

LABORATORIO DE HIDRÁULICA II

PRACTICA

***TEMA: PERFILES DE FLUJO POR EL METODO DEL PASO
DIRECTO.***

INTRODUCCION

El flujo gradualmente variado es el flujo permanente cuya profundidad varía gradualmente a lo largo de la longitud del canal esta definición significa dos condiciones:

- 1.- Que el flujo es permanente, es decir, que las características hidráulicas del flujo permanecen constante en el intervalo de tiempo en consideración.
- 2.- Que las líneas de corriente son prácticamente paralelas, es decir, que la distribución hidrostática de la presión prevalece sobre la sección del canal.

Todas las teorías desarrolladas se apoyan sobre la siguientes hipótesis:

“La pérdida de altura en una sección es la misma que la de un flujo uniforme teniendo la velocidad y radio hidráulico de la sección”

De acuerdo a esta hipótesis, la fórmula del flujo uniforme se puede usar para evaluar la pendiente de la energía de un flujo gradualmente variado en una sección dada del canal, y el correspondiente coeficiente de rugosidad desarrollado primariamente para flujo uniforme es aplicable al flujo variado.

Esta hipótesis no ha sido nunca confirmada precisamente por experimentos o teorías, pero los errores debido a ello se cree que sean pequeños comparados con los envueltos ordinariamente en el uso de una fórmula de flujo uniforme en la sección del coeficiente de rugosidad. A lo largo de años de uso ésta hipótesis ha probado ser una base adecuada para el diseño. La hipótesis es indudablemente más correcta para el flujo variado donde la velocidad disminuye porque en un flujo de velocidad creciente la pérdida de altura es causada casi enteramente por efectos friccionales, mientras que en un flujo de velocidad decreciente habrá pérdidas por remolinos de gran escala.

Estas situaciones se presentan en vertederos de canal lateral, colectores de escurrimiento pluviales, canales con fronteras permeables y estructuras de caída en el fondo del canal. Se consideran soluciones tabulares de las ecuaciones diferenciales que rigen el flujo espacialmente variado para incrementos y decrementos de gastos.

ECUACION DINAMICA DEL FLUJO GRADUALMENTE

Consideramos el perfil del flujo gradualmente variado en la longitud elemental dx de un canal abierto, la altura total sobre el plano de referencia en la sección 1 aguas arriba es:

$$H = z + y \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecuación \# 1}$$

Donde:

H: es la altura total en ft.

z: es la distancia vertical del fondo del canal sobre el datum en ft.

y: es la profundidad de la sección del flujo en ft.

θ : es el ángulo de la pendiente del fondo.

α : es el coeficiente de energía.

V: es la velocidad media del flujo a través de la sección en ft/seg.

Se supone que θ y α son constante a lo largo del tramo del canal en consideración, y por ello la ecuación # 1 se puede escribir así:

$$H = z + y + \frac{V^2}{2g}$$

$$H = z + E \quad \text{Ecuaciones \# 2 y 3}$$

Tomando el fondo del canal como el eje x y diferenciado la ecuación (3) con respecto a la longitud x del perfil de la superficie del agua, el cual se mide a lo largo del eje x, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dz}{dx} + \frac{dE}{dx} \quad \text{Ecuación \# 4}$$

De la figura se observa que: $S_f = -\frac{dH}{dx}$, $S_0 = -\frac{dz}{dx}$, y además se puede demostrar que $\frac{dE}{dx} = \frac{dy}{dx}(1 - F^2)$ de la siguiente forma:

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

$$\frac{dE}{dy} = 1 + \frac{1}{2g} \frac{d(V^2)}{dy}$$

$$\frac{dE}{dy} = 1 + \frac{1}{2g} \frac{d}{dy} \left(\frac{Q^2}{A^2} \right)$$

$$\frac{dE}{dy} = 1 + \frac{Q^2}{2g} \frac{d}{dy} (A^{-2})$$

$$\frac{dE}{dy} = 1 + \frac{Q^2}{2g} \frac{(-2)}{A^3} \left(\frac{dA}{dy} \right)$$

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{Q^2}{gA^3} \frac{T}{A}$$

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{V^2}{g} \frac{1}{D} = 1 - \frac{V^2}{gD}$$

$$\frac{dE}{dy} = 1 - F^2$$

Introduciendo el diferencial dx

$$\frac{dE}{dx} = (1 - F^2) \frac{dy}{dx}$$

Con estos resultados la ecuación # 4 se convierte en:

$$-S_f = -S_0 + \frac{dy}{dx} (1 - F^2)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 - F^2}$$

Ecuación # 5

Esta ecuación se llama la **ECUACIÓN DINAMICA DEL FLUJO GRADUALMENTE VARIADO**, y representa la variación de la profundidad de flujo con la distancia X **a lo largo del fondo del canal**.

