

GUÍAS DE LABORATORIO HIDRÁULICA DE CANALES



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE
COLOMBIA



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
Tunja, 2013

Elaborado por:
ING. JOSÉ JULIÁN VILLATE CORREDOR
MONITOR: ANA CRISTINA MORENO BECERRA

LABORATORIO N° 1 ENERGÍA ESPECÍFICA – FUERZA ESPECÍFICA

1.1. OBJETIVOS.

- Clasificar el flujo de acuerdo al comportamiento del sistema y sus profundidades registradas.
- Establecer la profundidad crítica para una energía específica mínima.
- Determinar las gráficas de energía específica y fuerza específica.
- Establecer la fuerza específica mínima para un determinado caudal.
- Determinar el tipo de flujo por medio del cálculo del número de Froude
- Calcular la velocidad del flujo a lo largo del canal.

1.2. EQUIPOS A UTILIZAR.

- ✓ Canal Rectangular
- ✓ Vertedero de pared gruesa.
- ✓ Limnómetro.
- ✓ Cronometro.
- ✓ Balde.
- ✓ Metro.

1.3. PROCEDIMIENTO.

- Disponga el canal de pendiente variable en posición horizontal.
- Adaptar el vertedero de pared gruesa y la cuadrícula de mediciones en la ranuradestinada para ésta, la cual se encuentra en la parte media del canal.
- Graduar por medio de las válvulas el caudal descargado procurando empezar de un valorbajo de éste e ir ascendiendo a medida que avanza la prueba.
- Para un mismo caudal, tómese diferentes lecturas de Limnómetro; para esto varíe la pendiente del canal hasta un valor alto y conserve el caudal inicial.
- Tomar el valor del caudal en un determinado instante de tiempo, para conocer ladescarga.
- Repetir la prueba para diferentes niveles de lámina de agua, variando porlo menos 3 veces la pendiente del canal.

1.4. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

La **Energía Específica** en una sección de canal es definida como la energía por unidad de peso de agua en cualquier sección del canal, medida con respecto al fondo de éste.

El concepto de energía específica se deriva de la ecuación de Bernoulli; cuando la distribución de presiones en la sección es hidrostática, la carga piezométrica $Z + \frac{P}{\gamma}$ es constante y la carga de presión $\frac{P}{\gamma} = y$, siendo Y el tirante del flujo en el canal.

De esta forma la carga hidráulica total en la sección referida al fondo del canal (tomando $z=0$ en el fondo del canal) es lo que se define como energía específica

$$E = \frac{P}{\gamma} + \alpha \frac{V^2}{2g}$$

Para canales de pendiente suave la energía específica resulta: $E = Y + \alpha \frac{V^2}{2g}$

Despreciando los efectos de no-uniformidad (coeficiente de Coriolis $\alpha = 1$) entonces:

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

La expresión de la energía específica en función del caudal (Q) es: $E = Y + \frac{Q^2}{2g \cdot A^2}$

Para este caso se tiene un canal rectangular ($A=b \cdot Y$), pendiente suave y con distribución uniforme de velocidad, la ecuación quedaría: $E = Y + \frac{Q^2}{2g \cdot b^2 \cdot Y^2}$

Si la energía específica es mínima para un gasto determinado, la profundidad es la profundidad-crítica, o este último es el tirante que existe cuando la descarga es máxima para una energía específica determinada.

$$Y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g}} \quad \text{Siendo } E_{min} = \frac{3}{2} Y_c$$

Al graficar el tirante contra la energía específica resulta una curva con dos asíntotas y un punto mínimo. En el punto mínimo sucede para un nivel de energía dado existe un único tirante Y llamado Tirante Crítico. La rama superior, con asíntota que se aproxima a la recta a 45 grados, posee tirantes mayores al crítico y es llamada Subcrítica; y la rama inferior con asíntota horizontal que se aproxima al eje de la energía específica y con tirantes menores al tirante crítico es llamada Supercrítica. (Ver Figura N° 1).

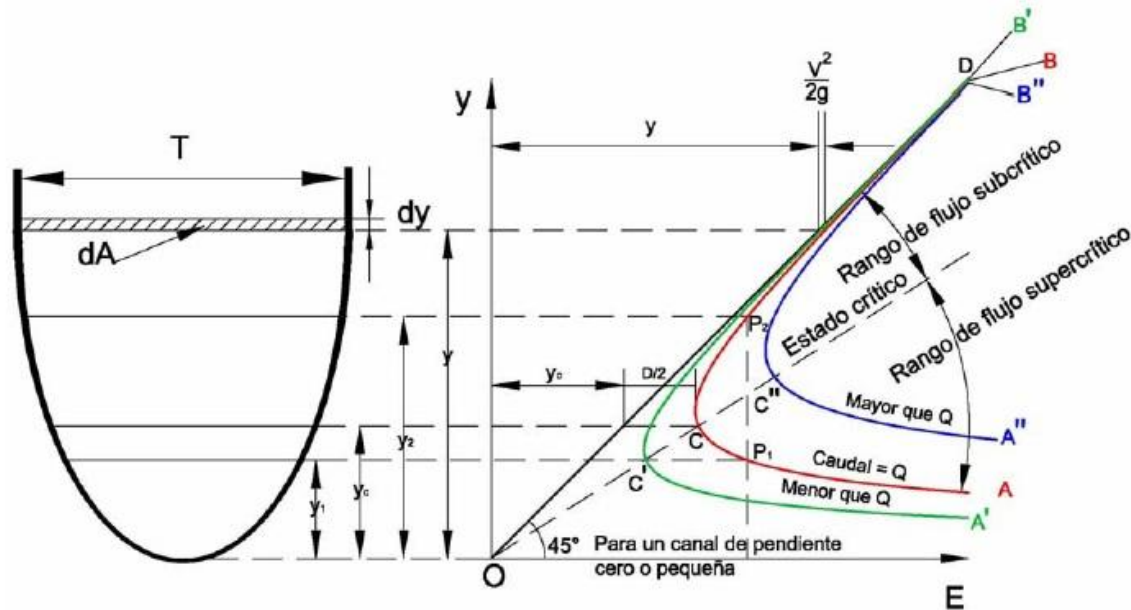


Figura 1 Curvas de energía específica para diferentes tirantes y un canal de características

Al aplicar el principio de momentum a un tramo horizontal corto del canal, e ignorando fuerzas externas de fricción y peso del agua, se puede expresar la ecuación de momentum como:

$$\frac{Q^2}{gA_1} + z_1 A_1 = \frac{Q^2}{gA_2} + z_2 A_2$$

Como los dos lados de la ecuación son análogos, se pueden expresar para cualquier sección del canal como:

$$F = \frac{Q^2}{gA} + z * A \text{ Donde } Z \text{ es la distancia entre la superficie libre y el centroide.}$$

