



MANUAL DE PRÁCTICAS LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE CANALES

INGENIERÍA CIVIL

IB606



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

I. PRESENTACIÓN



MANUAL DE PRÁCTICAS PARA LABORATORIO

Programa académico	Plan de estudio	Clave de la asignatura	Nombre de la asignatura	
Ingeniería Civil	Ingeniería básica	IB606	Laboratorio de hidráulica de canales	
Prácticas No.	Nombre del Laboratorio	Hidráulica		Horas de práctica
	Nombre de la práctica			
1	Canales abiertos y sus propiedades		2	
2	Clasificación del flujo		2	
3	Estado y régimen del flujo		2	
4	Descarga a través de estructuras en canales abiertos		4	
5	Distribución de velocidad		2	
6	Coeficientes de velocidad α y β		2	
7	Trazo de la línea de energía		2	
8	Aplicación de la ecuación de energía para el aforo de compuertas.		2	
9	Aplicación de la ecuación de cantidad de movimiento		2	
10	Flujo uniforme y permanente, cálculo de coeficientes		2	
11	Método sección pendiente		2	
12	Flujo rápidamente variado.		4	
13	Flujo gradualmente variado, clasificación de perfiles y cálculo de su longitud		4	
Anexo 1	Valores de viscosidad cinemática			

ATRIBUTOS /DOMINIO DE COMPETENCIA

- Define y manejar los parámetros hidráulicos para el diseño y operación de canales abiertos.
- Desarrolla habilidades y destrezas, relativas a la observación, cuantificación e interpretación de fenómenos hidráulicos.
- Comunica en forma oral y escrita sus ideas e interpretaciones, respecto a los fenómenos estudiados, así como exponer sus juicios de valor respecto a la relación que estos guardan con su vida y el mundo que le rodea.

NOMBRE DEL PROFESOR	FIRMA
FECHA	

ÍNDICE

Normas generales de prácticas en horario extra clase.....	4
Contenido del reporte.....	5
Canales abiertos y sus propiedades.....	6
Clasificación del flujo.....	11
Estado y régimen del flujo.....	14
Descarga a través de estructuras en canales abiertos.....	16
Distribución de velocidad.....	24
Coeficientes de velocidad α y β	28
Trazo de la línea de energía.....	30
Aplicación de la ecuación de energía para el aforo de compuertas.	32
Aplicación de la ecuación de cantidad de movimiento.....	35
Flujo uniforme y permanente, cálculo de coeficientes.....	37
Método sección pendiente.....	45
Flujo rápidamente variado.	48
Flujo gradualmente variado, clasificación de perfiles y cálculo de su longitud.....	53

NORMAS GENERALES DE PRÁCTICAS EN HORARIO EXTRA CLASE:

- I. Los alumnos podrán hacer uso del laboratorio en un horario distinto al asignado para poder llevar a cabo sus prácticas.
- II. El equipo deberá apartar el uso del laboratorio anticipadamente de acuerdo a la disponibilidad.
- III. Únicamente se recibirán equipos de un máximo de 6 personas por práctica.
- IV. El equipo o integrante del equipo que asista 15 minutos después de la hora en que se apartó el laboratorio, no podrá realizar la práctica.
- V. Para cada persona que asista al laboratorio es obligatorio conocer el contenido de la práctica desarrollada en este manual. Antes de comenzar con el trabajo de laboratorio, el grupo debe conocer los datos que se van a tomar durante la práctica y estar familiarizados con la misma. En caso de que no sepan los que se va a hacer, el grupo NO podrá realizar la práctica en ese momento.
- VI. Durante el desarrollo de la práctica, el equipo es el responsable de los materiales del laboratorio, en caso de descomposturas, tendrá que reponer o reparar los mismos.
- VII. Al terminar la práctica, el equipo es responsable de limpiar el equipo y área de trabajo utilizada
- VIII. Cada integrante del equipo deberá llenar el reporte de asistencia a la práctica.

CONTENIDO DEL REPORTE

- Título y objetivos de la práctica. -Especificar de manera clara lo que se pretende estudiar y los conocimientos que se pretenden adquirir.
- Antecedentes teóricos. - Se hace referencia a los principios físicos que respaldan el trabajo realizado.
- Equipo y materiales utilizados. - Descripción de los instrumentos utilizados.
- Procedimiento del experimento. - Enunciar cada paso llevado a cabo en la práctica, en el mismo orden de ejecución y de una forma clara.
- Datos y observaciones. - Valores medidos. Estos valores deben ser analizados y comparados, con el fin de verificar su coherencia y correspondencia.
- Cálculos y Resultados. - Los cálculos realizados al procesar los datos y los resultados obtenidos se presentan en forma de tabla o de una forma clara y organizada.
- Análisis de Resultados. - Comparar los datos experimentales con los que aparecen en los libros.
- Conclusiones. - Debe presentarse un análisis completo de las relaciones entre las variables, las comparaciones entre los resultados experimentales y los conceptos teóricos, y el desarrollo del experimento. Los resultados que presenten discrepancias deben ser discutidos, así como las posibles causas de error, proponiendo ideas que contribuyan a mejorar los resultados y el procedimiento de trabajo.
- Bibliografía. - Deben indicarse todos los textos, notas de profesores, trabajos de compañeros, manuales, catálogos, etc. que hayan sido usados en la realización del informe.

Nota: El catedrático de la materia puede hacer adecuaciones al contenido del reporte

PRÁCTICA No. 1

Canales abiertos y sus propiedades

INTRODUCCIÓN

Un canal es un conducto natural o artificial por donde fluye un líquido valiéndose únicamente de la acción de la fuerza de gravedad. Se caracteriza por presentar una superficie libre expuesta a presión atmosférica.

Elementos geométricos de un canal abierto

En la Figura 1 se muestran los elementos geométricos fundamentales de una sección de un canal.

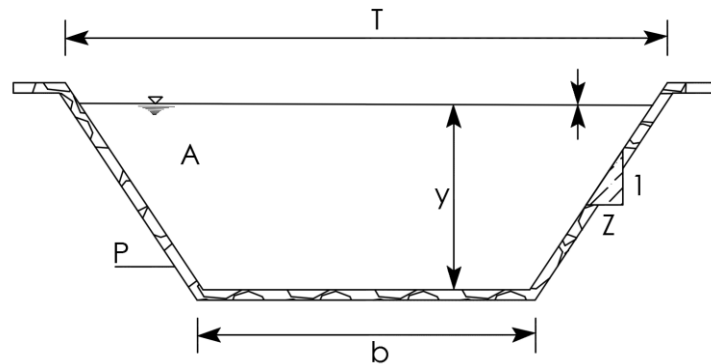


Figura 1. Elementos geométricos de un canal abierto

Área hidráulica (**A**), se refiere siempre a la de la sección transversal ocupada por el flujo en un canal, m².

Perímetro mojado (**P**) es la longitud de la línea de contacto entre el agua y la superficie mojada del canal, m.

Profundidad del flujo o Tirante hidráulico (**y**) es la distancia vertical a la plantilla, medida desde la superficie libre del agua al punto más bajo de la sección transversal.

Tirante normal de la sección (**d**) se mide en forma perpendicular al fondo del canal. Cuando el ángulo θ , que forma la pendiente longitudinal del canal con respecto al plano horizontal de referencia es muy pequeño, el tirante hidráulico y se puede considerar igual al tirante normal, d, m. La relación entre ambos tirantes es:

$$d = y \cos \theta \quad (1)$$

Ancho de la superficie libre o Espejo (**T**) es el ancho de la sección del canal, medido al nivel de la superficie libre, m.

Profundidad hidráulica o Tirante medio (**D**) es la relación entre el área hidráulica y el ancho de la superficie libre, m.

$$D = \frac{A}{T} \quad (2)$$

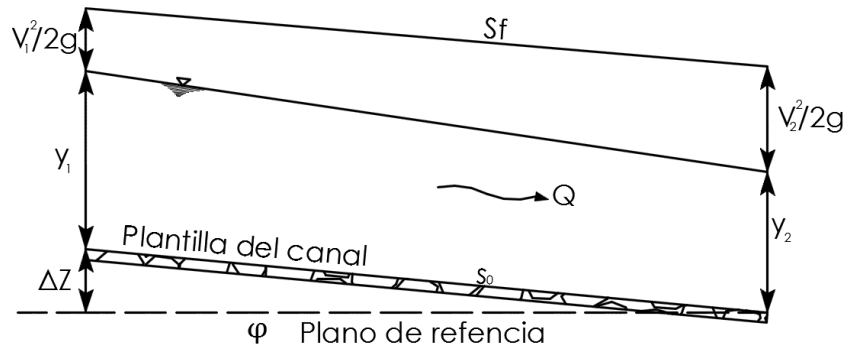


Figura 2. Elementos geométricos de un canal, sección longitudinal

Pendiente longitudinal (S_o) es la variación de altura con respecto a la horizontal en proporción longitudinal, por ejemplo, un incremento de altura o Δz en un metro.

$$S_o = \frac{\Delta z}{L} \quad (3)$$

Radio hidráulico (R_h) es el parámetro utilizado para medir el efecto de la forma del canal y es el cociente del área hidráulica y su perímetro mojado, m.

$$R_h = \frac{A}{P} \quad (4)$$

Talud (z) es la inclinación de las paredes de la sección transversal y corresponde a la distancia horizontal z recorrida desde un punto sobre la pared, para ascender la unidad de longitud a otro punto sobre la misma, generalmente se expresa 1: z .

Factor de sección para el cálculo de flujo uniforme ($AR^{2/3}$) es el producto del área hidráulica y el radio hidráulico elevado a la potencia $2/3$.

$$Z = AR^{2/3} = \frac{Q_n}{S^{1/2}} \quad (5)$$

Factor de sección para el cálculo de régimen crítico (Z) es el producto del área hidráulica y la raíz cuadrada de la profundidad hidráulica.

$$Z = A\sqrt{D} = A\sqrt{\frac{A}{T}} \quad (6)$$

De acuerdo con la figura 2, la pendiente longitudinal del canal, $S_o = \tan \theta$. [1] recomienda que “en la práctica θ sea menor o igual a 0.14 rad. (8°), esto es, canales de pendiente pequeña, para los que $\tan \vartheta \leq 0.14054$ y $\sin \vartheta \leq 0.13917$, de modo que la pendiente se pueda confundir con $\sin \vartheta$, sin incurrir en error mayor del uno por ciento”. A continuación, se presentan los diferentes tipos de secciones para un canal abierto (Figura 3).

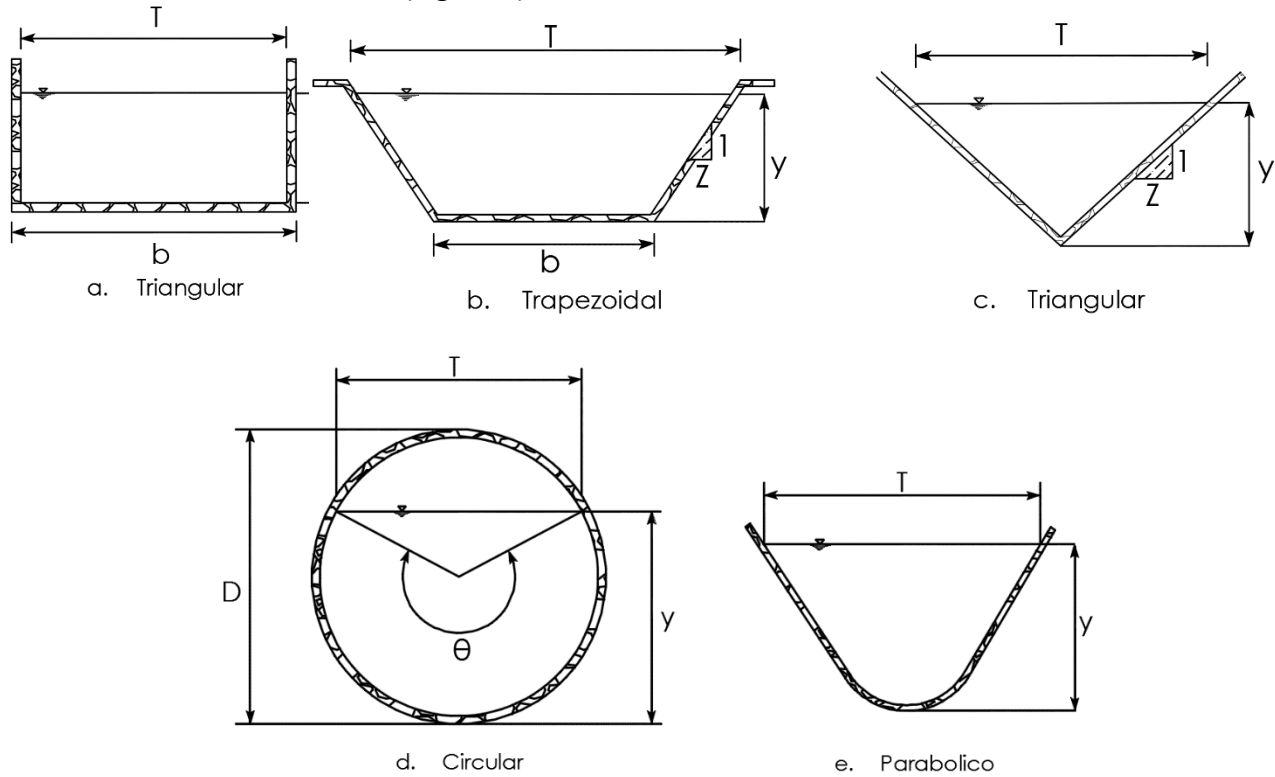


Figura 3. Tipos de secciones para un canal abierto. [1]

Tabla 1. Elementos geométricos de secciones de un canal.

