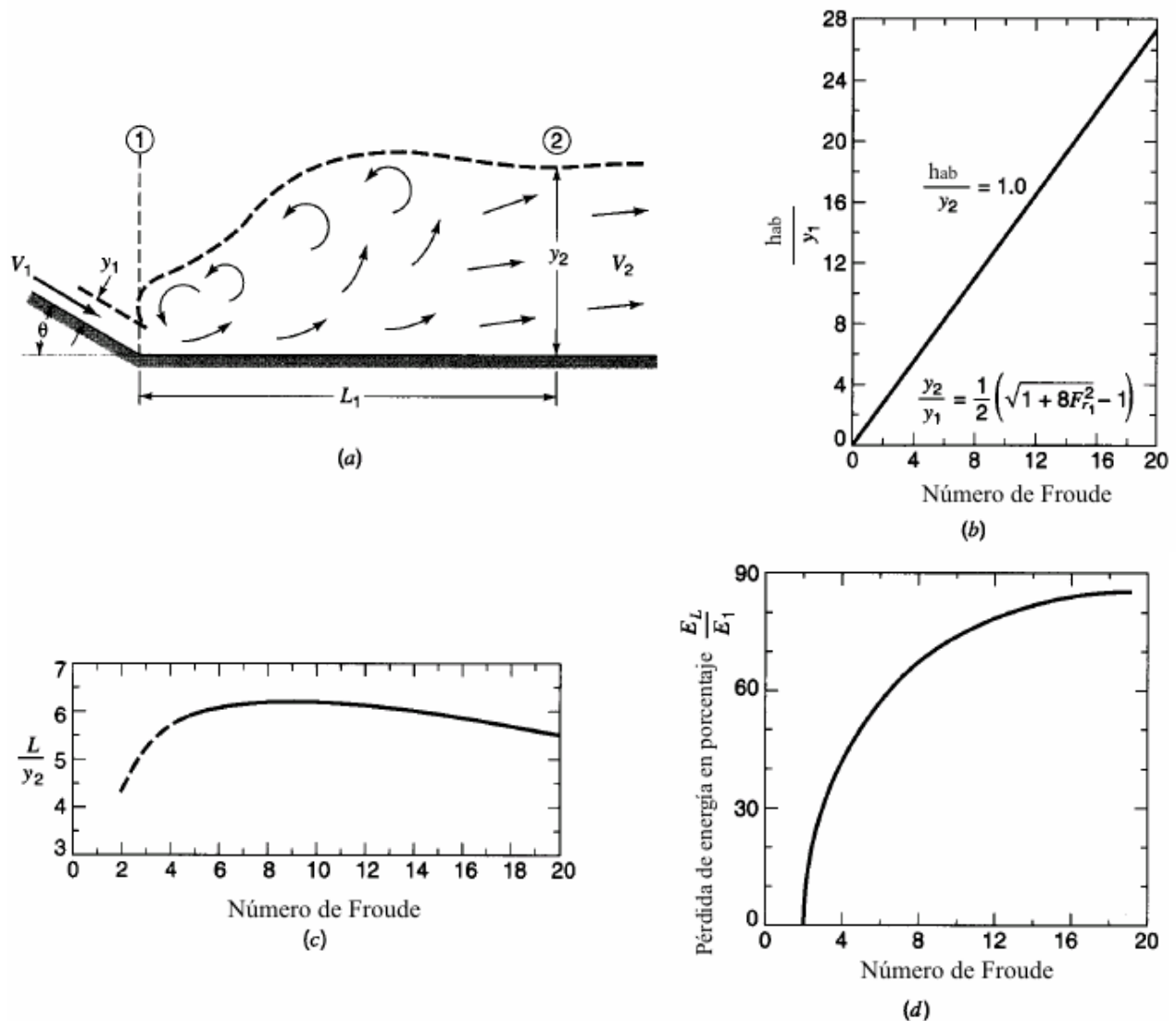
- TIPO I Para canales con pendiente moderada.
- TIPO II Estanques amortiguadores para vertederos de presas grandes y de tierra con canales extensos
- TIPO III Pequeños estanques amortiguadores para estructuras de canal, pequeñas estructuras de salida, y vertederos menores.
- TIPO IV Utilizado en estructuras 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.

### 6.7.1 Estanque Amortiguador Tipo I

Los estanques de tipo I deben ser utilizados cuando el número de Froude  $Fr_1$  es menor a 1.7, sin embargo en la práctica este límite puede extenderse a 2.5. Cuando el número de Froude es 1.7 el tirante conjugado  $y_2$  es aproximadamente el doble del tirante de llegada, o aproximadamente 40% mayor que el tirante crítico. La velocidad de salida  $v_2$  es aproximadamente la mitad de la velocidad de llegada, o 30% menor que la velocidad crítica. Las longitudes del canal más allá del punto donde el tirante comienza a cambiar no deben ser menores que aproximadamente  $4y_2$ . La longitud del estanque puede ser aproximada por la

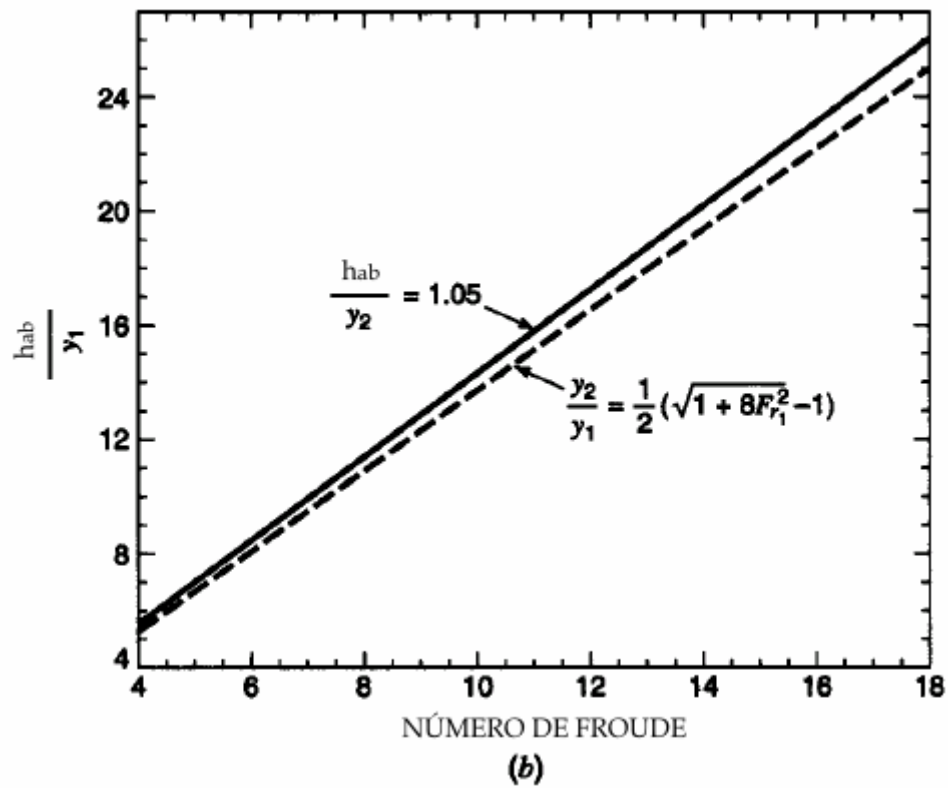
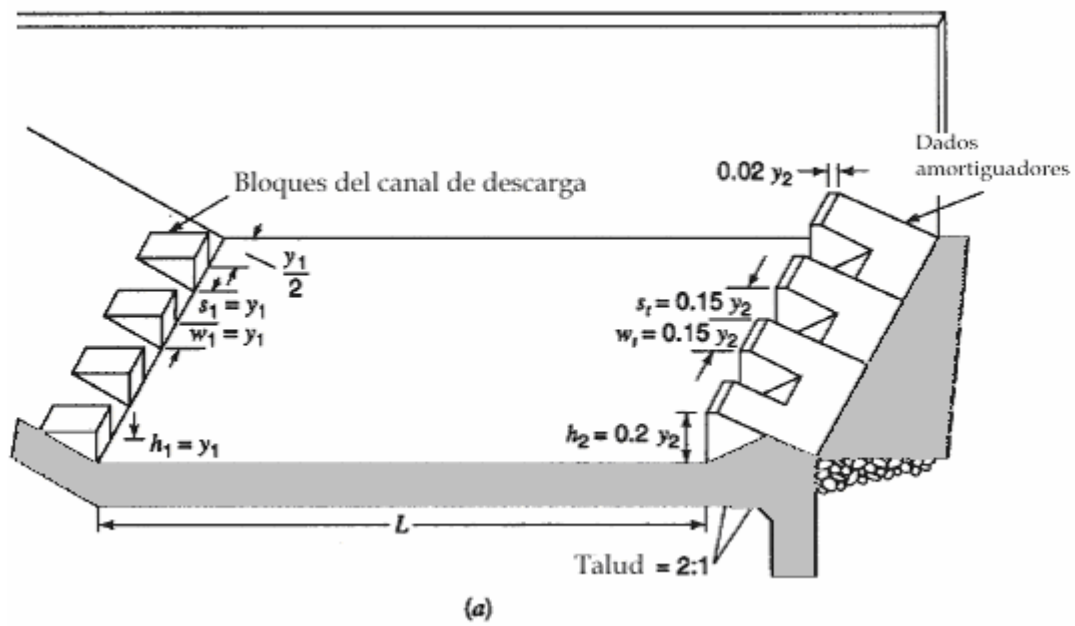
longitud  $L_j$  en la figura 6.3, mientras que la ecuación 6-3 puede ser utilizada para calcular la altura del estanque.

