

MANUAL DE LABORATORIO HIDRÁULICA

PRÁCTICA 4 RESALTO HIDRÁULICO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL
DE SANTANDER

ESCUELA DE INGENIERIA
CIVIL



Universidad
Industrial de
Santander



Contenido

| | |
|--|----|
| Laboratorio 4. Resalto hidráulico | 4 |
| 1. Marco Teórico | 4 |
| 1.1. Tipos de Resalto | 7 |
| 1.2. Longitud del Resalto: | 9 |
| 2. Objetivos: | 9 |
| 3. Procedimiento: | 10 |
| 4. Equipo utilizado | 10 |
| 5. Datos | 11 |
| 6. Cálculo Tipo: | 11 |
| 7. Observaciones y Conclusiones. | 14 |
| 8. Resultados | 14 |
| 9. Referencias Bibliográficas | 14 |
| | |
| Ecuación 1 | 4 |
| Ecuación 2 | 4 |
| Ecuación 3 | 5 |
| Ecuación 4 | 5 |
| Ecuación 5 | 5 |
| Ecuación 6 | 6 |
| Ecuación 7 | 6 |
| Ecuación 8 | 6 |
| Ecuación 9 | 6 |
| Ecuación 10 | 6 |
| Ecuación 11 | 6 |
| Ecuación 12 | 6 |
| Ecuación 13 | 6 |
| | |
| Ilustración 1:Curva de fuerza específica y energía específica en el resalto hidráulico[1]5 | |
| Ilustración 2:análisis del resalto hidráulico[2]..... | 5 |
| Ilustración 3: Resalto ondulante[3] | 7 |
| Ilustración 4: Resalto débil [3] | 7 |
| Ilustración 5: Resalto oscilante[3] | 8 |
| Ilustración 6: Resalto estable[3] | 8 |
| Ilustración 7: Resalto fuerte [3]..... | 8 |
| Ilustración 8: Longitud del resalto en canales con pendiente según el U.S. Bureau of Reclamation [1] | 9 |
| Ilustración 9: Procedimiento [4]..... | 10 |

| | |
|-------------------------------------|----|
| Tabla 1: Datos..... | 11 |
| Tabla 2: Resultados sección 1 | 14 |
| Tabla 3: Resultados sección 2 | 14 |

Laboratorio 4. Resalto hidráulico

1. Marco Teórico

El cambio de la profundidad del flujo de un nivel subcrítico a un nivel supercrítico 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.

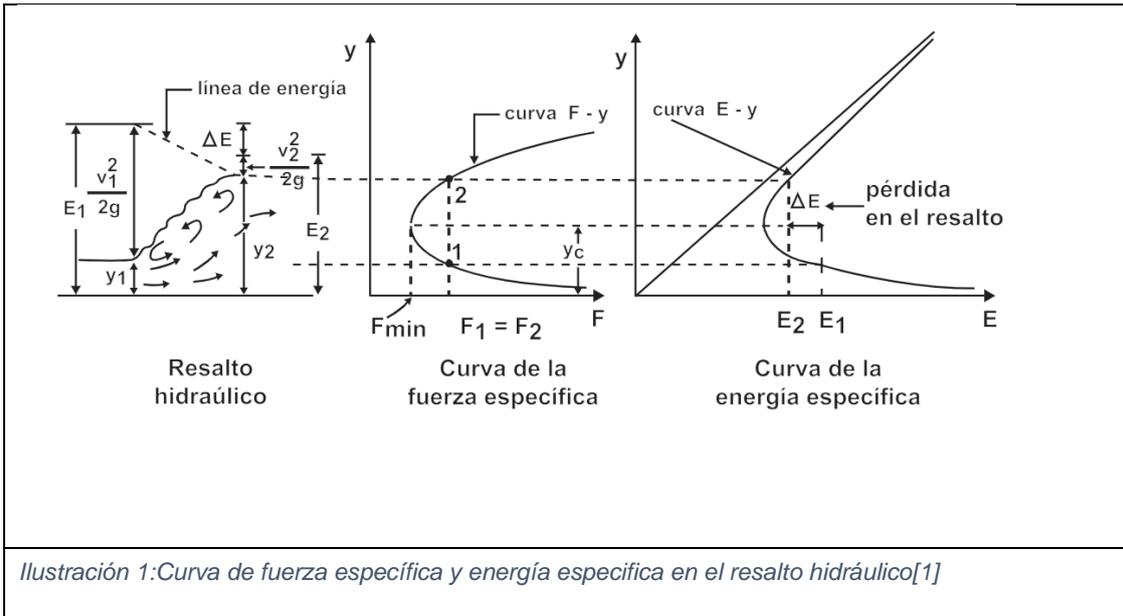
Cuando el resalto es alto, es decir, cuando el cambio en profundidad es grande, el resalto se llama directo. El resalto directo incluye una cantidad grande de pérdidas de energía a través de la disipación en el cuerpo turbulento de agua dentro del salto. Consecuentemente, la energía en el flujo después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