Sección	Área A	Perímetro mojado P	Radio hidráulico R	Ancho superficial T	Profundidad hidráulica D	Factor de Sección Z
Rectangular	by	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	b	y	$by^{1.5}$
Trapezoidal	$(b+2y)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$	$\frac{(b+zy)y}{b+2zy}$	$\frac{[(b+zy)y]^{1.5}}{\sqrt{b+2zy}}$
Triangular	zy^2	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$	$\frac{1}{2}y$	$\frac{\sqrt{2}}{2}zy^{2.5}$
Circular	$\frac{(\theta - \text{sen})D^2}{8}$	$\frac{\theta D}{2}$	$(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta})\frac{D}{4}$	$\frac{(\text{sen}\frac{\theta}{2})D}{2\sqrt{y(D-y)}}$	$\frac{1}{8}\left(\frac{\theta - \text{sen}\theta}{\text{sen}\frac{\theta}{2}}\right)$	$\frac{\sqrt{2}}{32}\frac{(\theta - \text{sen}\theta)^{1.5}}{(\text{sen}\frac{\theta}{2})^{0.5}}D^{2.55}$
Parabólica	$\frac{2}{3}Ty$	$T + \frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T + 8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$	$\frac{2}{3}y$	$\frac{2}{9}\sqrt{6}(Ty^{1.5})$

INDICADORES DEL RESULTADO DE APRENDIZAJE	
FUNDAMENTO	
Conocer los elementos geométricos de un canal o sección transversal.	
PROCEDIMIENTO	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Medir en cada modelo Base Altura total Pendiente longitudinal 2. Definir características del material de acabado o recubrimiento 3. Medir en cada pila disipadora: Base Longitud Profundidad 4. Medir en las pilas aforadoras de cada modelo lo siguiente: Ancho Largo 5. Dibujar y dimensionar el perfil longitudinal y la planta de cada uno de los modelos de canales 6. Dibujar y dimensionar las secciones transversales de cada canal 	
EQUIPO	MATERIAL/REACTIVOS
<ul style="list-style-type: none"> • Cinta métrica • Nivel • Estadal • Regla 	
DESARROLLO	
CÁLCULOS Y RESULTADOS	
ANÁLISIS DE DATOS Y CONCLUSIONES/COMENTARIOS	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
[1] G. Sotelo, Hidráulica general, México: Limusa, 1997. (Capítulo 9, Páginas 275 a 301) [2] H. F. Richard, Hidráulica de canales abiertos, DF, México: Mc. GRAW-HILL, 1998.	
ANEXOS	

Clasificación del flujo

INTRODUCCIÓN

El flujo en canales abiertos puede clasificarse en muchos tipos y distribuirse de diferentes maneras. La siguiente clasificación se hace de acuerdo con el cambio en la profundidad del flujo con respecto al tiempo y al espacio.

Tipos de flujo. Su importancia radica en que el comportamiento hidráulico se analiza bajo distintas concepciones o modelos de flujo, cuyo grado de dificultad aumenta en la medida que las hipótesis se ajusten a la realidad. Para entender la clasificación del flujo en canales abiertos se muestra en la siguiente figura (Figura 4).

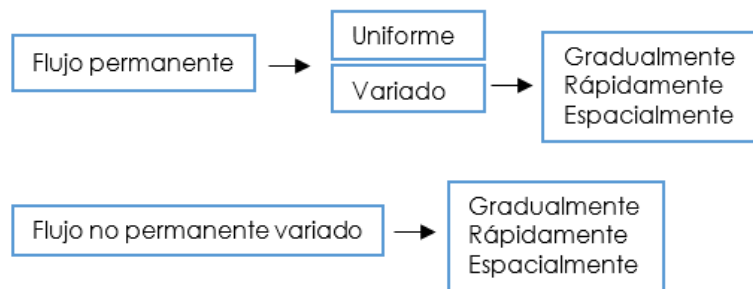


Figura 4. Clasificación del flujo en canales abiertos.

Flujo permanente. La profundidad de flujo no cambia o se supone constante respecto al tiempo.

$$dv/dt = 0$$

Flujo no permanente. La profundidad de flujo cambia respecto al tiempo.

$$dv/dt \neq 0$$

Flujo Uniforme. La velocidad media permanece constante en cualquier sección del canal y sus propiedades hidráulicas no cambian entre dos secciones (Figura 5).

$$dv/dx = 0$$

Flujo variado. El flujo es variado cuando la velocidad media cambia en las secciones a lo largo del canal, y sus secciones hidráulicas no son iguales.

$$dv/dx \neq 0$$

Flujo gradualmente variado. El tirante cambia en forma gradual a lo largo del canal.

Flujo rápidamente variado. El tirante cambia de manera abrupta a lo largo del canal.

Flujo espacialmente variado. El gasto cambia a lo largo del canal o en un tramo corto.

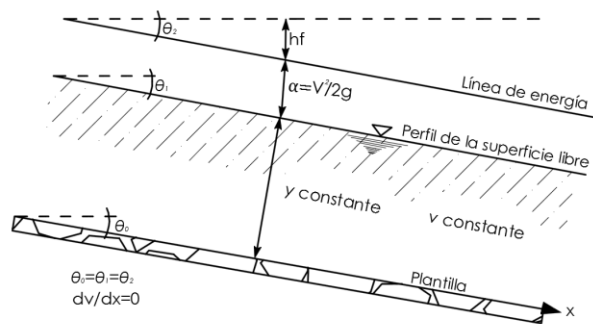


Figura 5. Flujo uniforme

Esta clasificación es opuesta a la del flujo uniforme., como se indica en la figura 6. El cambio de velocidad es para acelerar o desacelerar el movimiento y ocurre por una variación en la sección, por un cambio en la pendiente, o por la presencia de una estructura hidráulica, como un vertedor o una compuerta, interpuesta en la línea del flujo. La línea de energía, el perfil de la superficie y la plantilla tienen inclinaciones distintas entre sí.

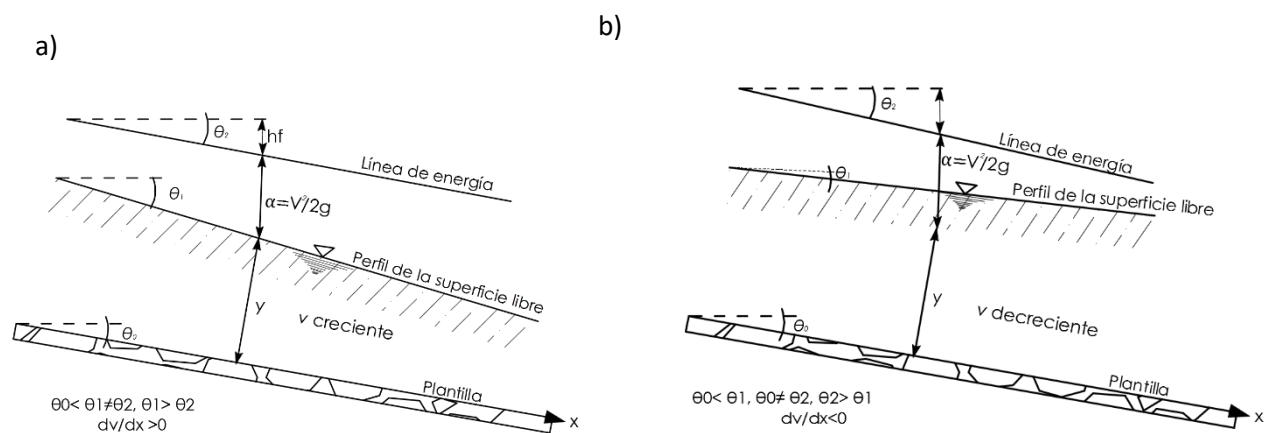


Figura 6. Flujo variado, a) Acelerado y b) Desacelerado.

INDICADORES DEL RESULTADO DE APRENDIZAJE

FUNDAMENTO

Experimentar mediante la recreación con los diferentes tipos de flujo que se pueden presentar en un canal.

PROCEDIMIENTO

1. Realizar un aforo volumétrico.
2. Medir tirantes a lo largo del modelo, m

3. Calcular velocidades para cada uno de los tirantes medidos, m/s
4. Tomar secciones entre los diferentes puntos medidos y clasificar cada uno de los flujos que se presenten.
5. Dibujar un perfil longitudinal del modelo especificando los diferentes flujos.

EQUIPO		MATERIAL/REACTIVOS	
<ul style="list-style-type: none">• Cinta métrica o regla• Cronómetro• Canal de pendiente variable			
DESARROLLO			
CÁLCULOS Y RESULTADOS			
ANÁLISIS DE DATOS Y CONCLUSIONES/COMENTARIOS			
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS			
[1]	G. Sotelo, Hidráulica general, México: Limusa, 1997. (Capítulo 9, Páginas 275 a 301)		
[2]	H. F. Richard, Hidráulica de canales abiertos, DF, México: Mc. GRAW-HILL, 1998.		
ANEXOS			

PRÁCTICA No. 3													
Estado y régimen del flujo													
INTRODUCCIÓN													
<p>Estado de flujo. Debido al efecto de la viscosidad, el flujo puede ser <i>laminar, de transición o turbulento</i>, de manera semejante a los conductos a presión. La importancia de la fuerza de inercia respecto a la viscosidad, ambas por unidad de masa, se mide con el número de Reynolds (Re), definido de la siguiente manera.</p> $Re = \frac{4VRh}{\nu} \quad (7)$ <p>Donde:</p> <p>Rh Radio hidráulico de la sección en m. V Velocidad media en la sección en m/s. ν Viscosidad cinemática del agua en m/s².</p> <p>En canales se ha comprobado resultados semejantes a los de los conductos a presión. Para fines prácticos se tiene:</p> <table> <tr> <td>$Re \leq 500$</td><td>Flujo laminar</td></tr> <tr> <td>$500 \leq Re \leq 12500$</td><td>Flujo transicional</td></tr> <tr> <td>$12500 \leq Re$</td><td>Flujo turbulento</td></tr> </table> <p>Régimen de flujo. Si se relacionan las fuerzas de inercia con las fuerzas gravitacionales se obtiene un parámetro adimensional conocido como número de Froude (Fr), el cual permite clasificar al flujo como subcrítico, crítico y supercrítico. El número de Froude se escribe:</p> $Fr = \frac{V_1}{\sqrt{gY_1}} \quad (8)$ <p>Donde:</p> <p>V Velocidad media del flujo en m/s, g aceleración de la gravedad en m/s². D Profundidad hidráulica en m.</p> <p>Dependiendo de la magnitud de la proporción de las fuerzas de gravedad e inercia, el régimen del flujo es clasificado como:</p> <table> <tr> <td>$Fr < 1$</td><td>Subcrítico</td></tr> <tr> <td>$Fr = 1$</td><td>Crítico</td></tr> <tr> <td>$Fr > 1$</td><td>Supercrítico</td></tr> </table>		$Re \leq 500$	Flujo laminar	$500 \leq Re \leq 12500$	Flujo transicional	$12500 \leq Re$	Flujo turbulento	$Fr < 1$	Subcrítico	$Fr = 1$	Crítico	$Fr > 1$	Supercrítico
$Re \leq 500$	Flujo laminar												
$500 \leq Re \leq 12500$	Flujo transicional												
$12500 \leq Re$	Flujo turbulento												
$Fr < 1$	Subcrítico												
$Fr = 1$	Crítico												
$Fr > 1$	Supercrítico												
INDICADORES DEL RESULTADO DE APRENDIZAJE													
FUNDAMENTO													

Identificar los diferentes estados y regímenes del flujo.	
PROCEDIMIENTO	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Aforo volumétrico, m^3/s 2. Medir la profundidad del flujo en diferentes secciones transversales, m 3. Calcular el área hidráulica A, m^2 4. Medir la temperatura, $^{\circ}C$ 5. Medir el espejo del agua B, m 6. Calcular el perímetro mojado P, m 7. Calcular la velocidad del flujo, m/s 8. Calcular el número de Froude 9. Clasificar el régimen de acuerdo al número de Froude 10. De la tabla 1, con la temperatura medida, calcular la viscosidad cinemática V, m^2/s 11. Calcular el radio hidráulico R, m 12. Calcular el número de Reynolds (Ver Anexo 1 para valores de viscosidad cinemática) 13. Clasificar el estado del flujo en función al número de Reynolds 	
EQUIPO	MATERIAL/REACTIVOS
<ul style="list-style-type: none"> • Cinta métrica o regla • Cronómetro • Canal de pendiente variable 	
DESARROLLO	
CÁLCULOS Y RESULTADOS	
ANÁLISIS DE DATOS Y CONCLUSIONES/COMENTARIOS	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
ANEXOS	

Descarga a través de estructuras en canales abiertos

INTRODUCCIÓN

De una manera general podemos decir que estructuras de aforo son todas aquellas que de una manera u otra permiten medir la cantidad de agua que circula por un conducto en una sección determinada.