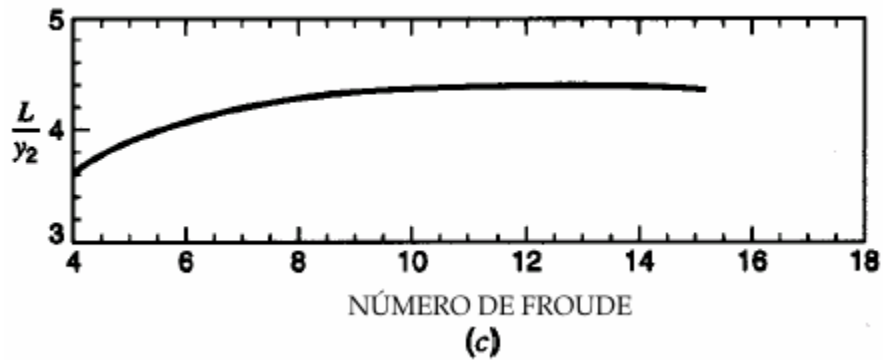


**Figura 6.12 Estanque amortiguador tipo I. a.) Longitud del resalto; b.) Relación  $h_{ab}/y_1$ ; c) relación  $L/y_2$ ; d) Pérdida de energía en el resalto (Mays, 2000)**

### 6.7.2 Estanque Amortiguador Tipo II

El estanque amortiguador tipo II se desarrolló para cuencos disipadores de uso común en vertederos de presas altas, de presas de tierra y para estructuras de canales grandes. El estanque contiene bloques en la rápida del extremo de aguas arriba y un umbral dentado cerca del extremo de aguas abajo. No se utilizan bloques de impacto debido a que las velocidades relativamente altas que entran al resalto pueden causar cavitación en dichos bloques. En la figura 6.13 se muestran los detalles constructivos y los datos necesarios para el cálculo. Este tipo de disipadores son utilizados cuando el número de Froude está por encima de 4.5 o velocidades mayores a 15 m/s.

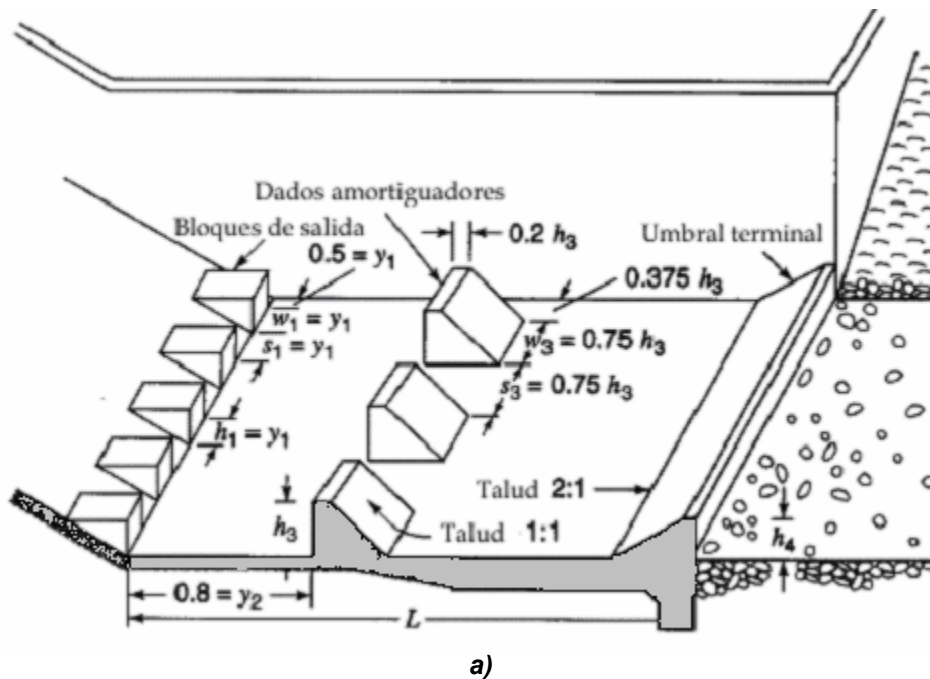




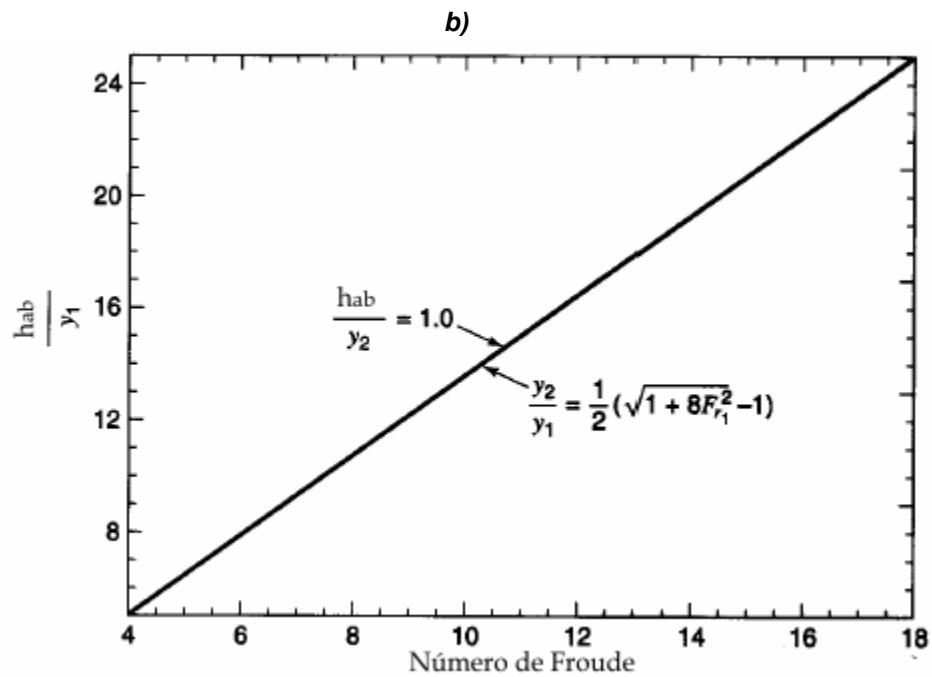
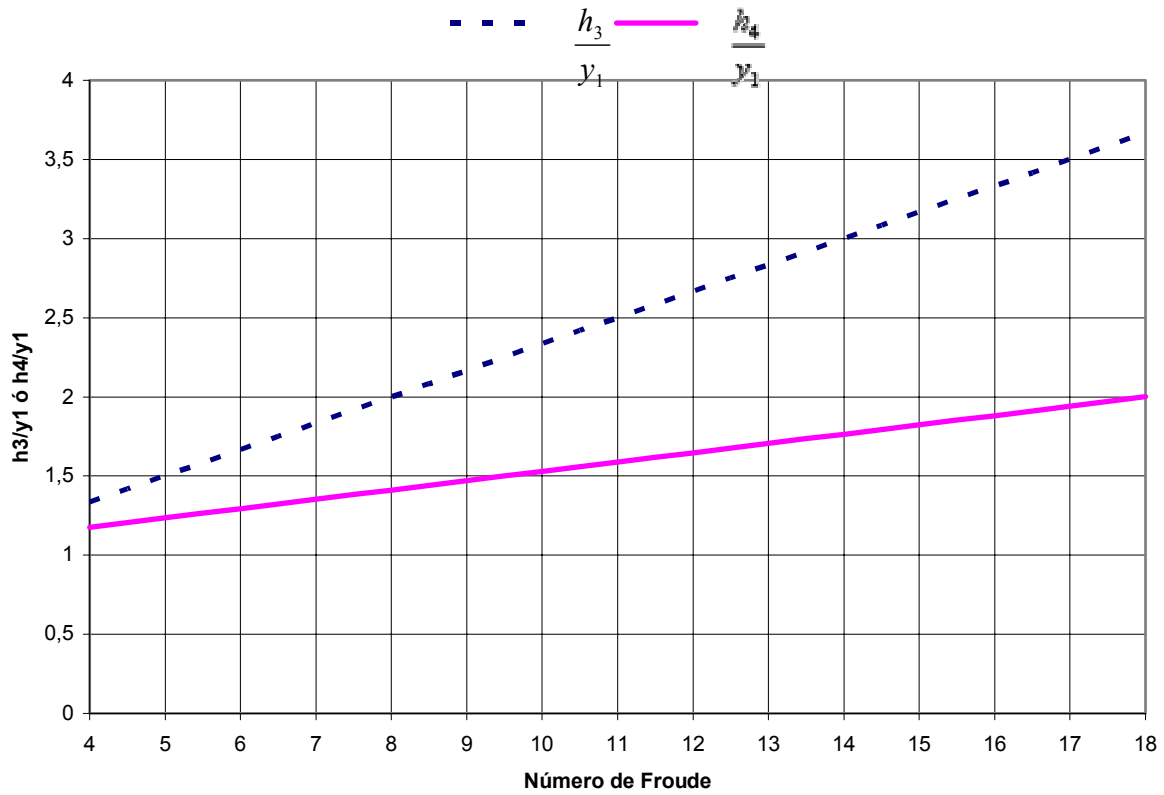
**Figura 6.13 Estanque amortiguador para números de Froude por encima de 4.5**  
a) Dimensiones del estanque tipo II; b) Tirante mínimo; c) Longitud del resalto (Mays, 2000)

### 6.7.3 Estanque Amortiguador Tipo III

Los estanques amortiguadores tipo III son más cortos que los del tipo II, y poseen un umbral de salida y dados amortiguadores aguas abajo del los bloques de caída. La velocidad de llegada para este tipo de dissipador debe ser limitada para prevenir la posibilidad de presiones bajas en los dados amortiguadores que pueden originar cavitación. El comportamiento de este dissipador indica que su longitud y la del resalto pueden reducirse alrededor del 60%, con accesorios en comparación con el 80% para el dissipador SAF. Los estanques tipo III son utilizados en pequeños vertederos, estructuras de salida, y en pequeñas estructuras de canal donde  $v_1$  no excede de 15 a 18 m/s y el número de Froude  $Fr_1 > 4.5$ .



