

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

1. CONCEPTOS PREVIOS 1

2. RESALTO HIDRÁULICO 3

2.1 TIPOS DE RESALTO 5

2.2 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL RESALTO HIDRÁULICO 6

2.3 LONGITUD DEL RESALTO HIDRÁULICO 7

2.4 EL PERFIL SUPERFICIAL 8

3. RESALTO HIDRÁULICO COMO DISIPADOR DE ENERGÍA 8

Introducción

En el control de flujos hidráulicos es frecuente el diseño de estructuras disipadoras de energía. Los cuencos disipadores de energía tienen aplicaciones prácticas e importantes en el diseño de obras hidráulicas entre otras, un cuenco disipa la energía del agua que fluye sobre presas, vertederos y otras estructuras hidráulicas para que de esta manera se prevenga la socavación aguas debajo de las estructuras; los cuencos disipadores ayudan a recuperar altura o aumentar el nivel del agua en el lado de aguas debajo de una canaleta de medición y mantener un nivel alto del agua en el canal de irrigación o de cualquier estructura para distribución de aguas, así mismo permiten incrementar el peso sobre la zona de aguas debajo de una estructura de mampostería y reducir la presión hacia arriba bajo dicha estructura aumentando la profundidad del agua en su zona de aguas abajo, y permiten aumentar el caudal por debajo de una compuerta deslizante manteniendo alejada la profundidad de aguas abajo, debido a que la altura efectiva se reducirá si la profundidad de aguas abajo ahoga el resalto.

Es importante que el ingeniero tenga los conocimientos básicos para el diseño de estructuras hidráulicas con cambios repentinos de flujo, mediante la determinación del número de froude y los efectos del cambio en las líneas de flujo en un punto específico de un canal.

Se comenta el principio del resalto hidráulico con las características a tener en cuenta para el diseño de cuencos disipadores y los tipos de resalto, se trata el resalto hidráulico como disipador de energía de forma detalla donde se describen las estructuras controladoras y tipos de cuencos disipadores más comunes: el cuenco disipador SAF, el USBR tipo II, IV y V los cuales son los mas usados debido a su seguridad y eficiencia.

Resalto Hidráulico Como Disipador De Energía

- **Conceptos previos**

Efecto de la gravedad. El efecto de la gravedad sobre el estado de flujo se representa por la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales. Esta relación esta dada por el Número de Froude, definido como:

$$F = \frac{v}{\sqrt{gD}}$$

Donde, v es la velocidad de flujo, g es la aceleración de gravedad y D es la profundidad hidráulica, $D = \frac{A}{T}$

Donde, A es el área mojada y T es el ancho de la superficie

Clasificación del flujo respecto al régimen de velocidad

- Flujo Supercrítico: en este estado el papel jugado por las fuerzas inerciales es más pronunciado presenta una velocidad de flujo muy alta, una profundidad de flujo baja y se genera en condiciones de pendiente alta.
- Flujo Crítico: régimen de flujo intermedio, se caracteriza por generar alta inestabilidad en el flujo, no es recomendable para el diseño.
- Flujo Subcrítico: en este estado el papel jugado por las fuerzas gravitacionales es más pronunciado por lo tanto se presenta una velocidad de flujo baja, tiene una profundidad de flujo alta y se genera en condiciones de baja pendiente.

Figura 1. Tipos de Flujo respecto al régimen de velocidad.

Para $F = 1$ el flujo es crítico, cuando $F < 1$ el flujo es subcrítico, y si $F > 1$ el flujo es supercrítico.