Un vertedor es una estructura hidráulica que consiste en una placa o muro sobre el cual fluye líquido a superficie libre. Según su forma geométrica los vertedores se pueden clasificar en:

Vertedores de cresta delgada. Este tipo de estructuras se utilizan como dispositivos de aforo en laboratorios o en canales de pequeñas dimensiones y podemos encontrar los diferentes tipos como se muestra en la figura 7.

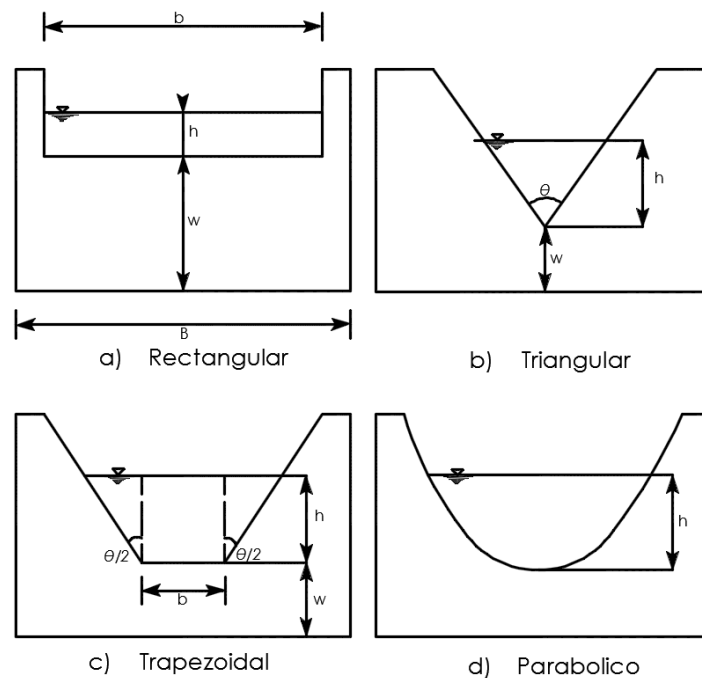


Figura 7. Vertedores de cresta delgada

Tabla 2. Ecuaciones para determinar el gasto de los diferentes tipos de vertedores de cresta delgada, los ecuaciones se obtuvieron de la metodología propuesta por Sotelo [1].

<i>Tipo de vertedor</i>	<i>Ecuación para determinar el gasto</i>	<i>Coeficiente de gasto μ</i>	<i>Coeficiente de gasto C</i>
a) Rectangular	$Q = C_1 b h^{3/2}$	Tabla 3	$C_1 = 2/3 \sqrt{2g} \mu$
b) Triangular	$Q = C_2 h^{5/2} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$	Tabla 4	$C_2 = 8/15 \sqrt{2g} \mu$
c) Trapezoidal	$Q = C_1 b h^{3/2} + C_2 h^{5/2} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$	Tabla 3 y Tabla 4	C1 (rectangular) C2 (triangular)
d) Parabólico	$Q = C_3 h^2$	$a = \frac{4h}{(T)^2}$ $\mu = \frac{2.658}{\sqrt{2g}} a^{0.012}$	$C_3 = \frac{2.088}{a^{0.488}}$ $C_3 = \frac{\pi \sqrt{2g} \mu}{4 \frac{1}{a^2}}$
e) Circular	$Q = Cd \phi D^{5/2}$		$Cd = 0.555 + \frac{D}{110h}$ $+0.041 \left(\frac{h}{D}\right)$

En donde C es el coeficiente de gasto, h es el tirante hidráulico que pasa por la sección y b es la base del canal.

Agregar razón del coeficiente de gasto para cada vertedor y constante parabólica para el vertedor parabólico. Explicar razonamiento del vertedor circular.

Tabla 3. Ecuaciones experimentales para determinar el coeficiente de gasto μ para aplicarse en la ecuación de gasto en vertedores rectangulares [1].

AUTOR	FÓRMULA	LÍMITE DE APLICACIÓN	OBSERVACIONES
Hegly (1921)	$\mu = \left[0.06075 - 0.045 \left(\frac{B-b}{B} \right) + \frac{0.0041}{h} \right] x \left[1 + 0.55 \left(\frac{b}{B} \right)^2 \left(\frac{h}{h+w} \right)^2 \right]$	$0.10 \text{ m} \leq h \leq 0.60 \text{ m}$ $0.50 \text{ m} \leq b \leq 2.00 \text{ m}$ $0.20 \text{ m} \leq w \leq 1.13 \text{ m}$	El primer límite de aplicación es el más importante. Para $h/b > 0.13$ tiene mayor precisión que la fórmula SIAS
Sociedad de Ingenieros y Arquitectos Suizos (SIAS)	$\mu = \left[0.578 + 0.037 \left(\frac{b}{B} \right)^2 + \frac{3.615 - 3 \left(\frac{b}{B} \right)^2}{h} \right] x \left[1 + 0.05 \left(\frac{b}{B} \right)^4 \left(\frac{h}{h+w} \right)^2 \right]$	$0.025 \text{ m} \leq h \leq 0.80 \text{ m}$ $b \leq 0.3B$ $w \geq 0.30 \text{ m}$ $h/w \leq 1$ en el caso de contracciones laterales	Para vertedores sin contracción lateral los límites son: $0.025 \text{ m} \leq h \leq 0.80 \text{ m}$ $0.30 \text{ m} \leq w$ $h/w \leq 1$ Para $h/b \leq 0.13$, es más precisa que la de Hegly
Hamilton - Smith	$\mu = 0.616 \left(1 - \frac{b}{10B} \right)$	$0.075 \text{ m} \leq h \leq 0.60 \text{ m}$ $0.30 \text{ m} \leq b$ $0.30 \text{ m} \leq w$ $h \leq w/2$ $b \leq (B-2h), \quad h/b \leq 0.5$	Si $B(h+w) < 10bh$, se deberá reemplazar en la ecs. 7.5 (Sotelo Á.) el valor de h por h' , donde: $h' = h + 1.4(V^2/2g)$ Siendo $V = [Q/B(h+w)]$ la velocidad de llegada.
Francis	$\mu = 0.623 \left[1 - 0.1 n \frac{h}{B} \right] x \left[\left(1 + \frac{V_0^2}{2gh} \right)^{3/2} - \left(\frac{V_0^2}{2gh} \right) \right]$	$0.18 \text{ m} \leq h \leq 0.50 \text{ m}$ $2.40 \text{ m} \leq b \leq 3.00 \text{ m}$ $0.60 \text{ m} \leq w \leq 1.50 \text{ m}$ $b \geq 3h$	$V = Q / (B(h+w))$ Siendo V la velocidad de llegada. $n = 2$ en vertedores con contracción lateral $n = 0$ en vertedores sin contracciones laterales
Rehbock (1929)	$\mu = 0.60035 + 0.0813 \left[\frac{h + 0.0011}{w} \right] x \left[1 + \frac{0.0011}{h} \right]^{3/2}$	$0.18 \text{ m} \leq h \leq 0.50 \text{ m}$ $b \geq 0.3 \text{ m}$ $w \geq 0.06 \text{ m}$ $h/w \leq 1$	Vale sólo para vertedores sin contracciones laterales. Es muy precisa y de las más utilizadas, por su sencillez.

Tabla 4. Fórmulas experimentales para determinar los coeficientes de gasto μ o C aplicables a la ecuación para vertedor triangular con diferentes valores para el ángulo θ en el vértice. Donde W es la altura del vertedor respecto a la base del canal, B representa el ancho del canal de llegada. En cualquier caso, las fórmulas se expresan en el sistema MKS* [1].

AUTOR	FÓRMULA	LIMITE DE APLICACIÓN	OBSERVACIONES
Universidad católica de Chile	$C = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan \frac{\theta}{2} \mu K$	Vale para $15^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$ La profundidad W no tiene influencia en el coeficiente de gasto	μ coeficiente experimental que depende de h y θ (según la figura 7.9 Sotelo Ávila), K es otro coeficiente que depende de B/h (según la figura 7.10) y vale 1 si $B/h \geq 5$ para $\theta = 90^\circ$ y si $B/h \geq 2.75$ para $\theta = 45^\circ$
Gourley y Crimp	$C = \frac{1.32 \tan \frac{\theta}{2}}{h^{0.03}}$	Vale para θ de 45° , 60° y 90° y para profundidades w grandes	Esta fórmula conduce a la ecuación: $Q = 1.32 \tan (\theta / 2) h^{2.48}$
Hegly (1921)	$\mu = \left[0.5812 + \frac{0.00375}{h} \right] x \left\{ 1 + \left[\frac{h^2}{B(h+w)} \right]^2 \right\}$	Vale para $\theta = 90^\circ$ $0.10 \text{ m} \leq h \leq 0.50 \text{ m}$ y profundidades w pequeñas	Es de las fórmulas más precisas para vertedores con ángulo en el vértice $\theta = 90^\circ$
Barr (1909)	$\mu = 0.565 + \frac{0.0087}{h^{0.5}}$	Vale para $\theta = 90^\circ$ con cargas $0.05 \text{ m} \leq h \leq 0.25 \text{ m}$ $w \geq 3h$ $B \geq 8h$	El valor medio de $\mu = 0.593$ que resulta de esta fórmula corresponde bastante al resultado de Thompson (1861), y que conduce a la ecuación: $Q = 1.42 h^{5/2}$
Koch (1923) Yarmall (1926)	$\mu = 0.58$	Vale para $\theta = 90^\circ$ con cargas muy grandes. $W \geq 3h$, $B \geq 8h$	No se limita con precisión el rango de validez.
Hendricks	$\mu = [0.5775 + 0.214h^{1.125}] x \left\{ 1 + \left[\frac{h^2}{B(h+w)} \right]^2 \right\}$	Vale para $\theta = 60^\circ$ y cargas normales	Set bastante precisa

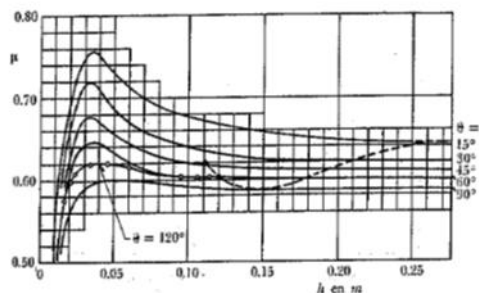
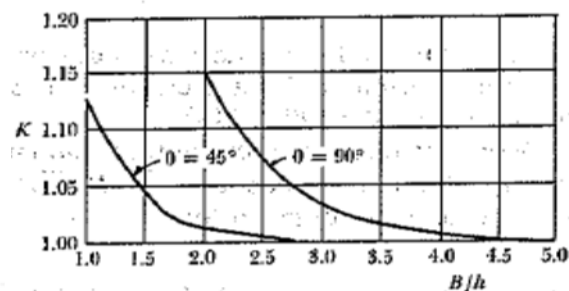


Figura 7.9. Coeficiente de gasto μ de vertedores triangulares en la fórmula de la Universidad Católica de Chile (Ref. 24).



Vertedores de cresta ancha. Estos vertedores de cresta ancha pueden adquirir varias formas. La forma más común es la de un vertedor rectangular (Figura 10). Para identificar un vertedor de cresta ancha se analiza la relación del ancho de la cresta y el tirante hidráulico (e/h) sea menor a **0.67**, en el cual el chorro se separa de la cresta y el funcionamiento es de un vertedor de cresta delgada. En cambio si la relación de $e/h > 0.67$ se tiene un comportamiento en el cual el chorro se adhiere a la cresta y funciona como vertedor de cresta ancha [2].

