

Universidad
Industrial de
Santander



MANUAL DE LABORATORIO DE HIDRÁULICA

PRÁCTICA 4

RESALTO HIDRÁULICO

ESCUELA DE
INGENIERIA
Civil

Contenido

Laboratorio 4. Resalto hidráulico	3
1. Marco Teórico.....	3
1.1. Tipos de Resalto	6
1.2. Longitud del Resalto	8
2. Objetivos:	8
3. Procedimiento.	9
4. Equipo utilizado	9
5. Datos.....	9
6. Resultados	10
7. Cálculo Tipo:	10
8. Resultados y preguntas.....	13
9. Observaciones y conclusiones	13
10. Referencias Bibliográficas.....	14

Listado de Ecuaciones

Ecuación 1	3
Ecuación 2	3
Ecuación 3	4
Ecuación 4	4
Ecuación 5	4
Ecuación 6	5
Ecuación 7	5
Ecuación 8	5
Ecuación 9	5
Ecuación 10	5
Ecuación 11	5
Ecuación 12	5
Ecuación 13	5

Listado de Ilustraciones

Ilustración 1 Curva de fuerza específica y energía específica en el resalto hidráulico [1]	4
Ilustración 2 análisis del resalto hidráulico [2]	4
Ilustración 3 Resalto ondulante[3]	6
Ilustración 4 Resalto débil [4]	6
Ilustración 5 Resalto oscilante[5]	7
Ilustración 6 Resalto estable[6]	7
<i>Ilustración 7 Resalto fuerte [7]</i>	<i>7</i>
Ilustración 8 Longitud del resalto en canales con pendiente según el U.S. Bureau of Reclamation [8]	8
Ilustración 9 Procedimiento [9]	9

Listado de Tablas

Tabla 1 Datos.....	9
Tabla 2 Resultados sección 1	10
Tabla 3 Resultados sección 2	10

El diseño de las guías de las prácticas presenciales toma como referencia el trabajo de grado desarrollado por Laiton Suárez (2022), del cual se adaptaron algunos lineamientos metodológicos.

Laboratorio 4. Resalto hidráulico

1. Marco Teórico

El cambio de la profundidad del flujo de un nivel supercrítico a un nivel subcrítico ocurre en forma brusca debido a la turbulencia generada *figura 1*. Este fenómeno se conoce como salto o resalto hidráulico. El resalto hidráulico ocurre frecuentemente en un canal abajo de la compuerta de regulación, al pie de un vertedero, o en un lugar donde un canal de gran pendiente que sorpresivamente se vuelve muy plano.

Si el resalto es bajo, es decir, si el cambio de profundidad es pequeño, el agua no se levantará abruptamente, pero pasará de un nivel bajo a uno alto a través de series de ondulaciones gradualmente disminuyendo en tamaño, tal salto bajo se llama salto ondular.

Cuando el resalto es alto, es decir, si el cambio de profundidad es pequeño, el agua no se levantará abruptamente, pero pasará de un nivel bajo a uno alto a través de series de ondulaciones gradualmente disminuyendo en tamaño, tal salto bajo se llama salto ondular.