Energía específica. Es igual a la suma de la profundidad del agua más la altura de la velocidad en una sección de canal ($E = y + V^2/2g$). Cuando la profundidad de flujo se grafica contra la energía específica para una sección de canal y un caudal determinados, se obtiene una *curva de energía específica*; para una energía específica determinada, existen dos posibles profundidades la *profundidad baja* y_1 y la *profundidad alta* y_2 . La profundidad alta es la profundidad alterna de la profundidad baja y viceversa. En el estado crítico (c) las profundidades alternas se convierten en una la cual es conocida como *profundidad crítica* y_c . Cuando la profundidad de flujo es mayor que la profundidad crítica, la velocidad de flujo es menor que la velocidad crítica para un caudal determinado y el flujo es subcrítico. Cuando la profundidad de flujo es menor que la profundidad crítica, el flujo es supercrítico. Por tanto y_1 es la profundidad de un flujo supercrítico y y_2 es la profundidad de un flujo subcrítico (Figura 2)

Coefficientes de distribución de velocidad. Como resultado de la distribución no uniforme de velocidades en una sección de canal, la altura de velocidad de un flujo en canales abiertos es por lo general mayor que el valor calculado de acuerdo con la expresión $V^2/2g$. A partir del principio de mecánica, el *momentum* de un fluido que pasa a través de una sección de canal por unidad de tiempo se expresa por $\beta w Q V/g$, donde β es conocido como *coeficiente de momentum*, w es el peso unitario del agua, Q es el caudal, V es la velocidad media. El valor de β para canales prismáticos (canal construido con una sección transversal invariable y una pendiente de fondo constante) rectos varía desde 1.01 hasta 1.12. Para canales de sección transversal regular y alineamiento más o menos recto, el efecto de la distribución no uniforme de velocidades en el cálculo del *momentum* es pequeño y el coeficiente se supone como la unidad. En canales con secciones transversales complejas se requerirán mediciones de la velocidad real para determinar el coeficiente de *momentum*. El coeficiente por lo general es mayor en canales empinados que en canales con pendientes bajas.

Momentum del flujo en canales abiertos. De acuerdo con la segunda ley de Newton, el cambio de *momentum* por unidad de tiempo en el cuerpo de agua en un canal es igual a la resultante de todas las fuerzas externas que actúan sobre el cuerpo:

$$\frac{Qw}{g}(\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) = P_1 - P_2 + W \sin \theta - F_f$$

Ecuación de momentum

Donde Q es el caudal, w es el peso unitario del agua, V es la velocidad media, P1 y P2 son las presiones resultantes que actúan en las dos secciones, W es el peso del agua contenida entre las dos secciones y Ff es la fuerza de fricción y de resistencia totales externas que actúan a lo largo de la superficie de contacto entre el agua y el canal.

El principio de *momentum* tiene ventajas de aplicación a problemas que involucran grandes cambios en la energía interna, como el problema del RESALTO HIDRÁULICO. Si la ecuación de la energía se aplica, las pérdidas de energía internas desconocidas representadas por hf son indeterminadas y su omisión resultaría en error. Si se aplica la ecuación de *momentum*, debido a que esta solo tiene en cuenta fuerzas externas, los efectos de las fuerzas internas no tendrían que ser evaluados. El término para las pérdidas por fricción debido a las fuerzas externas es poco importante y puede omitirse debido a que el fenómeno ocurre en un tramo corto del canal y los efectos debido a las fuerzas externas son insignificantes en comparación con las pérdidas internas.

Fuerza específica. Al aplicar el principio de momentum a un tramo horizontal corto de un canal prismático pueden ignorarse los efectos de las fuerzas externas y del peso del agua. Entonces, $\beta = 0$ y $F_f = 0$, y suponiendo $\beta_1 = \beta_2 = 0$, la ecuación se convierte:

$$\frac{Qw}{g}(V_2 - V_1) = P_1 - P_2$$

Las fuerzas hidrostáticas P1 y P2 pueden expresarse como: $P_1 = w\bar{z}_1 A_1, P_2 = w\bar{z}_2 A_2$

Donde z1 y z2 son las distancias de los centroides de las respectivas áreas mojadas A1 y A2, por debajo de la superficie de flujo. También $V_1 = Q/A_1$ y $V_2 = Q/A_2$.

Luego la ecuación de momentum puede escribirse como:

La fuerza específica, expresa el momentum del flujo que pasa a través de la sección del canal por unidad de tiempo y por unidad de peso del agua y la fuerza por unidad de peso del agua. Si $F_1 = F_2$, las fuerzas específicas en las secciones 1 y 2 son iguales, siempre y cuando las fuerzas externas y el peso efectivo del agua en el tramo entre las dos secciones sean insignificantes.