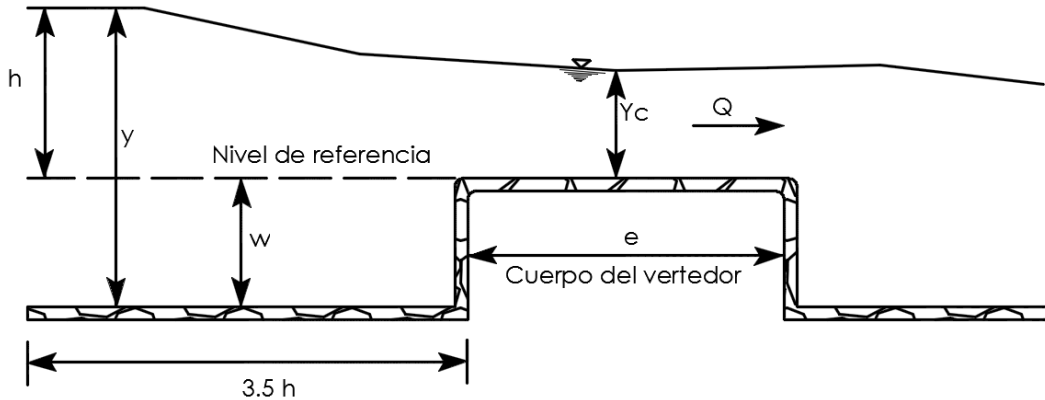


Figura 10. Perfil longitudinal de un vertedor de cresta ancha.

En la figura 10 se muestra un vertedor de cresta ancha rectangular donde **e** es el ancho de la cresta, **w** es la altura de la cresta, **Y** es el tirante aguas arriba. La ecuación básica para calcular el caudal de todos los vertedores es:

$$Q = Cbh^{3/2} \quad (9)$$

Donde:

- C** Coeficiente de gasto según forma del vertedor.
- b** Longitud de cresta del vertedor, m
- h** Carga hidráulica de diseño, m

En el caso de que el vertedor de cresta ancha rectangular el caudal se ve afectado por el coeficiente de gasto **C1** (Tabla 3) y por el coeficiente de gasto μ correspondiente (Tabla 3), además de multiplicarlo por un coeficiente de reducción ε_1 :

$$Q = \varepsilon_1 Cbh^{3/2} \quad (10)$$

Donde ε_1 :

$$\varepsilon_1 = 0.7 + \frac{0.185h}{e} \quad (11)$$

La ecuación 2 es válida hasta $e/h=3$.

Vertedor tipo cimacio. Entre las funciones de un vertedor tipo cimacio, se mencionan: proteger a la cortina de una presa de las aguas que exceden al almacenamiento normal, como estructura aforadora, y como estructura generadora de carga hidráulica (presa derivadora). La forma de cresta del vertedor coincide con la superficie inferior de una napa aireada sobre un vertedor de cresta delgada como se muestra en la figura 11. El caudal que descarga un vertedor puede calcularse con la siguiente ecuación

$$Q = CLeH_0^{1.5} \quad (12)$$

Donde:

Le Longitud efectiva de cresta en m.

W (P) Profundidad de cresta en m.

e Espesor de cresta en m.

H energía total, medida con respecto al punto más alto de la cresta del vertedor, incluida la carga de velocidad en m

C Coeficiente de gasto, se obtiene con la figura 11 en la cual se busca la relación de su H_0 . Cuando $P > 1.33h$ se desprecia la carga de velocidad de llegada

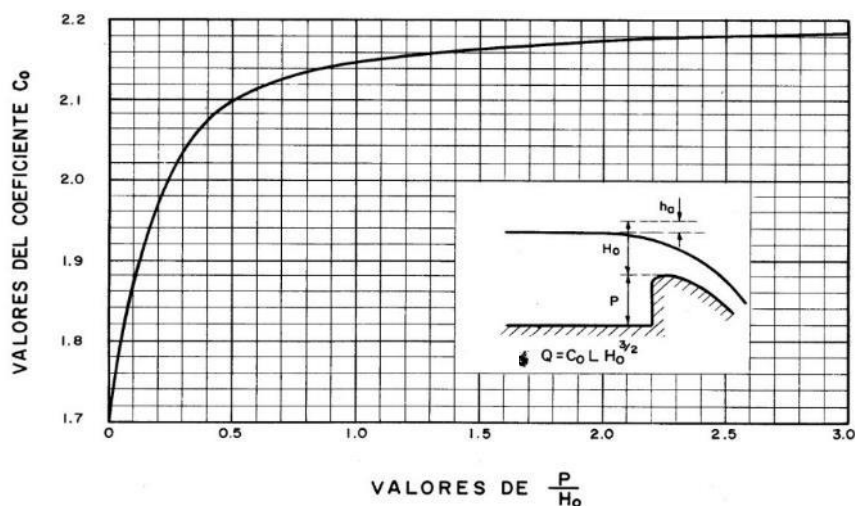


Figura 11. Coeficiente de gasto para un vertedor cimacio.

Medidor Parshall. El aforador Parshall (Figura 12), es un aparato que se basa en la pérdida de altura del nivel del agua producida por el paso forzado de una corriente a través de un estrechamiento inclinado. La entrada, de paredes convergentes, y la salida, de paredes divergentes, están separadas por una garganta de paredes paralelas y con el piso inclinado. Este tipo de vertedor trabaja bajo condiciones de régimen crítico en la garganta, es ideal para aforos donde el agua lleve algún tipo de material arrastrado ya que no permite que el sedimento se deposite.

Se usan aforadores de tamaños escalonados para medir diferentes caudales de agua. Los de mayor tamaño son fijos y construidos con obra de albañilería, mientras que los más pequeños son móviles y se construyen de chapa metálica o plástica.

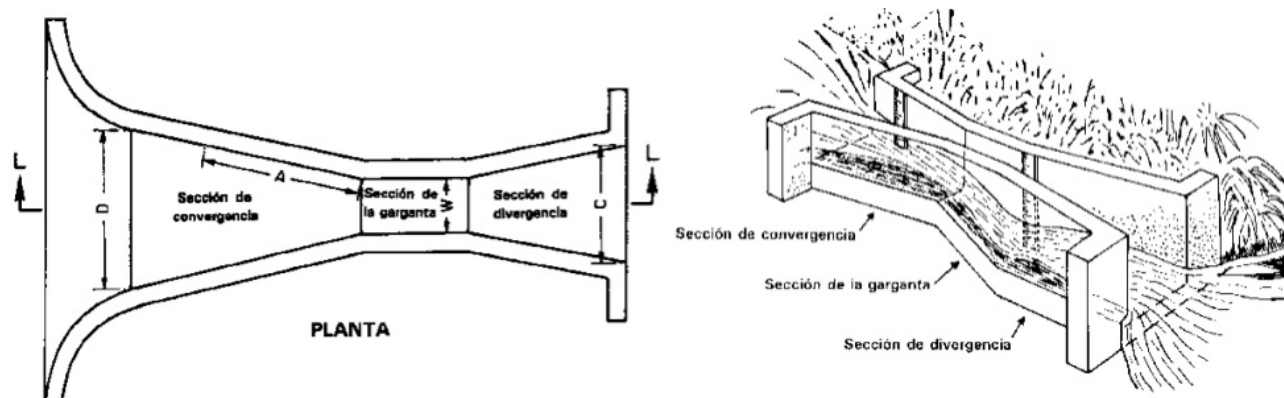


Figura 12. Diagrama en planta de un vertedor Parshall

La medición del caudal se obtiene mediante tablas específicas (tabla 5), para cada tipo de aforador. Con este procedimiento se obtienen mediciones muy precisas, aun cuando el aforador trabaje con inmersión casi completa.

Tabla 5. Ecuación para el cálculo del caudal de un vertedor Parshall como función del ancho de garganta W .

Ancho de la garganta (pies)	Ecuación del gasto libre (pies ³ /s)
0.25	$Q = 0.992H^{1.547}$
0.5	$Q = 2.06H^{1.58}$
0.67	$Q = 3.07H^{1.53}$
$1 \leq W \leq 8$	$Q = 4H^{1.522}W^{exp0.026}$
$10 \leq W \leq 50$	$Q = (3.6875W + 2.5)H^{1.6}$

INDICADORES DEL RESULTADO DE APRENDIZAJE

FUNDAMENTO

Determinar el gasto que fluye a través de una estructura de descarga.

PROCEDIMIENTO

- a) Vertedores de cresta delgada
 1. Medir la profundidad del flujo inmediatamente arriba del vertedor, sobre la pila de disipación
 2. Con los datos obtenidos en la práctica 1, y lo medido en el paso 1.1, calcular los coeficientes μ para los vertedores triangular y rectangular a partir de las tablas 2 y 3.
 3. Sustituir los datos anteriores en las fórmulas 11 y 12 para los vertedores rectangular y triangular respectivamente.
- b) Vertedores de cresta ancha
 1. Medir la carga hidráulica a una distancia $3.5h$
 2. Medir el ancho de la cresta (e) del vertedor
 3. A partir de las ecuaciones 15 y 16, obtener el caudal

c) Vertedor tipo Cimacio

1. Medir la profundidad del flujo sobre la cresta del vertedor (h)
2. Medir la profundidad del flujo (y), a una distancia aguas arriba del vertedor de $2.5h$.
3. A la profundidad medida en el paso 2.2, restar la profundidad del vertedor (P), medida en la práctica 1.
4. Obtener el coeficiente C para el cimacio, a partir de la figura 10.
5. Calcular el caudal mediante la fórmula.

d) Vertedor Parshall

1. Medir ancho de garganta (W), (pila.).
2. Medir longitud A
3. Medir profundidad hidráulica (H), a una distancia de $2/3$ de A , medida del inicio de la garganta hacia aguas arriba.
4. En función al ancho de garganta, emplear la ecuación recomendada según la tabla 5.

EQUIPO	MATERIAL/REACTIVOS
<ul style="list-style-type: none"> • Cinta métrica o regla • Cronómetro 	
DESARROLLO	
CÁLCULOS Y RESULTADOS	
ANÁLISIS DE DATOS Y CONCLUSIONES/COMENTARIOS	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
<p>[1] G. Sotelo, Hidráulica general, México: Limusa, 1997. (Capítulo 9, Páginas 275 a 301)</p> <p>[2] H. F. Richard, Hidráulica de canales abiertos, DF, México: Mc. GRAW-HILL, 1998.</p>	
ANEXOS	

PRÁCTICA No. 5

Distribución de velocidad

INTRODUCCIÓN

El perfil vertical de velocidad que existe en un canal, es aproximadamente logarítmico (figura 13). Es función de la forma y profundidad del canal, sin embargo, investigadores como Prandtl-Von Karman, establece que la velocidad máxima ocurre en la superficie libre. Sin embargo, las medidas en laboratorios y en el campo demuestran que la velocidad máxima por lo común ocurre debajo de la superficie libre, no obstante, en flujos superficiales, rápidos y anchos o en flujos que ocurren en canales muy lisos, la velocidad máxima puede estar en la superficie libre (figura 14). En general, la distribución de velocidad en un canal se considera que depende principalmente de la forma de la sección transversal y de la rugosidad de la frontera.

Existen diversos métodos para calcular la velocidad y por consiguiente el caudal que fluye por un canal abierto, como los métodos de velocidad/superficie, correntómetros, flotadores, entre otros.

El método velocidad/superficie se basa en las ecuaciones de Manning y de continuidad, donde el principal parámetro que debe calcularse es la velocidad del flujo. Este parámetro está determinado por: la pendiente del canal, su rugosidad y la forma.

Para determinar la velocidad en cualquier punto y profundidad de un canal abierto el procedimiento más sencillo, por facilidad operativa, es el uso de correntómetros más conocidos como molinetes, los cuales registran la velocidad del flujo valiéndose de aspas, conos o pequeñas turbinas (figuras 18 y 19).

Curva de velocidades en un eje vertical de una corriente

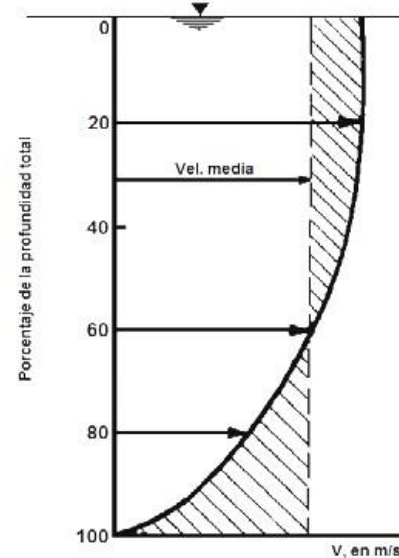


Figura 14. Distribución de velocidad en un canal abierto para diferentes formas de sección transversal

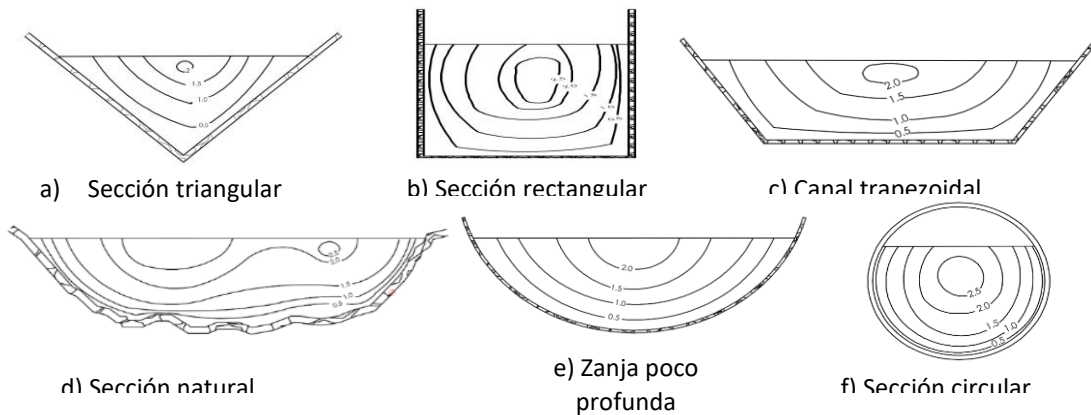


Figura 13. Perfil vertical de velocidad en un canal abierto

Estas registran el número de revoluciones o vueltas que genera el flujo al chocar con éstas. Para el medidor Price la relación entre la velocidad y las revoluciones por unidad de tiempo se escribe:

$$V = aN + b \quad (13)$$

Donde a y b son constante de calibración, V es la velocidad del flujo y N es el número de revoluciones por unidad de tiempo.

