



Laboratorio  
de Hidráulica  
Ing. David  
Hernández Huéramo



Dr. Juan Pablo Molina Aguilar • Ing. Jorge Leonel Angel Hurtado • M. I. Jesús Martín Caballero Ulaje

Revisión 2023

## NOMBRE DE LA PRÁCTICA

### FLUJO BRUSCAMENTE VARIADO

#### OBJETIVO (S)

Una vez desarrollada la práctica, orientada a visualizar y comprender, el alumno será capaz de:

1. Comprender el comportamiento del flujo bruscamente variado.
2. Conocer la importancia del flujo bruscamente variado.
3. Identificar el tipo de flujo bruscamente variado que se presenta en un canal.

#### ENCUADRE TEÓRICO

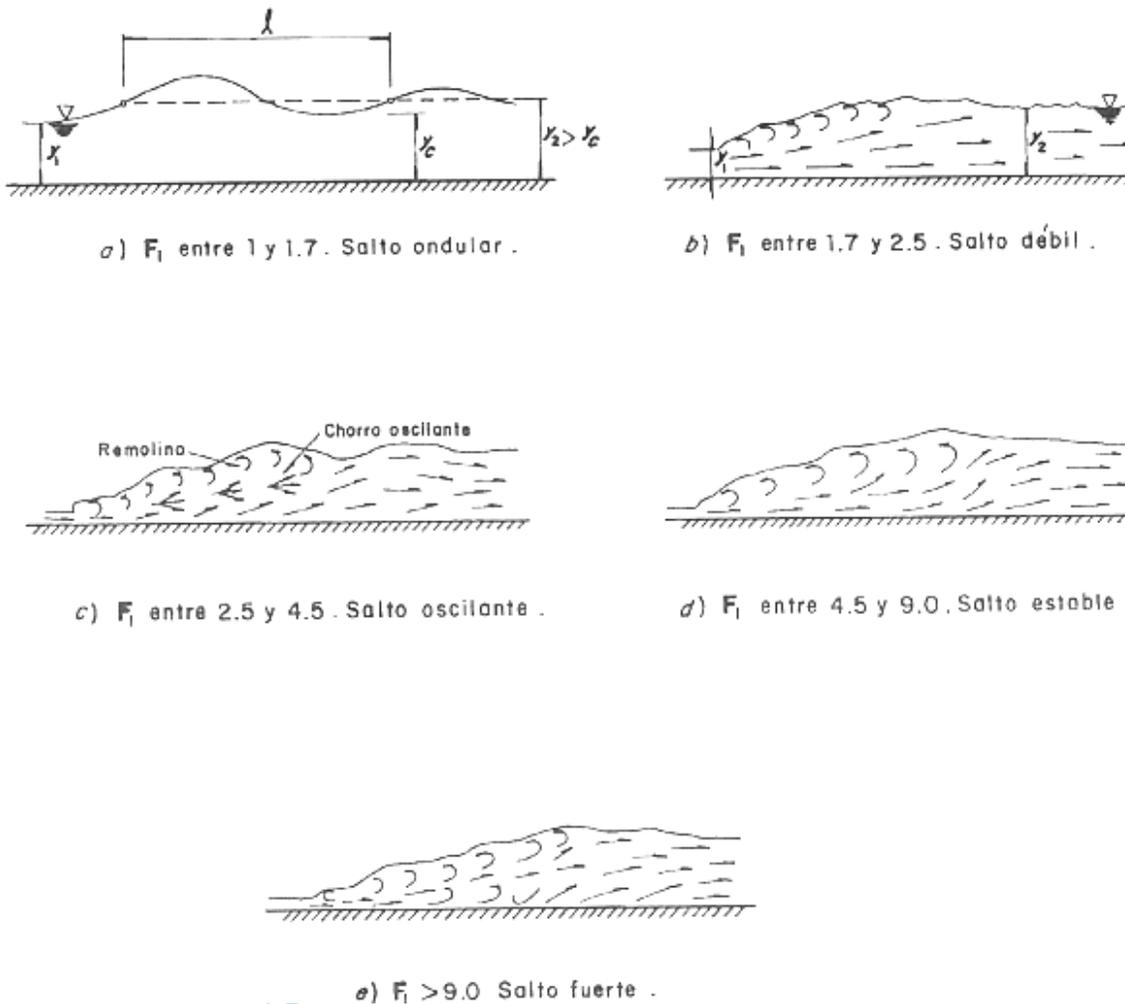
##### Salto hidráulico

Un salto hidráulico se presenta cuando por alguna circunstancia el flujo pasa de régimen supercrítico a régimen subcrítico, este cambio de régimen generalmente va acompañado por una importante pérdida de energía y tiene su aplicación en el diseño de estructuras hidráulicas disipadoras de energía, ya sea en la descarga de una compuerta de flujo inferior a descarga libre o en canales de conducción donde se necesite descender de una elevación superior a una inferior, lo cual se puede hacer por medio de una rápida, de tal forma que al pie de dicha rápida se continúe con un canal con una pendiente menor que el de la rápida, lo cual da origen a la formación de un flujo bruscamente variado.