Para mantener un valor constante F1, la profundidad de flujo debe cambiar de y1 a y2 con el costo de perder cierta cantidad de energía "E, en el RESALTO HIDRÁULICO en un fondo horizontal las fuerzas específicas antes y después del resalto son iguales y la pérdida de energía es una consecuencia del fenómeno.

Fenómenos Locales. En los canales abiertos a menudo ocurren cambios en el estado de flujo subcrítico a supercrítico o viceversa. Tales cambios se manifiestan con un correspondiente cambio en la profundidad de flujo de una profundidad alta a una profundidad baja, o viceversa. Si el cambio ocurre con rapidez a lo largo de una distancia relativamente corta, el flujo es rápidamente variado y se conoce como *fenómeno local*.

• 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.

Este involucra una pérdida de energía relativamente grande mediante disipación en el cuerpo turbulento de agua dentro del resalto. En consecuencia, el contenido de energía en el flujo después del resalto es apreciablemente menor que el de antes del mismo.

La profundidad antes del resalto es siempre menor que la profundidad después del resalto. La profundidad antes del resalto se conoce como PROFUNDIDAD INICIAL y_1 , y después del resalto se conoce como PROFUNDIDAD SECUENTE y_2 . Entonces, la energía específica E_1 correspondiente a la profundidad inicial y_1 es mayor que la energía específica E_2 correspondiente a la profundidad secuente y_2 en una cantidad igual a la pérdida de energía "E".

Figura 2. Resalto hidráulico interpretado mediante las curvas de energía específica y fuerza específica.

Al establecer una relación entre las profundidades inicial y secuente de un resalto hidráulico en un fondo horizontal de un canal rectangular, partiendo de las fuerzas específicas en las secciones 1 y 2, antes y después del resalto se obtiene:

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

Para un determinado número de Froude F_1 del flujo de aproximación, la relación de la profundidad secuente con respecto a la profundidad inicial está dada por la solución cuadrática: $\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \sqrt{1 + 8F_1^2} - 1$

El principio de momentum se utiliza debido a que el resalto hidráulico produce una alta cantidad de energía interna que no se pueden evaluar con la ecuación de energía.

Para flujo supercrítico en un canal horizontal, la energía de flujo se disipa a través de la resistencia friccional a lo largo del canal, dando como resultado un descenso en la velocidad y un incremento en la profundidad en la dirección del flujo. El resalto hidráulico se formará en el canal si el número de Froude F_1 del flujo, la profundidad de flujo y_1 y la profundidad y_2 aguas abajo satisfacen la ecuación:

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

Ecuación del resalto en canales rectangulares horizontales

Figura 3. Relación entre F_1 y y_2/y_1 para un resalto hidráulico en un canal rectangular horizontal

• Tipos De Resalto

El Bureau of Reclamation investigó diferentes tipos de resalto hidráulico en canales horizontales, cuya base de clasificación es el número de Froude F_1 del flujo entrante:

$F_1 = 1$, el flujo es crítico, por lo que no se forma resalto.

$F_1 = 1$ a 1.7, la superficie de agua muestra ondulaciones y se presenta el *resalto hidráulico ondulante*.

$F_1 = 1.7$ a 2.5, el ondulamiento de la superficie en el tramo de mezcla es mayor, se presenta una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, pero la superficie del agua hacia aguas abajo permanece uniforme. La velocidad a través de la sección es razonablemente uniforme y la pérdida de energía es baja. Se presenta el *resalto hidráulico débil*.

$F_1 = 2.5$ a 4.5, existe un chorro oscilante que entra desde el fondo del resalto hasta la superficie y se devuelve sin ninguna periodicidad. Cada oscilación produce una onda grande con periodo irregular, muy común en canales, que puede viajar a gran distancia causando daños ilimitados a bancas de tierra y a enrocados de

protección. Se produce el *resalto hidráulico oscilante*.

