

RESALTO HIDRÁULICO

I.1.OBJETIVO

- Analizar las características del salto hidráulico en un canal rectangular y evaluar las diversas fórmulas empíricas que rigen su comportamiento.
- Determinar la validez de las ecuaciones analíticas envueltas en el fenómeno del resalto hidráulico.

I.2.INTRODUCCIÓN

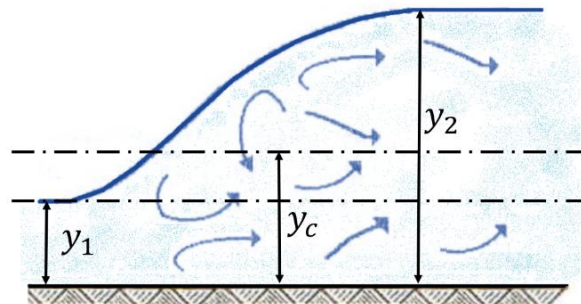
Se puede apreciar que en el flujo en canales abiertos bajo ciertas condiciones, es posible que la profundidad del fluido cambie rápidamente en una corta longitud sin ningún cambio en la disposición del canal. Estos cambios de profundidad se pueden aproximar a una discontinuidad en la elevación de la superficie libre ($dy/dx = \infty$). Este cambio de profundidad siempre se presenta de menor a mayor profundidad, nunca al contrario, y es conocido como resalto hidráulico (GHERARDELLI, p163).

El salto hidráulico es un fenómeno exclusivo de canales cuando un flujo viajando en régimen supercrítico se choca o alcanza a una masa que fluye en régimen subcrítico. En este choque se presenta cambio de régimen, turbulencia, disipación de energía, y entrada de aire en la masa líquida (SOTELO, s.f., p131).

Para que el salto hidráulico se produzca es necesario que los dos tirantes y_1 , y_2 (altura o calado) conjugados que lo acompañan (menor y mayor) sean diferentes del crítico Fig. 1. (UAEMEX, p1).

El resalto hidráulico corresponde al caso más típico de flujo permanente no uniforme, rápidamente variado. Se produce en el cambio de régimen rápido a régimen lento, produciéndose pérdida de energía. Se puede observar a la salida

de un desagüe bajo una compuerta o en un cambio brusco de nivel en un canal (SOTELO, s.f., p131).

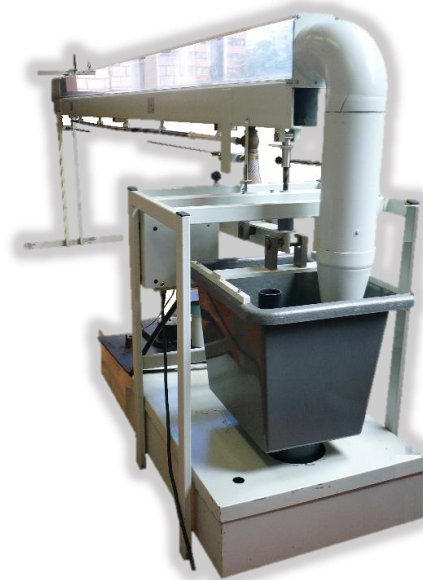


Fuente: <http://www.uaemex.mx/pestud/licenciaturas/civil/hidraulica2/Pr%20E1ctica%206%20HII.pdf>

Fig. 1 Salto Hidráulico

I.3.EQUIPO

TecQuipment H23 2.5-Metre Flow Channel, vertederos, tanque gravimétrico.



Fuente: http://www.tecquipment.com/Datasheets/H23_0711.pdf

Fig. 2 Montaje experimental del canal

Otros elementos

Cronómetro, piezómetro de aguja.