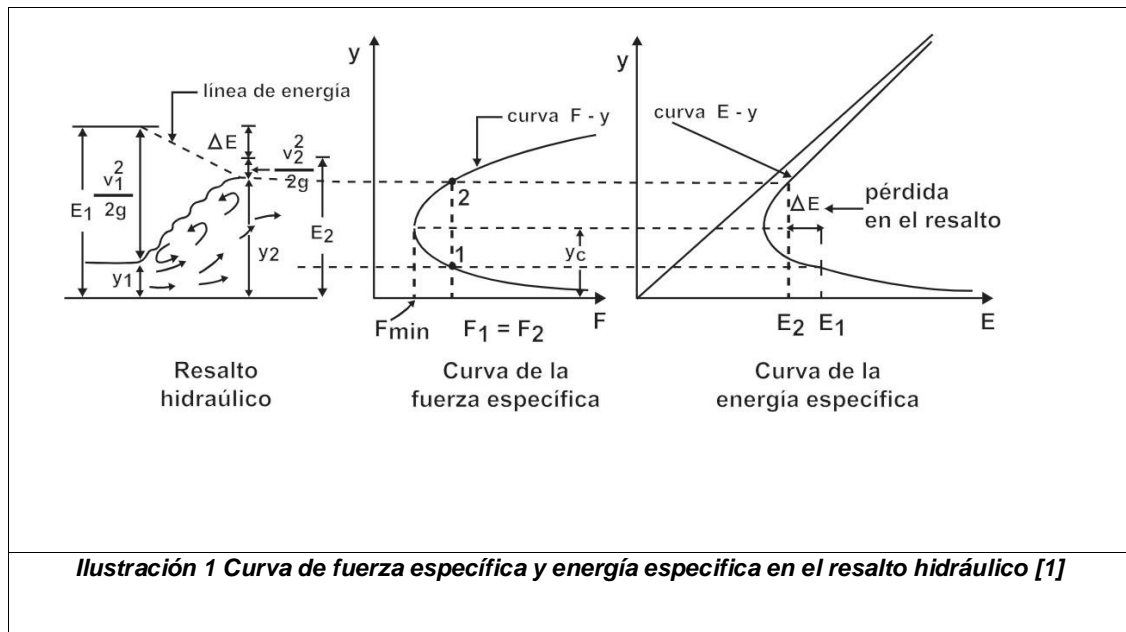
Cuando el resalto es alto, es decir, cuando el cambio en profundidad es grande, el resalto se llama directo. El resalto directo implica una gran cantidad de pérdidas de energía debido a la disipación en el cuerpo de agua turbulento dentro del salto. Consecuentemente, la energía en el flujo después del salto es apreciablemente menor que la de antes del salto. Se puede destacar que la profundidad previa al salto siempre es menor que la posterior. Las profundidades antes y después del resalto se denominan profundidades conjugadas o secuentes.

Aplicando la ecuación de conservación del momento para un canal abierto, como el de la *figura 2* tenemos:

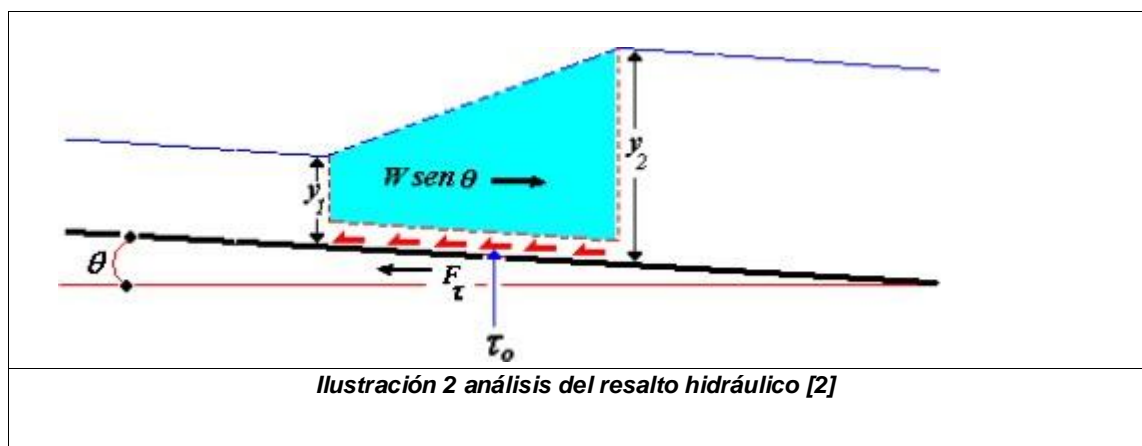
$\gamma \bar{Y}_1 A_1 - \gamma \bar{Y}_2 A_2 - F_{est} = \frac{\gamma}{g} Q (V_2 - V_1)$	Ecuación 1
--	-------------------

Aplicando el principio de conservación de la masa

$V_1 = \frac{Q}{A_1} \quad V_2 = \frac{Q}{A_2}$	Ecuación 2
---	-------------------



