

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
 ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN
 LABORATORIO DE HIDRÁULICA CO-3503
PRACTICA DE LABORATORIO

SALTO HIDRAULICO

1 INTRODUCCION

En flujo libre, cuando ocurre una transición entre el estado de flujo supercrítico (*alta energía cinética y baja energía potencial*) de vuelta al estado de flujo subcrítico (*baja energía cinética y alta energía potencial*), se presenta un fenómeno altamente turbulento conocido como salto (o resalto) hidráulico (*Fig1.0*). A través del salto hidráulico, se da un paso generalmente abrupto entre el tirante conjugado supercrítico y_1 (*Froude* >1) y el tirante conjugado subcrítico y_2 (*Froude* < 1) a lo largo de una distancia relativamente corta (Ven Te Chow, 1994). Lo anterior implica una alta pérdida de energía, principalmente en forma de calor. El salto hidráulico es ampliamente utilizado como medio de disipación de energía en estructuras hidráulicas de control como presas, compuertas o vertederos. Su naturaleza turbulenta es idónea en la mezcla de agentes químicos como coagulantes o polímeros en plantas químicas o biológicas de tratamiento de aguas. No obstante, por sus características altamente erosivas y por el riesgo de propiciar un flujo presurizado en conductos abovedados, su presencia debe limitarse a puntos específicos de control. Sistemas abovedados con altas pendientes como es el caso de alcantarillados pluviales o sanitarios, son especialmente sensibles a presentar saltos hidráulicos y por consiguiente, riesgo de inundaciones (Mays, 2001).

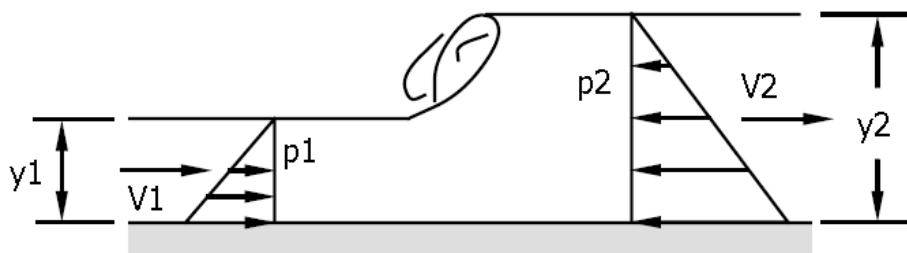


Figura 1.0. Diagrama esquemático del salto hidráulico
 Fuente (ICO)

Hasta décadas resientes, el salto hidráulico se consideraba por muchos como un fenómeno indeterminado y demasiado complejo para su análisis. Sin embargo, en la actualidad, la solución teórica completa a éste fenómeno se fundamenta en la aplicación de las leyes fundamentales de

la hidrostática, la conservación de la energía y la conservación del impulso-momentum. Esta solución teórica exhibe suficiente congruencia con resultados experimentales como para generalizar su uso en análisis y diseño. La Figura 1.0 muestra el desarrollo de un salto hidráulico para una sección rectangular de base b . Se muestran los tirantes alternos y_1 y y_2 junto con la así asumida, distribución de presiones hidrostáticas aguas arriba y aguas abajo del salto. Dado que el salto ocurre a lo largo de una distancia relativamente corta, los efectos de fricción son generalmente despreciados (King, 1976).

$$\sum F = Q\rho(\Delta v) \dots\dots\dots (ec 1.0)$$

Donde:

F = fuerza $[F]$

Q = caudal volumétrico $[L^3/T]$

ρ = densidad $[M/L^3]$

v = velocidad $[L/T]$

Al realizar un análisis dimensional de la ecuación 1.0:

$$\sum F = [F] = [M] \cdot \frac{[L]}{[T^2]} = \left[\underbrace{\left([M] \cdot \frac{[L]}{[T]} \right)}_{\text{MOMENTUM}} \cdot \frac{1}{[T]} \right]$$

IMPULSO MOMENTUM

$$Q\rho(\Delta v) = \frac{[L^3]}{[T]} \cdot \frac{[M]}{[L^3]} \cdot \frac{[L]}{[T]} = \left[\underbrace{\left([M] \cdot \frac{[L]}{[T]} \right)}_{\text{MOMENTUM}} \cdot \frac{1}{[T]} \right]$$

IMPULSO MOMENTUM

Al aplicar la ecuación de momentum (ec 1.0) entre dos puntos para el salto de la Figura 1.0:

$$F_1 - F_2 = (p_1 A_1 - p_2 A_2) = \left(Q \frac{\gamma}{g} (v_2 - v_1) \right) \Rightarrow$$

$$\sum F = \left(\gamma \frac{y_1^2}{2} b - \gamma \frac{y_2^2}{2} b \right) = \left(Q \frac{\gamma}{g} (v_2 - v_1) \right) \text{ sabiendo que } v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{b \cdot y} \Rightarrow$$

$$\sum F = \frac{\gamma b}{2} (y_1^2 - y_2^2) = \frac{Q\gamma}{g} \left(\frac{Q}{by_2} - \frac{Q}{by_1} \right) \text{ sacando a factor común } Q \text{ y } \gamma \text{ junto con } b, \text{ al cancelar :}$$

$$\Rightarrow \frac{y_1^2}{2} - \frac{y_2^2}{2} = \frac{Q^2}{b^2 g y_2} - \frac{Q^2}{b^2 g y_1} \text{ y sabiendo que } q = Q/b \text{ entonces :}$$