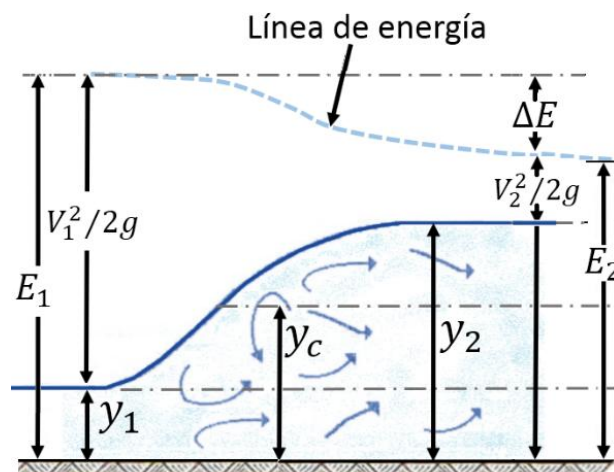
Descripción de la instalación

El aparato consiste en un canal de 2.5 m fabricado en acrílico transparente y anodizado de aluminio, junto con varias compuertas, vertederos y bloques que permiten el fenómeno de flujo en canales para ser fácilmente demostrado y estudiado.

I.4.MARCO TEORICO

El tipo más simple de salto hidráulico ocurre en un canal horizontal rectangular como se indica en la Fig.3. El flujo dentro del salto es complicado y agitado, no obstante, se puede suponer que el flujo en las secciones 1 y 2 es casi uniforme, estable y unidimensional. El esfuerzo cortante en la pared se desprecia en el tramo relativamente corto entre estas dos secciones (UAEMEX, p1).

Para el caso de un canal de geometría rectangular cuyo caudal unitario es $q=Q/b$, donde b corresponde al ancho del canal y suponiendo una distribución hidrostática de presiones se observa lo representado en la Fig.3.



Adaptado de:

<http://www.uaemex.mx/pestud/licenciaturas/civil/hidraulica2/Pr%20E1ctica%206%20HII.pdf>

Fig. 3 Resalto Hidráulico

Se tiene que:

$$q_1 = q_2$$

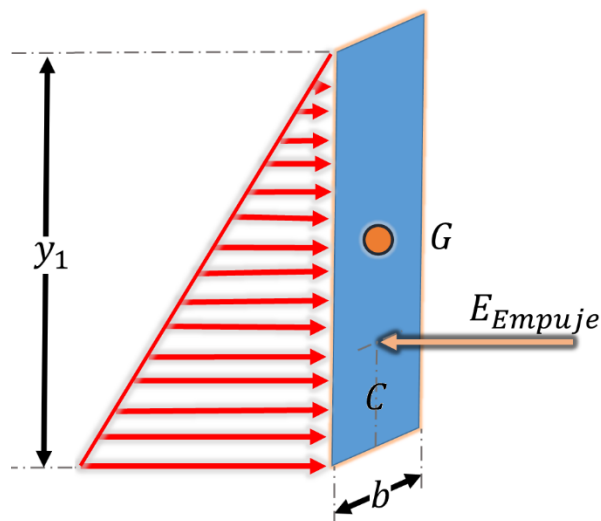
$$y_1 \cdot V_1 = y_2 \cdot V_2 \text{ Ec. de continuidad}$$

$$y_1 + \frac{V_1^2}{2g} - \Delta H = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \text{ Ec. de energía}$$

$$\sum F = \rho \cdot Q \cdot (V_1 - V_2) \text{ Ec. de cantidad de movimiento}$$

Donde ρ corresponde a la densidad del fluido.