$\bar{Y}_1 A_1 - \bar{Y}_2 A_2 - \frac{F_{est}}{\gamma} = \frac{Q^2}{g A_2} - \frac{Q^2}{g A_1}$	Ecuación 3
--	-------------------



Sí se define el momento como:

$M = \bar{Y} A + \frac{Q^2}{g A}$	Ecuación 4
-----------------------------------	-------------------

Entonces la F_{est} es igual a:

$F_{est} = M_1 - M_2$	Ecuación 5
-----------------------	-------------------

Las profundidades secuentes y_1 y y_2 Se muestran sobre la curva de energía específica figura 1. Ellas diferencian de las profundidades alternas o conjugadas y_1' y y_2' las cuales son las dos profundidades posibles para la misma energía específica.

La energía específica E_1 Es más grande que la energía específica E_2 en una cantidad igual a la pérdida de energía ΔE que ocurre en el resalto hidráulico y la profundidad y_1 ' es la profundidad se cuente de y_2 '. Si el resalto hidráulico ocurre en un canal sin ningún tipo de transición se tiene:

$\sum F_{ext} = 0 \Rightarrow M_1 - M_2$	Ecuación 6
--	-------------------

Si se supone un **canal rectangular**, entonces:

$\bar{Y}_1 A_1 + \frac{Q^2}{g A_1} = \bar{Y}_2 A_2 + \frac{Q^2}{g A_2}$	Ecuación 7
---	-------------------

Reemplazó las siguientes relaciones:

$\bar{Y} = \frac{y}{2} \quad A = b y \quad Q = V A \quad V = \frac{q}{y}$	Ecuación 8
---	-------------------

Se tiene:

$\frac{y_1^2}{2} - \frac{y_2^2}{2} = \frac{q^2}{g y_2} - \frac{q^2}{g y_1}$	Ecuación 9
---	-------------------

$\frac{(y_1 - y_2)(y_2 + y_1)}{2} = \frac{q^2}{g} \left(\frac{1}{y_2} - \frac{1}{y_1} \right)$	Ecuación 10
---	--------------------

$\frac{(y_2 + y_1)}{2} = \frac{q^2}{g} \left(\frac{1}{y_1 y_2} \right)$	Ecuación 11
--	--------------------

El número de Froude para un canal rectangular está definido como:

$F_{r1}^2 = \frac{q^2}{g y_1^3}$	Ecuación 12
----------------------------------	--------------------

$\left(\frac{y_2}{y_1} \right)^2 + \left(\frac{y_2}{y_1} \right) - 2 F_{r1} = 0$	Ecuación 13
--	--------------------

Donde:

y_1 : Nivel del agua antes del resalto

y_2 : Nivel de agua después del resalto

F_{r1} : Número de Froude previo al resalto.

Aplicaciones prácticas del resalto hidráulico hay muchas entre las cuales están las siguientes:

Es utilizado para disipar energía en el agua que escurre sobre empresas, diques y otras estructuras hidráulicas y así prevenir socavación aguas abajo de las estructuras

Para recuperar altura o elevar el nivel para irrigación u otros propósitos de distribución de agua.

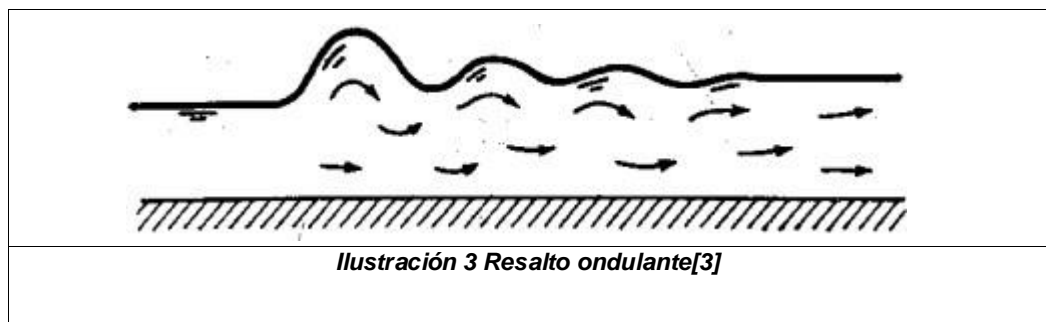
Para indicar condiciones especiales de flujo tales como la existencia de flujo supercrítico o la presencia de una sección de control, siempre que se pueda ubicar una estación de medida.[3]