Se deduce la Ecuación General del Salto Hidráulico (EGSH):

$$\frac{y_1^2}{2} + \frac{q^2}{g y_1} = \frac{y_2^2}{2} + \frac{q^2}{g y_2} \dots\dots\dots(\text{ec } 2.0)$$

Donde:

y_1 = tirante conjugado supercrítico (m)

y_2 = tirante conjugado subcrítico (m)

q = descarga específica ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)

g = aceleración de la gravedad (m/s^2)

A partir de la EGSH (ec 2.0), mediante manipulación algebraica, se puede deducir una expresión (ec 3.0) para la estimación del tirante subcrítico y_2 a partir del tirante supercrítico y_1 (*estado supercrítico conocido*).

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{8q^2}{g \cdot y_1^3} \right)} \right) \dots\dots\dots(\text{ec } 3.0)$$

Donde:

y_1 = tirante conjugado supercrítico (m)

y_2 = tirante conjugado subcrítico (m)

q = descarga específica ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)

g = aceleración de la gravedad (m/s^2)

La ecuación 3.0 puede ser igualmente puesta en términos del número de Froude:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + 8Fr_1^2} \right) \dots\dots\dots (ec 4.0)$$

Donde:

Fr_1^2 = Número de Froude correspondiente al tirante conjugado supercrítico:

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g y_1}} \dots\dots\dots (ec 4.0)$$

Al plantearse la ecuación general de la energía (EGE) entre los límites físicos del salto mostrados en la Figura 1.0 la pérdida de energía estaría dada por:

$$y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_L \dots\dots\dots (ec 5.0)$$

Entonces:

$$h_L = E_1 - E_2 = \left(y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(y_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right) \dots\dots\dots (ec 6.0)$$

Se llega entonces a la expresión que predice la pérdida teórica de energía para la extensión del salto hidráulico:

$$h_L = \Delta E = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 y_2} \dots\dots\dots (ec 7.0)$$

Donde:

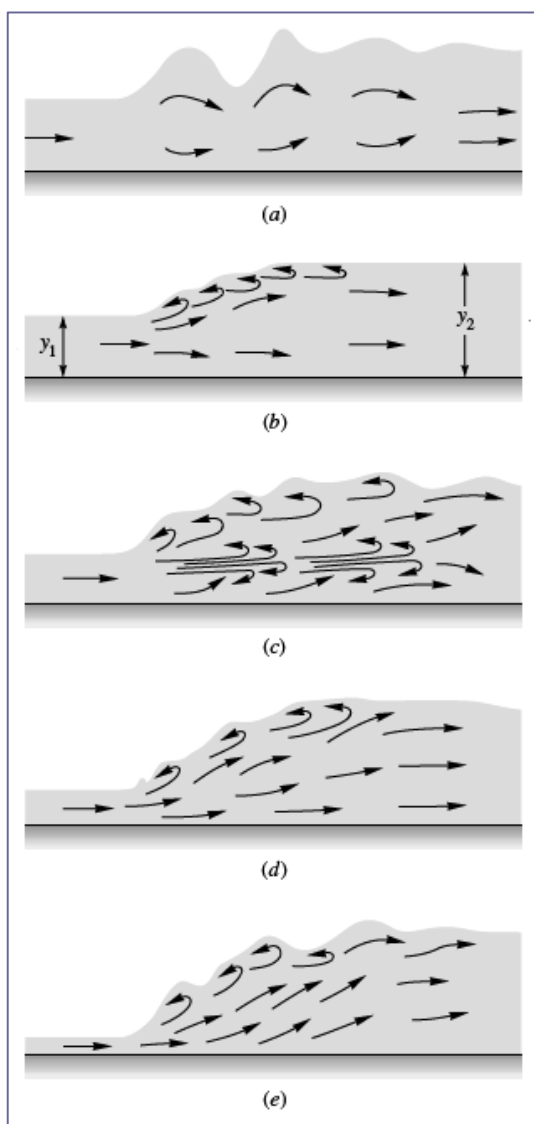
h_L = pérdida teórica de energía (m)

y_1 = tirante conjugado supercrítico (m)

y_2 = tirante conjugado subcrítico (m)

Finalmente, el % de disipación de energía (ya sea teórico o experimental) está dado por:

$$\%E = \frac{(E_1 - E_2)}{E_1} \dots\dots\dots (ec 8.0)$$



Tipo Salto	Rango Froude	% disipación	Relación y_2/y_1
Salto Ondular	1.0 a 1.7	<5	1.0 a 2.0
Salto débil	1.7 a 2.5	5 a 10	2.0 a 3.1
Salto Oscilatorio	2.5 a 4.5	15 a 45	3.1 a 5.9
Salto Estable	4.5 a 9.0	45 a 70	5.9 a 12
Salto Fuerte	> 9.0	70 a 85	> 12

Figura 2.0. Diagrama de clasificación de saltos hidráulicos.
Fuente (White, 2006).