El primer término de la función anterior corresponde al momentum del flujo que pasa a través de la sección del canal por unidad de tiempo y por unidad de peso del agua; el segundo término es la fuerza por unidad de peso del agua, como ambos términos son fuerza por unidad de peso del agua, su suma se denomina **Fuerza Específica**. Al graficar profundidad contra fuerza específica se obtiene una curva con dos ramas AC y BC, la rama AC que se aproxima asintóticamente al eje horizontal hacia la derecha y la rama BC aumenta hacia arriba y se extiende indefinidamente hacia la derecha, en el punto C de la curva las dos profundidades se convierten en una y la fuerza específica es mínima (Ver Figura 2)

1.6. FORMATO DE TOMA DE DATOS.

Firma del laboratorista: _____ Fecha: ____/____/____

NOMBRES	CÓDIGOS	FIRMAS
_____	_____	_____
_____	_____	_____
_____	_____	_____

Volumen: 111 Litros

Ancho del Canal: 28.2 cm

CAUDAL 1 (Altura Lámina de Agua 3 cm)												
Pendiente	LECTURA LIMIMÉTRICA (cm)									TIEMPO (segundos)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	T1	T2	T3
0												
1												
2												
3												
Distancia X(cm)												
L. fondo (cm)												

CAUDAL 2 (Altura Lámina de Agua 6 cm)												
Pendiente	LECTURA LIMIMÉTRICA (cm)									TIEMPO (segundos)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	T1	T2	T3
0												
1												
2												
3												
Distancia X(cm)												
L. fondo (cm)												

CAUDAL 3 (Altura Lámina de Agua 9 cm)												
Pendiente	LECTURA LIMIMÉTRICA (cm)									TIEMPO (segundos)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	T1	T2	T3
0												
1												
2												
3												
Distancia X(cm)												
L. fondo (cm)												

1.7. FORMATO DE CÁLCULOS.

Pendiente	TIRANTE (m)									T _{prom} (sg)	Q (m ³ /s)	q (m ² /s)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
0												
1												
2												
3												
Distancia												
L. fondo (cm)												

Pendiente	ENERGÍA ESPECÍFICA (m)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0									
1									
2									
3									

Pendiente	NUMERO DE FROUDE								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0									
1									
2									
3									

Pendiente	FUERZA ESPECÍFICA (m)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0									
1									
2									
3									

LABORATORIO N° 2 FLUJO UNIFORME.

2.1. OBJETIVOS.

- Determinar experimentalmente el coeficiente de Manning y Chezy, correspondientes a la rugosidad para el canal de pendiente variable del laboratorio.
- Comparar los valores teóricos con los valores experimentales obtenidos del canal del laboratorio.
- Caracterizar el comportamiento del flujo presentado en la práctica, por medio del cálculo de velocidad, pendiente, caudal, etc.
- Establecer los factores de los que depende el cálculo de la rugosidad del canal y su influencia en la práctica.

2.2. EQUIPOS A UTILIZAR.

- ✓ Canal Rectangular
- ✓ Limnímetro.
- ✓ Cronometro.
- ✓ Balde.
- ✓ Metro.

2.3. PROCEDIMIENTO.

- Disponga el canal de pendiente variable en posición horizontal.
- Alimentar el canal con un caudal determinado por medio de la válvula.
- Medir las dimensiones del canal.
- Registrar el tiempo de descarga del caudal.
- Para esta misma pendiente, tómese diferentes lecturas de lámina de agua, variando el caudal que alimenta el canal por medio de la válvula.
- Repetir la prueba para diferentes niveles de lámina de agua (caudales), variando por lo menos 3 veces la pendiente del canal.

2.4. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

Para el diseño y dimensionamiento de las estructuras hidráulicas a superficie libre se han utilizado por muchos años ecuaciones de flujo uniforme, el cual tiene las siguientes características: la profundidad, el área mojada, la velocidad y el caudal en cada sección del canal son constantes; la línea de energía, la superficie de agua y el fondo del canal son paralelos, es decir sus pendientes son iguales (ver Figura 3). Se considera que el

flujo uniforme es solo permanente debido a que el flujo no permanente prácticamente no existe, inclusive el flujo uniforme permanente es raro encontrarlo debido a que en ríos y corrientes en estado natural casi nunca se experimenta una condición estricta de flujo uniforme.

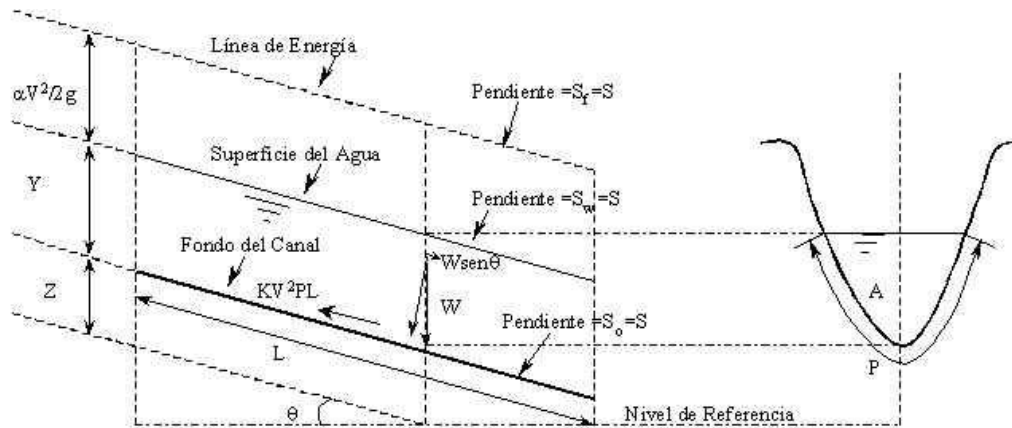


Figura 3 Flujo Uniforme.

El flujo uniforme no puede ocurrir a velocidades altas, esto se debe a que cuando el flujo uniforme alcanza cierta velocidad alta, se vuelve inestable, a velocidades más altas el flujo eventualmente atrapa aire y se volverá inestable. Las ecuaciones que comúnmente son usadas involucran coeficientes como el de Manning (n) y el de Chézy (C); para el cálculo de estos coeficientes es necesario determinar velocidad, pendiente, altura de lámina de agua, entre otros.

La primera ecuación desarrollada en el año de 1769 por el Ingeniero Francés Antoine Chézy se expresó así:

$$V = C * \sqrt{R_H * S}$$

Donde V es la velocidad en pies/s, R_H es el radio hidráulico en pies, S es la pendiente y C es un factor de resistencia al flujo conocido como C de Chézy.

La ecuación de Manning fue desarrollada en 1889 por el Ingeniero Irlandés Robert Manning que se expresa así:

$$V = \frac{1.49}{n} * R_H^{2/3} * S^{1/2}$$

Donde **V** es la velocidad media en pies/s, **R_H** es el radio hidráulico en pies, **S** es la pendiente y **n** es el coeficiente de rugosidad conocido como *n de Manning*.