Por tanto en cada una de las secciones se tiene:



Adaptado de: García P, A. (2006) "Hidráulica Prácticas de Laboratorio"
Fig. 4 Equilibrio estático en el resalto hidráulico

Empuje hidrostático:

$$F_1 = \gamma \cdot y_g \cdot A = \frac{1}{2} y_1 \cdot (b \cdot y_1) \cdot \gamma = \frac{1}{2} y_1^2 \cdot \gamma$$

$$F_1 = \frac{1}{2} y_1^2 \cdot \gamma$$

Aplicando la ecuación de cantidad de movimiento:

$$F_1 - F_2 = \rho \cdot q \cdot (V_2 - V_1)$$

$$\frac{1}{2} y_1^2 \cdot \rho \cdot g - \frac{1}{2} y_2^2 \cdot \rho \cdot g = \rho \cdot q \cdot (V_2 - V_1)$$

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

$$\frac{g}{2} = (y_1 + y_2) \cdot (y_1 - y_2) = q^2 \left(\frac{y_2 - y_1}{y_2 \cdot y_1} \right)$$

$$\frac{g}{2} = (y_1 + y_2) = \left(\frac{q^2}{y_2 \cdot y_1} \right)$$

Ordenando esta ecuación se tiene:

$$\frac{q^2}{g} = \frac{1}{2} y_1 \cdot y_2 \cdot (y_1 + y_2)$$

Para un canal rectangular y crítica $y_{crítica} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$

$$\frac{q^2}{g} = \frac{1}{2} y_1 \cdot y_2 \cdot (y_1 + y_2) = y_{crítica}^3$$

Las pérdidas de carga que se producen en el resalto obedecen a una expresión del tipo:

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

$$w = \gamma \cdot Q \cdot \Delta H$$

Para que se presente un resalto hidráulico debe existir un régimen rápido con número de Froude, $F_r > 1$, y siempre después del resalto el régimen es lento con $F_r < 1$. Por tanto, en este paso se debe transitar por un punto en el cual $F_r = 1$ y el calado y la velocidad por tanto críticos (CHOW, VT., p388).

Las secciones de control corresponden a los dispositivos que provocan este paso de régimen de forma intencionada, para disponer de un lugar en el cual existe una relación unívoca entre calado y caudales (SOTELO, s.f., p131).

El resalto hidráulico se puede caracterizar de acuerdo al número de Froude tal como se aprecia en la Fig.



Adaptado de:

<http://dspace.uniminuto.edu:8080/jspui/bitstream/10656/568/1/Tesis%20de%20grado.pdf>

Fig. 5 Clasificación del salto hidráulico de acuerdo al número de Froude

F_r entre 1 y 1.7: Salto hidráulico ondulado

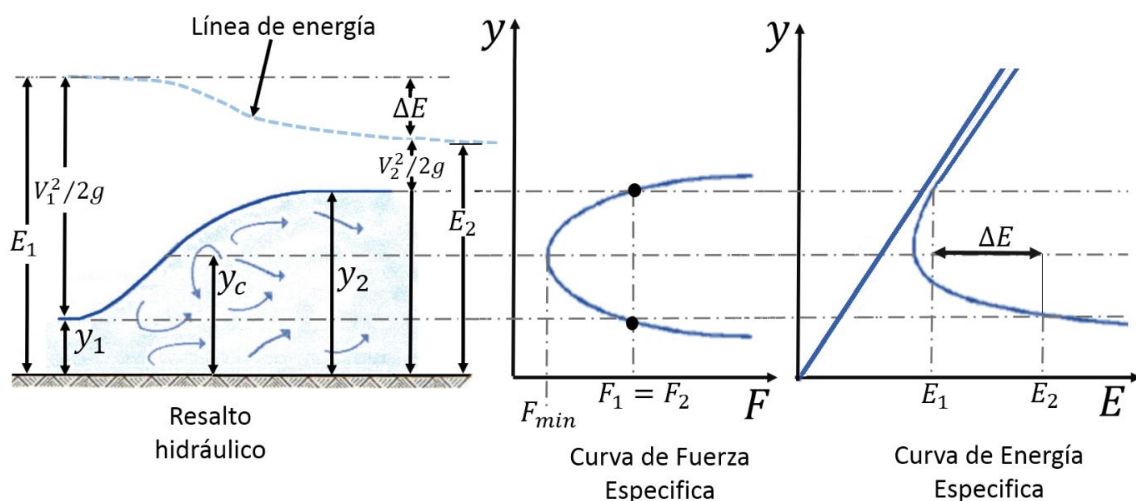
F_r entre 1.7 y 2.5: Salto hidráulico débil

F_r entre 2.5 y 4.5: Salto hidráulico oscilante

F_r entre 4.5 y 9: Salto hidráulico claro y estable.