$F_1 = 4.5$ a 9.0 , la extremidad de aguas abajo del remolino superficial y el punto sobre el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo ocurren en la misma sección vertical. La acción y la posición de este resalto son menos sensibles a la variación en la profundidad de aguas abajo. El resalto se encuentra bien balanceado, con mayor estabilidad y el rendimiento es mejor. La disipación de energía varía de 45% a 70% . Se presenta *resalto hidráulico permanente o estable*.

$F_1 > 9$, el chorro de alta velocidad choca con paquetes de agua intermitentes que corren hacia abajo a lo largo de la cara frontal del resalto, generando ondas hacia aguas abajo. Existe gran ondulación de la superficie con tendencia de traslado de la zona de régimen supercrítico hacia aguas abajo. La acción del resalto es brusca pero efectiva debido a que la disipación de energía puede alcanzar un 85% . Se produce el *resalto hidráulico fuerte*.

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 permanente y fuerte, las condiciones hidráulicas aguas abajo son muy exigentes y difíciles de cumplir en la práctica.

Figura 3. Tipos de Resalto Hidráulico

• Características Básicas Del Resalto Hidráulico

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. Se han investigado diferentes formas de colchones hidráulicos con el objeto de lograr una mejor disipación de energía en una menor longitud. Para el diseño de colchones hidráulicos se consideran los siguientes aspectos.

Pérdida de energía. En el resalto hidráulico la pérdida de energía es igual a la diferencia de las energías específicas antes y después del resalto

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^2}{4y_1y_2}$$

Eficiencia. Es la relación entre la energía específica antes y después del resalto, es una función adimensional y depende sólo del número de Fraude del flujo de aproximación.

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

Altura del resalto. Es la diferencia entre las profundidades antes y después del resalto.

$$h_j = y_2 - y_1$$

• Longitud Del Resalto Hidráulico

Un parámetro importante en el diseño de obras hidráulicas es la longitud del resalto, que 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.

La longitud del resalto puede definirse como la distancia medida desde la cara frontal del resalto y1 hasta un punto en la superficie inmediatamente aguas abajo del remolino y2. Los datos experimentales sobre la longitud del resalto pueden graficarse mediante el número de Froude F1 contra la relación adimensional L/(y2-y1), L/y1 o L/y2. La curva resultante de la gráfica F1 versus L/y2 muestra la regularidad de una parte plana para el rango de los resaltos bien establecidos.

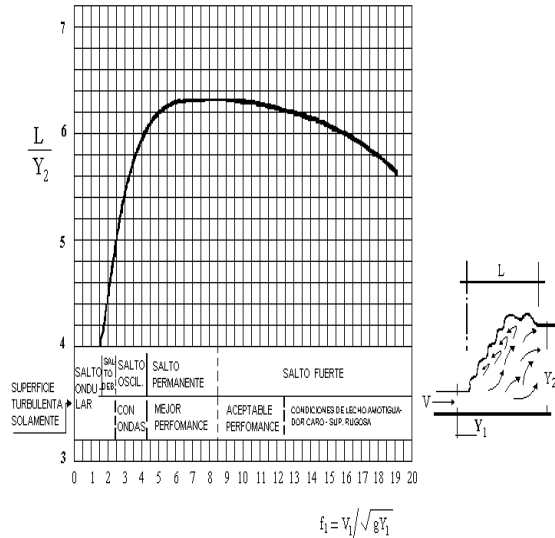


Figura 4. Relación adimensional para la longitud del resalto hidráulico (Bureau of reclamation)

• El perfil superficial

El conocimiento del perfil superficial de un resalto hidráulico es necesario en el diseño del borde libre para los muros laterales del cuenco disipador donde ocurre el resalto. También es importante para determinar la presión que debe utilizarse en el diseño estructural, debido a que la presión vertical en el piso horizontal bajo un resalto hidráulico es prácticamente la misma que hincaría el perfil de la superficie del agua. El perfil superficial de un resalto hidráulico puede representarse mediante curvas adimensionales para varios valores de F1.