IMPORTANCIA DE LA PRACTICA

Esta práctica tiene un alto grado de importancia ya que el análisis del perfil de flujo capacita al ingeniero para aprender anticipadamente los posibles perfiles del flujo que pueden ocurrir en un diseño de un canal dado, cabe mencionar que este procedimiento constituye una parte significativa de todos los problemas en diseños de canal para un flujo gradualmente variado.

OBJETIVO

Que los estudiantes sean capaces de calcular los perfiles de flujo permanente y gradualmente variado utilizando el método del paso directo.

EQUIPO:

1. Canal Hidráulico
2. Juego de pesas
3. Cronómetro
4. Vernieres medidores de profundidad (Hidrómetros)

GENERALIDADES

La curva que forma la superficie del agua en un flujo gradualmente variado, que sirve como transición de un estado dado de flujo al flujo uniforme o viceversa, se llama **Perfil de Flujo**. La forma que toman los perfiles de flujo dependerá de la pendiente del fondo S_0 y de la pendiente de la rasante de energía S_f en el tramo del canal bajo análisis, y puede ser bosquejada si se conocen las profundidades críticas (y_c), normal (y_o) en el canal, y la zona en que se encuentra la profundidad de flujo real (y) en el tramo estudiado. Para el análisis se emplea la ecuación # 5, obtenida anteriormente.

En el flujo uniforme se cumple la fórmula de Manning (despejando S_0):

$$S_0 = \frac{n^2 V_0^2}{R_0^3} = \frac{n^2 Q^2}{A_0^2 R_0^3} \quad \text{Ecuación \# 6}$$

Donde V_0 , R_0 y A_0 son parámetros del flujo uniforme.

La pendiente de la rasante de energía, o gradiente de energía (S_f), puede ser obtenida de la fórmula de Manning, si se acepta su validez en el flujo gradualmente variado:

$$S_f = \frac{n^2 V^2}{R^3} = \frac{n^2 Q^2}{A^2 R^3} \quad \text{Ecuación \# 7}$$

Donde V, A y R son parámetros correspondientes a la profundidad real (y) en el tramo en estudio (todas son variables).

Como el Q es constante, y tanto el área como el radio hidráulico aumentan con “y”, de la comparación entre las fórmulas 6 y 7, resulta que:

Para $y > y_0 \Rightarrow S_0 > S_f$

Para $y < y_0 \Rightarrow S_0 < S_f$

La pendiente del fondo del canal S_0 para canales cuyo lecho descende en la dirección del flujo, es positiva y puede clasificarse como subcrítica ($S_0 < S_c$), crítica ($S_0 = S_c$) o supercrítica ($S_0 > S_c$). Si el canal es horizontal, entonces la pendiente del fondo es nula ($S_0 = 0$), si el lecho del canal asciende en la dirección del flujo, se trata de una pendiente adversa ($S_0 < 0$).

Para las pendientes positivas es posible determinar una profundidad normal (y_0) y una profundidad crítica (y_c); mientras que para las pendientes horizontal y adversa, el valor de (y_0) no existe. En el primer caso se han determinado las siguientes relaciones, para flujo uniforme:

Pendiente Subcrítica	$S_0 < S_c$	$Y_0 > Y_c$	$F_0 < 1$
Pendiente Crítica	$S_0 = S_c$	$Y_0 = Y_c$	$F_0 = 1$
Pendiente Supercrítica	$S_0 > S_c$	$Y_0 < Y_c$	$F_0 > 1$