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

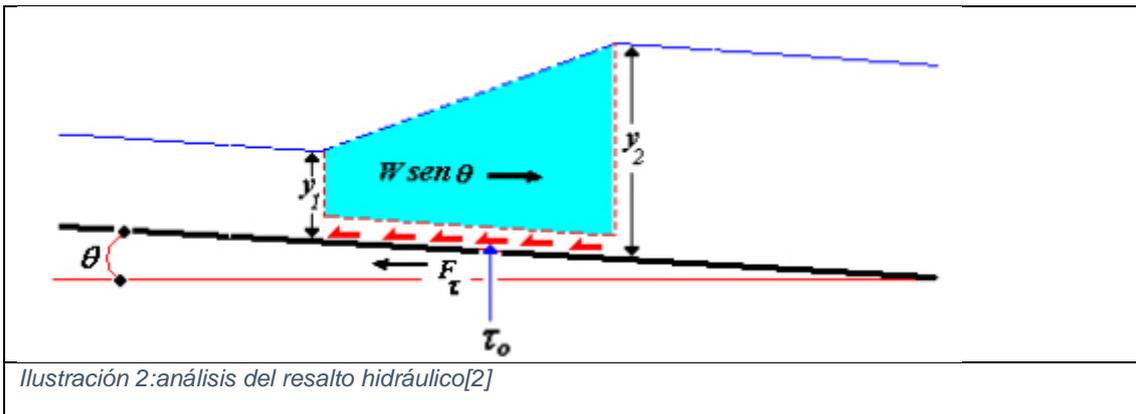
| | |
|--|-------------------|
| $\gamma \bar{Y}_1 A_1 - \gamma \bar{Y}_2 A_2 - F_{est} = \frac{\gamma}{g} Q (V_2 - V_1)$ | <i>Ecuación 1</i> |
|--|-------------------|

Aplicando el principio de conservación de la masa

| | |
|---|-------------------|
| $V_1 = \frac{Q}{A_1} \quad V_2 = \frac{Q}{A_2}$ | <i>Ecuación 2</i> |
|---|-------------------|



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



Sí Se define el momento como:

| | |
|---------------------------------|------------|
| $M = \bar{Y}A + \frac{Q^2}{gA}$ | 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:

| | |
|--|-------------------|
| $\sum F_{ext} = 0 \Rightarrow M_1 - M_2$ | <i>Ecuación 6</i> |
|--|-------------------|

Si se supone un canal rectangular, entonces:

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

Reemplazó las siguientes relaciones:

| | |
|---|-------------------|
| $\bar{Y} = \frac{y}{2} \quad A = b y \quad Q = V A \quad V = \frac{q}{y}$ | <i>Ecuación 8</i> |
|---|-------------------|

Se tiene:

| | |
|---|-------------------|
| $\frac{y_1^2}{2} - \frac{y_2^2}{2} = \frac{q^2}{g y_2} - \frac{q^2}{g y_1}$ | <i>Ecuación 9</i> |
|---|-------------------|

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

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

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

| | |
|----------------------------------|--------------------|
| $F_{r1}^2 = \frac{q^2}{g y_1^3}$ | <i>Ecuación 12</i> |
|----------------------------------|--------------------|

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

Donde:

y_1 : Nivel del agua antes del resalto

y_2 : Nivel de agua después del resalto

F_{r1} : Número de Froude antes del resalto.