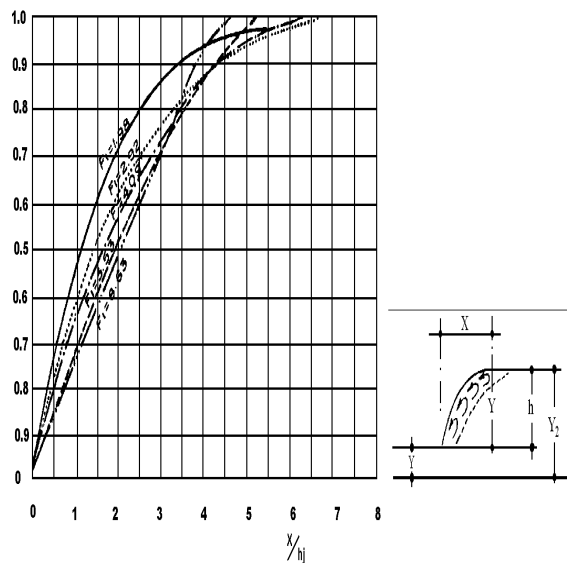


Figura 5. Perfiles superficiales adimensionales de resaltos hidráulicos en canales horizontales

(Con base en datos de Bakhmeteff–Matzke)

• Resalto Hidráulico Como Disipador De Energía

El resalto hidráulico es un medio útil para disipar el exceso de energía en un flujo supercrítico debido a que previene la posible erosión aguas debajo de vertederos de rebose, rápidas y compuertas deslizantes, pues reduce rápidamente la capacidad de socavar el lecho del canal aguas abajo. El resalto hidráulico utilizado para la disipación de energía a menudo se confina parcial o totalmente en un tramo del canal que se conoce como *cuenco de disipación* o cuenco de aquietamiento, cuyo fondo se recubre para resistir la socavación.

Las aplicaciones prácticas del resalto hidráulico son:

- Disipar la energía del agua que fluye sobre presas, vertederos y otras estructuras hidráulicas, y prevenir de esta manera la socavación aguas debajo de las estructuras
- Recuperar altura o aumentar el nivel del agua en el lado de aguas debajo de una canaleta de medición y mantener un nivel alto del agua en el canal de irrigación o de cualquier estructura para distribución de aguas
- Incrementar el peso sobre la zona de aguas debajo de una estructura de mampostería y reducir la presión hacia arriba bajo dicha estructura aumentando la profundidad del agua en su zona de aguas abajo
- Aumentar el caudal por debajo de una compuerta deslizante manteniendo alejada la profundidad de aguas abajo, debido a que la altura efectiva se reducirá si la profundidad de aguas abajo ahoga el resalto

En el diseño de un cuenco disipador, se deben considerar los siguientes aspectos:

Posición del resalto. Existen tres modelos alternativos que permiten que un resalto se forme aguas debajo de una fuente (vertedero de rebose, una rápida o una compuerta deslizante):

Caso 1: $y'2 = y2$. Este caso representa un modelo para el cual la profundidad de aguas abajo $y'2$ es igual a la profundidad $y2$ seciente a $y1$. En este caso se satisface la ecuación y el resalto ocurrirá sobre un piso sólido inmediatamente delante de la profundidad $y1$. Es ideal para propósitos de protección contra la socavación.

Figura 6. Efecto de la profundidad de salida en la formación de un resalto hidráulico aguas debajo de un vertedero o por debajo de una compuerta deslizante, cuando $y'2 = y2$

Caso 2: $y'2 < y2$. Representa el patrón para el cual la profundidad de salida $y'2$ es menor que $y2$. Esto significa que la profundidad de salida del caso 1 disminuye y el resalto se desplazará hacia aguas abajo hasta un punto donde se satisfaga la ecuación. Este caso debe evitarse en el diseño, debido a que el resalto rechazado fuera de la zona resistente a la socavación ocurriría en un lecho de cantos rodados sueltos o en un canal desprotegido ocasionando erosión severa. La solución para el diseño es utilizar cierto control en fondo del canal, el cual incrementaría la profundidad de agua y asegurará un resalto dentro de la zona protegida.