$F_r > 9$: Salto hidráulico fuerte.

Para que el salto sea estable, las fuerzas que lo acompañan deben estar en equilibrio y conservarse el momentum (fuerza específica) de una sección a otra. El momentum depende del área de la sección transversal del canal, del calado, y del caudal, por lo que se tienen ecuaciones que dan solución al problema del salto hidráulico para cada sección del canal (UAEMEX, p1).



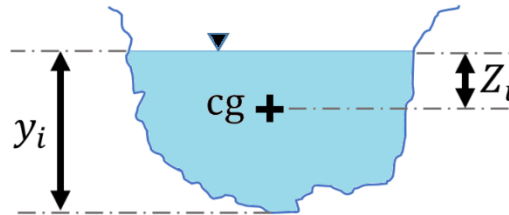
Adaptado de: <http://www.cuevadelcivil.com/2011/03/fuerza-especifica.html>

Fig. 6 Esquema de la ecuación momentum o de fuerza específica

La fuerza específica puede ser calculada por medio de la siguiente expresión:

$$M_i = \frac{Q^2}{gA_i} + Z_i A_i$$

donde:



O también, $M = \frac{q^2}{gy} + \frac{y^2}{2}$, donde el primer término corresponde al momentum del flujo que pasa a través de la sección del canal por unidad de tiempo y de peso de agua, y el segundo término corresponde a la unidad de fuerza por peso de agua (UAEMEX, p2).

La energía específica por unidad de ancho para un canal rectangular se define como:

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2}$$

donde

$$q = Q/b$$

En general, en los problemas de salto hidráulico se conoce uno de los tirantes conjugados y es necesario calcular el otro.

En los canales rectangulares, debido a la condición de equilibrio y conservación los momentos correspondientes a los tirantes conjugados deberán

ser iguales, por tanto el cálculo se puede hacer por medio de la siguiente expresión:

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

La longitud del salto hidráulico puede ser calculada por medio de las siguientes expresiones:

Expresión	Referencia
$L_s = 9.75y_1[Fr_1 - 1]^{1.01}$	USBR-1 (US)
$L_s = y_2[3.491 + 0.73Fr_1 - 0.06Fr_1^2 + 0.001441Fr_1^3]$	USBR-2 (US)
$L_s = 6(y_2 - y_1)$	Smetana (Rep. Checa)
$L_s = 5.9y_1 \cdot Fr_1$	Safranez (Alemania)
$L_s = 8.3y_1(Fr_1 - 1)$	Einwachter (Alemania)
$L_s = (y_2 - y_1) \left(8 - 0.05 \frac{y_2}{y_1} \right)$	Wóycicki (Polonia)
$L_s = 10.3 y_1 (Fr_1 - 1)^{0.81}$	Chertusov (Rusia)
$L_s = 10.6 (y_2 - y_1)$	Sieñchin

Fuente:

<http://www.uaemex.mx/pestud/licenciaturas/civil/hidraulica2/Pr%E1ctica%206%20HII.pdf>

Adicionalmente se tiene otro método propuesto por el USBR-3:

$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}}$	1.70	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	5.00	6.00	8.00	10.0
L_s/y_2	4.00	4.35	4.85	5.28	5.55	5.80	6.00	6.10	6.12	6.10

Fuente:

<http://www.uaemex.mx/pestud/licenciaturas/civil/hidraulica2/Pr%E1ctica%206%20HII.pdf>

Las pérdidas de carga pueden ser calculadas con la siguiente expresión:

$$\sum p = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4 \cdot y_1 \cdot y_2}$$

I.5.PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

- a. Establecer un salto hidráulico en el canal de pendiente variable haciendo uso de los vertederos variando la pendiente seis veces
- b. Determinar el flujo circulante por el canal haciendo uso del tanque gravimétrico, y del vertedero rectangular midiendo la altura sobre la cresta (h).
- c. Estimar físicamente la longitud del salto hidráulico en proyección horizontal, desde el tirante conjugado menor al tirante conjugado mayor (m).