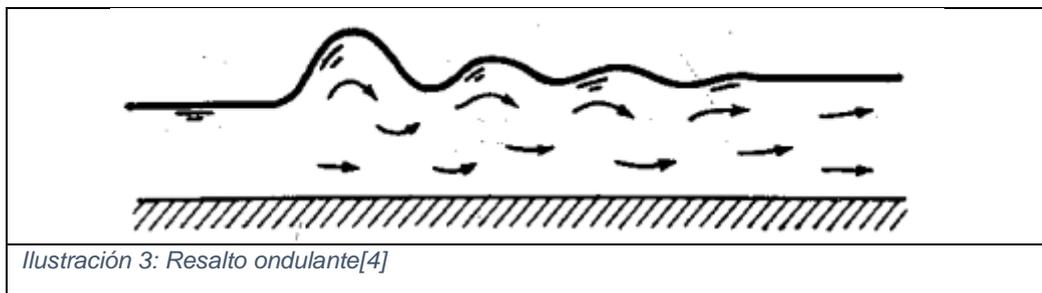
Aplicaciones prácticas del resalto hidráulico hay muchas entre las cuales están las siguientes:

- Es utilizado para disipar energía en el agua que escurre sobre empalizadas, 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 del flujo tales como la existencia del flujo supercrítico o la presencia de una sección de control siempre que se pueda ubicar una estación de medida.[3]

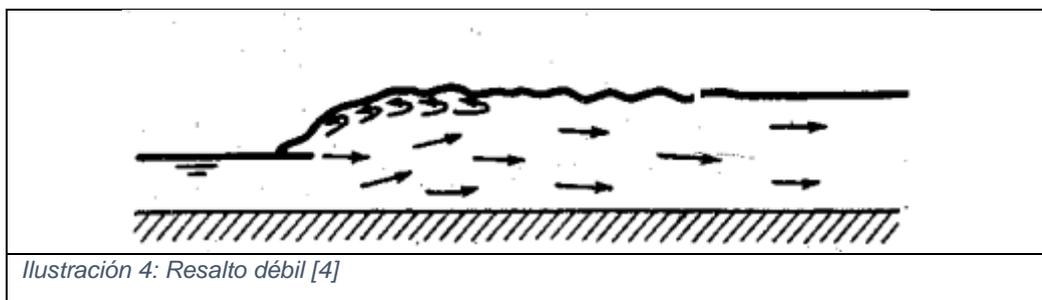
1.1. Tipos de Resalto

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

- 1) Para $F_{r1} = 1$ el flujo es crítico, aquí no se puede formar ningún resalto hidráulico (energía mínima).
- 2) Para $1 < F_{r1} < 1.7$ la superficie del agua muestra ondulaciones, y el salto es llamado salto ondular.

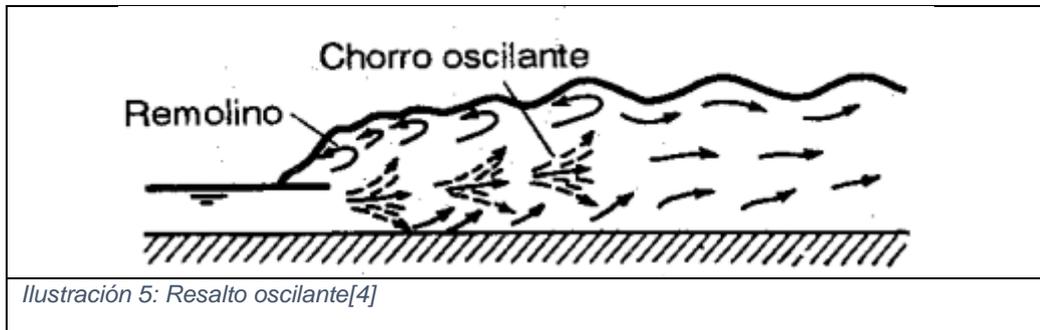


- 3) Para $1.7 < F_{r1} < 2.5$, hay una serie de pequeñas ondulaciones sobre la superficie del salto, pero la superficie del agua, aguas abajo, permanece lisa. La velocidad a lo largo es ligeramente uniforme, y la pérdida de energía es baja, este salto se puede llamar un salto débil.

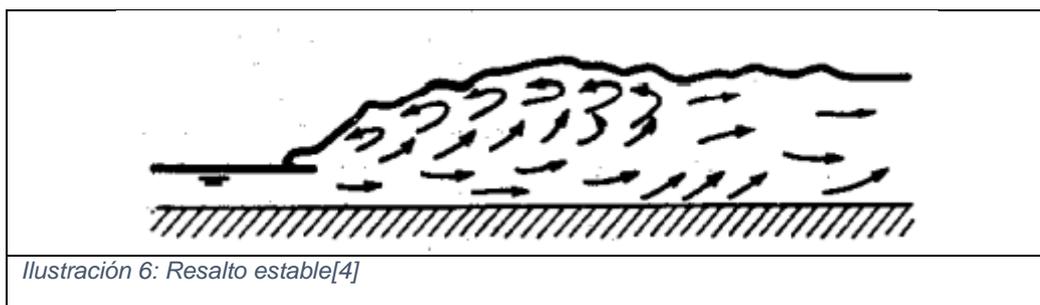


- 4) Para $2.5 < F_{r1} < 4.5$, hay un chorro oscilante del fondo de la superficie y atrás sin periodicidad. Cada oscilación produce una gran onda de periodo