Estas relaciones pueden ser utilizadas cuando se determinen los valores de ($S_0 - S_f$) y de ($1 - F^2$), para determinar el signo de dy

dx en la ecuación # 5, siempre que se conozca el entorno de valores de la profundidad de flujo (y). Por ejemplo, si la pendiente es supercrítica ($S_0 > S_c$, $y_0 < y_c$), y si $y_0 < y < y_c$, podemos concluir:

$$Y > Y_0 \Rightarrow S_0 > S_f \Rightarrow S_0 - S_f > 0$$

$$Y \cdot Y_c \Rightarrow F \cdot 1 \Rightarrow 1 - F^2 \cdot 0$$

Resultado: $\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f}{1 - F^2} < 0$

Este resultado se muestra en la siguiente figura, nótese que la superficie del agua desciende desde la profundidad crítica, acercándose a la profundidad normal (que es la tendencia general de los flujos en canales abiertos).

LPC: Línea de Profundidad Crítica

LPN: Línea de Profundidad Normal

$S_0 \cdot S_c$, $Y_0 \cdot Y \cdot Y_c$

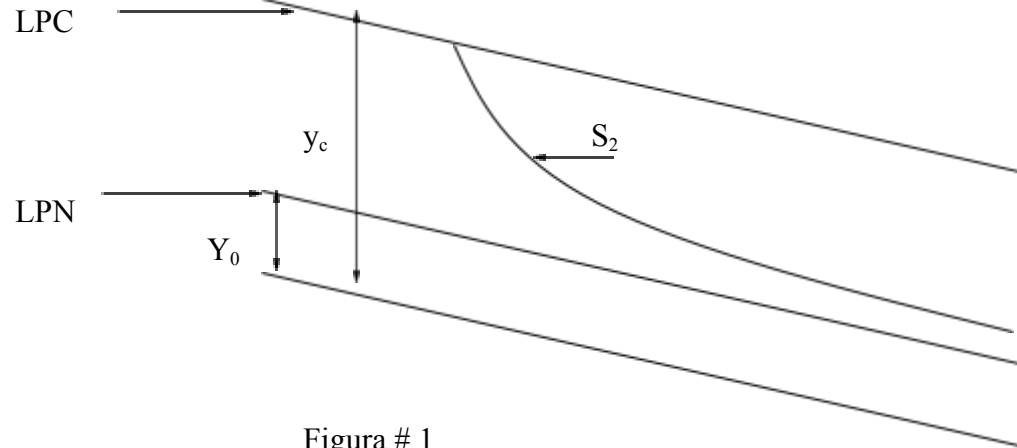


Figura # 1

$\frac{dy}{dx}$

Un análisis exhaustivo de los perfiles de flujo requiere analizar el valor de la derivada $\frac{dy}{dx}$, para cada tipo de pendiente y para todos los valores relativos de y respecto a (y_0) y a (y_c) . La tabla # 1 presentada a continuación muestra los resultados de ese análisis.

Obsérvese que al dibujar las líneas de profundidad crítica y profundidad normal, como se hizo en la figura # 1, el espacio encima del canal queda dividido en tres zonas:

- Zona 1. El espacio encima de la línea superior.
- Zona 2. El espacio entre las dos líneas
- Zona 3. El espacio debajo de la línea inferior.

Esta nomenclatura sirve para designar los perfiles resultantes, los cuales se muestran en la tabla, designándoles por una letra que corresponde al tipo de pendiente, de acuerdo a la siguiente clasificación:

- M: Pendiente suave o subcrítica
- C : Pendiente crítica
- S : Pendiente fuerte o supercrítica
- H : Pendiente horizontal
- A : Pendiente Adversa

Cada letra va seguida de un número que corresponde a la zona donde ocurre el perfil. Por ejemplo, si se trata de una pendiente fuerte (S) y la curva ocurre entre las LPN y LPC (zona 2), como se muestra en la figura # 1, el perfil se llama S_2 .