Figura 7. Efecto de la profundidad de salida en la formación de un resalto hidráulico aguas debajo de un vertedero o por debajo de una compuerta deslizante, cuando $y'2 < y2$

Caso 3: $y'2 > y2$. Este caso representa un modelo en el cual la profundidad de salida $y'2$ es mayor que $y2$. Esto significa que la profundidad de salida con respecto al caso 1 se incrementa. El resalto se verá forzado hacia aguas arriba, y finalmente puede ahogarse en la fuente y convertirse en un resalto sumergido. Éste es el

caso más seguro para el diseño, debido a que la posición del resalto sumergido puede fijarse con rapidez, sin embargo el diseño no es eficiente, debido a que se disipará muy poca energía.

Figura 8. Efecto de la profundidad de salida en la formación de un resalto hidráulico aguas debajo de un vertedero o por debajo de una compuerta deslizante, cuando $y_2 > y_1$

Condiciones a la salida. En la mayor parte de los problemas prácticos, la profundidad de agua a la salida fluctúa, debido a cambios en el caudal de flujo en el canal. En tales casos, se dispone de una curva de calibración de la profundidad de salida que muestra la relación entre el nivel de salida y_2 y el caudal Q . De la misma manera puede construirse una curva de calibración del resalto para mostrar la relación entre la profundidad secuente y_1 y el caudal. Leliavsky sugirió que el diseño puede considerarse según cinco diferentes clases de condiciones.

Clase 1. Representa una condición ideal para la cual las dos curvas de calibración siempre coinciden. Esto significa que existe el caso 1 en la posición del resalto y siempre se formará un resalto en el lugar deseado sobre una zona protegida para todos los caudales. Condiciones de esta clase rara vez se encuentran en la naturaleza.

Clase 2. Representa las condiciones para las cuales la curva de calibración del resalto siempre se encuentra en un nivel mayor que la curva de calibración de profundidad de salida. Esto significa que siempre existe un caso 2 (la profundidad de salida es menor que la secuente) y el resalto se formará en un lugar alejado hacia aguas abajo. Un método efectivo para asegurar que el resalto ocurra en la zona protegida es utilizar bloques para crear un cuenco disipador.

Clase 3. Representa las condiciones para las cuales la curva de calibración del resalto se encuentra siempre a un nivel menor que la de calibración de profundidad de salida. Esto significa que siempre ocurre el caso 3 (la profundidad de salida es mayor que la secuente) y el resalto se moverá hacia aguas arriba y tal vez se ahogará en la fuente y se disipará muy poca energía. Un método efectivo para asegurar un resalto es construir una zona de aproximación por encima del nivel del lecho del canal. La pendiente de la aproximación puede ser tal que las condiciones apropiadas para un resalto se desarrollen allí para todos los caudales. Otro método es proveer una caída en el fondo del canal para bajar la profundidad de salida.

Clase 4. Representa las condiciones para las cuales la curva de calibración del resalto se encuentra a un nivel mayor que la de calibración de profundidad de salida para caudales bajos pero a un nivel menor para caudales altos. Un método efectivo para asegurar un resalto es proveer un cuenco disipador para formarlo a bajos caudales y combinar el cuenco con una aproximación inclinada para desarrollarlo a satisfacción de todos los caudales.

Clase 5. Representa las condiciones para las cuales la curva de calibración del resalto se encuentra a un nivel más bajo que la de calibración de profundidades de salida para caudales bajos pero a un nivel más alto para caudales altos. Un método efectivo para asegurar el resalto es incrementar la profundidad de aguas abajo lo suficientemente mediante la construcción de una piscina de quietamiento formándolo así para caudales altos.

Figura 9. Clasificación de las condiciones de profundidad de salida para el diseño de obras de protección contra socavación.

Tipos de resalto. Al considerar los diferentes tipos de resalto hidráulico, el U.S Bureau of Reclamation da las siguientes recomendaciones prácticas:

- Todos los tipos de resalto se encuentran en el diseño de cuencos disipadores.
- El resalto débil no requiere de bloques o consideraciones especiales. Lo único que se necesita es dar la longitud apropiada al cuenco, la cual es relativamente corta. Ésta puede determinarse mediante el

gráfico donde se presenta la relación adimensional para la longitud del resalto hidráulico.