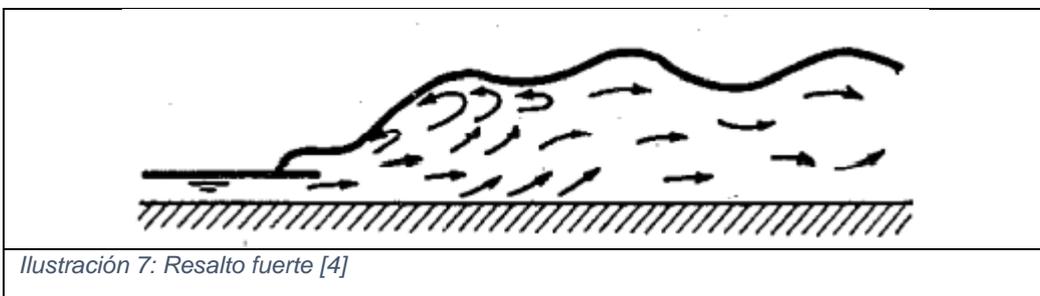
irregular, la cual, comúnmente en canales puede variar en una longitud muy larga produciendo daño ilimitado a bancos de tierra y piedras sueltas, este salto se llama salto oscilante



- 5) 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.

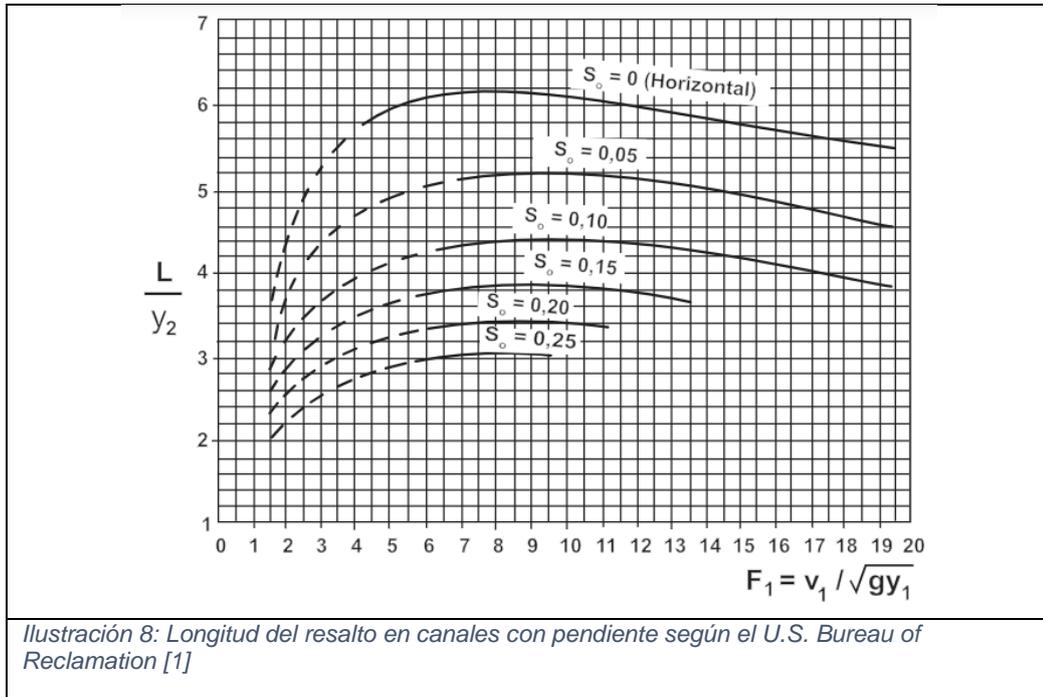


- 6) Para $F_{r1} \geq 9.0$, el chorro de alta velocidad agarra a golpes intermitentes de agua rodando hacia abajo de la cara del frente del resalto, generando ondas aguas abajo, y puede prevalecer una superficie áspera, la acción del salto es áspera, pero efectiva, ya que la disipación puede alcanzar 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 a 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, se presenta una gráfica útil para el cálculo aproximado de esta longitud *figura 8*.