Tabla # 1: Clasificación de los Perfiles de Flujo

Pendiente del Lecho	Designación			Relación Y, Y_n, Y_c			dy/dx	Tipo de Flujo
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3		
Horizontal $S_0 = 0$	-			$Y \cdot Y_n \cdot Y_c$			-	No hay
		H2		$Y_n \cdot Y \cdot Y_c$			•0	Subcrítico

			H3	$Y_n \cdot Y_c \cdot Y$	•0	Supercrítico
Suave $0 \cdot S_0 \cdot S_c$	M1			$Y \cdot Y_n \cdot Y_c$	•0	Subcrítico
		M2		$Y_n \cdot Y \cdot Y_c$	•0	Subcrítico
			M3	$Y_n \cdot Y_c \cdot Y$	•0	Supercrítico
Crítica $S_0 = S_c \cdot 0$	C1			$Y \cdot Y_c = Y_n$	•0	Subcrítico
		C2		$Y_c = Y = Y_n$	0	Uniforme Crítico
			C3	$Y_c = Y_n \cdot Y$	•0	Supercrítico
Fuerte $S_0 \cdot S_c \cdot 0$	S1			$Y \cdot Y_c \cdot Y_n$	•0	Subcrítico
		S2		$Y_c \cdot Y \cdot Y_n$	•0	Supercrítico
			S3	$Y_c \cdot Y_n \cdot Y$	•0	Supercrítico
Adversa $S_0 \cdot 0$	-			$Y \cdot (Y_n)^* \cdot Y_c$	-	No hay
		A2		$(Y_n)^* \cdot Y \cdot Y_c$	•0	Subcrítico
			A3	$(Y_n)^* \cdot Y_c \cdot Y$	•0	Supercrítico

Nota: $(Y_n)^*$ en realidad no existe

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1. Nivelar el canal y el hidrómetro.

88969344. Encender el motor y abrir la llave dejando pasar todo el cuadal (Q).

88969640. Establecer una pendiente suave (No. 5 ó 8), caída libre y compuerta semi abierta.

88969641. Tomar tirantes cada 50 cm a lo largo de todo el canal.

88969642. Establecer una pendiente supercrítica y verificar el flujo por caída libre

88969643. Tomar tirantes cada 50 cm a lo largo de todo el canal.

88970880. Establecer el flujo bajo compuerta de manera que no se produzca salto y repetir el paso No. 6.

88971904. Calcular los diferentes perfiles por el método del paso directo.

CALCULO DE LA SUPERFICIE DEL AGUA **(METODO DEL PASO DIRECTO)**

El cálculo de la superficie del agua consiste en determinar las profundidades de flujo a lo largo del tramo de canal donde ocurre el flujo gradualmente variado. El cálculo de estas profundidades se hace resolviendo la ecuación dinámica del flujo gradualmente variado. Dado que esta solución no siempre puede ser explícita, se utilizarán métodos iterativos como el **Método del Paso Directo**, que se caracteriza por dividir el canal en pequeños tramos y efectuar los cálculos paso a paso de un extremo a otro del tramo.

El concepto de “pequeño tramo” es relativo ya que su longitud puede no ser tan pequeña. La idea básica es que se puede admitir, sin gran error, que tanto la rasante de energía como la superficie del agua son rectas entre esos tramos.

A continuación se explica el llamado **método del paso directo**, aplicable a canales prismáticos.