1.1. Tipos de Resalto

De acuerdo con la clasificación de tipos de resaltos hidráulicos del U.S. Bureau of Reclamation, esto se clasifican convenientemente de acuerdo con el número de Froude antes del resalto (F_{r1}) figura 3 cómo sigue:

Para $F_{r1} = 1$ el flujo es crítico, aquí no se puede formar ningún resalto hidráulico (energía mínima).

- Para $1 < F_{r1} < 1.7$ la superficie del agua muestra ondulaciones, y el salto es llamado salto ondular.



- Para $1.7 < F_{r1} < 2.5$, hay una serie de pequeñas ondulaciones sobre la superficie del salto, pero la superficie del agua, aguas abajo, permanece lisa. La velocidad a lo largo es ligeramente uniforme, y la pérdida de energía es baja, este salto se puede llamar un salto débil.



- Para $2.5 < F_{r1} < 4.5$, hay un chorro oscilante del fondo de la superficie y atrás sin periodicidad. Cada oscilación produce una gran onda de periodo

irregular, la cual, comúnmente en canales puede variar en una longitud muy larga produciendo daño ilimitado a bancos de tierra y piedras sueltas, este salto se llama salto oscilante



- Para $4.5 < F_{r1} < 9$, la extremidad aguas abajo de la ondulación de la superficie y el punto en el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo, ocurre prácticamente en la misma sección vertical. La acción y la posición de este salto son menos sensibles a la variación en la profundidad aguas abajo. La disipación de energía varía entre 45% y 70%. Este es el salto permanente.