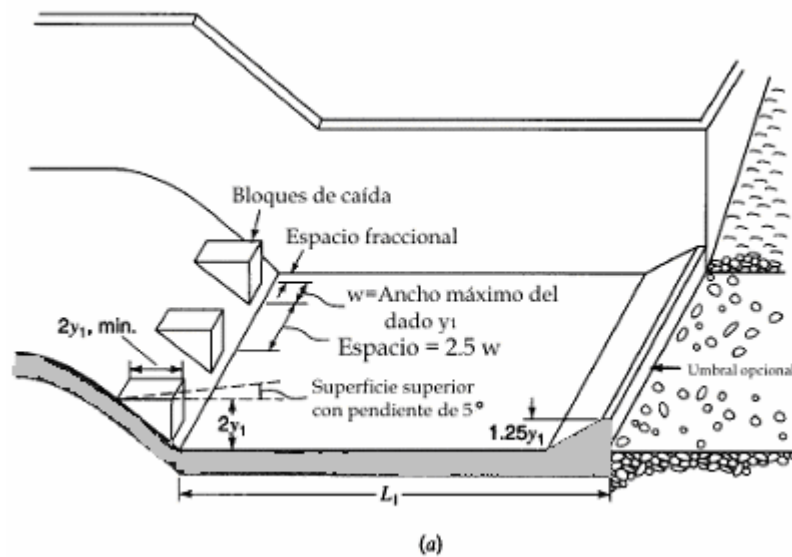




**Figura 6.14** Estanque amortiguador para números de Froude por encima de 4.5 y velocidad de llegada  $\leq 18$

a) Dimensiones del estanque tipo III; b) Alturas del dado y del umbral; c) Tirante mínimo (Mays, 2000)

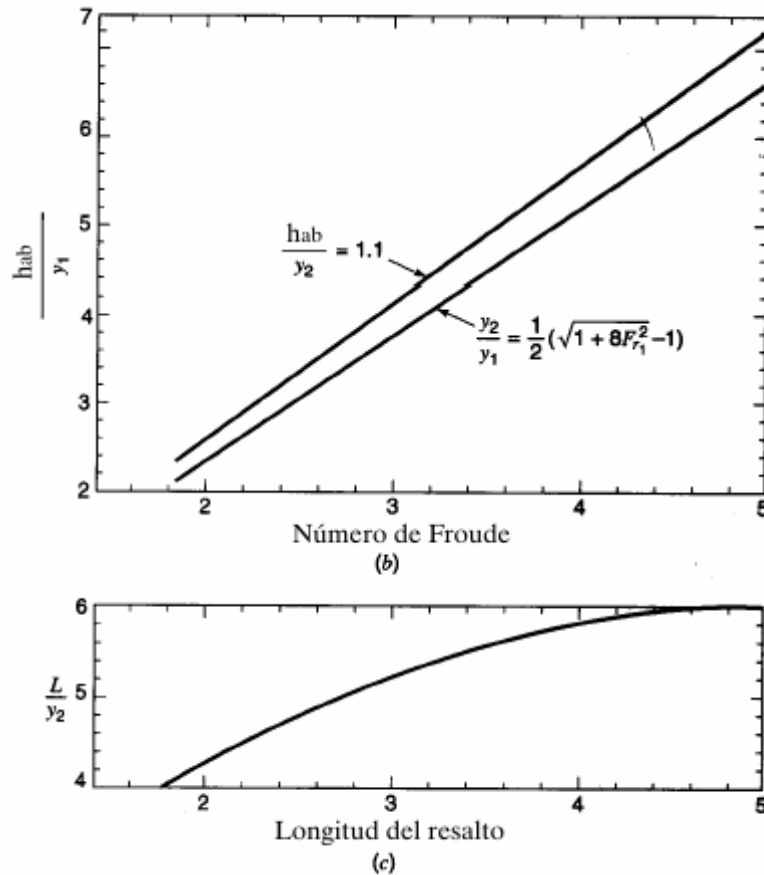
### 6.7.4 ESTANQUE AMORTIGUADOR TIPO IV



**Figura 6.15 Estanque amortiguador tipo IV. a) Dimensiones del estanque; b) Tirante mínimo; c) Longitud del resalto (Mays, 2000)**

Cuando el número de Froude está comprendido entre 2.5 y 4.5, se producirá un resalto oscilante en el estanque amortiguador, el cual genera una onda que es difícil de atenuar. El estanque amortiguador tipo IV se diseña para combatir este problema eliminando la onda en su fuente<sup>1</sup>. Esto se lleva a cabo intensificando el remolino, que aparece en la parte superior del resalto, con los chorros direccionales deflectados utilizando grandes bloques en la rápida cuyo número mínimo requerido para este propósito se muestra en la figura 6.13. para un comportamiento hidráulico mejor, es conveniente construir estos bloques más angostos que lo indicado, preferiblemente con un ancho igual a  $0.75 y_1$ , y fijar la profundidad de salida, de tal manera que sea un 5% a 10% mayor que la profundidad recuente del resalto. La longitud del estanque puede determinarse mediante la curva c.) de la figura 6.13. El estanque tipo IV se utiliza en las secciones transversales rectangulares.

<sup>1</sup> El Bureau también ha desarrollado diseños alternativos para sustituir el estanque amortiguador tipo IV, como el dissipador de energía de caída, el de tipo impacto y los supresores de onda.



**Figura 6.15** Estanque amortiguador tipo IV. a) Dimensiones del estanque; b) Tirante mínimo; c) Longitud del resalto (Mays, 2000)

## 6.8 COLCHÓN HIDRÁULICO SAF

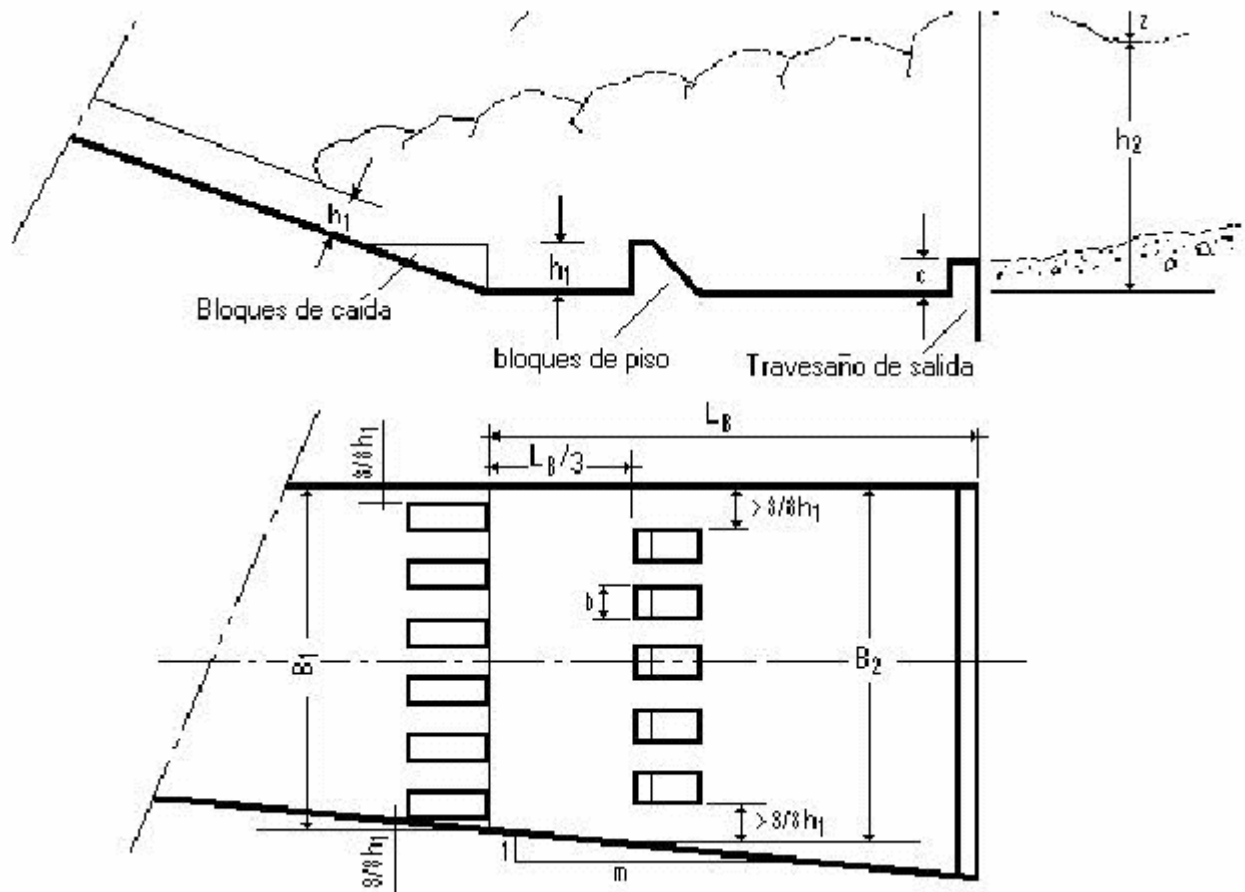
Ha sido desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica St. Anthony Falls de la Universidad de Minnesota EE.UU. para su uso en pequeñas estructuras de drenaje. La utilización de este tipo de estructuras en sistemas de gran altura podría dar lugar a la generación de fenómenos como la cavitación. Las reglas de diseño resumidas por el investigador Blaisdell son las siguientes:

1. La longitud  $L_B$  del colchón disipador para número de Froude entre 1.7 y 17 se determina mediante la fórmula:

$$L_B = 4.5 \cdot y_2 \cdot Fr_1^{-0.76}$$

2. La altura de los bloques de entrada y los bloques del piso es  $y_1$  y su ancho y espaciamiento es aproximadamente  $0.75 y_1$ .
3. La distancia desde el extremo de aguas arriba del colchón disipador hasta los bloques del piso es  $L_B/3$
4. No deben localizarse bloques en el piso más cerca de las paredes laterales que  $\frac{3y_1}{8}$ .

5. Los bloques del piso deben localizarse aguas abajo enfrentados a las aberturas entre los bloques de la rápida.
6. Los bloques del piso deben ocupar entre el 40% y el 55% del ancho del colchón disipador.
7. Los anchos y el espaciamiento de los bloques del piso para cuencos disipadores divergentes deben incrementarse en proporción al aumento del ancho del colchón disipador en la sección dónde se localizan los bloques.
8. La altura del umbral de salida esta dada por  $c = 0.07y_2$ , dónde  $y_2$  es la altura conjugada teórica, correspondiente a  $y_1$ .
9. La profundidad de salida de aguas abajo por encima del piso del colchón disipador está dada por  $y_2' = \left(1.10 - \frac{Fr_1^2}{120}\right) \cdot y_2$ , para  $Fr_1 = 1.7$  a  $5.5$ ; por  $y_2' = 0.85 \cdot y_2$  para  $Fr_1 = 5.5$  a  $11$ ; y por  $y_2' = \left(1.00 - \frac{Fr_1^2}{800}\right) \cdot y_2$  para  $Fr_1 = 11$  a  $17$ .
10. La altura de los muros laterales por encima de la profundidad de salida máxima esperada dentro de la vida útil de la estructura esta dada por  $z = \frac{y_2}{3}$ .
11. Los muros de salida deben ser iguales en altura a los muros laterales del cuenco disipador, y su parte superior debe tener una pendiente de 1:1.
12. El muro de salida debe localizarse con un ángulo de  $45^\circ$  con respecto al eje central de la salida.
13. Los muros laterales del colchón disipador pueden ser paralelos o divergir como una extensión de los muros laterales de la transición.
14. Debe utilizarse un muro cortina de profundidad nominal en el extremo del colchón disipador.
15. El efecto de absorción de aire no se considera en el diseño del colchón disipador.