La ecuación de manning en sistema internacional se expresa como:

$$V = \frac{1}{n} * R_H^{2/3} * S^{1/2}$$

Al comparar la ecuación de Chézy con la Ecuación de Manning, puede verse que:

$$V = \frac{1.49}{n} * R_H^{1/6} \text{ (Ecuación en sistema Ingles)}$$

La determinación de un valor de *n* significa estimar la resistencia al flujo en un canal determinado, para lo cual es necesario establecer cuatro enfoques necesarios e indispensables, los cuales son: a) Determinar los factores que afectan el valor del *n* con el fin de disminuir el nivel de incertidumbre en el cálculo de este; b) Determinar valores estándar para canales de diferente rugosidad; c) Familiarizar la apariencia de algunos canales con rugosidad conocida; y d) Determinar experimentalmente el valor de *n* junto con velocidades y demás factores para el canal existente en la facultad de Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, los cuales se encuentran como objetivos dentro de la práctica a desarrollar.

Para cada pendiente utilizada en la práctica de laboratorio, se calcula un *n* de manning, por lo cual se requiere hallar un *n* compuesto que correspondería a la media aritmética calculado a partir de la siguiente formula:

$$\bar{n} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i$$

NOTA: El tirante se calcula por medio de la diferencia de alturas entre la lámina de agua (limnimétrica) y la lectura del fondo del canal. El caudal se calcula como Volumen (m³) dividido en el tiempo promedio (segundos). El caudal unitario (q) es el cociente entre el caudal que se transporta y el valor de la base del canal.

2.5. CUESTIONARIO.

- Calcular la rugosidad equivalente para el canal de laboratorio y el correspondiente coeficiente de rozamiento de Chézy.
- Realizar una consulta de los factores que afectan en el cálculo y determinación del factor de rugosidad.
- Relacionar la consulta anterior con lo visto en la práctica y establecer que factores afectaron en el cálculo de dicho factor.
- Realizar una comparación de los valores teóricos y los valores experimentales de rugosidad obtenidos en la práctica de laboratorio.
- Establecer el régimen de flujo encontrado en la práctica.
- Determinar los perfiles de flujo por medio de la gráfica de lecturas limnimétricas vs distancias horizontales.

2.6. FORMATO DE TOMA DE DATOS

Firma del laboratorista: _____ Fecha: ____/____/____

NOMBRES	CÓDIGOS	FIRMAS
_____	_____	_____
_____	_____	_____
_____	_____	_____

Volumen: 111 Litros

Ancho del Canal: 28.2 cm

PENDIENTE 1									
CAUDAL	LECTURA LIMNIMÉTRICA (cm)						TIEMPO (segundos)		
	1	2	3	4	5	6	T1	T2	T3
1									
2									
3									
Distancia X(cm)									
L. fondo (cm)									

PENDIENTE 2									
CAUDAL	LECTURA LIMNIMÉTRICA (cm)						TIEMPO (segundos)		
	1	2	3	4	5	6	T1	T2	T3
1									
2									
3									
Distancia X(cm)									
L. fondo (cm)									

PENDIENTE 3									
CAUDAL	LECTURA LIMNIMÉTRICA (cm)						TIEMPO (segundos)		
	1	2	3	4	5	6	T1	T2	T3
1									
2									
3									
Distancia X(cm)									
L. fondo (cm)									

2.7. FORMATO DE CÁLCULOS.

PENDIENTE									
CAUDAL	TIRANTE (m)						T _{prom} (sg)	Q (m ³ /s)	q (m ² /s)
	1	2	3	4	5	6			
1									
2									
3									
4									
Distancia X(cm)									
L. fondo (cm)									

CAUDAL	PENDIENTE								
	Y (prom)	Área (m ²)	Perímetro (m)	RH	R ^{2/3}	CAUDAL (m ³ /s)	Velocidad (m/s)	n (manning)	c (Chezy)
1									
2									
3									

CAUDAL	n (manning)	C (Chézy)	Y _n	Y _c
1				
2				
3				

LABORATORIO N° 3 FLUJO GRADUALMENTE VARIADO.

3.1. OBJETIVOS.

- Analizar el comportamiento del flujo gradualmente variado en un canal abierto.
- Reconocimiento del perfil de flujo formado en la práctica.
- Determinar el tipo de flujo que se presenta por medio de un vertedero rectangular.
- Aplicar el método de Integración Gráfica en la determinación del perfil de flujo.

3.2. EQUIPOS A UTILIZAR.

- ✓ Canal Rectangular
- ✓ Vertedero Rectangular.
- ✓ Limnímetro.
- ✓ Cronometro.
- ✓ Balde.
- ✓ Metro.

3.3. PROCEDIMIENTO.

- Adaptar el vertedero en la parte central del canal.
- Disponer el canal de pendiente variable en una inclinación conocida.
- Alimentar el canal con un caudal determinado por medio de la válvula
- Medir las dimensiones del canal.
- Registrar tiempos de descarga del caudal.
- Verificar que el flujo se encuentre estabilizado para empezar a registrar lecturas de lámina de agua.
- Para esta misma pendiente, tómese diferentes lecturas de lámina de agua, variando el caudal que alimenta el canal por medio de la válvula.

3.4. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

El flujo gradualmente variado constituye una clase especial del flujo permanente no uniforme. En este tipo de flujo el área, la rugosidad, la pendiente del fondo y el radio hidráulico varían muy poco (si es que lo hacen) a lo largo del canal, las líneas de corriente son rectas y prácticamente paralelas.

Cualquiera que sea el valor del caudal, la pendiente y la forma de la sección transversal, éstas desigualdades dividen el canal en tres zonas en las cuales se puede desarrollar el perfil del flujo. Estas zonas son:

Zona 1. Cuando el perfil se encuentra por arriba de la línea superior

Zona 2. Cuando el perfil se encuentra entre las dos líneas

Zona 3. Cuando el perfil se encuentra entre la línea inferior y la plantilla del canal.

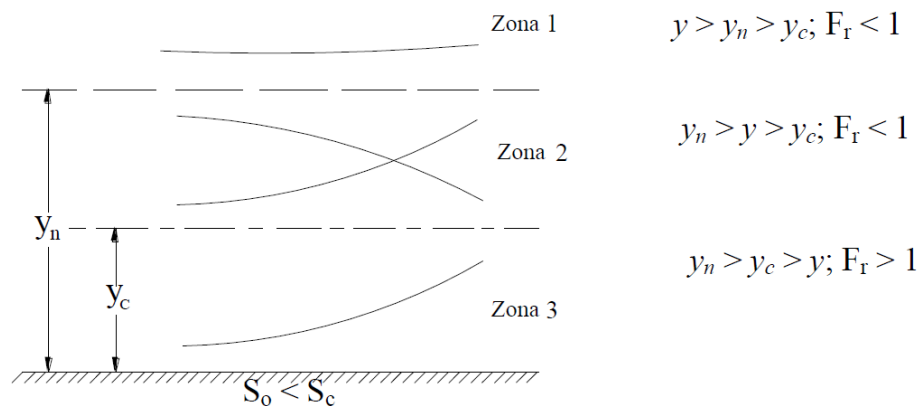


Figura 4 Clasificación por zonas para una pendiente subcrítica

La clasificación de los perfiles de flujo variado está basada en la pendiente del canal y en la zona en que se localiza el perfil. En el caso de pendiente positiva (el fondo del canal descende en la dirección del flujo), se puede establecer un flujo uniforme de tirante y_n , por lo cual dicha pendiente podría ser:

- ❖ Supercrítico $y_c < y$ $F_r > 1$ perfil **S**
- ❖ Subcrítico $y_n > y_c$ $F_r < 1$ perfil tipo **M**
- ❖ Crítica $y_n = y_c$ $F_r = 1$ perfil tipo **C**
- ❖ Horizontal y_n tiende a ∞ , perfil **H**
- ❖ Adversa $y_c < y_n$, perfil **A**

Según sea la posición donde se esté analizando el flujo existen tres zonas para análisis, las cuales son:

Zona I: y real está por encima de y_n y del y_c

Zona II: y real está en medio del y_n y del y_c

Zona III: y real está por debajo del y_n y del y_c

Para el desarrollo de esta práctica se va a seguir el procedimiento de cálculo de perfil hidráulico por el método de Integración Gráfica, plasmado en el libro Hidráulica de Canales de Ven Te Chow, el cual se resaltan algunos parámetros a continuación:

Teniendo como datos iniciales Volumen, ancho del canal, Pendiente, y rugosidad del material se procede al cálculo del Caudal por medio de los tiempos registrados y el volumen manejado. En seguida, teniendo lecturas limnimétricas y lecturas de fondo se establece la altura de lámina de agua a partir de las cuales se puede establecer el perfil de flujo con las distancias horizontales registradas.

Se tiene que determinar los tirantes normales y críticos por medio de las siguientes ecuaciones:

$$Q = \frac{1}{n} * A * R^{2/3} * S^{1/2} \text{ (Ecuación para el cálculo del Tirante Normal)}$$

$$\frac{Q}{\sqrt{g}} = A * \sqrt{D} \text{ (Ecuación para el cálculo del Tirante Crítico)}$$

Teniendo como sección de control el vertedero rectangular es necesario determinar las dimensiones y la altura desde donde se va a calcular el perfil de flujo, cuando la velocidad es baja, la ecuación para un vertedero es la siguiente:

$$Q = C_w * L * h^{3/2} \text{ Donde:}$$

Q= Caudal (m³/s)

L= Longitud del vertedero (m)

h= altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero.

C_w = Coeficiente indicador de las condiciones de escurrimiento del agua sobre el vertedero, el cual está definido por h y $\frac{H_d}{h}$ donde h es la lamina de agua sobre la cresta y H_d es la altura del vertedero.

Como se tienen los datos de altura del vertedero y altura de lámina de agua sobre la cresta de este mismo, se calcula la altura total **Y (m)** que hace referencia a la altura del vertedero mas la altura de la lamina de agua sobre la cresta del mismo, posteriormente se procede a seguir los lineamientos del método de integración directa plasmados en el libro anteriormente nombrado, el cual exige los siguientes cálculos.

Y (m)	Tirante que inicia con el valor total de lámina de agua sobre la cresta más altura total del vertedero y va disminuyendo según como se esté calculando el perfil de flujo.
A (m ²)	Área calculada por medio del producto del Y (anterior) y la base del canal.
T (m)	Ancho superficial que en este caso hace es la misma base del canal.
RH	Radio Hidráulico, calculado como Área/Perímetro.
V (m ² /s)	Velocidad calculada con Caudal / Área.
K	$K = \frac{A * R^{2/3}}{n}$
Z	$Z = \sqrt{\frac{A^3}{T}}$
dx/dy	$\frac{dx}{dy} = \frac{1}{S_0} * \frac{1 - \left(\frac{Z_c}{Z}\right)^2}{1 - \left(\frac{Kn}{K}\right)^2} \text{ donde } Z_c = \frac{Q}{\sqrt{\frac{g}{\alpha}}} \text{ y } Kn = \frac{Q}{\sqrt{S_0}}$
E	Energía = $Y + \frac{v^2}{2 * g}$
SF	Pendiente de fricción calculada mediante despeje de la ecuación de Manning = $\left(\frac{V * n}{R^{2/3}}\right)^2$
SFp	Promedio de las Pendientes halladas anteriormente, la primer casilla no tiene valor, se empieza a hacer promedio en la segunda casilla con los dos valores respectivos de pendientes
ΔX	Longitud del tramo calculada mediante: $\Delta X = \frac{E_1 - E_2}{S - SF_p}$ Donde E1 y E2 son las energías calculadas para los puntos 1 y 2 respectivamente, S es la pendiente del canal, y SFp es el promedio de pendientes calculado anteriormente.
X	Distancia desde la sección en consideración hasta el sitio del vertedero, son los valores acumulados de ΔX

3.5. CUESTIONARIO.

- Determinar el caudal que circula por el canal.
- Establecer el tipo de perfil formado, por medio del cálculo de tirantes crítico y normal.
- Realizar el cálculo de la sección de control (en este caso del vertedero).
- Determinar los perfiles de flujo por medio de la gráfica de lecturas limnimétricas vs distancias horizontales.
- Realizar la curva f(y) vs Y
- Establecer la curva de remanso.
- Establecer el régimen de flujo encontrado en la práctica.
- Analizar el comportamiento del flujo y su variabilidad de acuerdo a las condiciones en que se realiza la prueba de laboratorio.