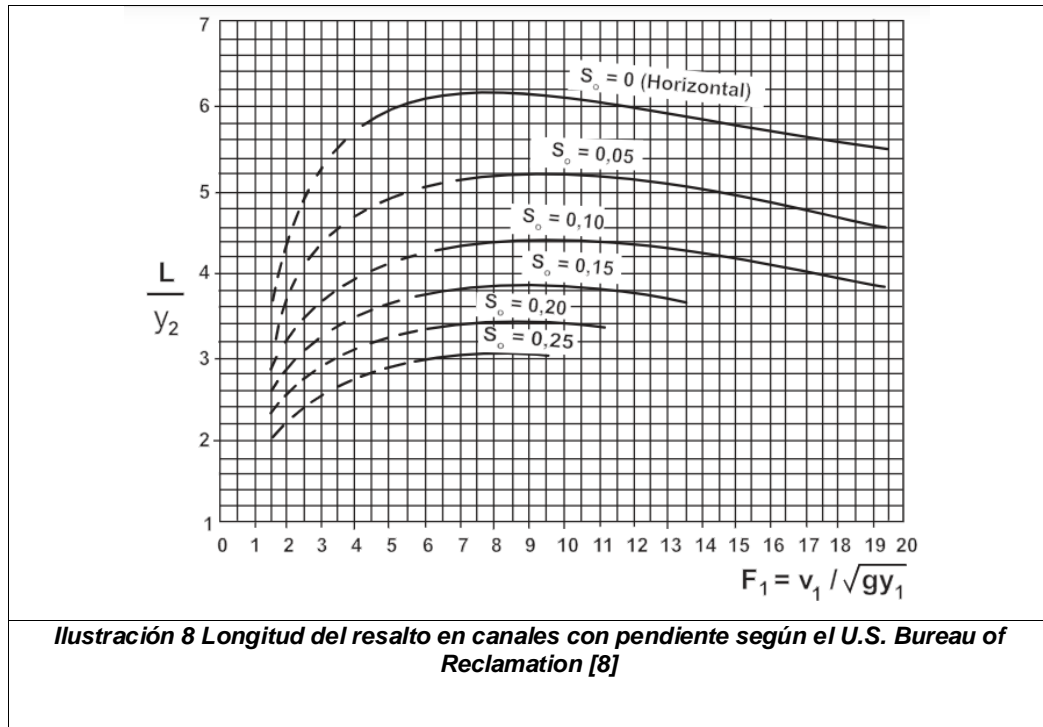


- Para $F_{r1} \geq 9.0$, el chorro de alta velocidad agarra a golpes intermitentes de agua rodando hacia abajo de la cara del frente del resalto, generando ondas aguas abajo, y puede prevalecer una superficie áspera, la acción del salto es áspera, pero efectiva, ya que la disipación puede alcanzar un 85%. Este es un salto fuerte.



1.2. Longitud del Resalto

La longitud del salto se puede definir como la distancia medida desde la cara del frente del salto hasta un punto sobre la superficie inmediata aguas abajo de la turbulencia. Esta longitud no puede ser determinada fácilmente por la teoría, pero ha sido investigada experimentalmente. A continuación, en la Ilustración 8 se presenta una gráfica útil para el cálculo aproximado de esta longitud.

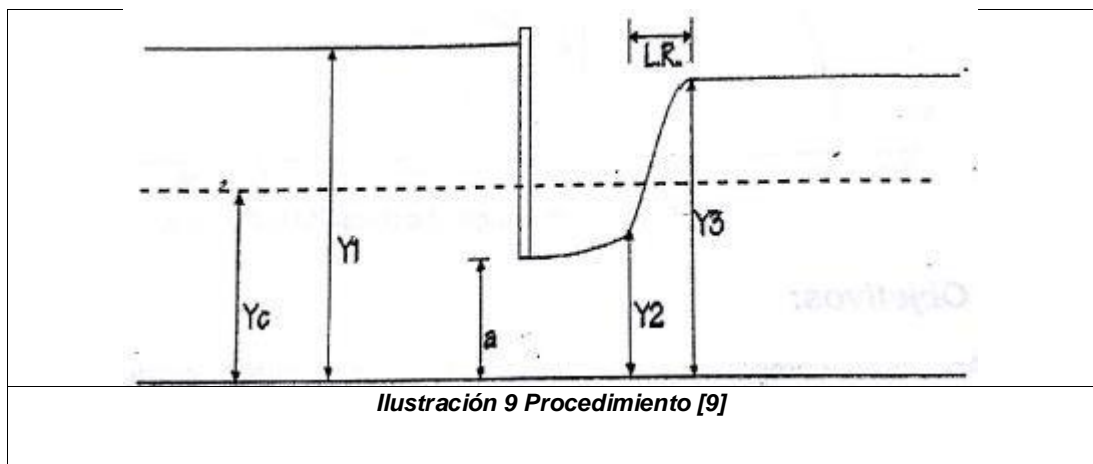


2. Objetivos:

- 1) Analizar el comportamiento del resalto hidráulico generado aguas abajo de una compuerta, verificando su coherencia con los fundamentos teóricos y los principios de cantidad de movimiento.
- 2) Comprobar la ecuación de cantidad de movimiento aplicada al resalto hidráulico y evaluar su correspondencia con el fenómeno observado
- 3) Clasificar los tipos de resalto según el número de Froude, comparando sus características teóricas con el comportamiento real del flujo, e identificar posibles fuentes de error en la práctica y estrategias para minimizarlos.

3. Procedimiento.

- Medir el caudal usando el método volumétrico.
- Poner en funcionamiento las bombas del sistema para generar el flujo de agua en el canal y esperar a que el caudal se estabilice, asegurando una cabeza de presión constante que permita un flujo uniforme.
- Ajustar la compuerta a una altura “W” hasta identificar la formación de un resalto no ahogado.
- Registrar el caudal indicado por el medidor.
- Medir las alturas antes y después del resalto (Y_2 y Y_3), la longitud del resalto (L_r) y el ancho del canal “b”, según se muestra en la figura 9.
- Repetir las mediciones para distintos valores de “W”.
- Nota: verificar que la lectura del caudal se mantenga constante durante todo el ensayo.



