



Laboratorio
de Hidráulica
Ing. David
Hernández Huéramo



Dr. Juan Pablo Molina Aguilar • Ing. Jorge Leonel Angel Hurtado • M. I. Jesús Martín Caballero Ulaje

Revisión 2023

NOMBRE DE LA PRÁCTICA

FLUJO GRADUALMENTE VARIADO

OBJETIVO (S)

Una vez desarrollada la práctica, orientada a visualizar y comprender, el alumno será capaz de:

1. Entender el comportamiento del flujo gradualmente variado e identificar correctamente los perfiles de flujo que se pueden presentar en canales.

ENCUADRE TEÓRICO

El flujo gradualmente variado se refiere a un flujo permanente cuya profundidad varía gradualmente en la dirección del canal, de tal manera que las líneas de corriente son rectas y prácticamente paralelas. Por lo tanto, la distribución hidrostática de presiones prevalece en cada sección.

El análisis del perfil del flujo gradualmente variado es un procedimiento utilizado para predecir el comportamiento general. Esto capacita al ingeniero para determinar anticipadamente los perfiles de flujo que llegan a ocurrir en el diseño de un canal dado. Dicho procedimiento constituye una parte muy significativa de todos los problemas de diseño de canales para un flujo gradualmente variado.

Debido a que el flujo gradualmente variado involucra cambios pequeños de profundidad, este flujo está relacionado con longitudes grandes del canal y puede ser de dos tipos.

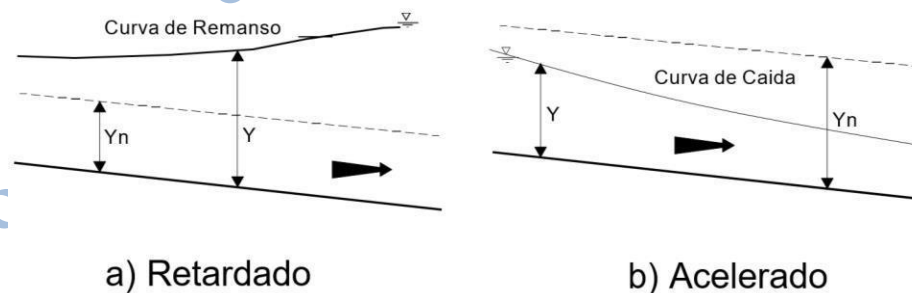


Figura 4.1 Características del flujo retardado y acelerado.

Flujo variado retardado

Se presenta cuando la velocidad del flujo disminuye, y por ende aumenta la profundidad (Figura 4.1 a), en el sentido de la corriente.

Flujo variado acelerado

Se presenta cuando la velocidad del flujo aumenta, y por ende disminuye la profundidad (Figura 4.1 b), en el sentido de la corriente.

Perfiles de flujo variado

En el análisis de flujo en canales abiertos es necesario predecir el comportamiento de los perfiles de la lámina de agua. Esto se puede hacer con un análisis del comportamiento de la pendiente de la superficie del agua en función de las variables geométricas e hidráulicas del flujo (Figura 4.2), como se analizará a continuación:

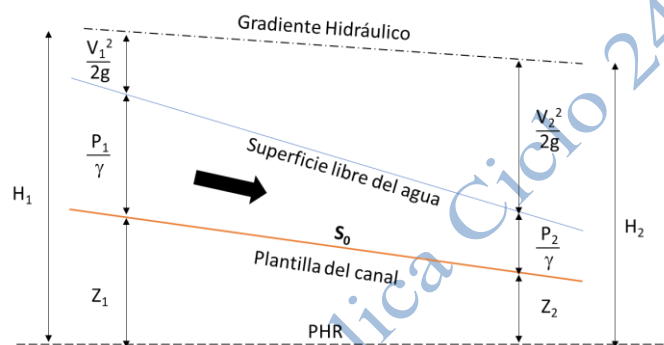


Figura 4.2 Comportamiento de las variables geométricas e hidráulicas en un flujo gradualmente variado.