3.6. FORMATO DE TOMA DE DATOS

Firma del laboratorista: _____ Fecha: ____/____/____

NOMBRES	CÓDIGOS	FIRMAS
_____	_____	_____
_____	_____	_____
_____	_____	_____

Volumen: 111 Litros

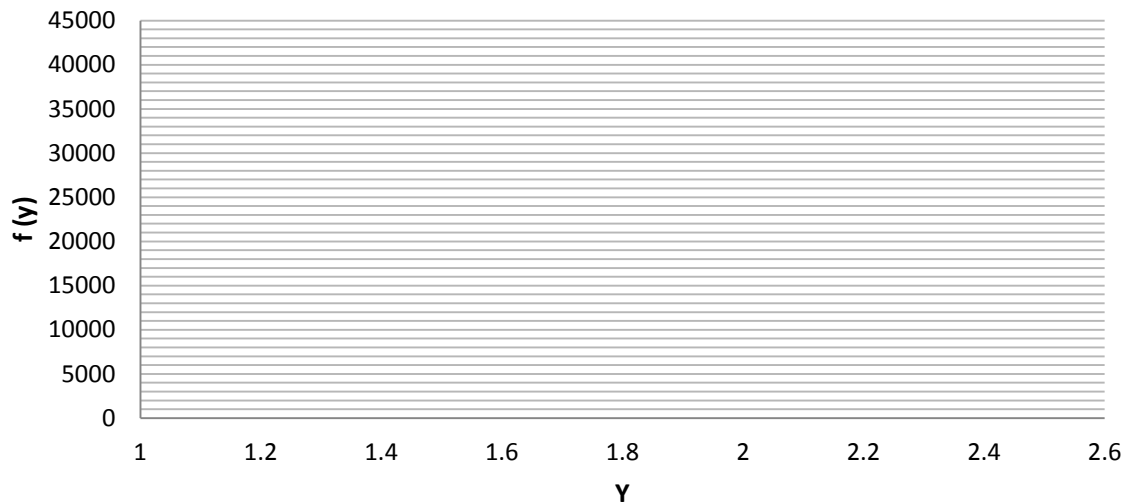
Ancho del Canal: 28.2 cm

Volumen (m ³)	_____
Ancho del canal (m):	_____
PENDIENTE	_____
Manning	_____

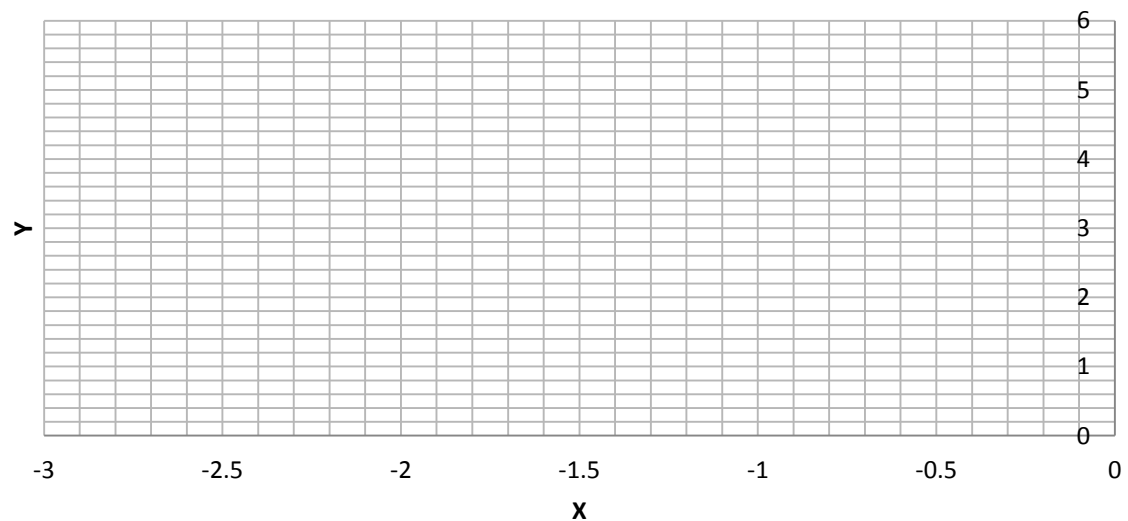
Tiempo (segundos)	Volumen (m ³)	Caudal (m ³ /s)	Caudal (m ³ /s)
_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	
_____	_____	_____	

PENDIENTE 1					
Puntos de Lectura	Distancia Horizontal (cm)	Distancia Horizontal acumulada (m)	LECTURA LIMIMETRICA (cm)	L. fondo (cm)	Tirante (m)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					

CURVA dx/dy vs Y



Perfil de Remanso



LABORATORIO N° 4 FLUJO GRADUALMENTE VARIADO.

4.1. OBJETIVOS.

- Analizar el comportamiento del flujo gradualmente variado en un canal abierto.
- Reconocimiento del perfil de flujo formado en la práctica.
- Determinar el tipo de flujo que se presenta por medio de una compuerta.
- Aplicar el método de Paso Directo en la determinación del perfil de flujo.

4.2. EQUIPOS A UTILIZAR.

- ✓ Canal Rectangular
- ✓ Compuerta.
- ✓ Limnímetro.
- ✓ Cronometro.
- ✓ Balde.
- ✓ Metro.

4.3. PROCEDIMIENTO.

- Adaptar la compuerta en la parte central del canal.
- Disponer el canal de pendiente variable en una inclinación conocida.
- Alimentar el canal con un caudal determinado por medio de la válvula
- Medir las dimensiones del canal.
- Registrar tiempos de descarga del caudal.
- Verificar que el flujo se encuentre estabilizado para empezar a registrar lecturas de lámina de agua.
- Para esta misma pendiente, tómese diferentes lecturas de lámina de agua, variando el caudal que alimenta el canal por medio de la válvula.

4.4. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

El flujo gradualmente variado constituye una clase especial del flujo permanente no uniforme. En este tipo de flujo el área, la rugosidad, la pendiente del fondo y el radio hidráulico varían muy poco (si es que lo hacen) a lo largo del canal, las líneas de corriente son rectas y prácticamente paralelas.

La clasificación de los perfiles de flujo variado está basada en la pendiente del canal y en la zona en que se localiza el perfil. En el caso de pendiente positiva (el fondo del canal

desciende en la dirección del flujo), se puede establecer un flujo uniforme de tirante Y_n , por lo cual dicha pendiente podría ser:

- ❖ Supercrítico $Y_n < Y_c F > 1$ perfil **S**
- ❖ Subcrítico $Y_n > Y_c F < 1$ perfil tipo **M**
- ❖ Crítica $Y_n = Y_c F = 1$ perfil tipo **C**
- ❖ Horizontal Y_n tiende a ∞ , perfil **H**
- ❖ Adversa $Y_c < \text{la horizontal}$, perfil **A**

Según sea la posición donde se esté analizando el flujo existen tres zonas para análisis, las cuales son:

Zona I: Y real está por encima de Y_n y del Y_c

Zona II: Y_{real} está en medio del Y_n y del Y_c

Zona III: Y_{real} está por debajo del Y_n y del Y_c

Compuerta Hidráulica:

Una compuerta hidráulica es un dispositivo hidráulico-mecánico, utilizado en la regulación de caudales y en ocasiones para cierre y mantenimiento de instalaciones hidráulicas.

Las condiciones físicas, hidráulicas, climáticas y de operación, evaluadas apropiadamente, imponen la selección del tipo y tamaño adecuado de las compuertas. Éstas se diseñan de diferentes tipos y con variadas características en su operación, los cuales permiten clasificarlas como descarga libre y sumergida.

Igualmente pueden ser clasificadas de acuerdo a su funcionamiento como *Compuertas Principales* las cuales se diseñan para operar bajo cualquier condición de flujo, se les llama de regulación cuando se les conciben para controlar caudales en un canal abierto, también son conocidas como compuertas de guarda o de cierre aquellas que funcionan completamente abiertas o cerradas; *Las Compuertas de Emergencia* son utilizadas en eventos de reparación, inspección y mantenimiento de las compuertas principales, siendo concebidas para funcionar tanto en condiciones de presión diferencial, en conductos a presión, como en condiciones de presión equilibrada. En la figura 5 se muestra un perfil generado utilizando una compuerta hidráulica.