- El resalto oscilante, encontrado a menudo en el diseño de estructuras de canales, presas de derivación y obras de descarga es difícil de manejar. En lo posible deben evitarse los resaltos con número de Froude dentro del rango 2.5 a 4.5. En muchos casos no puede evitarse el uso de este resalto, pero en otros casos, alterando la dimensiones puede llevarse al rango deseable. Los bloques deflectores o accesorios tienen muy poco valor, las ondas son la principal fuente de dificultad, por consiguiente pueden utilizarse supresores de onda diseñados para manejarlas.
- No se encuentra una dificultad particular para el resalto estacionario. Arreglos con deflectores y de bloques son útiles como medios para acortar la longitud del cuenco disipador.
- A medida que el número de Froude aumenta, el resalto se vuelve más sensible a la profundidad de salida. Para números de Froude tan bajos como 8, se recomienda una profundidad de salida mayor que la seciente para asegurar que el resalto permanecerá en la zona protegida.
- Cuando el número de Froude es mayor que 10, un cuenco disipador de resalto puede no ser lo más económico. En este caso, la diferencia entre las profundidades, inicial y seciente es alta y, por lo general se requiere un cuenco muy profundo con muros de retención muy altos. El costo del cuenco disipador no compensa los resultados obtenidos. Un disipador del tipo cubeta deflectorá dará resultados similares a menor costo.

y

v1

Q

S1

Flujo Supercrítico

v

Q

Flujo Crítico

y

v2

Q

S1

Flujo Subcrítico

Resalto Hidráulico

Curva de Energía Específica

C

E

Curva de Fuerza Específica

P^2

P^1

P'^2

Profundidad inicial

Profundidad crítica

E1

E2

"E

Q

Línea de Energía

E1

E2

"E

C

y_c

y^2

Rango de flujo Subcrítico

Rango de flujo Supercrítico

y^2

y^1

y

y^1

y_c

y^2

P2

P1

F1=F2

F

y

Valores de y_2/y_1

Valores de F1

0

30

28

26

24

22

20

18

16

14

12

10

8

6

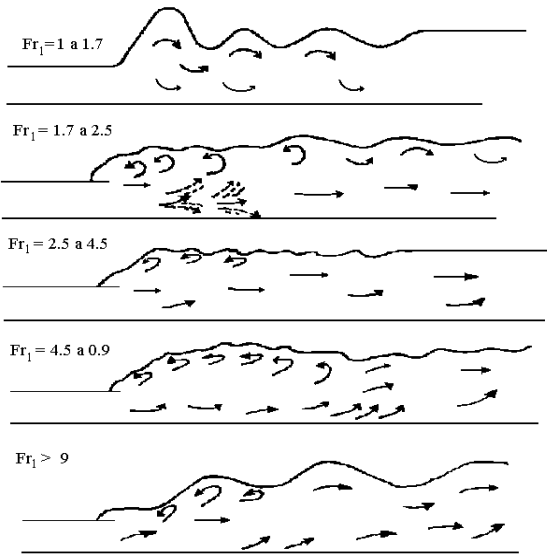
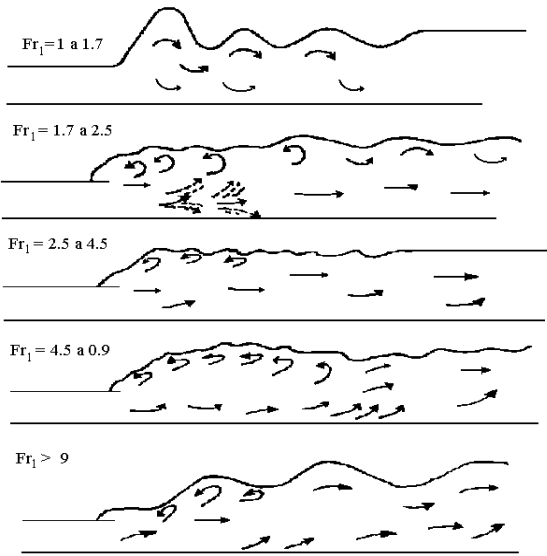
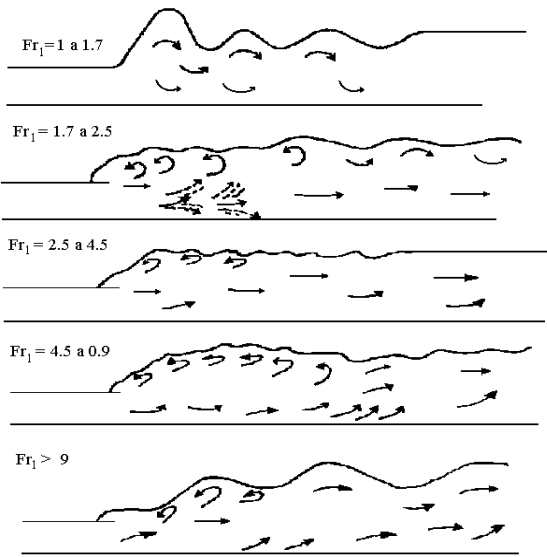
4