Cada revolución de las copas cierra un circuito eléctrico operado por baterías el cual produce en los audífonos del operador un chasquido audible. Para aguas poco profundas debe utilizarse el micro medidor Price, procurando que la profundidad del agua no sea menor de 10cm.

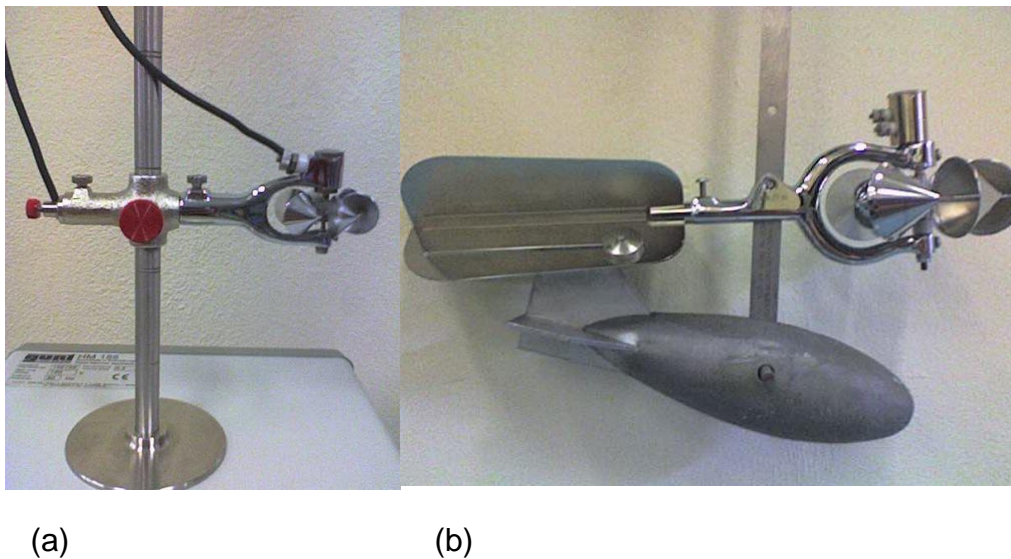


Figura 15. (a) Micro medidor Price o micromolinete para aforo de corrientes pequeñas o someras, (b) Medidor Price o molinete para aforo de corrientes grandes o caudalosas.

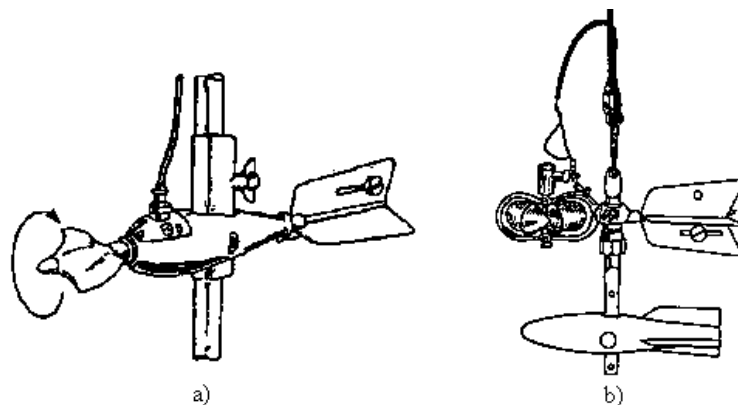


Figura 16. Molinete; a) Tipo hélice; b) Tipo cazoleta

Cuando la sección del canal a aforar es pequeña, la velocidad se mide al centro de la sección y a una profundidad de 0.6 del tirante. Para secciones anchas y profundas es más conveniente dividir la

sección en subsecciones de ancho constante (Figura 17), y obtener la velocidad media en cada subsección, que se calculará como el promedio de las velocidades medidas a 0.2 y 0.8 de la profundidad del flujo, aunque para las subsecciones primera y última se puede efectuar la medición de la velocidad a una profundidad de 0.6 del tirante, siempre y cuando éstas no sean muy profundas. Una vez conocidas las velocidades medias de cada subsección, el caudal se calcula con:

$$Q = \sum_{i=1}^n v_i d_i \Delta w_i \quad (14)$$

Donde:

V_i es la velocidad media de la subsección, en m/s.

d_i es la profundidad del flujo en el punto donde se midió la velocidad, en m.

Δw_i es el ancho de la subsección, en m.

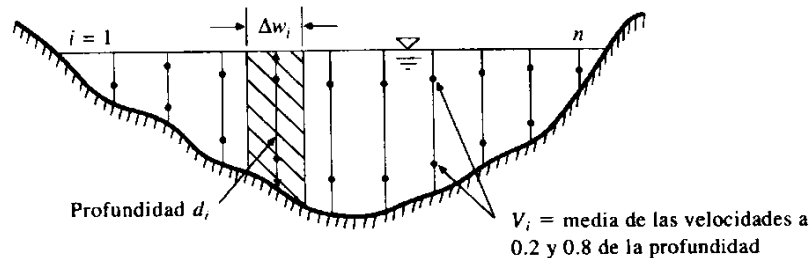


Figura 17. Sección transversal de un canal dividido en subsecciones

INDICADORES DEL RESULTADO DE APRENDIZAJE

FUNDAMENTO

Conocer la forma de trabajo de un correntómetro, calcular el perfil de distribución del flujo y dibujar las curvas de igual distribución de velocidad.

PROCEDIMIENTO

1. Localizar la sección transversal más adecuada, donde no haya influencia de estructuras o transiciones.
2. Medir la profundidad del flujo.
3. Fijar el correntómetro a profundidades que varíen de 5 en 5 cm., de la base a la superficie libre, contando el número de vueltas que den los tazonos del correntómetro respecto a su eje durante un minuto (N), para cada profundidad.
4. En la ecuación número 18, sustituir el valor de N calculado en el paso número 3 para cada profundidad y obtener la velocidad.

5. Graficar los valores de la velocidad respecto a la profundidad.
6. Calcular la velocidad media del flujo, fijando el correntómetro a 0.6y, medido de arriba hacia abajo.
7. Calcular la velocidad del flujo a profundidades de 0.8 y 0.2 del tirante.
8. Calcular la velocidad media del flujo, a partir de los datos del paso 7, con la ecuación 20.

$$V = (V_{0.8} + V_{0.2}) / 2 \quad (15)$$
9. Comparar la velocidad calculada en el paso 6, con la calculada en el paso 8
10. Graficar la velocidad media en el gráfico del paso 5.

EQUIPO	MATERIAL/REACTIVOS
<ul style="list-style-type: none"> • Cinta métrica • Correntómetro (Figura 18) • Cronómetro 	
DESARROLLO	
CÁLCULOS Y RESULTADOS	
ANÁLISIS DE DATOS Y CONCLUSIONES/COMENTARIOS	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
[1] G. Sotelo, Hidráulica general, México: Limusa, 1997. (Capítulo 9, Páginas 275 a 301) [2] H. F. Richard, Hidráulica de canales abiertos, DF, México: Mc. GRAW-HILL, 1998.	
ANEXOS	

PRÁCTICA No. 6

Coeficientes de velocidad α Y β

INTRODUCCIÓN

Debido a la distribución no uniforme de velocidades en una sección de canal (figura 18), la carga de velocidad de un flujo en canales abiertos es por lo general mayor que el valor calculado a partir de la expresión $V^2/2g$, por lo que es conveniente afectarla por un coeficiente α conocido como coeficiente de energía. En flujo en canales abiertos, la distribución no uniforme de velocidades también afecta el cálculo del momentum, de ahí la importancia de familiarizarse con los coeficientes α y con las ecuaciones para calcularlos.

Coeficiente de energía o coeficiente de Coriolis. Cuando se utiliza el principio de energía en cálculos, la carga de velocidad real puede expresarse como $\alpha (V^2/2g)$, siendo α coeficiente de energía o coeficiente de coriolis, en honor a G. Coriolis. El valor de α para canales prismáticos relativamente rectos, varía desde 1.03 hasta 1.36, donde el valor alto se asocia con canales pequeños y el valor bajo con corrientes grandes y de profundidad considerable.

Coeficiente de momentum o coeficiente de Boussinesq. A partir del principio de mecánica, el momentum de un fluido que pasa a través de una sección de canal por unidad de tiempo se expresa por $\beta \gamma QV/g$, donde β es conocido como coeficiente de momentum o coeficiente de Boussinesq, en honor a J. Boussinesq quien lo propuso por primera vez; γ es el peso unitario del agua, V es la velocidad media del agua y Q el caudal. Experimentalmente se ha encontrado que β para canales artificiales aproximadamente rectos, varía desde 1.01 hasta 1.12.

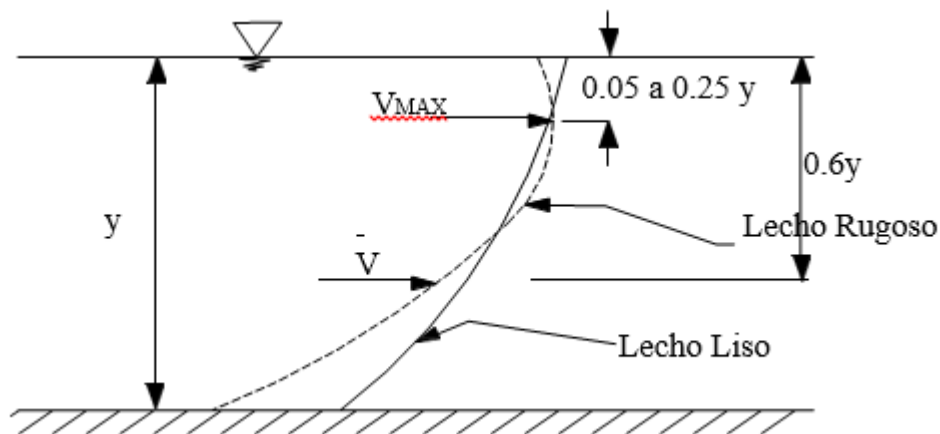


Figura 18. Perfil de distribución de velocidad en un canal abierto

INDICADORES DEL RESULTADO DE APRENDIZAJE

FUNDAMENTO

Que el alumno además de ser capaz de proponer los valores de los coeficientes de distribución de velocidad α y β , en función a lo sugerido por diferentes investigadores, los calcule para los modelos a partir de las respectivas ecuaciones.