**Figura 6.16 Colchón hidráulico SAF**

## 6.9 DISIPACIÓN POR DISPERSIÓN (SALTO DE SKY)

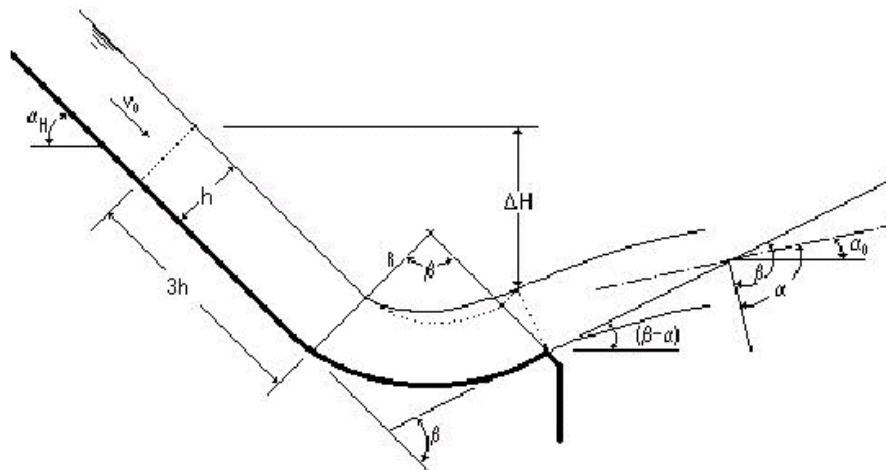
Otra alternativa para disipar la energía cinética es la dispersión del flujo por medio de un canal de evacuación de solera curvada.

A través de esta medida se logra generar un salto, alejando el chorro de la obra y reduciendo la velocidad de flujo en el punto de llegada del chorro líquido. Esta medida puede tener aplicación en vertederos de excedencias, estructuras de salidas de alcantarillas de carreteras, etc. (FIGURA No 6.13)

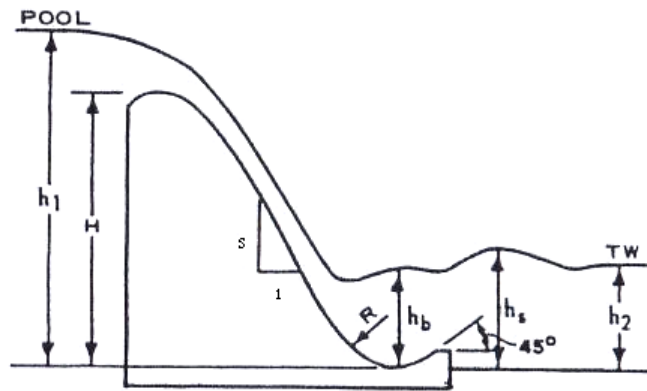
Debe notarse que este tipo de estanques son solo ejemplos típicos y se debe tener cuidado en la aplicación práctica de los mismos, en condiciones de diseño enteramente distintas. Además, existe una gama de diseños diferentes a los discutidos en este capítulo, que se presentan como una alternativa de diseño a continuación en el cuadro 6.1:

Nombre	Aplicación práctica	Condiciones de flujo	Tirante ( $h_{ab}$ )	Observaciones
USBR Tipo I	Canales	$Fr_1 < 1.7$ (hasta 2.5) Longitud del estanque $\approx 4.2y_2$	$1.0 y_2$	Sin bloques o dispositivos de disipación
USBR Tipo II	Estructuras grandes	$Fr_1 > 4.5$ $q < 46.5 \text{ m}^3/\text{s/m}$ $H_1 < 61 \text{ m}$ Longitud del estanque $\approx 4.4 y_2$	$1.05 y_2$	Dos hileras de bloques. La hilera final se combina con un umbral de salida inclinado (umbral dentado). Altura de bloque = $y_1$
USBR Tipo III	Estructuras pequeñas	$Fr_1 > 4.5$ $q < 16.86 \text{ m}^3/\text{s/m}$ $V_1 < 15 \text{ a } 18 \text{ m/s}$ Longitud del estanque $\approx 2.8 y_2$	$1.0 y_2$	Dos hileras de bloques y un umbral de salida. Altura de bloque = $y_1$
USBR Tipo IV	Para resaltos oscilantes	$2.5 < Fr_1 < 4.5$ Longitud del estanque $\approx 6.0 y_2$	$1.1 y_2$	Una hilera de bloques y un umbral de salida. Altura de los bloques = $2y_1$ . Deben añadirse supresores de onda en la salida.
SAF	Estructuras pequeñas	$1.7 < Fr_1 < 17$ Longitud del estanque $\approx 4.5 \cdot y_2 \cdot Fr_1^{-0.76}$	$1.0 y_2$	Dos hileras de bloques y un umbral de salida. Altura de bloque = $y_1$
USACE	Estructuras pequeñas	Longitud del estanque $\approx 4.0 y_2$	$1.0 y_2$	Dos hileras de bloques y un umbral de salida

**Cuadro 6.1 Disipadores de energía de resalto hidráulico. (Chanson, 1999)**



**Figura 6.17 Estructura de salto. Disipación por dispersión del flujo**



**Figura 6.18** Disipación por dispersión del flujo (Salto de Sky)

## 6.10 EJEMPLOS DE APLICACIÓN

### EJEMPLO 1

Dimensione un estanque amortiguador tipo II para un vertedero de excedencia con su cara aguas arriba vertical y con una longitud de cresta de 250 pies. El caudal de diseño es 75000 pies<sup>3</sup>/s. La superficie del agua hacia la parte aguas arriba correspondiente al caudal de diseño se localiza en la cota 1000 y el fondo promedio del canal se encuentra en la cota 880. La elevación de la profundidad de salida se localiza en la cota 920.

#### **Solución**

##### a) Diseño del vertedero

Se supone un vertedero de excedencia alto, entonces no se considera el efecto de la velocidad de aproximación, y  $C_d = 4.03$ . (Ver sección 4.6).

Mediante la ecuación de descarga (4-2),  $H_e^{1.5} = \frac{Q}{CL} = \frac{75000}{4.03 \cdot 250} = 74.4$  y  $H_e = 17.8$  pies.

La velocidad de aproximación es  $V_a = \frac{75000}{250 \cdot (1000 - 880)} = 2.5$  pies/s y la altura de velocidad

correspondiente es  $H_a = \frac{2.5^2}{2g} = 0.1$  pies.

Luego la altura de diseño es  $H_d = 17.8 - 0.1 = 17.7$  pies y la altura de la presa es  $h = 120 - 17.7 = 102.3$  pies. Esta altura es mayor que  $1.33 H_d$ , y por consiguiente, el efecto de la velocidad de aproximación es insignificante.

##### b) Diseño del estanque amortiguador

Al registrar en la figura 4.14 una altura de 17.7 pies por encima de la cresta y una caída total de 120 pies, la velocidad de flujo a la salida del vertedero es 79 pies/s.

Por consiguiente la profundidad de flujo es  $\frac{75000}{250 \cdot 79} = 3.8$  pies y el número de Froude es  $\frac{79}{\sqrt{3.8g}} = 7.13$

Al ingresar en la figura 5.13b con  $Fr_1=7.13$  la línea punteada da una relación de la profundidad de salida con respecto a  $y_1$  igual a 9.7. Debido a que la profundidad de salida y la conjugada  $y_2$  en este caso son idénticas,  $y_2 = 9.7 \times 3.8 = 36.9$  pies. Para mayor seguridad, de hecho, el Bureau recomienda un margen de seguridad mínimo del 5% de  $y_2$ , que debe sumarse a la profundidad conjugada.

Si se desea un margen de seguridad del 5% se sigue el siguiente procedimiento. A partir de la gráfica 5.13b, con un número de Froude  $Fr_1=7.13$  la línea continua da una relación de la profundidad de salida/ $D_1=10.2$ . Luego el estanque amortiguador debe posicionarse de nuevo para una profundidad de salida de  $10.2 \times 3.8 = 38.76$  pies ó  $1.05 y_2$ . La elevación del piso del estanque se coloca en la cota 881.24 (cota =  $920 - 38.76$ ).

La longitud del estanque puede obtenerse ingresando a la curva de la figura 5.13c con  $Fr_1=7.13$ . Luego  $L/y_2 = 4.16$  o  $L = 4.16 \times 36.9 = 154$  pies.

Las dimensiones y espaciamento para los bloques del canal de descarga son:

- ✦ Separación entre bloques =  $y_1 = 3.8$  pies
- ✦ Ancho de los bloques =  $y_1 = 3.8$  pies
- ✦ Altura de los bloques =  $y_1 = 3.8$  pies
- ✦ Separación del borde =  $y_1/2 = 1.9$  pies

Las dimensiones y espaciamento para los dados amortiguadores son:

- ✦ Separación entre dados =  $0.15y_2 = 5.54$  pies
- ✦ Ancho de los dados =  $0.15y_2 = 5.54$  pies
- ✦ Altura de los dados =  $0.2y_2 = 7.38$  pies
- ✦ Ancho de la parte superior =  $0.02 y_2 = 0.74$  pies

## EJEMPLO 2

Utilizando los datos del ejemplo anterior, diseñe un estanque amortiguador tipo SAF.

### Solución

El dimensionamiento del vertedero es exactamente igual al procedimiento anterior.

Al registrar en la figura 4.14 una altura de 17.7 pies por encima de la cresta y una caída total de 120 pies, la velocidad de flujo a la salida del vertedero es 79 pies/s. Por consiguiente la profundidad de flujo es  $\frac{75000}{250 \cdot 79} = 3.8$  pies y el número de Froude es  $\frac{79}{\sqrt{3.8g}} = 7.13$



Utilizando la ecuación  $\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right)$ , encontramos que la altura conjugada  $y_2 = 36.5$  pies.