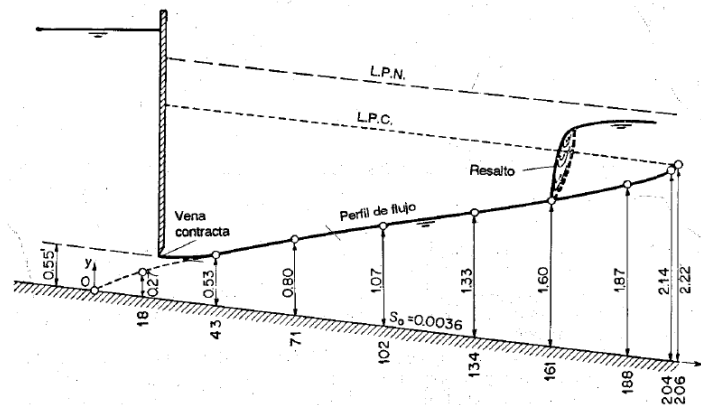


Figura 5 Perfil Generado Utilizando Compuerta Hidráulica.

Para el desarrollo de esta práctica se va a seguir el procedimiento de cálculo de perfil hidráulico por el método de Paso Directo, plasmado en el libro Hidráulica de Canales de Ven Te Chow, el cual se resaltan algunos parámetros a continuación:

Teniendo como datos iniciales Volumen, ancho del canal, Pendiente, y rugosidad del material se procede al cálculo del Caudal por medio de los tiempos registrados y el volumen manejado. En seguida, teniendo lecturas limnimétricas y lecturas de fondo se establece la altura de lámina de agua a partir de las cuales se puede establecer el perfil de flujo con las distancias horizontales registradas.

Se tiene que determinar los tirantes normales y críticos por medio de las siguientes ecuaciones:

$$Q = \frac{1}{n} * A * R^{2/3} * S^{1/2} \text{ (Ecuación para el cálculo del Tirante Normal)}$$

$$\frac{Q}{\sqrt{g}} = A * \sqrt{D} \text{ (Ecuación para el cálculo del Tirante Crítico)}$$

Teniendo como sección de la compuerta es necesario determinar las dimensiones y la altura desde donde se va a calcular el perfil de flujo, que en este caso es la distancia que hay entre el fondo del canal y la compuerta, éste sería el valor correspondiente a **Y (m)**; posteriormente se procede a seguir los lineamientos del método de Paso Directo plasmados en el libro anteriormente nombrado, el cual exige los siguientes cálculos.

Y (m)	Tirante que inicia con el valor total de lámina de agua sobre la cresta más altura total del vertedero y va disminuyendo según como se esté calculando el perfil de flujo.
A (m ²)	Área mojada calculada por medio del producto del Y (anterior) y la base del canal.
RH	Radio Hidráulico, calculado como Área/Perímetro.
V (m ² /s)	Velocidad calculada con Caudal / Área.
E	Energía específica = $Y + \frac{v^2}{2 \cdot g}$
ΔE	Cambio en la energía específica, obtenido a través de la diferencia de energías calculadas anteriormente (E2-E1)
Sf	Pendiente de fricción calculada mediante despeje de la ecuación de Manning = $\left(\frac{V \cdot n}{R^{2/3}}\right)^2$
$\overline{S_f}$	Promedio de las Pendientes halladas anteriormente, la primer casilla no tiene valor, se empieza a hacer promedio en la segunda casilla con los dos valores respectivos de pendientes
$S_o - \overline{S_f}$	Diferencia entre la pendiente de Fondo y la pendiente de fricción promedio.
ΔX	Longitud del tramo calculada mediante: $\Delta X = \frac{E_1 - E_2}{S - \overline{S_f}}$ Donde E1 y E2 son las energías calculadas para los puntos 1 y 2 respectivamente, S es la pendiente del canal, y Sf es el promedio de pendientes calculado anteriormente.
X	Distancia desde la sección en consideración hasta el sitio del vertedero, son los valores acumulados de ΔX

4.5. CUESTIONARIO.

- Determinar el caudal que circula por el canal.
- Establecer el tipo de perfil formado, por medio del cálculo de tirantes crítico y normal.
- Realizar el cálculo de la sección de control (en este caso de la compuerta).
- Determinar los perfiles de flujo por medio de la gráfica de lecturas limnimétricas vs distancias horizontales.
- Realizar la curva f(y) vs Y
- Establecer la curva de remanso.
- Establecer el régimen de flujo encontrado en la práctica.
- Analizar el comportamiento del flujo y su variabilidad de acuerdo a las condiciones en que se realiza la prueba de laboratorio.
- Analizar la diferencia entre el método de Integración Gráfica trabajado en el anterior laboratorio y el método de Paso Directo trabajado en el presente laboratorio.