En aprovechamiento de ésta cualidad de pérdida de energía del salto hidráulico, es posible inducir la presencia de saltos con diferentes niveles de disipación (*pérdida*) de energía según se requiera para cada caso. La Figura 2.0 representa un diagrama de clasificación de saltos hidráulicos donde se muestran el tipo de salto, el rango de número de Froude supercrítico para el tirante y_1 , el porcentaje esperado de disipación (h_f / E_1) y el cociente entre tirantes y_2/y_1 . Todas estas tendencias han sido encontradas de forma experimental (White, 2006).

1.1 Objetivos

- Validar con base en datos experimentales, la ecuación general del salto hidráulico.
- Validar con base en datos experimentales, la ecuación de pérdida de energía para el salto hidráulico.
- Clasificar los diversos saltos hidráulicos experimentales con base en el número de Froude.
- Comparar el grado de disipación de energía experimental contra el calculado y a su vez contra los valores tabulados en la literatura.
- Comparar el cociente y_2/y_1 experimental contra el calculado y a su vez contra los valores tabulados en la literatura.

2 METODOS Y MATERIALES

Para realizar la presente práctica se hará uso del Canal Hidráulico Experimental (CHE) de la Escuela de Ingeniería en Construcción del ITCR cuyo ancho de solera (B) de 86 mm. Las características del mismo en cuando a equipos y accesorios, serán tomadas en el momento de realizar el experimento.

2.1 Métodos

1. Asegurarse que el conector principal de poder en el panel de control de la bomba se encuentren en posición de apagado.
2. Asegurarse que la válvula de control del CHE se encuentre completamente cerrada.
3. Ajustar la pendiente del canal a un valor de cero-pendiente mediante el mecanismo de ajuste vertical.
4. Montar la compuerta de fondo en la posición indicada.
5. Poner la bomba en posición de encendido.
6. Abrir parcialmente la válvula de control y permitir que el flujo se estabilice en el canal.
7. Para cada salto hidráulico formado, tomar las alturas de los tirantes conjugados y_1 y y_2 y anotarlos en el Cuadro 1.0.

8. Para cada set experimental, realizar mediciones de Volumen (L), Tiempo (s) para el flujo circulante y anotar estos valores en el Cuadro 1.0.
9. Finalmente, colocar los conectores principales de poder en los paneles de control en posición de apagado.
10. Secar la compuerta de fondo y dejarla sobre el banco de trabajo.

2.2 Requerimientos de análisis para la práctica

1. En la formulación de su marco conceptual y como respaldo de su análisis de resultados, no deje de consultar a los autores: *Cengel, King, Munson, Potter, Ven te Chow y White*.
2. Confeccione un cuadro comparativo para todos los puntos experimentales que incluya:
 - a. Secuencia
 - b. Tirante experimental y_1
 - c. Tirante experimental y_2
 - d. Tirante teórico y_2
 - e. Caudal
 - f. Desviación simple entre y_2 teórico y y_2 experimental
 - g. Velocidad-1 (experimental)
 - h. Velocidad-2 (experimental)
 - i. Número de *Froude*-1 (experimental)
 - j. Número de *Froude*-2 (experimental)
 - k. Clasificación del salto (experimental)
 - l. hf teórica
 - m. hf experimental
 - n. % disipación teórico
 - o. % disipación experimental
 - p. Desviación simple entre %dis. teórico y %dis. experimental
 - q. Cociente y_2/y_1 teórico
 - r. Cociente y_2/y_1 experimental
 - s. Desviación simple entre y_2/y_1 teórico y y_2/y_1 experimental
3. Que tan confiables son las predicciones de hf teóricas contra las hf experimentales? Que factores afectan a cada una de estas cantidades? Sea concreto en sus respuestas y recuerde que en las hf experimentales ambos tirantes son medidos en el laboratorio.
4. Que tan similares son los valores de y_2 teóricos y y_2 experimentales? Como afecta el número de *Froude* a esta discrepancia y porque?

5. Que tendencia siguen los % de disipación de energía respecto del número de Froude y a los valores tabulados en la literatura (*cuadro adjunto*)?
6. alguna de las clasificaciones de salto hidráulico se impone sobre las demás?
7. Que puede deducirse a través de las tendencias y_2/y_1 contra Froude? Que utilidad tiene éste gráfico (y_2/y_1 *exp* y y_2/y_1 *teo* vs Froude)? Investigue en la literatura.