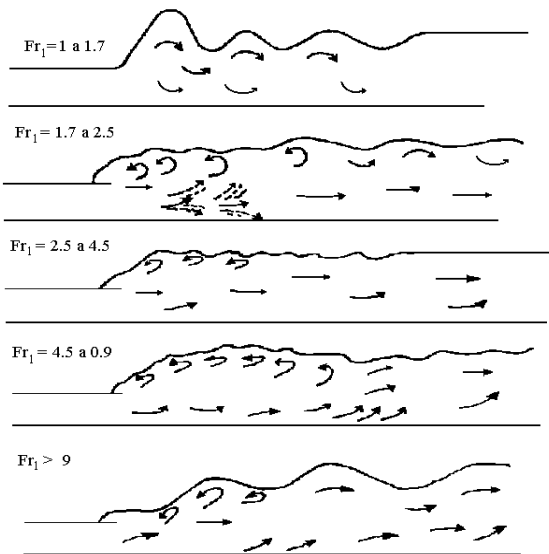
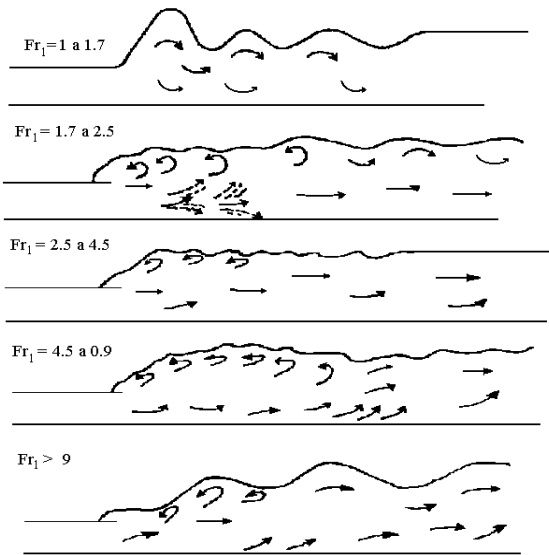
2

0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22

$$\frac{y^2}{y_1^2} = \frac{1}{2} \sqrt{1 + 8F_1^2} - 1$$

$$F_1 = v_1 / \sqrt{gy_1}$$





y1

y2 = y'2

y1

y2 = y'2

y2

y1

y'2

y2

y1

$y'2$

$y2$

$y1$

$y'2$

$y2$

$y1$

$y'2$

$y2$

$y'2$

$y1$

$y2$ = Profundidad secuente

$y'2$ = Profundidad aguas abajo

Niveles $y2$ y $y'2$

Caudal Q

Caso 1

Calibración del resalto = Calibración de la profundidad aguas abajo

Niveles $y2$ y $y'2$

Caudal Q

Caso 2

Calibración del resalto > Calibración de la profundidad aguas abajo

Niveles $y2$ y $y'2$

Caudal Q

Caso 3

Calibración del resalto < Calibración de la profundidad aguas abajo

Calibración del resalto > Calibración de la profundidad aguas abajo en Q menores

Niveles $y2$ y $y'2$

Caudal Q

Caso 4

Calibración del resalto < Calibración de la profundidad aguas abajo en Q menores

Niveles y_2 y y_2'

Caudal Q

Caso 5