Por lo anterior, es necesario calcular las pérdidas de energía y sobre todo definir si el salto será bien formado, ya que de lo contrario podría provocarse un flujo con velocidad excesiva aguas abajo de la compuerta o la rápida que puedan generar erosión no aceptable y entonces deberá de calcularse una estructura disipadora de energía. Este fenómeno hidráulico permite pasar del régimen supercrítico al régimen subcrítico.

El salto hidráulico puede clasificarse con base a la magnitud del número de Froude ( $Fr$ ), considerando su desarrollo y sus características, tal como se muestra en la Figura 3.1:

- 1) Salto hidráulico ondulado (Figura 3.1 a).
- 2) Salto hidráulico débil (Figura 3.1 b).
- 3) Salto hidráulico oscilante (Figura 3.1 c).
- 4) Salto hidráulico claro y estable (Figura 3.1 d).
- 5) Salto hidráulico fuerte (Figura 3.1 e).



**Figura 3.1** Clasificación del salto hidráulico a partir del número de Froude.

El número de Froude, el cual establece la relación de la fuerza inercial respecto la fuerza resistente durante el desarrollo del fenómeno hidráulico, puede determinarse con la expresión:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gY}}$$

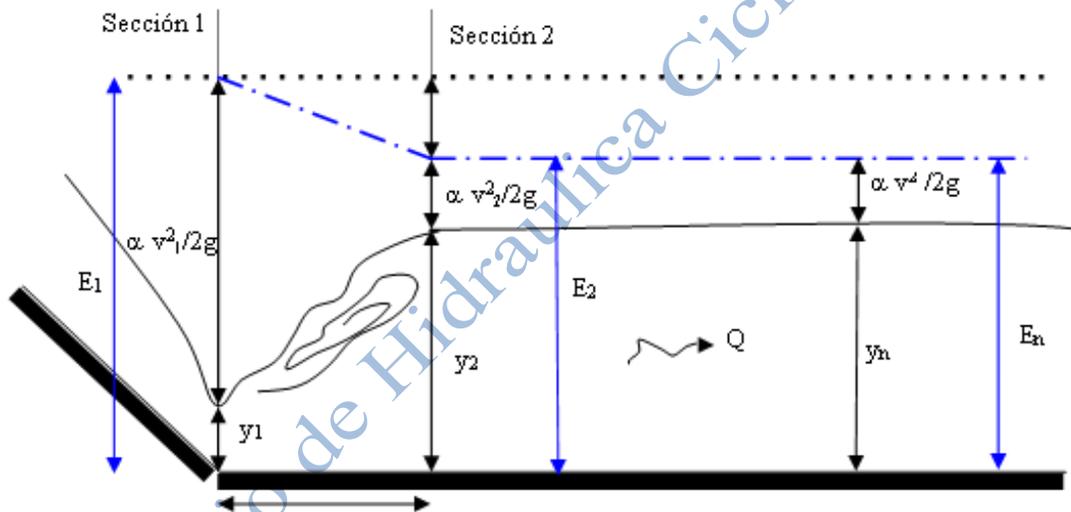
Donde:

- $F_r$  = Número de Froude [adimensional]
- $Y$  = Tirante hidráulico, relación del A respecto B [m]
- $A$  = Área hidráulica en la sección [m<sup>2</sup>]
- $B$  = Ancho de superficie libre [m]
- $g$  = Aceleración de la gravedad [9.81 m/s<sup>2</sup>]

También el salto puede clasificarse conforme a la energía del tirante conjugado mayor y la energía asociada al tirante aguas abajo del mismo:

- 1) Salto hidráulico bien formado.
- 2) Salto hidráulico barrido.
- 3) Salto hidráulico ahogado.