En cualquier sección transversal la energía total H está dada por la expresión:

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

Donde:

H = Energía total [m]

z = Energía de posición [m]

$y = p / \gamma$ = Energía de presión [m]

V = Velocidad del flujo [m/s]

g = Aceleración de la gravedad [9.81 m/s²]

Derivando la ecuación de la energía total (ecuación previa) respecto de la distancia longitudinal y considerando un sistema de referencia (x, y) con incrementos positivos hacia la derecha y hacia arriba respectivamente, se obtiene:

$$\frac{d(H)}{dx} = \frac{d(z)}{dx} + \frac{d(y)}{dx} + \frac{d\left(\frac{V^2}{2g}\right)}{dx}$$

El cambio de energía respecto a la distancia x , es decir la pendiente de fricción S_f ; siempre negativa para el sistema de referencia especificado, sería:

$$\frac{d(H)}{dx} = -S_f$$

El cambio de elevación del fondo del canal con respecto a la distancia, o pendiente del fondo S_0 ; para el sistema de referencia especificado es negativa cuando decrece en el sentido de flujo, es decir:

$$\frac{d(z)}{dx} = -S_0$$

El cambio en la energía cinética respecto a la distancia se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\frac{d\left(\frac{V^2}{2g}\right)}{dx} = -\frac{Q^2}{gA^3} \frac{d(A)}{dy} \frac{d(y)}{dx} = -\frac{Q^2 B}{gA^3} \frac{d(y)}{dx} = -F_r^2 \frac{d(y)}{dx}$$

Siendo el número de Froude:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gY}}$$

definida la profundidad hidráulica Y como:

$$Y = \frac{A}{B}$$

Donde:

A = Área hidráulica en la sección [m²]

B = Ancho de la superficie libre del agua [m]

Sustituyendo las derivadas en la ecuación original y despejando para el cambio en la profundidad con respecto de la distancia se tiene:

$$\frac{d(y)}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 - F_r^2}$$

La ecuación describe la variación de la profundidad del flujo dy/dx en un canal de forma arbitraria como función de S_0 , S_f y Fr^2 . Para el cálculo de los perfiles de flujo es útil determinar la relación entre las pendientes de fondo (S_0), de fricción (S_f) y del

número de Froude (Fr). Por las características del flujo uniforme se tiene que $Y = Y_n$, $S_0 = S_f$ y en la condición de flujo crítico $Fr = 1$.

	Pefiles en la zona 1 $y > y_n ; S_0 > S_f$ $y > y_c ; Fr^2 < 1$	Pefiles en la zona 2 $y_n \geq y \geq y_c ; S_0 \leq S_f ; Fr^2 \leq 1$ $y_c \geq y \geq y_n ; S_0 \geq S_f ; Fr^2 \geq 1$	Pefiles en la zona 3 $y < y_n ; S_0 < S_f$ $y < y_c ; Fr^2 > 1$
Pendiente positiva: $S_0 > 0$	Subcrítica: $y_n > y_c$ $\frac{dy}{dx} = \frac{+}{+} = +$ Cálculo 	Cálculo 	Cálculo
	Crítica: $y_n = y_c$ $\frac{dy}{dx} = \frac{+}{+} = +$ Cálculo 	$\frac{dy}{dx} = 0$ Cálculo 	Cálculo $\frac{dy}{dx} = \frac{-}{-} = +$
	Supercrítica: $y_n < y_c$ $\frac{dy}{dx} = \frac{+}{+} = +$ Cálculo 	$\frac{dy}{dx} = \frac{+}{-} = -$ Cálculo 	Cálculo $\frac{dy}{dx} = \frac{-}{-} = +$
Pendiente horizontal $S_0 = 0$	$\frac{dy}{dx}$ no existe Ninguno 	$\frac{dy}{dx} = \frac{-}{+} = -$ Cálculo 	Cálculo $\frac{dy}{dx} = \frac{-}{-} = +$
Pendiente negativa $S_0 < 0$	$\frac{dy}{dx}$ no existe Ninguno 	$\frac{dy}{dx} = \frac{-}{+} = -$ Cálculo 	Cálculo $\frac{dy}{dx} = \frac{-}{-} = +$

Figura 4.3 Clasificación del flujo gradualmente variado en perfiles hidráulicos.