I.6.ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

1. ¿Qué sugerencias tiene para mejorar el aparato?
2. Representar gráficamente la forma en que se generó el salto hidráulico en el laboratorio.
3. Verificar analíticamente la existencia del salto hidráulico.
4. Calcular la velocidad de la sección conjugada menor (m/s).
5. Calcular el número de Froude para el tirante conjugado menor (F_{r1})
6. De acuerdo al valor calculado para el número de Froude, clasificar el salto.

7. Plantear la ecuación de energía entre las secciones inicial y subsiguiente del salto hidráulico
8. Calcular la energía en las secciones inicial y subsiguiente (m)
9. Calcular la pérdida de energía (m)
10. Determinar la longitud del salto con los métodos propuestos.
11. Comparar los resultados obtenidos analíticamente con los del laboratorio. Determinar porcentajes de error. Establecer cuál es el método analítico más apropiado para establecer la longitud del resalto.
12. ¿Qué sucede con las curvas de energía cuando el flujo se incrementa?
13. ¿Qué sucede con las curvas de momentum cuando el flujo se incrementa?
14. Exponer posibles aplicaciones del resalto hidráulico.

I.7.HOJA DE RESULTADOS

<i>S</i>	<i>W</i>	<i>T</i>	<i>h</i>	<i>Q</i>	<i>Q</i>	<i>Y₁</i>	<i>Y₂</i>	<i>A₁</i>	<i>V₁</i>		<i>Tipo de salto</i>	ΔE	<i>L medida</i>	<i>L calculada</i>
(%)	(Kg)	(s)	(m)	(kg/s)	(m ³ /s)	(m)	(m)	(m ²)	(m/s)	<i>Fr₁</i>		(m)	(m)	(m)
1														
2														
3														
4														
5														
6														

I.8. BIBLIOGRAFÍA

García P, A. (2006) "Hidráulica Prácticas de Laboratorio", Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Escuela Politécnica Superior de Gandia, Universidad Politécnica de Valencia, Editorial de la UPV.

Laboratorio de Hidráulica II, Práctica No. 6, Salto Hidráulico, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX), tomado de: <http://www.uaemex.mx/pestud/licenciaturas/civil/hidraulica2/Pr%20E1ctica%206%20HII.pdf> , 20 de octubre de 2011.

CHOW, VT., Hidráulica de canales abiertos. Recuperado de: <http://www.hidrojing.com/wp-content/uploads/2013/02/2-Chow-Ven-Te-Hidraulica-De-Canales-Abiertos.PDF>. Fecha de recuperación: 20 de octubre de 2014.

GHERARDELLI C., Flujo en canales abiertos, mecánica de fluidos. Capítulo 12. Universidad de Chile. Recuperado de: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Wcbe90eXij0J:https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/2/ME33A/1/material_docente/bajar%3Fid_material%3D138200+%&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=co. Fecha de recuperación: 20 de octubre de 2014.

DÍAZ M., Estudio comparativo del salto hidráulico en canales de sección trapezoidal y rectangular (2009). Universidad de la Salle. Recuperado de: <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/15387/T40.09%20D543e.pdf?sequence=2>. Fecha de recuperación: 20 de octubre de 2014.

SOTELO G. Apuntes de hidráulica. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de: http://www.ingenieria.unam.mx/~deptohidraulica/publicaciones/pdf_publicaciones/C8.pdf . Fecha de recuperación: 20 de octubre de 2014.