Dimensiones del estanque y sus componentes:

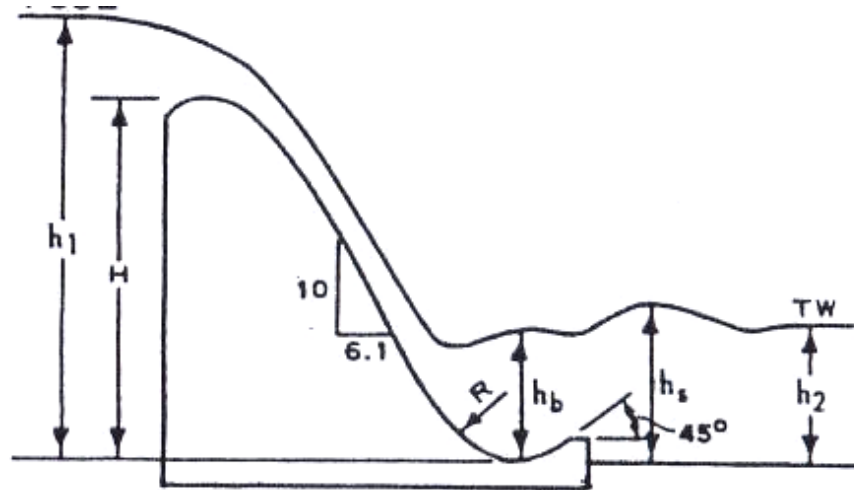
1. Longitud del estanque:

$$L_B = 4.5 \cdot y_2 \cdot Fr_1^{-0.76} = 4.5 \cdot 36.5 \cdot 7.13^{-0.76} = 36.9 \text{ pies.}$$

2. Altura de los bloques de entrada y bloques del piso =  $y_1 = 3.8$  pies. El ancho y espaciamiento tienen un valor de aproximadamente  $0.75 y_1 = 2.85$  pies.
3. La distancia desde el extremo de aguas arriba del colchón disipador hasta los bloques del piso es  $L_B/3 = 12.3$  pies
4. No deben localizarse bloques en el piso más cerca de las paredes laterales que  $\frac{3y_1}{8} = 1.4$  pies.
5. Los bloques del piso deben localizarse aguas abajo enfrentados a las aberturas entre los bloques de la rápida.
6. Los bloques del piso deben ocupar entre el 40% y el 55% del ancho del colchón disipador. Por lo tanto el número de bloques será de  $n_1 = \frac{0.5 \cdot B_1}{2.85} = \frac{0.5 \cdot 250}{2.85} \approx 44$ .
7. La altura del umbral de salida esta dada por  $c = 0.07 y_2 = 0.07 \cdot 36.5 = 2.6$  pies.
8. La profundidad de salida de aguas abajo por encima del piso del colchón disipador está dada por  $y_2' = 0.85 \cdot y_2 = 0.85 \cdot 36.5 = 31$  pies para  $Fr_1 = 5.5$  a  $11$ .
9. La altura de los muros laterales por encima de la profundidad de salida máxima esperada dentro de la vida útil de la estructura esta dada por  $z = \frac{y_2}{3} = \frac{36.5}{3} = 12.2$  pies.
10. Los muros de salida deben ser iguales en altura a los muros laterales del cuenco disipador, y su parte superior debe tener una pendiente de 1:1.
11. El muro de salida debe localizarse con un ángulo de  $45^\circ$  con respecto al eje central de la salida.
12. Los muros laterales del colchón disipador pueden ser paralelos o divergir como una extensión de los muros laterales de la transición.
13. Debe utilizarse un muro cortina de profundidad nominal en el extremo del colchón disipador.
14. El efecto de absorción de aire no se considera en el diseño del colchón disipador.

### EJEMPLO 3

Diseñar el disipador de energía por dispersión para el vertedero de la presa de Whitney (Texas, EEUU). Los datos son:



Descarga unitaria en el dissipador = 450 cfs.  
 Nivel de aguas máximo (NAM) de la presa = 765 ft.  
 Altura del vertedero = 650 ft  
 Radio de curvatura del salto = 50 ft  
 Angulo del salto =  $45^\circ$   
 Pendiente de la superficie aguas abajo del vertedero = V:H = 10:6.1  
 Índice de  $H/h_1 > 0.75$   
 Cota solera de la curvatura = 550 ft.

### Solución

1.  $h_1 = \text{NAM} - \text{Cota solera de la curvatura}$   
 $h_1 = 765 - 550 = 215 \text{ ft.}$
2.  $h_2 = \text{Altura del vertedero} - \text{Cota solera de la curvatura}$   
 $h_2 = 650 - 550 = 100 \text{ ft.}$
3.  $h_2/h_1 = 100/215 = 0.465$
4. Parámetro de descarga:

$$\frac{q}{\sqrt{g} \cdot h_1^{3/2}} \cdot 10^3 = \frac{450 \cdot 10^3}{\sqrt{32.2} \cdot 215^{3/2}} = 25$$

5. De la gráfica del Anexo 5.1 encuentre el valor  $h_b/h_1 = 0.42$  para un valor de  $h_2/h_1 = 0.465$  y

$$\frac{q}{\sqrt{g} \cdot h_1^{3/2}} \cdot 10^3 = 25$$

6.  $h_b = 0.42 \cdot h_1$   
 $= 0.42 \cdot 215 = 90 \text{ ft.}$
7. De la gráfica del Anexo 5.1 halle el valor  $h_s/h_1 = 0.52$  para un valor de  $h_b/h_1 = 0.42$  y

$$\frac{q}{\sqrt{g} \cdot h_1^{3/2}} \cdot 10^3 = 25$$

8.  $h_s = 0.52 \cdot h_1$   
 $= 0.52 \cdot 215 = 112 \text{ ft.}$

9. Para una buena energía de disipación:

$$0.75 h_2 \leq h_b \leq 0.90 h_2$$

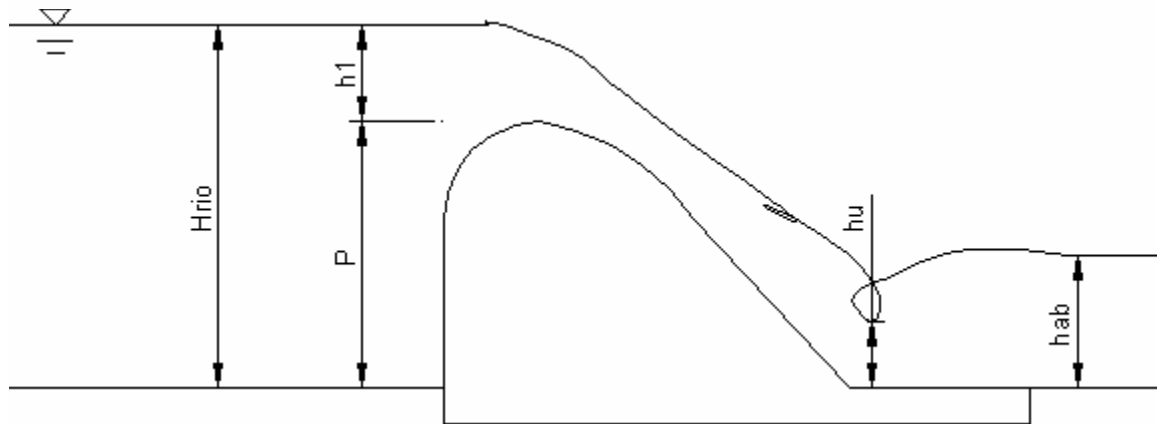
$h_b = 90 \text{ ft} \quad \text{ok!}$

#### EJEMPLO 4

Se tiene un río en el cual se desea colocar una obra de derivación de agua, se sabe que el río con caudal máximo tiene un tirante de 2 m. Diseñar un vertedero de cresta cilíndrica y verificar si es necesario disipar la energía. Si ese es el caso, diseñar un dispositivo de disipación de energía.

Longitud de la cresta:  $L = 8 \text{ m}$   
 Coeficiente de descarga:  $C_d = 4.03$   
 Caudal de diseño:  $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$   
 Altura aguas abajo:  $h_{ab} = 0.70 \text{ m}$

Nota: Considerar pérdida de energía en el resalto como  $\Delta h = 0.1 \cdot \frac{v^2}{2g}$



#### Solución

La altura de energía será  $H_e^{1.5} = \frac{Q}{CL} = \frac{10}{4.03 \cdot 8} = 0.31$ , y  $H_e = 0.46 \text{ m}$ .

La velocidad de aproximación es  $V_a = \frac{10}{2 \cdot 8} = 0.625$  m/s y la altura de velocidad correspondiente es  $H_a = \frac{0.625^2}{2g} = 0.02$  m.

Luego la altura del vertedero será  $P = H_{rio} - (H_e - H_a) = 2 - (0.46 - 0.02) = 1.56$  m. y la carga  $H_1 = H_e - H_a = 0.46 - 0.02 = 0.44$  m.

Igualando las energías en el resalto y antes del resalto tenemos:

$$H_{rio} + H_a = y_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \Delta h, \text{ ó } H_{rio} + H_a = y_1 + 1.1 \frac{v_1^2}{2g}$$

Sabemos que  $\frac{v_1^2}{2g} = \frac{Q^2}{2g \cdot B^2 \cdot y_1^2}$ , entonces  $H_{rio} + H_a = y_1 + 1.1 \frac{Q^2}{2g \cdot B^2 \cdot y_1^2}$ ,

reemplazando valores se tiene:  $2.02 = y_1 + 1.1 \cdot \frac{10^2}{2 \cdot 9.8 \cdot 8^2 \cdot y_1^2}$ .

La altura del resalto será  $y_1 = 0.22$  m.

El número de Froude en el resalto es  $Fr_1 = \frac{v}{\sqrt{gh}} = \frac{Q}{L \cdot y_1 \cdot \sqrt{gy_1}} = \frac{10}{8 \cdot 0.22 \cdot \sqrt{9.81 \cdot 0.22}} = 3.87$

Utilizando la ecuación 5-3 calculamos la altura conjugada:  $y_2 = \frac{0.22}{2} (\sqrt{1 + 8 \cdot 3.87^2} - 1) = 1.1$  m.

Como  $y_2 > h_{ab}$ , el resalto será fuera del canal!, por lo tanto es necesario disipar la energía.

Utilizar un cuenco amortiguador (gradita):

1. Altura de la grada (ecuación 5-11):  $e = 0.75 \cdot \Delta h \cdot \left( \frac{h_{ab}}{h_{crit}} \right)^3 \cdot \frac{h_{min}}{h_{crit}}$ , que puede ser escrita

como  $e = 0.75 \cdot (y_2 - h_{ab}) \cdot \left( \frac{h_{ab}}{h_1} \right)^3 \cdot \frac{y_1}{h_1} = 0.75 \cdot (1.1 - 0.7) \cdot \left( \frac{0.7}{0.44} \right)^3 \cdot \frac{0.22}{0.44} = 0.6$  m.

2. La nueva altura del paramento será  $P = 1.56 + 0.6 = 2.16$  m. De la misma manera la altura en el canal de salida será  $h_{ab} = 0.7 + 0.6 = 1.3$  m.