De lo anterior y un análisis del comportamiento y la interacción de las variables hidráulicas se puede establecer el siguiente juego de desigualdades:

- $S_f > S_0$ corresponde a $y < y_n$ y $S_f < S_0$ corresponde a $y > y_n$.
- $Fr > 1$ corresponde a $y < y_c$ y $Fr < 1$ corresponde a $y > y_c$.

Estas desigualdades dividen el canal en tres secciones en la dimensión vertical como se pueden observar en la Figura 4.3. Por convención, estas zonas se numeran del 1 al 3 empezando por la porción superior. Los perfiles en canales con pendientes menores que la crítica, se denominan perfiles de pendiente suave “Mild” (**M**); los perfiles en canales de pendiente mayor que la crítica se denominan de pendiente fuerte “Strong” (**S**); los perfiles en canales con pendiente igual a la pendiente crítica “Critical” (**C**), los perfiles en canales con pendiente negativa se denominan adversos “Adverse” (**A**) y los perfiles en canales horizontales se denominan “Horizontal” (**H**).

Para cada zona y para cada tipo de pendiente del canal, la pendiente del nivel del agua puede ser positiva o negativa, presentándose flujo retardado o acelerado respectivamente. Por ejemplo, para un canal de pendiente suave o subcrítica:

- Zona 1: $y_n < y > y_c$; $S_0 > S_f$, $Fr < 1$; por tanto, $dy/dx < 0$, se forma remanso, perfil M1.
- Zona 2: $y_n > y > y_c$; $S_0 < S_f$, $Fr < 1$; por tanto, $dy/dx > 0$, se forma caída, perfil M2.
- Zona 3: $y_n > y < y_c$; $S_0 < S_f$, $Fr > 1$; por tanto, $dy/dx < 0$, se forma remanso, perfil M3.

Con un análisis similar al anterior para cada zona y cada pendiente se tienen diversas situaciones, presentadas en la Figura 4.3.

EQUIPO O DISPOSITIVO

Canal de pendiente variable.

MATERIALES

- Limnímetros.
- Flexómetros.

PROCEDIMIENTO

La práctica se desarrollará en una etapa, acorde con la siguiente secuencia de pasos:

Etapa I.

1. Medir las variables geométricas de la sección transversal del canal de pendiente variable.
2. Colocar el dispositivo para cambio de flujo en el canal.
3. Hacer circular un gasto por el canal.
4. Observar la variación del perfil del agua. Si esta es notoria continuar con el paso siguiente; de lo contrario modificar la pendiente del canal y el gasto hasta lograr visualizar bien la variación del perfil.
5. Medir los tirantes del flujo a lo largo del canal.
6. Calcular la pendiente del canal (S_0).
7. Identificar el tipo de flujo, ya sea subcrítico, crítico o supercrítico.
8. Identificar el tipo de perfil de acuerdo con la Figura 4.3.
9. Una vez determinado el tipo de perfil, se deja de circular el agua y se repite desde el paso No 2, colocando el dispositivo a la inversa.

REGISTRO DE MEDICIONES

ETAPA 1

No se realizarán mediciones.

ACTIVIDADES

ETAPA 1

1. Con base a los tirantes tomados a lo largo del canal para cada ejemplo, dibujar los perfiles de cada uno de los flujos, indicando el tipo de flujo de acuerdo con la Figura 4.3.
2. Investigar las causas que pueden generar un flujo gradualmente variado retardado y un flujo gradualmente variado acelerado y dar un mínimo de 2 ejemplos.
3. Desde el punto de vista práctico, ¿Qué perfil tiene la mayor importancia de acuerdo con la clasificación presentada por Chow? Justifica tu respuesta.
4. Mencione los métodos teóricos que se utilizan para el cálculo de perfiles de flujo gradualmente variado.
5. Mencione dos consideraciones que se deben de hacer al calcular un perfil de flujo gradualmente variado por medio de un método teórico.

INSTRUCCIONES

1. Dibuja los perfiles de flujos observados durante la práctica.
2. Realizar una conclusión señalando lo aprendido durante la práctica.