PROCEDIMIENTO	
<p>Determinación de los coeficientes de distribución de energía y de mamentum</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Seleccionar una sección transversal en el modelo de pendiente fija donde no existan interferencias por estructuras. 2. Medir la profundidad del flujo. 3. Dividir en dovelas de ancho constantes la sección transversal del canal. 4. Calcular por medio del correntómetro la velocidad en diferentes profundidades de cada dovela. 5. Calcular la velocidad media general de la sección transversal 6. Establecer entre las velocidades calculadas, la velocidad máxima. 7. Suponiendo una distribución logarítmica de velocidades, calcular los coeficientes a partir de las siguientes ecuaciones: $\alpha = 1 + 3\varepsilon^2 - 2\varepsilon^3 \quad (16)$ $\beta = 1 + \varepsilon^2 \quad (17)$ <p>Donde:</p> $\varepsilon = \frac{V_{m\acute{a}x}}{V_{media}} - 1 \quad (18)$ <p>Siendo:</p> <p>$V_{m\acute{a}x}$ Velocidad máxima.</p> <p>V_{media} Velocidad media.</p> <p>Comparar los valores calculados a partir de las ecuaciones 21 y 22, con los valores propuestos por diferentes investigadores, para las mismas condiciones de revestimiento o material del modelo.</p>	
EQUIPO	MATERIAL/REACTIVOS
<ul style="list-style-type: none"> • Correntómetro • Cinta métrica • Cronómetro 	
DESARROLLO	
CÁLCULOS Y RESULTADOS	
ANÁLISIS DE DATOS Y CONCLUSIONES/COMENTARIOS	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
<p>[1] G. Sotelo, Hidráulica general, México: Limusa, 1997. (Capitulo 9, Paginas 275 a 301)</p> <p>[2] H. F. Richard, Hidráulica de canales abiertos, DF, México: Mc. GRAW-HILL, 1998.</p>	
ANEXOS	

PRÁCTICA No. 7

Trazo de la línea de energía

INTRODUCCIÓN

La energía específica en cualquier sección de un canal abierto está definida como la energía por kilogramo de agua, medida con respecto al fondo de éste. Si no se considera la carga de posición Z , la energía específica se escribe

$$E = d \cos \theta + \alpha \frac{v^2}{2g} = d \cos \theta \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (19)$$

Para canales con pendiente longitudinal pequeña ($\theta < 10^\circ$) la ecuación 20 se convierte en

$$E = y + \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (20)$$

La línea de energía es una línea imaginaria trazada con respecto a un plano horizontal de referencia, que resulta de sumar los siguientes conceptos (Figura 19); carga de posición (Z), carga de presión (y) y carga de velocidad ($\alpha v^2/2g$). Igualando la suma de las cargas anteriores entre dos secciones y con $\alpha = 1$, la ecuación de energía se indica como:

$$Z_1 + y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta E \quad (21)$$

Donde ΔE representa las pérdidas de energía tanto locales como de fricción entre las dos secciones consideradas para la aplicación de la ecuación de energía.

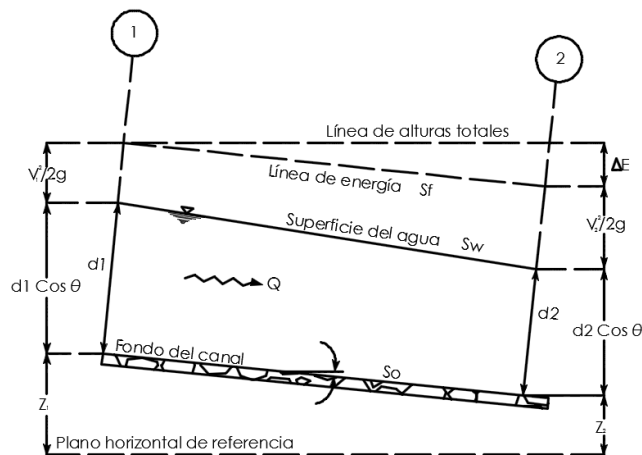


Figura 19. Energía específica

INDICADORES DEL RESULTADO DE APRENDIZAJE

FUNDAMENTO

Que el estudiante se familiarice con el manejo y uso de la ecuación de energía específica.

PROCEDIMIENTO

1. Aforar el modelo (cualquier método), m^3/s
2. Medir tirantes a lo largo del canal, principalmente antes, en y después de estructuras especiales y fenómenos hidráulicos, m.
3. Calcular la velocidad en cada sección donde se midió el tirante, m/s
4. De la práctica número 6, obtener el valor del coeficiente α
5. Calcular las cargas de velocidad en cada sección, m
6. Con respecto a un plano de referencia y para obtener la línea de energía, sumar en cada punto de medición los siguientes conceptos: carga de posición (ΔZ), carga de presión (y), y carga de velocidad ($\alpha V^2/2g$).
7. Trazar en un perfil longitudinal del canal lo siguiente:
 - Rasante del cana
 - Profundidad del flujo
 - Línea de energía
 - Línea de alturas totales

EQUIPO

MATERIAL/REACTIVOS

- Cinta métrica
- Cronómetro

DESARROLLO

CÁLCULOS Y RESULTADOS

ANÁLISIS DE DATOS Y CONCLUSIONES/COMENTARIOS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Sotelo, Hidráulica general, México: Limusa, 1997. (Capítulo 9, Páginas 275 a 301)
- [2] H. F. Richard, Hidráulica de canales abiertos, DF, México: Mc. GRAW-HILL, 1998.

ANEXOS

PRÁCTICA No. 8

Aplicación de la ecuación de energía para el aforo de compuertas.

INTRODUCCIÓN

Una compuerta es una placa móvil, que al moverse verticalmente permite graduar la altura del orificio que se va descubriendo en su parte inferior, controlando la descarga producida. El orificio que forma la compuerta generalmente se encuentra en el fondo del canal y por lo general coincide con el ancho de éste. El caudal que fluye bajo la compuerta puede analizarse mediante una red de flujo.

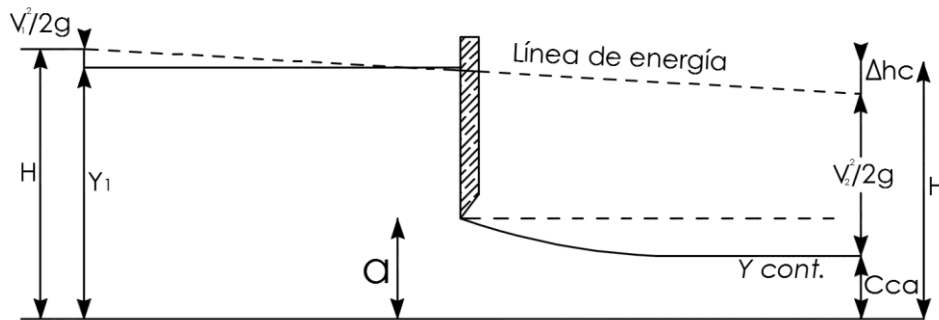


Figura 20. Flujo a través de una compuerta plana.

Como se muestra en la figura 20, el agua al pasar bajo la compuerta sufre un efecto de contracción. La profundidad del agua en la sección contraída será igual al producto de la apertura de la compuerta (a) por un coeficiente de contracción (C_c), a esta profundidad se le denomina profundidad contracta ($y_{cont.}$).

Para calcular el caudal que fluye bajo la compuerta será necesario aplicar la ecuación de energía entre las secciones aguas arriba de la compuerta, sección 1, y la sección 2 localizada en la profundidad contracta, despreciando la pérdida de energía por la compuerta:

$$H = y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = C_c a + \frac{v_2^2}{2g} \quad (22)$$

La ecuación de continuidad aplicada entre las secciones transversales 1 y 2 consideradas de ancho unitario, se expresa como:

$$V_1 = \frac{C_c a}{y_1} V_2 \quad (23)$$

Considerando que el coeficiente de gasto C_d es igual a $C_c C_v$ y como el coeficiente de velocidad es $C_v \approx 1$, sustituyendo en la ecuación de energía y expresándola en función al caudal se tiene

$$Q = C_d b a \sqrt{2g y_1} \quad (24)$$

La ecuación 24 se puede aplicar a cualquier tipo de compuerta, independientemente de que la descarga sea libre o sumergida. Para compuertas planas verticales, si $y_1/a < 1.35$ la ecuación 29 no tiene validez.

Para estimar el coeficiente de gasto, Cofré y Buchheister, citados por Domínguez^[8], propusieron, a partir de análisis experimentales, la figura 21. Donde dicho coeficiente depende de y_3/a , siendo y_3 el tirante aguas abajo de la compuerta cuando ésta descarga ahogada.

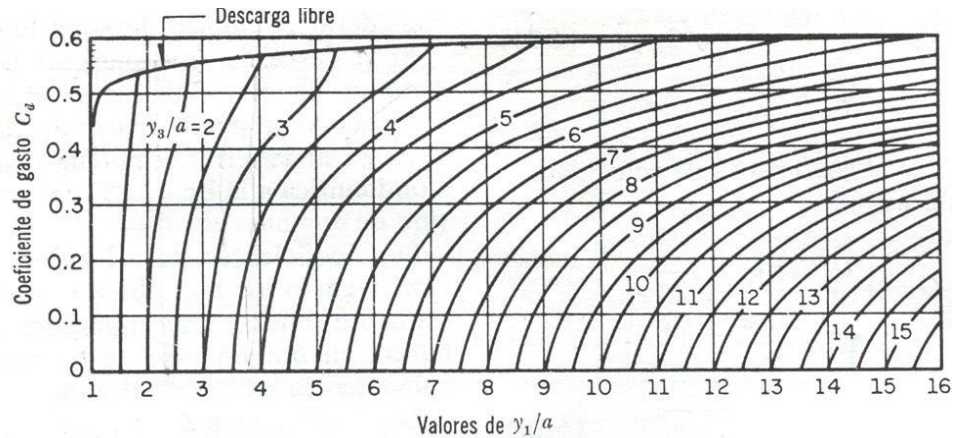


Figura 21. Coeficiente de gasto para una compuerta plana vertical, según Cofré y Buchheister[8].

INDICADORES DEL RESULTADO DE APRENDIZAJE	
FUNDAMENTO	
Aplicar el principio de energía para el aforo de compuertas planas y circulares.	
PROCEDIMIENTO	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Antes de poner a funcionar el canal, se abre la compuerta y se mide la apertura del fondo del canal a la parte inferior de la compuerta (a), así como el ancho de la compuerta (b). 2. Se pone a funcional el canal y se deja que se establezca con un determinado gasto, posteriormente se mide el tirante aguas arriba de la compuerta (sección 1). 3. Con la relación y_1/a, de la figura 24 obtener el coeficiente de descarga C_d y con los valores de a y b se calcula el caudal a partir de la ecuación 29, finalmente se compara con el caudal obtenido por aforo volumétrico. 	
EQUIPO	MATERIAL/REACTIVOS
<ul style="list-style-type: none"> • Cinta métrica. • Canal de pendiente variable. • Compuerta plana. 	
DESARROLLO	

CÁLCULOS Y RESULTADOS
ANÁLISIS DE DATOS Y CONCLUSIONES/COMENTARIOS
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
<p>[1] G. Sotelo, Hidráulica general, México: Limusa, 1997. (Capítulo 9, Páginas 275 a 301)</p> <p>[2] H. F. Richard, Hidráulica de canales abiertos, DF, México: Mc. GRAW-HILL, 1998.</p>
ANEXOS

PRÁCTICA No. 9

Aplicación de la ecuación de cantidad de movimiento

INTRODUCCIÓN

Aplicando la segunda ley de Newton a un volumen de control en un canal abierto, ésta establece que la resultante de todas las fuerzas externas que actúan sobre dicho volumen es igual al cambio de momentum por unidad de tiempo. El volumen de control está limitado por las secciones transversales 1 y 2, la superficie libre del agua y las paredes del canal. La ecuación de cantidad de movimiento para dicho volumen de control, considerando un caudal constante (Figura 22), puede escribirse

$$F_1 - F_2 + F_p - F_f - F_w = \frac{\gamma}{g} Q (\beta_1 V_1 - \beta_2 V_2) \quad (25)$$

Donde:

F_p Componente de presión ejercida en el área de la estructura

F_1 y F_2 Fuerza resultante de la presión ejercida en las secciones 1 y 2.

F_w Fuerza de cuerpo debida al peso del volumen de control.

F_f Fuerza resultante producida por el esfuerzo tangencial generado sobre el fondo y paredes del volumen de control.

Q gasto en la sección.

ρ Densidad del agua (γ / g).

V Velocidad media de la sección.

β Coeficiente de Boussinesq.