4. Equipo utilizado b

- Sistema de bombas hidráulicas.
- Canal rectangular de pendiente suave provisto de compuerta graduable.
Regla, flexómetro o metro.

5. Datos

W [cm]	Y_2 [m]	Y_3 [m]	LRH [m]
5	4.5	13	82
4	3.5	11.8	79
3.6	2.9	15	106

Tabla 1 Datos

canal [m]: 0.412 Q [L/s]: 27.28 26.90 26.50

6. Resultados

w [cm]	y2 [cm]	y3 [cm]	L.R.H [cm]	V2 [m/s]	V3 [m/s]	Fr2	Fr3	Tipo Resalto
5	4,5	13	82	1,4506	0,5021	2,1832	0,4446	Debil
4	3,5	11,8	79	1,8650	0,5532	3,1828	0,5142	Oscilante
3,6	2,9	15	106	2,2509	0,4352	4,2200	0,3587	Oscilante

Tabla 2 Resultados sección 1

L.R.H [cm]	%E1	y3 teo [cm]	%E2	E2 [m]	E3 [m]	%EF	M2 [m]	M3 [m]	%E3
60,45	35,65%	11,825	9,94%	0,152	0,143	6,58%	4,39,E-03	4,86,E-03	10,56%
63,13	25,14%	14,101	16,32%	0,212	0,134	37,07%	5,37,E-03	4,38,E-03	18,27%
87,75	20,80%	15,918	5,77%	0,287	0,160	44,42%	6,34,E-03	5,83,E-03	8,13%

Tabla 3 Resultados sección 2

7. Cálculo Tipo:

- Cálculo de Qprom

$$Q = \frac{Q1 + Q2 + Q3}{3} = \frac{27,28 + 26,90 + 26,50}{3} = 26,89 \text{ [L/s]}$$

- Cálculo de Velocidad (V2 y V3)