Las características hidráulicas de un salto hidráulico se pueden determinar por medio del teorema de impulso y cantidad de movimiento, aplicándolo entre las secciones 1 y 2 señaladas en la Figura 3.2.



**Figura 3.2** Esquema y dimensiones del salto hidráulico.

El teorema de impulso y cantidad de movimiento, está descrito por la siguiente expresión:

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

Donde:

$Q$  = Gasto (caudal) [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$A$  = Área hidráulica en la sección [ $\text{m}^2$ ]

$g$  = Aceleración de la gravedad [ $9.81 \text{ m/s}^2$ ]

$\bar{y}_1$  = Tirante al centro de gravedad del área hidráulica inicial [ $\text{m}$ ]

$\bar{y}_2$  = Tirante al centro de gravedad del área hidráulica final [ $\text{m}$ ]

El tirante al centro de gravedad se puede calcular por medio de alguna las siguientes ecuaciones en función de la sección del canal:

- Para canal rectangular

$$\bar{y} = \frac{y}{2}$$

- Para canal trapecial

$$\bar{y} = \frac{y(2b + B)}{3(b + B)}$$

Donde:

$\bar{y}$  = Tirante al centro de gravedad en la sección transversal [m]

$y$  = Tirante de agua en la sección del canal [m]

$b$  = Ancho de la plantilla del canal [m]

$B$  = Ancho de la superficie libre del agua [m]

De lo anterior para conocer  $y_2$ , denominado tirante conjugado mayor, en función de un valor conocido de  $y_1$ , denominado tirante conjugado menor, y en una sección rectangular se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$y_2 = \frac{-y_1 \pm \sqrt{y_1^2 + \frac{8Q^2}{gb^2y_1}}}{2}$$

Donde:

$y_1$  = Tirante conjugado menor [m]

$y_2$  = Tirante conjugado mayor [m]

Las pérdidas de energía producida por el salto se pueden calcular por medio de la siguiente fórmula:

$$\Delta E = y_1 - y_2 + \frac{1}{2g} \left( \frac{Q^2}{A_1^2} - \frac{Q^2}{A_2^2} \right)$$

Que, en el caso de un canal rectangular, la expresión anterior quedaría de la siguiente forma al simplificar algebraicamente:

$$\Delta E = y_1 - y_2 + \frac{Q^2}{2gb^2} \left( \frac{1}{y_1^2} - \frac{1}{y_2^2} \right)$$

Donde:

$\Delta E$  = Pérdida de energía [mca]

### Forma del salto hidráulico

Cuando la energía del conjugado mayor ( $E_2$ ) es aproximadamente igual a la energía del tirante normal ( $E_n$ ) aguas abajo de él (ver Figura 3.2), se dice que el **salto es bien formado**; cuando la energía  $E_2$  es menor que la energía  $E_n$  se dice que el **salto es ahogado**; y cuando  $E_2$  es mayor que  $E_n$  se dice que el **salto es barrido**. De los tres casos no es conveniente que se barra el salto, si ocurre es necesario diseñar una estructura disipadora de energía, como puede ser un tanque amortiguador o un dique vertedor, que permita igualar la energía del conjugado mayor con la energía del tirante normal aguas abajo del salto.