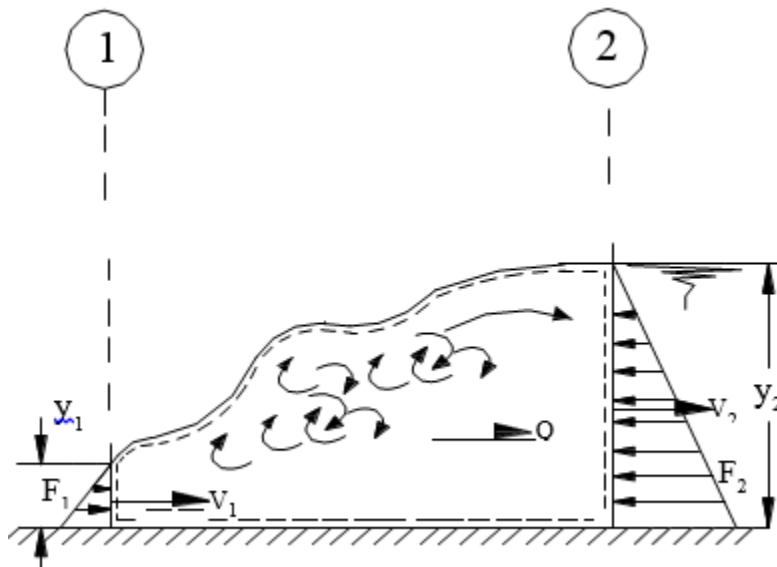


Figura 22. Volumen de control de un salto hidráulico en un canal abierto

INDICADORES DEL RESULTADO DE APRENDIZAJE

FUNDAMENTO	
Analizar un volumen de control y calcular las fuerzas hidráulicas que actúan sobre una estructura determinada.	
PROCEDIMIENTO	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Aforar el modelo (cualquier método excepto el volumétrico), m³/s. 2. Delimitar un volumen de control donde exista una estructura (compuerta, transición, etc.). 3. Medir características hidráulicas del volumen de control 4. Calcular las velocidades en las secciones transversales de aguas arriba y aguas abajo del volumen de control, m/s. 5. Establecer las fuerzas que actúan en el volumen 6. De la práctica 6, obtener el valor del coeficiente de momentum 7. Calcular la fuerza sobre una estructura interna en el volumen de control. 	
EQUIPO	MATERIAL/REACTIVOS
<ul style="list-style-type: none"> • Cinta métrica • Cronómetro 	
DESARROLLO	
CÁLCULOS Y RESULTADOS	
ANÁLISIS DE DATOS Y CONCLUSIONES/COMENTARIOS	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
<p>[1] G. Sotelo, Hidráulica general, México: Limusa, 1997. (Capítulo 9, Páginas 275 a 301)</p> <p>[2] H. F. Richard, Hidráulica de canales abiertos, DF, México: Mc. GRAW-HILL, 1998.</p>	
ANEXOS	

PRÁCTICA No. 10

Flujo uniforme y permanente, cálculo de coeficientes

INTRODUCCIÓN

Cuando el flujo se presenta en un canal abierto, el agua encuentra resistencia a medida que fluyen aguas abajo. Esta resistencia por lo general es contrarrestada por las componentes de fuerzas gravitacionales que actúan sobre el cuerpo de agua en la dirección del movimiento, a esta zona se le conoce como zona transitoria (Figura 23). Un flujo uniforme se desarrollará si la resistencia es balanceada por las fuerzas gravitacionales.

El flujo uniforme se presenta cuando todas las secciones del canal tienen exactamente las mismas características hidráulicas. Para que este tipo de flujo se presente es necesario que la sección transversal sea constante, que su trazo sea recto y de una longitud suficiente para vencer la zona transitoria. En este tipo de flujo, el gradiente de energía, la superficie libre del agua y la pendiente del fondo del canal presentan líneas paralelas.

En el flujo permanente, el tirante normal, la velocidad y el área hidráulica en cada sección transversal del canal, deben permanecer constantes en el tiempo y el espacio. Para el cálculo del flujo uniforme y permanente se emplean las fórmulas de Chezy (Ecuación 26) y la de Manning (Ecuación 29).

El contacto entre el agua y los márgenes del canal causa una resistencia (fricción) que depende de la suavidad o aspereza del canal. En las corrientes naturales la cantidad de vegetación influye en la rugosidad al igual que cualquier otra irregularidad que genere turbulencia.

Ecuación de Antoine Chezy

$$V = C\sqrt{R_h S} \quad (26)$$

Donde:

V Velocidad media en ft/s.

C Factor de resistencia al flujo, conocido como *C* de Chezy.

R_h Radio hidráulico en ft.

S Pendiente del canal.

Estimación del factor de resistencia de Chezy. Se han obtenido en forma experimental algunas ecuaciones que permiten estimar el valor de la **C** de Chezy, entre las más comunes se encuentran

- La ecuación de Basin, propuesta por el francés H. Basin^[2] en 1897, la cual es relativamente sencilla y donde el valor de *C* es función del radio hidráulico (*R*), y de un coeficiente de rugosidad *m*, cuyos valores se dan en la tabla 5. La ecuación de Basin no es adimensional, debido a que tiene unidades de aceleración (longitud/tiempo²). Expresada en unidades métricas, esta ecuación se escribe como

$$C = \frac{157.6}{1 + \frac{m}{\sqrt{R_h}}} \quad (27)$$

Tabla 5. Valores propuestos para el coeficiente m de Bazin	
Descripción del canal	m de Bazin
Pavimento muy suave con formaleta de madera cepillada	0.11
Madera sin cepillar, concreto o ladrillo	0.21
Mampostería en bloques de piedra o de piedra y ladrillo mal acabado	0.83
Canales en tierra en perfectas condiciones	1.54
Canales en tierra en condiciones normales	2.36
Canales en tierra en condiciones rugosas	3.17

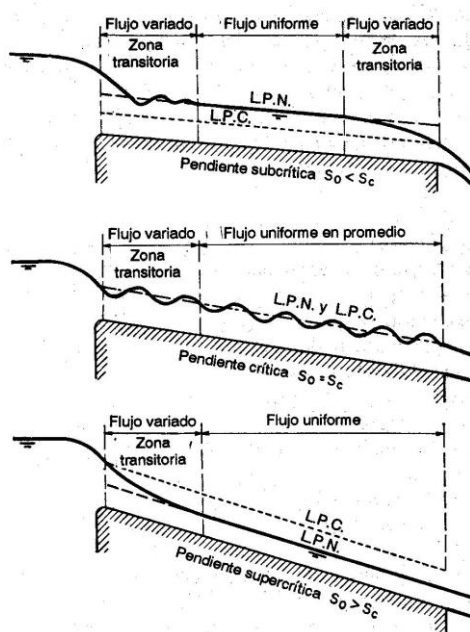


Figura 23. Zona transitoria y flujo uniforme en un canal a superficie libre.

- b) Manning. Esta ecuación es de las más utilizadas por su sencillez, donde el coeficiente n se puede calcular a partir de la tabla 6, y R_h el radio hidráulico. Originalmente fue obtenida a partir de ensayos hechos por Bazin y verificados posteriormente por observaciones.

$$C = \frac{1}{n} R_h^{\frac{1}{2}} \quad (28)$$

Ecuación de Manning. Esta ecuación es netamente empírica y fue presentada por primera ocasión por el ingeniero Irlandés Robert Manning en 1889. Es función del radio hidráulico (R), de la pendiente de la línea de energía (S) y del coeficiente de rugosidad n , conocido mundialmente como

coeficiente n de Manning y cuyo valor puede ser usado en ambos sistemas de unidades (tabla 6). La ecuación en el sistema métrico de unidades se escribe

$$V = \frac{1.49}{n} R_h^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

Donde:

V Velocidad media en ft/s.

R_h Radio hidráulico en ft.

S Pendiente del canal.

n Coeficiente de rugosidad o n de Manning.

De todas las ecuaciones de flujo uniforme, la ecuación de Manning es la más utilizadas para el cálculo de flujos en canales abiertos, debido a su sencillez y a los resultados satisfactorios que se obtienen con ella. En el Anexo 2 se presentan algunas tablas con valores propuestos para el coeficiente de rugosidad de Manning.

INDICADORES DEL RESULTADO DE APRENDIZAJE	
FUNDAMENTO	
Identificar el flujo uniforme en un canal y analizar el efecto que la rugosidad de las paredes de la sección transversal tiene sobre la velocidad del flujo	
PROCEDIMIENTO	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Generar un perfil hidráulico uniforme y permanente en el canal de pendiente variable 2. Aforar el modelo, m³/s. 3. Medir tirantes a lo largo del modelo para localizar flujo uniforme, m. 4. Calcular: <ul style="list-style-type: none"> • Área hidráulica, m²/s • Perímetro mojado, m. • Radio hidráulico, m. 5. Obtener la pendiente del fondo del canal (S_o) 6. De las ecuaciones para flujo uniforme (Chezy, ecuación 31 y de Manning ecuación 34), despejar los coeficientes de rugosidad "n" y "C" respectivamente 7. Comparar los coeficientes calculados en el paso 5, con los recomendados en diferentes libros de hidráulica para las mismas condiciones de revestimiento o acabado del modelo 	
EQUIPO	MATERIAL/REACTIVOS
<ul style="list-style-type: none"> • Cinta métrica o regla 	
DESARROLLO	
CÁLCULOS Y RESULTADOS	

ANÁLISIS DE DATOS Y CONCLUSIONES/COMENTARIOS
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
<p>[1] G. Sotelo, Hidráulica general, México: Limusa, 1997. (Capítulo 9, Páginas 275 a 301)</p> <p>[2] H. F. Richard, Hidráulica de canales abiertos, DF, México: Mc. GRAW-HILL, 1998.</p>

ANEXOS			
COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING (n)			
Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
A. Conductos cerrados que fluyen con superficie libre			
1. Metales			
a) Latón liso	0.009	0.1	0.013
b) Acero			
Soldado	0.01	0.012	0.014
Remachado	0.013	0.016	0.017
c) Hierro fundido			
Pintado	0.01	0.013	0.014
Normal	0.011	0.014	0.016
d) Hierro forjado			
Negro	0.01	0.014	0.015
Galvanizado	0.013	0.016	0.017
e) Metal corrugado			
Drenaje	0.017	0.019	0.021
Drenaje pluvial	0.021	0.024	0.03
2. No metales			
a) Lucita	0.008	0.009	0.01
b) Vidrio	0.009	0.01	0.013
c) Cemento			
Liso	0.01	0.011	0.013
Mortero	0.011	0.013	0.015
d) Concreto			
Alcantarillado recto y libre de escombros	0.01	0.011	0.013
Alcantarillado con curvas, conexiones y algunos escombros	0.011	0.013	0.014
Acabados	0.011	0.012	0.014
Drenajes rectos con ventanas de inspección, entradas, etc.	0.013	0.015	0.017
No acabados, en cimbra de acero	0.012	0.013	0.014
No acabados, en cimbra de madera lisa	0.012	0.014	0.016
No acabados, en cimbra de madera bruta	0.015	0.017	0.02
e) Madera			
Duela	0.01	0.012	0.014
Lamina tratada	0.015	0.017	0.02
f) Arcilla			
Tubos de barro cocido común	0.011	0.013	0.017
Tubos de albañil vitrificado	0.011	0.014	0.017
Tubos de albañil vitrificado con ventanas de inspección	0.013	0.015	0.017
Tubo vitrificado para drenes con juntas abiertas	0.014	0.016	0.018
g) Mampostería			
Barnizada o lacada	0.011	0.013	0.015
Acabados con mortero de cemento	0.012	0.015	0.017
h) Drenajes sanitarios cubiertos de lama con curvas conexiones	0.012	0.013	0.016
i) Drenaje con fondo liso	0.016	0.019	0.02
j) Acabados de cemento rugoso o mampostería de piedra, cementada	0.018	0.025	0.03

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Alto
B. Canales revestidos			
1. Metales			
a) Superficies de aceros lisas			
No pintadas	0.011	0.012	0.014
Pintadas	0.012	0.013	0.017
b) Corrugadas	0.021	0.025	0.03
2. No metales			
a) Cemento			
Superficie lisa	0.01	0.011	0.013
En mortero	0.011	0.013	0.015
b) Madera			
Cepillada, plana, no tratada	0.01	0.012	0.014
Cepillada, plana, creosotada	0.011	0.012	0.015
Sin cepillar	0.011	0.013	0.015
Tablones y tejamanil	0.012	0.015	0.018
Forrada con papel impermeabilizante	0.01	0.014	0.017
c) Concreto			
Acabado con llana metálica	0.011	0.013	0.015
Acabado con llana de madera	0.013	0.015	0.016
Acabado con grava en el fondo	0.015	0.017	0.02
Sin pulir	0.014	0.017	0.02
Lanzado (gunietado), buena sección	0.016	0.019	0.023
Lanzado (gunietado), sección ondular	0.018	0.022	0.025
Sobre roca excavada	0.017	0.02	
Sobre roca excavado irregular	0.022	0.027	
d) Fondo de concreto acabado con llana de madera y con taludes de:			
Mampostería cuidada, sobre mortero	0.015	0.017	0.02
Mampostería burda, sobre mortero	0.017	0.02	0.024
Mampostería junteada y recubierta con mortero	0.016	0.02	0.024
Mampostería junteada con mortero	0.02	0.025	0.03
Piedra suelta a volteo	0.02	0.03	0.035
e) Fondo de grava con lodos de:			
Concreto cimbrado	0.017	0.02	0.025
Mampostería sobre mortero	0.02	0.023	0.026
Piedra suelta a volteo	0.023	0.033	0.036
f) Ladrillo			
Barnizado o lacado	0.011	0.013	0.015
Con mortero de cemento	0.012	0.015	0.018
g) Mampostería			
Junteada con mortero	0.017	0.025	0.03
Piedra suelta	0.023	0.032	0.035
h) piedra labrada	0.013	0.015	0.017
i) Asfalto			
Liso	0.013	0.013	
Rugoso	0.016	0.016	
j) Cubierta vegetal	0.03		0.5