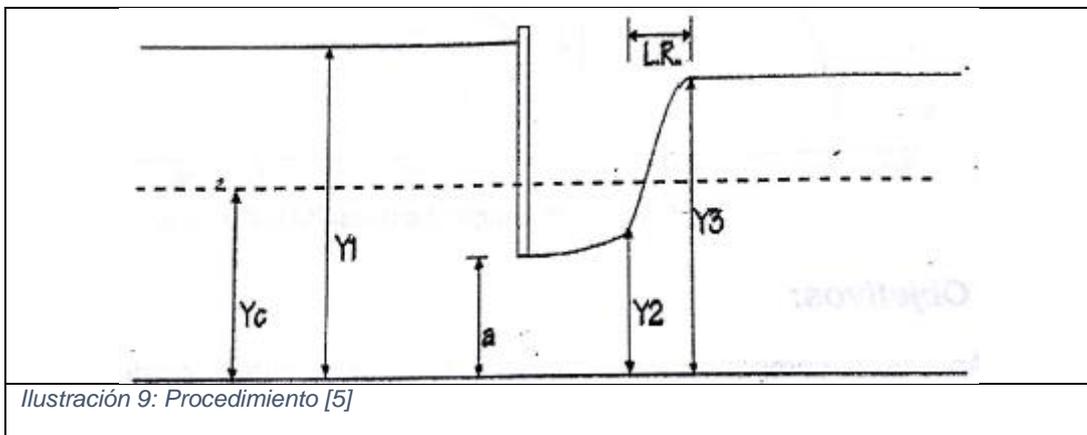
2. Objetivos:

- 1) Analizar el comportamiento del resalto hidráulico que se produce después del paso del agua debajo de una compuerta.
- 2) Comprobar la ecuación de Cantidad de movimiento aplicado en este fenómeno.
- 3) Determinar los diferentes tipos de resalto que se forman de acuerdo con el número de Froude y observar si realmente el comportamiento del agua tiene las características del resalto definido teóricamente.
- 4) Identificar las posibles fuentes de error y establecer la forma de reducirlos

3. Procedimiento:

➤ Parte A

- 1) Encender las bombas del sistema para obtener flujo de agua a través del canal y esperar a que el caudal se estabilice. Hay que tener en cuenta que para esta experiencia se requiere mantener una cabeza de presión constante para obtener flujo uniforme.
- 2) Llevar la compuerta a una altura "W" hasta que se observe un resalto no ahogado.
- 3) Tomar la lectura del caudal en el medidor.
- 4) 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" indicadas en la *figura 9*.
- 5) Efectuar estas mediciones para valores distintos de "W".
- 6) Nota: observar que la lectura del caudal permanezca constante durante el ensayo



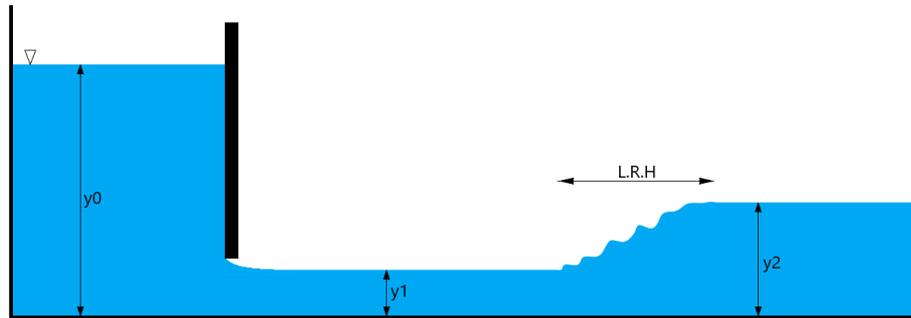
➤ Parte B

- 1) Llevar la compuerta hasta una altura "W", la cual permanecerá constante y medir su abertura.
- 2) Cambiar la abertura de la válvula reguladora de flujo del canal, con el fin de variar el caudal observado que no se presente un resalto ahogado.
- 3) Tomar la lectura del caudal en el medidor de flujo.
- 4) Medir la altura antes y después del resalto Y_2 y Y_3 .
- 5) repetir los pasos dos al cuatro para valores diferentes de caudal.

4. Equipo utilizado

- Sistema de bombas hidráulicas.
- Canal rectangular dependiente suave provisto de compuerta graduable.
- Medidor electromagnético de caudal.
- Metro o regla.