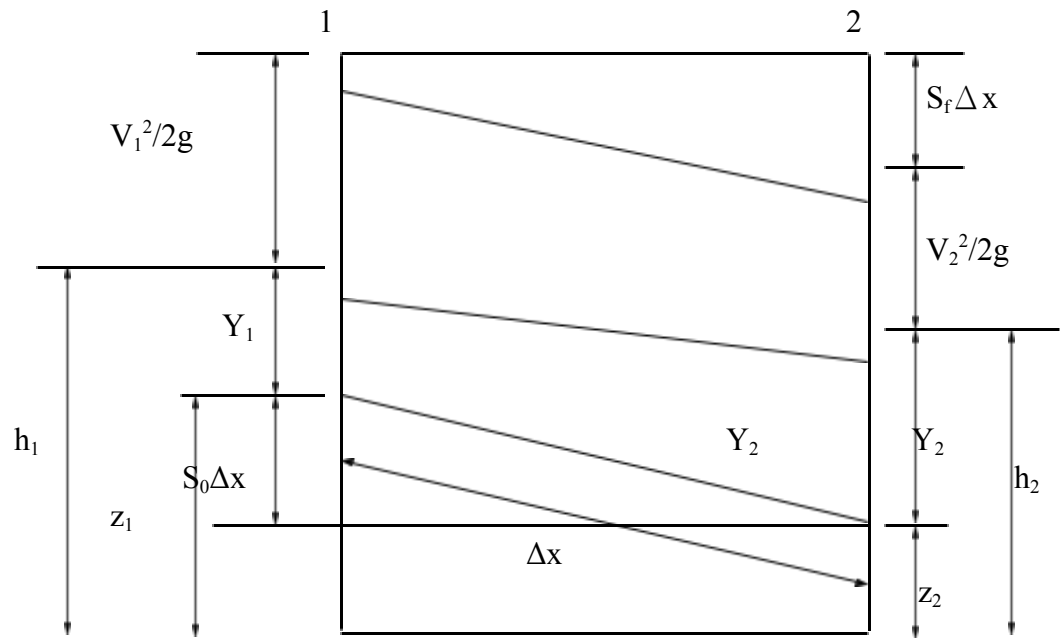


Figura # 2: Tramo de un canal para la aplicación del método de paso directo

La figura # 2 muestra un “tramo pequeño” de un canal con flujo gradualmente variado. Al igualar las energías en las dos secciones extremas resulta:

$$S_0 \Delta x + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + S_f \Delta x$$

De donde resulta:

$$\Delta x = \frac{E_2 - E_1}{S_0 - S_f} = \frac{\Delta E}{S_0 - S_f} \quad \text{Ecuación \# 8}$$

En las ecuaciones anteriores, (y) es la profundidad del flujo, (V) es la velocidad media, (S_0) es la pendiente del fondo y (S_f) es la pendiente de la rasante de energía, la cual puede ser obtenida de la fórmula de Manning con la ecuación # 7.

Para aplicar el método del paso directo deben conocerse el caudal Q, la pendiente del fondo S_0 , la forma y dimensiones de la sección y una profundidad inicial para comenzar los cálculos. Cabe señalar que en canales con pendiente positiva, si el flujo uniforme es subcrítico los pasos del cálculo se realizan en dirección aguas arriba a partir de la profundidad dada, y en dirección contraria si el flujo es supercrítico. Siempre es recomendable hacer un bosquejo del perfil del flujo.

Los cálculos pueden ponerse en forma tabular como se muestra en la tabla # 2, los valores de cada columna de la tabla se explican a continuación:

Columna Número:

1. Profundidad de flujo en metros, asignándosele valores desde la profundidad dada en intervalos de 5 cm.
2. Área de la sección en m^2 , correspondiente a la profundidad (y) en columna 1.
3. Radio Hidráulico en m, correspondiente a la profundidad (y) en columna 1.
4. Radio Hidráulico elevado a la potencia 4/3.
5. Velocidad media en m/seg, obtenida de $V = Q/A$, A en columna 2.
6. Carga a velocidad en m.
7. Energía específica en m, obtenido al sumar (y) en la columna 1 con $(V^2/2g)$ en la columna 6.
8. Cambio en la energía específica en m, igual a la diferencia entre el valor E en la columna 7 y el correspondiente al paso anterior.
9. Pendiente de la rasante de energía calculada con la ecuación # 7, con el valor dado de (n) y los valores de (V) de la columna 5 y el radio hidráulico de la columna 4.
10. Pendiente media de la rasante de energía entre dos pasos consecutivos, igual a la media aritmética de (S_f) calculado en columna 9.

11. Diferencia entre la pendiente del fondo dada (S_0) y la pendiente media de la rasante de energía.
 12. Longitud del tramo en m, entre dos pasos consecutivos, calculado con la ecuación #8, o sea, dividiendo el valor ΔE de la columna 8, entre el valor de la columna 11.
 13. Distancia desde la sección en estudio hasta la sección donde se inició el cálculo. Este valor es igual a la suma acumulativa de los valores de la columna 12, calculados en los pasos anteriores.
- El perfil de flujo puede graficarse calculando la elevación del fondo del canal con las distancias (x) de la columna 13 de la tabla, ($z = S_0 * x$) y usando los valores de (y) de la columna 1 de la tabla.

TABLA DE DATOS EXPERIMENTALES

La tabla de datos experimentales para la realización de esta práctica de laboratorio será orientada por el profesor encargado de la práctica, se recomienda levantar datos de por lo menos 3 perfiles de flujo en diferentes condiciones hidráulicas.

Tabla # 2: Cálculo de la Superficie del agua por el método del paso directo

[illegible]