3. Luego, la altura del resalto para estas condiciones será:  

$$2.16 + 0.46 = y_1 + 1.1 \cdot \frac{10^2}{2 \cdot 9.8 \cdot 8^2 \cdot y_1^2}, \text{ resultando } y_1 = 0.19 \text{ m.}$$

4. El número de Froude correspondiente será  $Fr_1 = \frac{10}{8 \cdot 0.19 \cdot \sqrt{9.81 \cdot 0.19}} = 4.82$

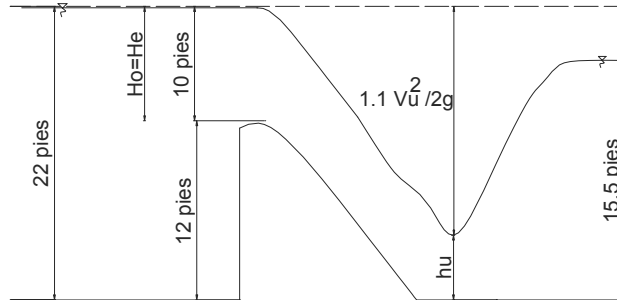
5. Luego, la altura conjugada equivale a  $y_2 = \frac{0.19}{2} (\sqrt{1 + 8 \cdot 4.82^2} - 1) = 1.2$  m. Como  $h_{ab} > y_2$  la energía ha sido disipada. Además, el valor de  $h_{ab} \approx y_2$ .

6. La longitud del colchón amortiguador es  $L_c = 10 \cdot e = 10 \cdot 0.6 = 6$  m.

**EJEMPLO 5**

Dado el vertedero de cresta ogee con caudal de 8000 pies<sup>3</sup>/s (226.54 m<sup>3</sup>/s), una altura de vertedero de 12 pies (3.66m), una carga sobre el vertedero de 10 pies (3.05 m). La carga aguas abajo es de 15.5 pies (4.73m). Se asume un coeficiente de descarga 3.6, el vertedero tiene una inclinación de 45° (3:3) aguas arriba, en la cresta existe una pila de 5 pies de ancho, de sección redonda y muros laterales rectangulares.

- hallar la longitud total de la cresta del vertedero  $L_t$ , tomando en cuenta las condiciones aguas abajo y la inclinación del vertedero aguas arriba.
- Verificar si se necesita dissipador de energía (grada), para un canal de ancho 60 m.

**Solución:**

- la Longitud efectiva  $L_e$  esta en función al caudal:  $Q = C_0 L_e H_0^{3/2}$

Paso 1. Corrección por la inclinación del paramento aguas arriba para una inclinación de 45°:

Hallar  $P/H_0 = 12/10 = 1.2$ , en la Fig 4.3, se tiene  $C_1 = 0.996$

Paso 2. Corrección por sumergencia, Fig. 4.4

Calcular  $h_d/H_e = (22-15.5)/10 = 0.65$

$(h_d+d)/H_e = 22/10 = 2.2$ , entonces en la Fig. 4.4; la corrección es 1%.

Paso 3. Corregir el coeficiente de descarga  $C_0$ :

$$C_{\text{corregido}} = (1-0.01) \cdot 0.996 \cdot 3.6 = 3.55$$

Paso 4. Calcular  $L_e$ , despejando  $L_e = Q / (C_{\text{cor}} \cdot H_e^{3/2}) = 8000 / (3.55 \cdot 10^{3/2}) = 71.263$  pies.

Paso 5. Hallar  $L_T$ , los valores de  $N = 1$  por una pila,  $K_p = 0.01$  por ser pila redonda,  $K_a = 0.20$  por muros rectangulares.

$$\text{Entonces: } L_T = L_e + 2(N \cdot K_p + K_a) H_e = (71.263-5) + 2(1 \cdot 0.01 + 0.20)10 = 70.463 \text{ pies.}$$

- verificar las condiciones del resalto, dissipador de energía. Para un ancho de 60 m.

Paso 1. Bernoulli entre la sección sobre el vertedero y la sección del resalto:

$$P + H_0 = h_u + 1.1 V_u^2/2g, \text{ entonces, } 6.71 = h_u + 1.1 V_u^2/2g$$

$$V_u^2 = (Q / B \cdot h_u)^2 = (226.54 / 60 \cdot h_u)^2 = 0.727 / h_u^2$$

Reemplazando  $V_u^2$  en la ecuación de energía y multiplicando por  $h_u^2$  tenemos:

$$h_u^3 - 6.71 h_u^2 + 0.727 = 0, \text{ la solución es } h_u = 0.338 \text{ m.}$$

Paso 2. Hallar la altura recuente de la formula:  $h_2 = -1/2 h_u + (h_u^2/4 + 2 Q^2/(g B^2 h_u))$

Reemplazando valores se tiene  $h_2 = 2.77 \text{ m.}$

Conclusión: como  $h_2 < h_f$ ,  $2.77 < 4.73$ , entonces no se necesita disipador de energía (grada)

## 6.11 SOFTWARE APLICADO AL DISEÑO DE DISIPADORES DE ENERGÍA

Como complemento de este capítulo, se presentan dos paquetes computacionales con el objetivo de simplificar el diseño de disipadores de energía (Incluidos en el CD ROM). Cabe recalcar que para manejar dicho software es necesario conocer el marco teórico descrito en este capítulo, para introducir datos racionales en el paquete y obtener resultados.

### 6.11.1 DISENER v.1.01

Programa computacional desarrollado por Mario Jesús Pérez Saavedra en lenguaje Visual Basic, presentado como parte de la Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil en la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Mayor de San Simón (Cochabamba, Bolivia) en el año 2001.

DISENER v.1.01 es una herramienta computacional que realiza cálculos hidráulicos en base a los parámetros descritos en los ejemplos resueltos anteriormente, basados principalmente en el diseño de disipadores de energía de U.S. Bureau of Reclamation, el programa incluye el diseño de los siguientes disipadores:

1. BASIN I: Descrito en este capítulo.
2. BASIN II: Descrito en este capítulo.
3. BASIN V: Disipador por resalto hidráulico en canales inclinados
4. BASIN IX: Disipadores con espaldón dentado para canales inclinados, especialmente rápidas.

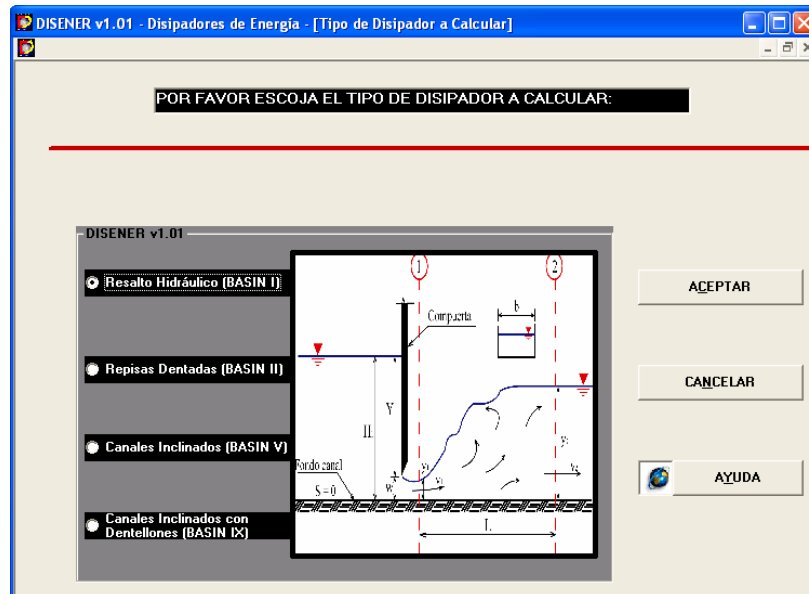
Los ejemplos del manejo de este software, mostrados a continuación, están orientados a diseñar solamente los disipadores descritos en este capítulo (BASIN I y II), en el caso de que el estudiante o proyectista requiera diseñar los otros estanques amortiguadores (BASIN V y IX), previamente deberá hacer una revisión bibliográfica más específica (USBR, Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators).

**Ejemplo 1.** Disipador por resalto hidráulico con lecho de amortiguación horizontal (BASIN I)

Calcule las características y localice el salto hidráulico para la disipación de energía aguas abajo del vertedero de cresta cilíndrica, los datos proporcionados son:

- Ancho del canal de llegada: 60 m.
- Altura del Paramento: 1 m.
- Coeficiente de descarga ( $1^a$  aprox.): 2
- Caudal de diseño:  $200 \text{ m}^3/\text{s}$
- Angulo de inclinación del espaldón:  $45^\circ$
- Ángulo de inclinación del paramento  $90^\circ$
- Coeficiente de Manning: 0.013
- Cota del fondo del canal de llegada: 2554 msnm
- Cota solera del canal de salida (estanque): 2552 msnm

**Paso 1.** Inicie el programa, desde el lugar donde este instalado (Inicio/programas/DISENER v1.01). La primera pantalla visualizada es la de bienvenida (autor, UMSS, etc.), posteriormente aparecerá la ventana del **Tipo de disipador a elegir** (Ver figura). En esta ventana seleccione **Resalto Hidráulico (BASIN I)**.



**Figura 6.19** Ventana de inicio (Tipo de disipador de energía).

**Paso 2** Al presionar ACEPTAR, el programa le mostrará una ventana que contiene las opciones de diseño para el disipador BASIN I, una de las opciones le permite calcular el resalto hidráulico aguas abajo de una compuerta (ver figura), la segunda opción realiza el mismo cálculo pero para un vertedero de cresta cilíndrica (ver figura). Seleccione **Vertederos**

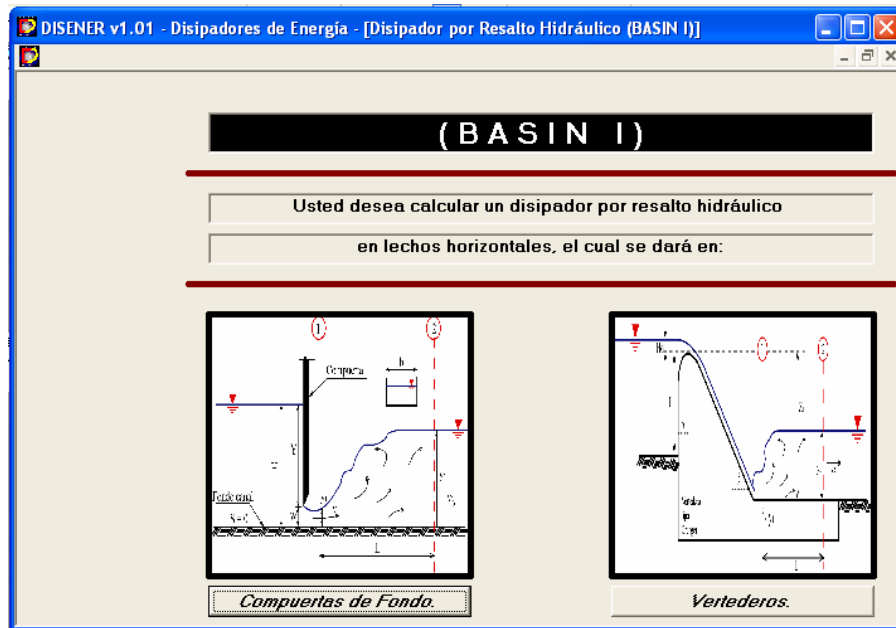


Figura 6.20 Ventana de opciones del Disipador BASIN I

**Paso 3** Al presionar el botón **Vertederos** aparecerá la ventana de datos de entrada (Ver figura), en dónde se introducirán todos los datos proporcionados. La altura  $Z_1$  es la diferencia entre la cota del canal de llegada y la cota solera del colchón hidráulico ( $Z_1 = 2554 - 2552 = 2$  m).