$$V2 = \frac{26,89 * 10^{-3}}{0,412 * 0,035} = 1,8650 \text{ [m/s]}$$

$$V3 = \frac{26,89 * 10^{-3}}{0,412 * 0,118} = 0,5532 \text{ [m/s]}$$

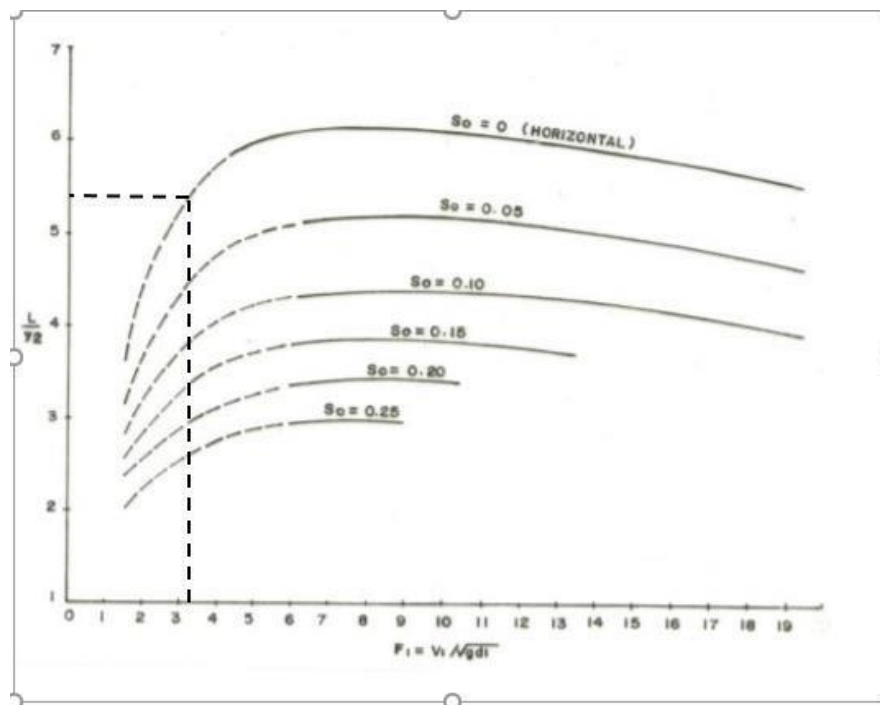
- Cálculo del Número de Froude

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{9,81 * y}}$$

$$Fr1 = \frac{1,8650}{\sqrt{9,81 * 0,035}} = 3,1828$$

$$Fr2 = \frac{\sqrt{9,81 * 0,035V}}{\sqrt{9,81 * 0,118}} = 0,5142$$

- El número de Froude se encuentra entre $2,5 < Fr1 \leq 4,5$, por tanto, se considera oscilante.
- Longitud teórica del resalto, con el valor calculado de $Fr2$ se lleva a la gráfica 8, y se sustrae el valor de la ordenada.



$$\frac{L}{y3} = 5,35$$

$$L.R.H\ teo = 5,35(11,8) = 63,13[cm]$$

- % Error L.R.

$$\%Error\ L.R = \frac{|Lteo - Lexp|}{Lteo} = \frac{|63,13 - 79|}{63,13}$$

$$\% Error\ L.R. = 25,14\%$$

- Cálculo de la profundidad seciente:

$$y_{3teo} = \left(\frac{\sqrt{1 + 8Fr^2} - 1}{2} \right) * y_2$$

$$y_{3teo} = \left(\left(\frac{\sqrt{1 + 8 * 3,1828^2} - 1}{2} \right) * 3,5 * 10^{-2} \right) * 10^2 = 14,101 [cm]$$

- Porcentaje de error de y_3

$$\%E_2 = \frac{|y_{3teo} - y_3|}{y_{3teo}} = \frac{|14,101 - 11,8|}{14,101} = 16,32\%$$

- Energía en 2 y 3

$$E = y + \frac{V^2}{2 * g}$$

$$E_2 = 0,035 + \frac{1,8650^2}{2 * 9,81} = 0,212 [m]$$

$$E_3 = 0,118 + \frac{0,5532^2}{2 * 9,81} = 0,134 [m]$$

- % Ef (Eficiencia)

$$\%EF = \frac{\Delta E}{E_2} = \frac{E_3 - E_2}{E_2} * 100$$

$$\%EF = \frac{|0,134 - 0,212|}{0,134} = 37,07\%$$

- Cálculo del momento en 2 y 3

$$M = \frac{y^2 * b}{2} + \frac{Q^2}{g * b * y}$$

$$M_2 = \frac{0,035^2 * 0,412}{2} + \frac{(26,89 * 10^{-3})^2}{9,81 * 0,412 * 0,035} = 5,37E - 3 [m^3]$$

$$M_3 = \frac{0,118^2 * 0,412}{2} + \frac{(26,89 * 10^{-3})^2}{9,81 * 0,412 * 0,118} = 4,38E - 3 [m^3]$$

- % Error en momentos

$$\%E3 = \frac{|M2 - M3|}{M2} \times 100 = 18,27\%$$

8. Resultados y preguntas.

- 1) ¿Qué posibles fuentes de error se evidenciaron durante las mediciones y cómo pudieron influir en la observación y caracterización del resalto hidráulico?

9. Observaciones y conclusiones

- 1) ¿Cómo afecta la variación de la abertura de la compuerta al régimen de flujo aguas arriba y aguas abajo, y de qué manera se refleja este cambio en los valores de los números de Froude?
- 2) ¿En qué medida los resultados obtenidos experimentalmente validan la teoría de la fuerza específica aplicada al resalto hidráulico generado en el canal?

10. Referencias Bibliográficas

M. V. Béjar, *Hidráulica de canales*. Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2008.

J. H. C. R, *Hidráulica de canales: fundamentos*. Universidad Eafit, 2020.

G. E. GAVILAN LEON, *GUIA DE LABORATORIO DE HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS*. Bucaramanga: UISEscuela de Ingenieria Civil, 2001.

V. T. CHOW, *HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS*. Santafe de Bogota:

McGraw-Hill, 2000.

V. T. CHOW, *HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS*. Santafe de Bogota:

McGraw-Hill, 1954.