4.6. FORMATO DE TOMA DE DATOS

Firma del laboratorista: _____ Fecha: ____/____/____

NOMBRES	CÓDIGOS	FIRMAS
_____	_____	_____
_____	_____	_____
_____	_____	_____

Volumen: 111 Litros

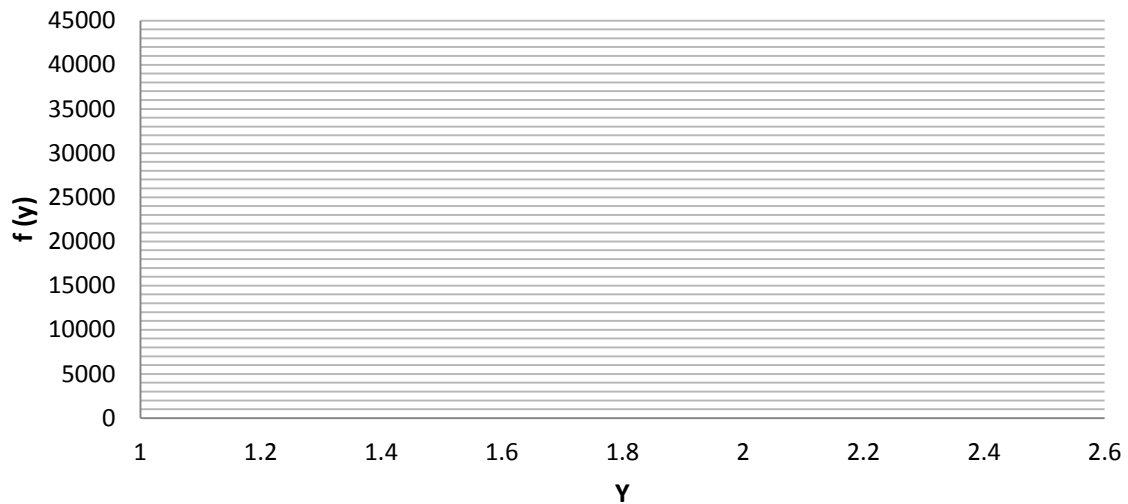
Ancho del Canal: 28.2 cm

Volumen (m ³)	_____
Ancho del canal (m):	_____
PENDIENTE	_____
Manning	_____

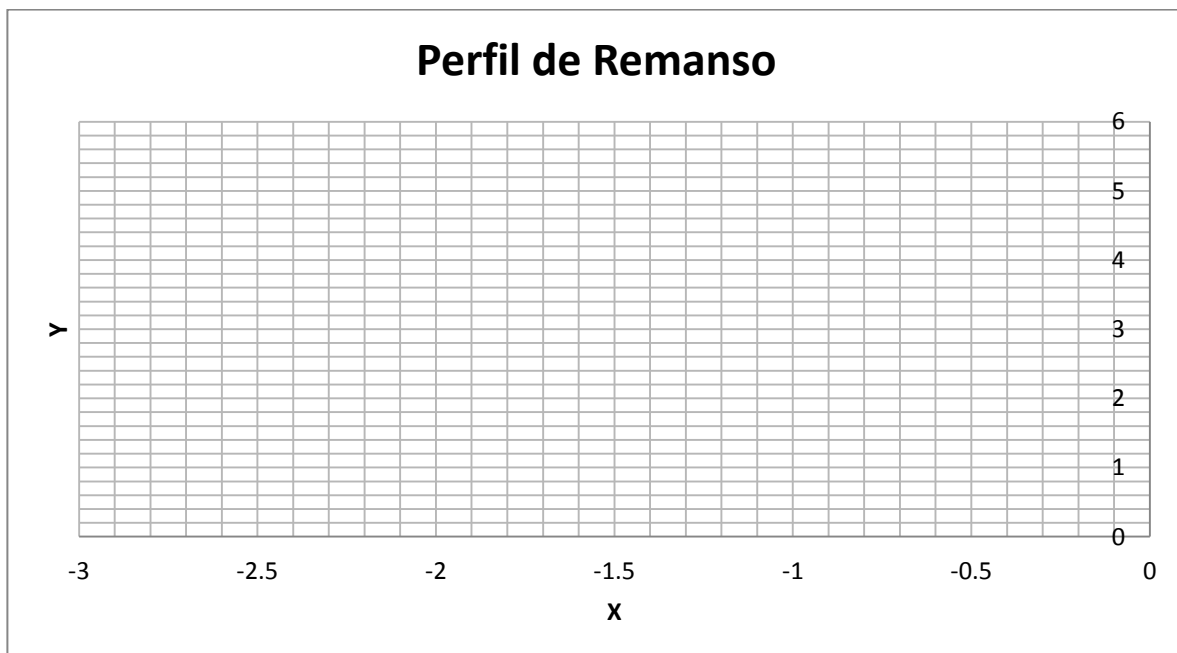
Tiempo (segundos)	Volumen (m ³)	Caudal (m ³ /s)	Caudal (m ³ /s)
_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	
_____	_____	_____	

PENDIENTE 1					
Puntos de Lectura	Distancia Horizontal (cm)	Distancia Horizontal acumulada (m)	LECTURA LIMIMETRICA (cm)	L. fondo (cm)	Tirante (m)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					

CURVA dx/dy vs Y



Perfil de Remanso



LABORATORIO N° 5 FLUJO RÁPIDAMENTE VARIADO.

5.1. OBJETIVOS.

- Identificar el resalto hidráulico en el canal abierto del laboratorio de Hidráulica.
- Establecer los tipos de resalto hidráulico existentes y que se pueden formar en el desarrollo de la práctica.
- Calcular la pérdida de energía que genera el resalto, medir la longitud del mismo y establecer si se requiere o no de una estructura disipadora de energía.
- Calcular teóricamente la longitud del resalto, la energía mínima del resalto, la energía específica del mismo y la profundidad crítica.
- Establecer las aplicaciones y usos del resalto hidráulico en la Ingeniería.

5.2. EQUIPOS A UTILIZAR.

- ✓ Canal Rectangular
- ✓ Compuerta.
- ✓ Limnímetro.
- ✓ Cronometro.
- ✓ Balde.
- ✓ Metro.

5.3. PROCEDIMIENTO.

- Disponga el canal de pendiente variable en la mayor inclinación posible.
- Adaptar la compuerta en la parte central del canal.
- Graduar el caudal por medio de la válvula empezando de un valor bajo, para ir ascendiendo a medida que avanza la práctica de laboratorio.
- Espere que normalice o se estabilice las alturas de lámina de agua antes del resalto y poco después del resalto hidráulico, y registrar las alturas lámina de agua en los puntos establecidos en el canal.
- Registrar el tiempo de descarga del caudal.
- Medir tentativamente la longitud del resalto hidráulico.
- Repetir la prueba para diferentes niveles caudales.

5.4. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

El flujo rápidamente variado se presenta cuando en una corta distancia se presenta un cambio brusco en las características del flujo, el ejemplo más representativo de éste tipo de flujo es el *salto hidráulico*. Cuando ocurre un cambio de régimen del flujo de

supercrítico a subcrítico, generalmente se manifiesta mediante un cambio brusco en la elevación del agua, de un nivel bajo a uno alto, acompañado por una disipación importante de energía, se conoce como salto hidráulico (ver figura 7), en el cual se presentan dos tirantes denominados tirantes conjugados. Este cambio de régimen generalmente va acompañado por una importante pérdida de energía.

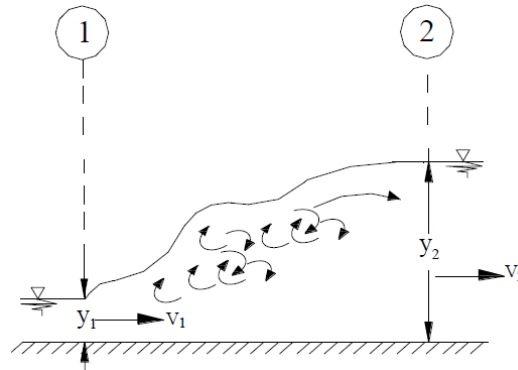


Figura 6 Salto Hidráulico.

Teniendo en cuenta la Figura N° 7, el subíndice 1 indica las características hidráulicas del régimen supercrítico asociadas al tirante conjugado menor, y el subíndice 2 las características hidráulicas del régimen subcrítico asociadas al conjugado mayor, se particularizan los resultados a diferentes secciones transversales. Para las secciones rectangulares las ecuaciones obtenidas son:

❖ Régimen Supercrítico conocido:

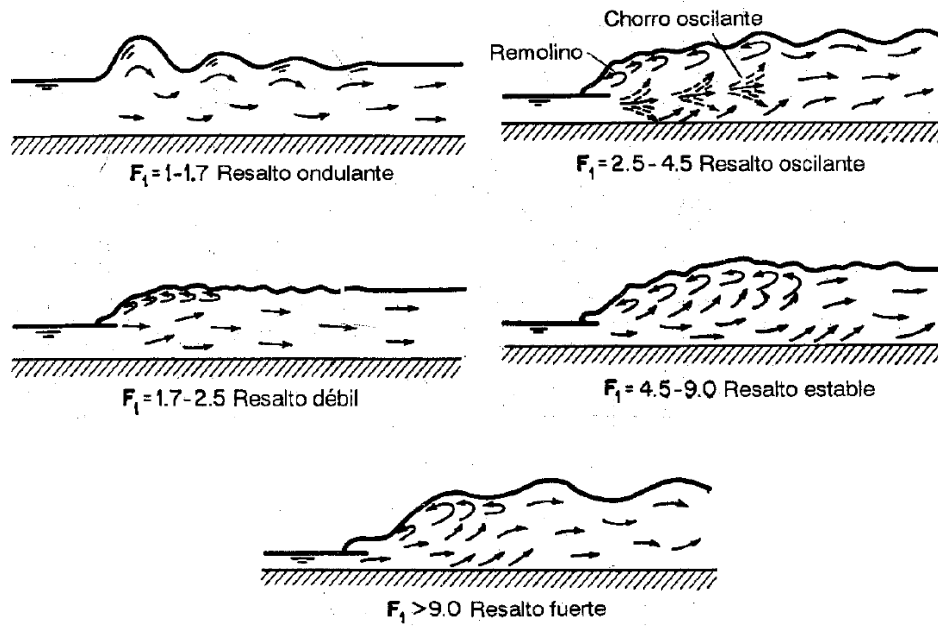
$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{8F_1^2 + 1} - 1 \right]$$

❖ Régimen Subcrítico conocido:

$$\frac{Y_1}{Y_2} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{8F_2^2 + 1} - 1 \right]$$

El resalto hidráulico como ya se había nombrado es el paso de un flujo supercrítico a flujo subcrítico, este cambio sucede bruscamente y se producen grandes turbulencias en las cuales se presenta una pérdida de energía que caracteriza el tipo de resalto y además lo hace útil, ya sea para reducir la energía de aguas, ya que esta turbulencia puede reemplazar un mezclador. Este fenómeno se presenta también frecuentemente

en la base de embalses, aguas debajo de compuertas y en los alrededores de obstáculos sumergidos. El resalto se clasifica según el número de Froude (Fr) así:



En la esta práctica se toman como tirantes conjugados los registros de los puntos 5 y 6, a partir de los cuales se puede establecer las velocidades en dichos puntos con el caudal calculado por medio del volumen y promedios de tiempos.

Se van a determinar las características básicas del resalto hidráulico, las cuales son:

Pérdida de Energía: es igual a la diferencia de las energías específicas antes y después del resalto hidráulico, la pérdida es:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(Y_2 - Y_1)^3}{4Y_1Y_2}$$

Pérdida Relativa: es la relación $\Delta E/E_1$

Eficiencia: es la relación entre la energía especifica antes y después del resalto:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{3/2} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)}$$

La eficiencia de un resalto es una función adimensional que solo depende del número de Froude del flujo de aproximación (calculado a partir de la ecuación de régimen supercrítico conocido).

Altura del Resalto: corresponde a la diferencia entre las profundidades antes y después del resalto:

$$h_j = Y_2 - Y_1$$

LONGITUD DEL RESALTO HIDRÁULICO.

Distancia media desde la cara frontal del resalto hasta el punto en la superficie inmediatamente aguas abajo del remolino. Esta longitud no puede determinarse con facilidad, sin embargo el cálculo clásico es mediante la ecuación de Smetana:

$$Lr = 6(h_2 - h_1)$$

CURVAS CARACTERÍSTICAS.

Las curvas características del resalto hidráulico en canales rectangulares son:

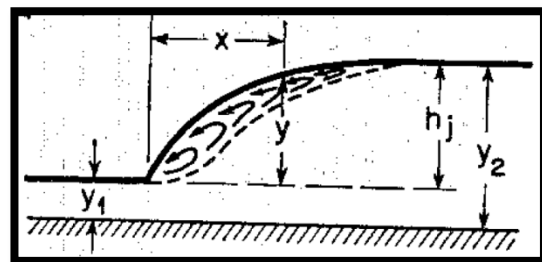
$$\begin{aligned} &\rightarrow \frac{E_2}{E_1} \text{ vs } F_1 \\ &\rightarrow \frac{h_j}{E_1} \text{ vs } F_1 \\ &\rightarrow \frac{Y_1}{E_1} \text{ vs } F_1 \\ &\rightarrow \frac{Y_2}{E_1} \text{ vs } F_1 \end{aligned}$$

PERFIL SUPERFICIAL DE UN RESALTO HIDRÁULICO.

Se puede representar mediante curvas adimensionales para varios valores de F_1

$$\frac{Y}{h_j} \text{ vs } \frac{X}{h_j}$$

Los valores de Y y X , se tienen que medir en laboratorio, haciendo referencia a mediciones que se observan en la siguiente figura:



5.5. CUESTIONARIO.

- Calcular las características básicas del resalto hidráulico.
- Calcular la longitud del resalto hidráulico.
- Clasificar el resalto hidráulico formado de acuerdo al número de Froude calculado.
- Realizar las curvas características del resalto hidráulico ya nombradas.
- Graficar el perfil superficial de un resalto hidráulico y establecer la importancia que tiene la determinación de este.
- Describir el comportamiento del flujo en general, haciendo énfasis en las zonas inmediatamente antes y después del resalto hidráulico formado por la presencia de la compuerta.
- Realizar una consulta de las aplicaciones y usos que tiene el resalto hidráulico como disipador de energía.
- Realizar una consulta bibliográfica de la localización óptima del resalto hidráulico.

5.6. FORMATO DE TOMA DE DATOS.

Firma del laboratorista: _____ Fecha: ____/____/____

NOMBRES	CÓDIGOS	FIRMAS
_____	_____	_____
_____	_____	_____
_____	_____	_____

Volumen: 111 Litros

Ancho del Canal: 28.2 cm

Volumen (m³)	
Ancho del canal (m):	
PENDIENTE	
Manning	

PENDIENTE =													
CAUDAL	Longitud Resalto	LECTURA LIMIMÉTRICA (cm)									TIEMPO (segundos)		
		1	2	3	4	5 (Y1)	6 (Y2)	7	8	9	T1	T2	T3
1													
2													
3													
4													
Distancia X(cm)													
L. fondo (cm)													

Perfil Superficial Resalto	
X	Y

5.7. FORMATO DE CÁLCULOS.

Q	Longitud Resalto	TIRANTE (m)									T _{prom} (sg)	Q (m ³ /s)	q (m ² /s)
		1	2	3	4	5 (Y1)	6 (Y2)	7	8	9			
1													
2													
3													
4													
X (cm)													
L. fondo (cm)													

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL RESALTO HIDRÁULICO													
Q	Y1 (m)	Y2 (m)	A1 (m ²)	A2 (m ²)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	E1 (m)	E2 (m)	ΔE (m)	Pérdida Relativa	Fr 1	Eficiencia	Altura del Resalto
1													
2													
3													
4													

Lr (cm) $L=6*(h_2-h_1)$	Tirante Crítico (m)