### EQUIPO O DISPOSITIVO

- Canal de pendiente variable
- Canal de flujo lento
- Canal de transporte de sedimentos

### MATERIALES

- Limnímetros

### PROCEDIMIENTO

La práctica se desarrollará en una etapa, acorde con la siguiente secuencia de pasos, se deberá tener en cuenta que se podrá realizar en cualquiera de los equipos o dispositivos señalados, En función del mismo se deberá utilizar el procedimiento o instrumentos de aforo correspondientes:

#### Etapa I.

1. Determinar el gasto (caudal) que pasa por el canal empleado, en  $m^3/s$ , aplicando la ecuación y desarrollando el procedimiento acorde con el equipo o modelo utilizado:

Utilizando el modelo hidráulico llamado canal de flujo lento, determina la carga hidráulica en el vertedor triangular que se sitúa al final del mismo, para definir el caudal utiliza la ecuación de calibración siguiente:

$$Q = 1.2077h^{2.3192}$$

Donde:

- Q = Gasto (caudal) [ $m^3/s$ ]
- h = Carga del vertedor [m]

Utilizando el modelo autocontenido, determina la carga hidráulica en el vertedor rectangular que se sitúa al final del mismo, para definir el caudal utiliza la ecuación de calibración siguiente:

$$Q = 0.147412h^{1.50}$$

Donde:

Q = Gasto (caudal) [m<sup>3</sup>/s]

h = Carga del vertedor [m]

Utilizando el canal de pendiente variable, ubica la sección de control para definir el caudal empleando la ecuación de régimen crítico en sección rectangular, o bien, emplear el procedimiento de dovelas para calcular la velocidad media con el molinete (consulte las prácticas 3 y 1 de cuarto semestre según corresponda).

2. Medir los tirantes conjugados menor ( $y_1$ ) y mayor ( $y_2$ ) del salto hidráulico (m).
3. Calcular la velocidad en la sección del conjugado menor (m/s).
4. Plantear la ecuación de energía específica en la sección del tirante conjugado menor.
5. Calcular el número de Froude para el tirante conjugado menor ( $Fr_1$ ).
6. De acuerdo al valor calculado para el número de Froude, clasificar el salto.
7. Repetir los pasos 3 y 4 para el tirante conjugado mayor (m/s).
8. Utilizando las ecuaciones correspondientes a la pérdida de energía ( $\Delta E$ ) (m).
9. Calcular la longitud del salto hidráulico “bien formado” (L) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$L = 5(y_2 - y_1)$$

10. Medir la longitud del salto hidráulico en proyección horizontal, desde el tirante conjugado menor al tirante conjugado mayor (m).

## REGISTRO DE MEDICIONES

## ETAPA 1

**Tabla 3.1**

Ancho del canal: \_\_\_\_\_ m

Altura al borde de la cresta: \_\_\_\_\_ m

S	(1) <i>h</i>	(2) <i>Q</i>	(3) <i>y</i> <sub>1</sub>	(4) <i>A</i> <sub>1</sub>	(5) <i>V</i> <sub>1</sub>	(6) <i>E</i> <sub>1</sub>	(7) <i>y</i> <sub>2</sub>	(8) <i>A</i> <sub>2</sub>	(9) <i>V</i> <sub>2</sub>	(10) <i>E</i> <sub>2</sub>
(%)	(m)	(m <sup>3</sup> /s)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(m/s)	(m)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(m/s)	(m)

S	(11) <i>F</i> <sub>r1</sub>	(12) <i>Tipo de salto</i>	(13) $\Delta E$	(14) <i>L</i> <sub>calculada</sub>	(15) <i>L</i> <sub>medida</sub>
(%)	(adimensional)		(m)	(m)	(m)

**ETAPA 1**

**ACTIVIDADES**

1. Con base a la Figura 3.2, realiza un esquema en el cual coloques las mediciones y valores calculados para el primer salto hidráulico registrado en la Tabla 3.1.
2. ¿En qué zona del canal de flujo lento es donde se presentó el salto hidráulico?
3. ¿El salto hidráulico se presenta únicamente en secciones transversales similares a la del canal de flujo lento?
4. ¿Qué otros dispositivos, aparte de los mencionados, se pueden utilizar para evitar que se barra un salto?
5. ¿Cómo se calcula el conjugado mayor?
6. De acuerdo con la bibliografía de Hidráulica de Canales, ¿Qué otras ecuaciones son utilizadas para definir teóricamente la longitud de un salto hidráulico?

**INSTRUCCIONES**

1. Mediante las mediciones registradas en la Tabla 3.1 determine las propiedades de los saltos hidráulicos generados y compara con los valores registrados.