**Información General:**

Nombre del Proyecto: Ejemplo 1      Lugar y Fecha: Cochabamba, 28/04/2004

Nombre del Usuario: Raúl Romero Vidaurre      Hora: 17:33

Empresa: UMSS      Observaciones: Vertedero de cresta cilíndrica (o Creager)

**Datos de Entrada:**

Ancho del canal (w): 60 [m]      Angulo Inclinación del Paramento (a): 90 [grados]

Altura del Paramento (P): 1.00 [m]      Aceleración de la Gravedad (g): 9.81 [m/s<sup>2</sup>]

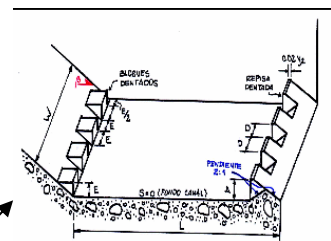
Coefficiente de Descarga (C): 2.00      Coeficiente de Manning (n): 0.013

Caudal (Q): 200 [m<sup>3</sup>/s]      Altura (Z1): 2 [m]

Angulo Inclinación Delantal (b): 45 [grados]      Consideraciones Especiales: Vertedero de cresta cilíndrica (o Creager)

**Definición de Símbolos:**

Diagrama de un vertedero de cresta cilíndrica (o Creager) con parámetros de diseño.



Esquema Visualizado para los datos de entrada del disipador BASIN II

Figura 6.21 Ventana de datos de entrada

**Paso 4.** Para obtener los resultados, ingrese al menú análisis y presione **Analizar Disipador**. Inmediatamente el programa calculará el comportamiento de flujo (velocidad, tirante de agua, y



número de Froude) en las secciones 1 y 2, el cálculo del coeficiente de descarga del vertedero, los datos calculados en el proceso de cálculo para hallar la carga hidráulica ( $H_o$ ), y las características del resalto hidráulico (Longitud, energía absorbida y el tipo de salto).

**BASIN I en Vertederos Creager (Resultados)**

**Resultados del Análisis:**

<b>Carga sobre el Vertedero (H) :</b> H = 1.29 [m]	<b>Sección 1 :</b> Velocidad (v1) = 9.082 [m/s] Tirante de agua (y1) = .367 [m] Froude (Fr1) = 4.786
<b>Carga H+Altura de Velocidad (Ho) :</b> Ho = 1.397 [m]	<b>Sección 2 :</b> Velocidad (v2) = 1.444 [m/s] Tirante de Agua (y2) = 2.307 [m] Froude (Fr2) = 0.303
<b>Relación P/Ho :</b> P/Ho = 0.744	<b>Longitud del Salto (L) :</b> L = 14.13 [m]
<b>Coefficiente de Descarga (C) :</b> C = 2.126	<b>Energía Absorbida en el Salto (E) :</b> E = 46.68 %
<b>H' Recalculado (H') :</b> H' = 1.23 [m]	<b>Tipo de Salto:</b> 4.5 < F < 9.0    Estable
<b>Ho' Recalculado (Ho') :</b> Ho' = 1.343 [m]	
<b>Coefficiente Definitivo (m) :</b> m = 2.129	

**Figura 6.22** Ventana de resultados del disipador BASIN I en vertederos Creager

**Paso 5.** En el menú **Ver** usted tendrá la opción de visualizar las siguientes gráficas:

- Salto en función a Y1
- Salto en función a Y2
- Energía Disipada.

**Ejemplo 2.** Diseñe un disipador de energía tipo BASIN II, para un vertedero con las siguientes características:

- Ancho del canal de llegada: 35 m.
- Altura del Paramento: 2.5 m.
- Coeficiente de descarga (1ª aprox.): 1.5
- Caudal de diseño: 150 m<sup>3</sup>/s
- Angulo de inclinación del espaldón: 60°
- Ángulo de inclinación del paramento 33°
- Coeficiente de Manning: 0.013
- Cota del fondo del canal de llegada: 2003 msnm
- Cota solera del canal de salida (estanque): 2002 msnm

**Paso 1.** Inicie el programa, desde el lugar donde este instalado (Inicio/programas/DISENER v1.01). La primera pantalla visualizada es la de bienvenida (autor, UMSS, etc.), posteriormente aparecerá la ventana del **Tipo de dissipador a elegir** (Ver figura 6.19). En esta ventana seleccione **Repisas dentadas (BASIN II)**.

**Paso 2** Al presionar ACEPTAR, el programa le mostrará una ventana que contiene la opción única de diseño para el dissipador BASIN II. Seleccione **Vertederos**

**Paso 3** Al presionar el botón **Vertederos** aparecerá la ventana de datos de entrada, similar a la figura E2, con la diferencia de que el esquema visualizado en la parte inferior derecha de su pantalla es el de un estanque amortiguador tipo BASIN II. Desde esa ventana se introducirán todos los datos proporcionados. La altura Z1 es la diferencia entre la cota del canal de llegada y la cota solera del colchón hidráulico ( $Z1 = 2003 - 2002 = 1 \text{ m}$ ).

**Paso 4.** Para obtener los resultados, ingrese al menú análisis y presione **Analizar Dissipador**. Inmediatamente el programa calculará el comportamiento de flujo (velocidad, tirante de agua, y número de Froude) en las secciones 1 y 2, el cálculo del coeficiente de descarga del vertedero, los datos calculados en el proceso de cálculo para hallar la carga hidráulica ( $H_o$ ), y las características geométricas de la repisa dentada (Longitud de resalto, alto, ancho y espaciamiento entre los bloques).

Resultados:

Carga sobre el vertedero (H):	$H = 1.47 \text{ m.}$
Carga H + Altura de Velocidad ( $H_o$ ):	$H_o = 1.529 \text{ m.}$
Relación $P/H_o$ :	$P/H_o = 2.302$
Coeficiente de descarga (C):	$C = 2.185$
$H'$ Recalculado ( $H'$ ):	$H' = 1.01 \text{ m.}$
$H_o'$ Recalculado ( $H_o'$ ):	$H_o' = 1.085 \text{ m.}$
Coeficiente definitivo (m):	$m = 2.185$

Sección 1:

Velocidad ( $v_1$ ) =  $9.829 \text{ m/s}$   
 Tirante de agua ( $y_1$ ) =  $0.436 \text{ m}$   
 Froude ( $Fr_1$ ) =  $4.749$

Sección 2:

$TW/Y_1 = 6.120 \text{ m/s}$   
 Tirante de agua ( $y_2$ ) =  $2.672 \text{ m.}$

Lecho amortiguador:

Longitud del salto (L):	$L = 10.14 \text{ m.}$
Ancho-Espacio-Alto (Bloques dentados):	$E = 0.436 \text{ m.}$
Altura de la repisa dentada (A):	$A = 0.534 \text{ m.}$
Ancho y espacio de la repisa (D):	$D = 0.4 \text{ m.}$
Factor de Seguridad =	$6\%$

Nota: Del valor del número de Froude obtenido (4.7) se observa que este es mayor a 4.5 y se encuentra dentro el rango normado para los dissipadores del Tipo BASIN II, por lo tanto el sistema de disipación es adecuado para las características de este vertedero.

**Paso 5.** En el menú **Ver** usted tendrá la opción de visualizar la gráfica de la altura seciente mínima vs. la altura y1.

### 6.11.2 HY8Energy MODEL

HY8Energy fue elaborado en la Universidad de Utah (EEUU), el año 2000. El software incluye una interfase gráfica para el usuario en el entorno de Windows. Este programa permite diseñar el sistema de disipación en canales y principalmente en alcantarillas (disipación de energía interna y externa o a la salida), proporcionando una amplia gama de alternativas en lo que se refiere a disipadores (BASIN II, III, IV, VI, tipo SAF, tipo CSU, de enrocado, tipo ContraCosta, y Tipo Hook). Otra de las bondades que ofrece, es el cálculo de la socavación a la salida de estructuras pequeñas (canales, caídas o alcantarillas). El modelo esta basado en el manual publicado por Hydraulic Engineering Circular No. 14, de la U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.

En los siguientes párrafos se desarrollará un ejemplo del estanque amortiguador tipo USBR 3, como parte de un breve inicio al software, sin embargo el estudiante tendrá a su alcance el manual de uso (ver en CD ROM). Como se mencionó anteriormente, para diseñar las otras estructuras de disipación que se encuentran disponibles en el programa, el proyectista deberá revisar la literatura correspondiente.

#### Parámetros de entrada y salida de disipadores tipo SAF, BASIN II, III y IV

Parámetros de entrada en alcantarillas y canales:

Shape: Forma de la alcantarilla: circular, rectangular u otras.

Flow: Caudal de diseño ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) ( $\text{ft}^3/\text{s}$ ).

Span: Diámetro de la alcantarilla (m) (ft).

Vo: Velocidad de salida (m/s) (ft/s).

Yo: Profundidad de agua a la salida (m) (ft).

Zo: Elevación de la solera a la salida. (m) (ft).

Channel width: Ancho del fondo del canal (m) (ft).

Channel slope: Slope of the channel (vertical/horizontal).

Channel tail water: Profundidad de flujo aguas abajo Depth (m) (ft).

### Parámetros de ensayo de los disipadores (Trial Parameters for the Basin)

Basin width: Ancho del estanque a la entrada. (m) (ft).

ST: Pendiente de la rápida a la entrada del estanque.

SS: Pendiente de salida del estanque

Flare: The flare for a SAF basin; longitudinal  $z$  : 1 transverse.