5. Datos



| W [cm] | Y1 [m] | Y2 [m] | LRH [m] |
|--------|--------|--------|---------|
| 5 | 4.5 | 13 | 82 |
| 4 | 3.5 | 11.8 | 79 |
| 3.6 | 2.9 | 15 | 106 |

Tabla 1: Datos

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

6. Cálculo Tipo:

- Cálculo de Q_{prom}

$$Q = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} = \frac{27,28 + 26,90 + 26,50}{3} = 26,89 \left[\frac{L}{s} \right]$$

- Cálculo de Velocidad (V_2 y V_3)

$$V_2 = \frac{26,89 * 10^{-3}}{0,412 * 0,035} = 1,8650 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$V_3 = \frac{26,89 * 10^{-3}}{0,412 * 0,118} = 0,5532 \left[\frac{m}{s} \right]$$

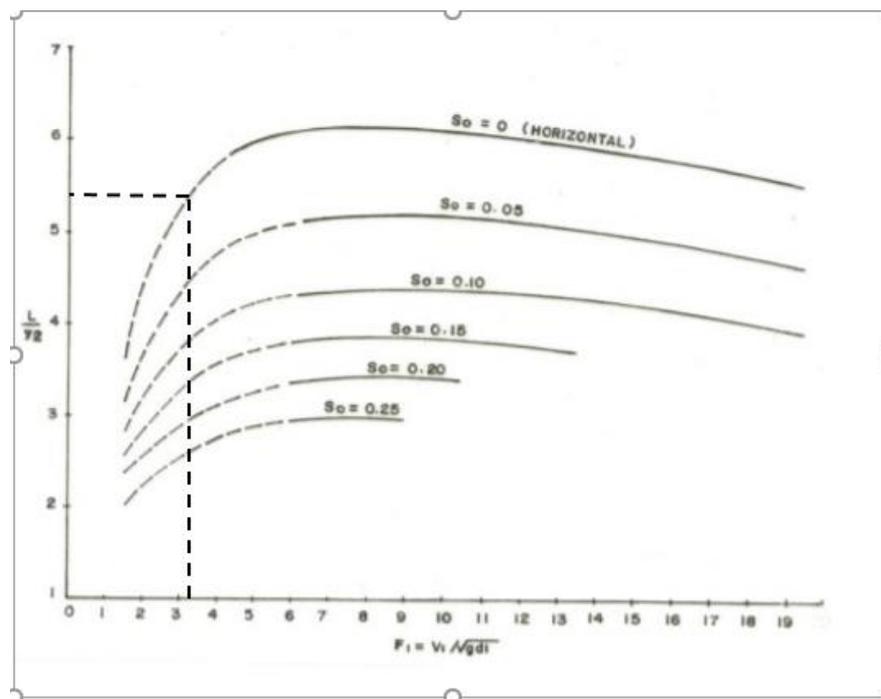
- Cálculo Número de Froude

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

$$Fr_1 = \frac{1,8650}{\sqrt{9,81 * 0,035}} = 3,1828$$

$$Fr_2 = \frac{V}{\sqrt{9,81 * 0,118}} = 0,5142$$

- El número de Froude se encuentre entre $2,5 < Fr_1 \leq 4,5$, por tanto, se considera oscilante.
- Longitud teórica del resalto, con el valor calculado de Fr_2 se lleva a la gráfica 8, y se sustrae el valor de la ordenada.



$$\frac{L}{y_3} = 5,35$$

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

- % Error L.R.

$$\%Error\ L.R = \frac{|L_{teo} - L_{exp}|}{L_{teo}} = \frac{|63,13 - 79|}{63,13}$$

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

- Cálculo de la profundidad secunete:

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

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

- 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

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

7. Observaciones y Conclusiones.

Porque el valor de la longitud del resalto no medido en el laboratorio no es igual al obtenido en la gráfica (no incluir en este análisis del factor de error de medición)

Investigue acerca de los usos del resalto hidráulico en ingeniería.

8. 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

9. Referencias Bibliográficas

- [1] M. V. Béjar, *Hidráulica de canales*. Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2008.
- [2] J. H. C. R., *Hidráulica de canales: fundamentos*. Universidad Eafit, 2020.
- [3] G. E. GAVILAN LEON, *GUIA DE LABORATORIO DE HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS*. Bucaramanga: UISEscuela de Ingenieria Civil, 2001.
- [4] V. T. CHOW, *HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS*. Santafe de Bogota: McGraw-Hill, 2000.
- [5] V. T. CHOW, *HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS*. Santafe de Bogota: McGraw-Hill, 1954.