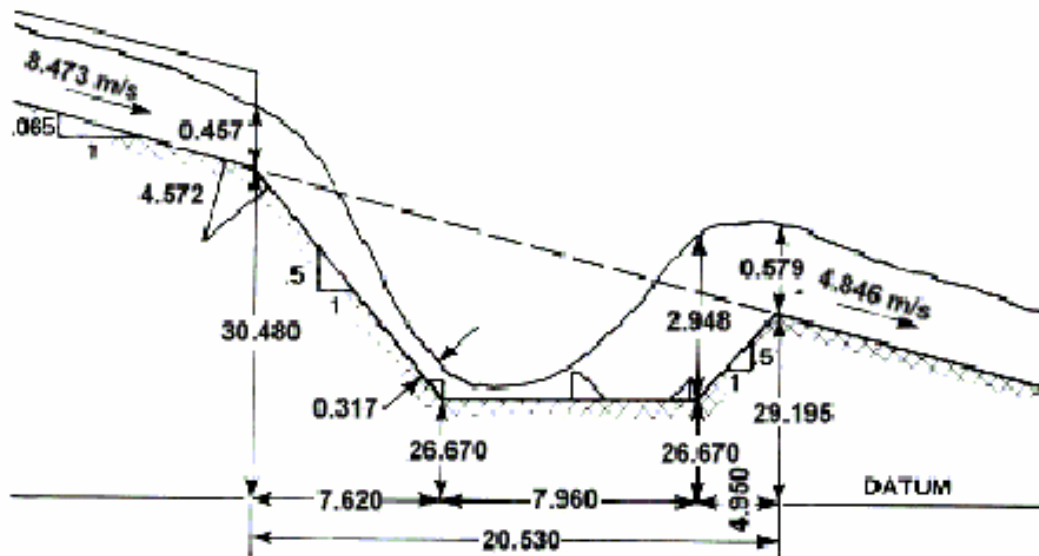
### Ejemplo 1.

Alcantarilla tipo cajón de 1.829 m de lado

Elevación de la solera en la salida de 30.48 m.

Pendiente longitudinal: 6.5 %

Caudal:  $11.801 \text{ m}^3/\text{s}$ .



El canal de salida aguas abajo es de sección transversal de 3.1 m de ancho en la base con taludes de 2:1 en ambos lados, y un coeficiente de Manning de 0.03. Calcule las dimensiones de un estanque amortiguador tipo BASIN III.

**Paso 1.** Inicie el programa, desde el lugar donde este instalado (Inicio/programas/HY8Energy). La pantalla visualizada contiene tres solapas:

**Scour:** En esta ventana se realizan cálculos para evaluar la socavación originada por el flujo a la salida de alcantarillas, canales y otras estructuras.

**Internal:** En esta ubicación se realizan los cálculos para el diseño de disipadores de energía internos.

**External:** Esta ventana muestra una descripción de las posibles opciones de estructuras de disipación, que pueden utilizarse a la salida de una alcantarilla, un vertedero, rápidas, etc. Justificando si la opción es factible. Dentro de esta ventana existen menús para introducir datos de la estructura de disipación elegida.

Nota: Las casillas en amarillo representan datos calculados por el programa, mientras que las celdas de color celeste representan los datos de entrada.

**Design of Energy Dissipators -**

File External View Options Help

Scour Internal External

Input

Title:

Shape:

Flow(Q):  m³/s

Diameter:  m

Rise:  m

Tail Water (TW):  m

Depth (Yo):  m

Velocity (Vo):  m/s

Froude (Fr):

Dissipator Type	Froude Number	Tail Water Depth	Feasibility	Reasons

**Figura 6.23 Ventana principal de HY8Energy**

**Paso 2.** Dentro de la ventana “external” y el menú del mismo nombre ubicar la opción USBR-3. Introducir los datos de entrada proporcionados (ver figura).

**Roughness Basins**

File External View Options Help

Input culvert and channel details

Title: Alcantarilla cajon Velocity (Vo): 8.473 m/s Channel width: 3.1 m

Shape: Rectangular Depth (Yo): 0.457 m Channel slope: 0.065

Flow (Q): 11.801 m³/s Outlet elev. (Zo): 30.48 m Channel tail water: 0.579 m

Span: 1.829 m Froude: 4.001 Elev. at channel (Z3): 29.860 m

Input

Basin Type

☐ USBR 2

☒ USBR 3

☐ USBR 4

☐ SAF Basin

SAF Basin Shape

☒ Rectangular

☐ Flared

Flare: 0.0 z: 1

Basin width: 3.1 m Elev. (Z1, Z2): 27.624 m

In slope (ST): 2 H:1V Basin L: 9.533 m

Out slope (SS): 2 H:1V Chute R: 4.65 m

Sill H4: 0.458 m

Output

LB: 6.987 m Fr1: 6.309 NCB: 5

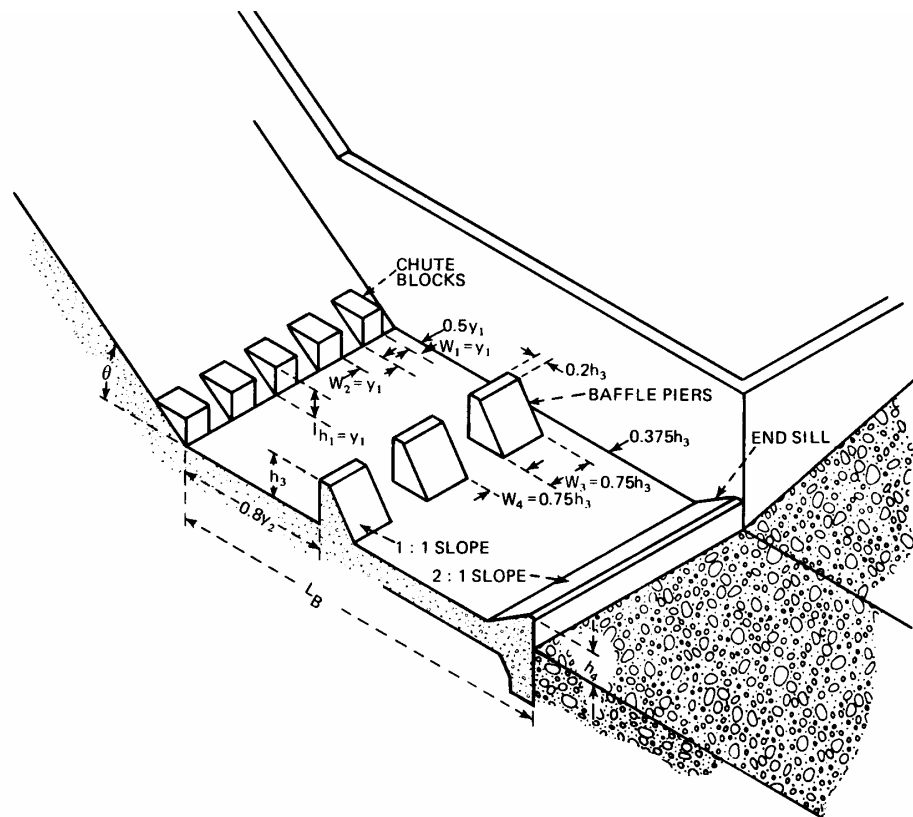
LS: 1.118 m Y2: 2.814 m CBSWS: 0.155 m Len: 2.251 m

LT: 1.428 m H1: 0.334 m H3: 0.556 m

Y1: 0.334 m W1: 0.310 m W3, W4: 0.388 m

V1: 11.414 m/s W2: 0.310 m NBB: 4

**Figura 6.24 Ventana de cálculo del HY8Energy**








**Figura 6.25 Esquema geométrico del disipador Tipo USBR 3**

Los resultados muestran que  $Fr = 6.309$ , lo que es adecuado para este tipo de disipadores. La simbología.

## 6.12 EJERCICIOS PROPUESTOS

- 6.1** El agua que fluye por debajo de una compuerta deslizante descarga en un cuenco de disipación rectangular simple el cual tiene el mismo ancho de la compuerta. Después de la contracción del chorro el flujo tiene una velocidad promedio de 80 pies/s y una profundidad de 6 pies. Determine: a) la profundidad de salida conjugada, b) la longitud del cuenco requerido para confinar el resalto, c) la efectividad del cuenco para disipar la energía (es decir, la eficiencia del resalto), y d) el tipo de resalto esperado.
- 6.2** En el experimento de Bidone se encontró que, para  $V_1=5.59$  pies/s y  $y_1=0.208$  pies en un canal rectangular, la altura conjugada  $y_2$  fue 0.613. Determine: a) la profundidad alterna, b) la profundidad conjugada teórica, c) la pérdida de energía en el resalto, d) la pérdida relativa, e) la eficiencia, f) la altura relativa, g) la longitud, y h) el tipo de resalto.
- 6.3** Utilizando su criterio dimensione un estanque amortiguador para un vertedero de excedencia con el paramento vertical y una longitud de cresta de 15 m. El volumen anual aprovechable es de  $120 \text{ Hm}^3$ . El nivel de aguas máximo se encuentra en la cota 2856 y la solera del canal en la cota 2835. La elevación de la profundidad de salida se localiza en la cota 2845. Justifique la elección del sistema de disipación.
- 6.4** Diseñar un disipador de energía para un caudal de  $25.5 \text{ m}^3/\text{s}$  que pasa a través de un vertedero de cresta Ogee con un paramento inclinado de talud 2:3. El nivel de aguas máximo se encuentra en la cota 2564, la solera del vertedero se encuentra en la cota 2553, la carga hidráulica de diseño esta proyectada para una altura de 1.3 m sobre la cresta del vertedero. La altura de agua en el canal de salida esta ubicada en la cota 2557. Justifique la elección del sistema de disipación.
- 6.5** Diseñar un colchón hidráulico tipo SAF para los datos del ejemplo 4.
- 6.6** Utilizando los datos del ejemplo 4 diseñar un estanque amortiguador tipo III.

## 6.13 BIBLIOGRAFÍA

-  U.S. Bureau of Reclamation. "Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators". 8a. Edition. Colorado, Estados Unidos. Año 1984.  
Vínculo en Internet: [http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics\\_lab/pubs/](http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/pubs/)
-  U.S. Bureau of Reclamation. "Design of Small Dams". 3rd edition, Revised 1987.
-  Ven Te Chow. "Hidráulica de Canales Abiertos". Editorial McGraw Hill. Año 1994
-  University of Manitoba. "Hydraulic Structures". Canada. Año 2003.  
Vínculo en Internet: <http://www.ce.umanitoba.ca/~ugrad/ftp/>
-  Mattos Ruedas Rogel. "Pequeñas Obras Hidráulicas". PHI/UNESCO. Montevideo, Uruguay  
Vínculo en Internet: <http://www.unesco.org.uy/phi/libros/obrashidraul>



U.S. Army Corps of Engineers, "Hydraulic Design Of Spillways". Washington, 31 de agosto de 1992.

Vínculo en Internet: <http://www.usace.army.mil/inet/usace-docs/eng-manuals/em.htm>