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
C. Canales excavados o dragados			
a) En tierra, recto y uniforme			
Limpio, recientemente terminado	0.016	0.018	0.02
Limpio, después de intemperizado	0.018	0.022	0.025
Con grava, sección uniforme y limpia	0.022	0.025	0.03
Con pastos cortos y alguna maleza	0.022	0.027	0.033
b) En tierra, con curvas y régimen lento			
Sin vegetación	0.023	0.025	0.03
Pasto y algo de hierba	0.025	0.03	0.033
Maleza densa o plantas acuáticas en canales profundos	0.03	0.035	0.04
Fondo de tierra y mampostería o piedra en los lados	0.028	0.03	0.035
Fondo pedregoso y maleza en los bordos	0.025	0.035	0.040.
Fondos con cantos rodados y lados limpios	0.03	0.04	0.05
c) Excavado o dragado en línea recta			
Sin vegetación	0.025	0.028	0.033
Pocos arbustos en los bordos	0.035	0.05	0.06
d) Cortes en roca			
Lisos y uniformes	0.025	0.035	0.04
Afilados e irregulares	0.035	0.04	0.05
e) Canales sin mantenimiento, malezas y matorrales sin cortar			
Maleza densa, tan alta como la profundidad del flujo	0.05	0.08	0.12
Fondo limpio, matorrales en los lados	0.04	0.05	0.08
Igual al anterior, nivel máximo de flujo	0.045	0.07	0.11
Matorrales densos, altos niveles de escurrimiento	0.08	0.1	0.14
D. Corrientes naturales			
D. 1 Corrientes menores (ancho de la superficie libre del agua en nivel de creciente <30 m)			
a) Corrientes en planicies			
Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos	0.025	0.03	0.033
Igual al anterior pero con más piedras y malezas	0.03	0.035	0.04
Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena	0.033	0.04	0.045
Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0.035	0.045	0.05
Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más eficientes	0.04	0.048	0.055
Igual al 4, pero con más piedras	0.045	0.05	0.055
Tramos lentos, con malezas y pozos profundos	0.05	0.07	0.06
Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos	0.075	0.1	0.08
b) Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos			
Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.03	0.04	0.05
Fondo: cantos rodados con rocas grandes	0.04	0.05	0.07

<i>Tipo de canal y descripción</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Normal</i>	<i>Máximo</i>
D. Corrientes naturales			
D.2 Planicies de inundación			
a) Pastizales, sin matorrales			
Pasto corto	0.025	0.03	0.035
Pasto alto	0.03	0.035	0.05
b) Áreas cultivadas			
Sin cultivo	0.02	0.03	0.04
Cosecha en tierra labrada y pradera	0.025	0.035	0.045
Campos de cultivo maduros	0.03	0.04	0.05
c) Matorrales			
Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.05	0.07
Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.05	0.06
Pocos matorrales y árboles, en verano	0.04	0.06	0.08
Mediana a densa población de matorrales, en invierno	0.045	0.07	0.11
Mediana a densa población de matorrales, en verano	0.07	0.1	0.16
d) Árboles			
Población densa de sauces, en verano, rectos	0.11	0.15	0.2
Terrenos talados con troncos sin retoños	0.03	0.04	0.05
Igual al anterior, pero con troncos con una gran cantidad de retoños	0.05		0.08
Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel del agua por debajo de las ramas	0.08	0.1	0.12
Igual al anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas	0.12	0.12	0.16
D:3 Corrientes mayores (ancho de la superficie libre del agua en nivel de creciente > 30m)			
Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales	0.025		0.06
Sicyon irregular y rugosa	0.035		0.1

PRÁCTICA No. 11
Método sección pendiente
INTRODUCCIÓN
<p>Cuando se va a aforar un cauce natural, fugaz o intermitente, y no se dispone de datos que permitan aplicar un método indirecto para el cálculo del caudal, el método sección-pendiente o área-pendiente suele proporcionar resultados adecuados. La aplicación de este método, no obstante que las avenidas producen flujos espacialmente variados, en algunos casos es posible y/o necesario analizar estos flujos con los conceptos de flujo uniforme permanente, por lo cual, se justifica el empleo del enfoque sección- pendiente cuando los cambios en el factor de forma son menores al 30%.</p> <p>De acuerdo a French ^[8] “también se justifica el empleo del enfoque área-pendiente cuando los cambios en el factor de forma son menores al 30%”. Es importante tener en cuenta que el caudal calculado a partir de este método da una estimación aproximada del gasto pico.</p> <p>Para aplicar el método área-pendiente, se requiere la siguiente información:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Un tramo de canal lo suficientemente largo, donde no existan afluentes ni efluentes. • El cambio de elevación del agua a través del tramo (pendiente longitudinal del agua). • Estimación del coeficiente de rugosidad del tramo.
INDICADORES DEL RESULTADO DE APRENDIZAJE
FUNDAMENTO
<p>Aprender un método de estimación del caudal máximo que drena por una corriente natural, cuando los datos disponibles no son suficientes para justificar el uso de técnicas más comunes.</p>
PROCEDIMIENTO
<p>Lineamientos para la selección del tramo</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Disponibilidad de marcas de nivel de la avenida en el tramo. Una sección transversal en roca, aunque es fácil de medir, no es útil por la falta de marcas de escurrimiento en ella. 2. Se debe buscar un tramo lo más recto y uniforme posible. De no ser posible, elegir de preferencia un tramo con la sección de aguas abajo en contracción y no en expansión. 3. Evitar tramos donde existan condiciones locales que causen disturbios como: curvas horizontales, puentes, estructuras, etc. 4. La longitud del tramo según Dalrymple y Benson[9] debe cumplir con los siguientes lineamientos: <ol style="list-style-type: none"> 1. La longitud debe ser por lo menos de 75 veces el tirante medio de la primera sección transversal localizada; 2. La caída de la superficie del agua debe ser igual o mayor que la carga de velocidad dos, es decir:

$$\Delta h = \frac{V_2^2}{2g} \quad (30)$$

3. La caída debe ser por lo menos de 0.15m.

5. El método área pendiente no se aplica a tramos que incluyan caídas libres.

- Equipo
- Tránsito
- Estadal
- Cinta métrica
- Procedimiento

6. Realizar un recorrido por las márgenes del cauce, tanto hacia aguas arriba como aguas debajo del punto de interés, para localizar marcas de máximo escurrimiento.

7. Una vez localizadas la marca de máximo escurrimiento, se debe calcular:

- Área hidráulica
- Perímetro mojado total y parcial
- Rugosidades
- Tirante medio

8. Buscar una segunda sección transversal con marcas de máximo escurrimiento, a una longitud mínima de $L = 75$ y medio, tomando en cuenta que entre las dos secciones no existan:

- Curvas
- Caídas
- Obstáculos (escombros, pilas de puentes, cercas, construcciones, etc.)
- Afluentes
- Efluentes, etc. que alteren la condición de flujo uniforme.

9. Una vez localizada la segunda sección, efectuar los mismos cálculos del paso número 2.

10. Calcular la pendiente de la superficie libre del agua, con las elevaciones previamente medida de las marcas de máximo escurrimiento.

11. Calcular los coeficientes de conducción (K), para cada sección

$$K_{M,m} = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} \quad (31)$$

12. Calcular el factor de forma, el cual para que proceda el método, no debe exceder del 30%.

$$Ff = \frac{K_M - K_m}{K_M} * 100 \quad (32)$$

Donde K_M y K_m , representan los coeficientes de conducción mayor y menor.

13. Calcular el factor geométrico medio de forma para el tramo

$$K_{med} = \sqrt{K_1 K_2} \quad (33)$$

14. Estimar el gasto pico, de orden cero, mediante la ecuación siguiente:

$$Q^0 = K_{med} \sqrt{S} \quad (34)$$

15. Calcular la aproximación de primer orden del gasto, mediante la refinación de la estimación de la pendiente de energía

$$S_{Correg} = S + k \left[\frac{\alpha_1 (V_1^2 / 2g) - \alpha_2 (V_2^2 / 2g)}{L} \right] \quad (35)$$

Donde k es factor de corrección por contracción / expansión. Si el tramo se expande, o sea $V_1 > V_2$, entonces $k = 0.5$. Si el tramo se contrae, o sea $V_1 < V_2$, entonces $k = 1.0$, entonces:

$$Q^1 = K_{med} \sqrt{S_{Correg}} \quad (36)$$

16. Se repite el paso 11 hasta que:

$$Q_{n-1} \approx Q_n \quad (37)$$

17. Se considera apropiado promediar los gastos estimados para varios tramos.

EQUIPO	MATERIAL/REACTIVOS
DESARROLLO	
CÁLCULOS Y RESULTADOS	
ANÁLISIS DE DATOS Y CONCLUSIONES/COMENTARIOS	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
[1] G. Sotelo, Hidráulica general, México: Limusa, 1997. (Capítulo 9, Páginas 275 a 301) [2] H. F. Richard, Hidráulica de canales abiertos, DF, México: Mc. GRAW-HILL, 1998.	
ANEXOS	

Flujo rápidamente variado

INTRODUCCIÓN

El flujo rápidamente variado se presenta cuando en una corta distancia se presente 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 (Figura 24), en el cual se presentan dos tirantes denominados tirantes conjugados. Este fenómeno local se considera como el ejemplo más claro de un flujo rápidamente variado. Este cambio de régimen generalmente va acompañado por una importante pérdida de energía.

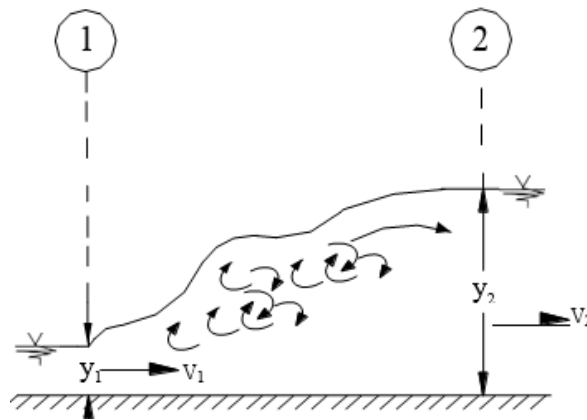


Figura 24. Representación esquemática de un salto hidráulico.

Partiendo de la ley del impulso y cantidad de movimiento aplicada a un canal de sección cualquiera, donde 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

1. Conocido régimen supercrítico

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) \quad (38)$$

2. Conocido régimen subcrítico

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_2^2} - 1 \right) \quad (39)$$

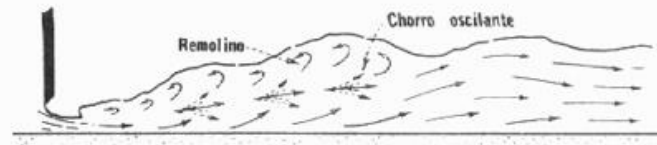
El salto hidráulico se clasifica de acuerdo al número de Froude (Fr), como se indica en la Figura 25.

Salto débil



F_1 ENTRE 1.7 y 2.5
FORMA A – REGIMEN ANTES DEL RESALTO

Salto oscilante



F_1 ENTRE 2.5 Y 4.5
FORMA B – REGIMEN DE TRANSICION

Salto estable



F_1 ENTRE 4.5 Y 9.0
FORMA C – ZONA DE RESALTOS BIEN BALANCEADOS

Salto fuerte



F_1 MAYOR QUE 9.0
FORMA D – RESALTO EFECTIVO PERO CON UNA SUPERFICIE MUY IRREGULAR AGUAS ABAJO

Figura 25. Clasificación del salto hidráulico según el número de Froude.

Dicha clasificación va en función a la cantidad de pérdida de energía que genera el cambio de régimen implícito en el salto.

La longitud del salto hidráulico es la longitud medida en su proyección horizontal, a partir del tirante inicial o conjugado menor, al tirante subsecuente o conjugado mayor. Existen muchas fórmulas para calcular la longitud del salto, el cuadro siguiente permite conocer la longitud dependiendo de la forma de la sección transversal del canal:

Tabla 7. Longitud del salto hidráulico para canales de sección rectangular.

Fr	1.7	2	2.5	3	3.5	4	5	6	8	10
L/y_2	4	4.35	4.85	5.28	5.55	5.8	6	6.	6.12	6.12

Para secciones trapeziales, de acuerdo a la fórmula de Sieñchi, la longitud se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$L = A(y_2 - y_1) \quad (40)$$

Donde A depende del talud del canal de acuerdo al tabla 8.

Tabla 8. Coeficiente A en la fórmula Sieñchi para la longitud del salto en canales trapezoidales.

Talud z	0	0.5	0.75	1	1.25	1.5
A	5	7.9	9.2	10.6	12.6	15

Conforme a la energía del tirante conjugado mayor y la energía aguas abajo del salto, este se clasifica en:

Salto hidráulico normal; se presenta cuando: $E_2 \approx E_n$

Salto hidráulico ahogado; se presenta cuando: $E_2 < E_n$

Salto hidráulico barrido; se presenta cuando: $E_2 > E_n$

Si el salto se barre, es necesario diseñar una estructura disipadora de energía, ya sea un estanque amortiguador o bien un escalón hacia arriba que permita igualar energías entre la sección del tirante conjugado mayor y la energía del tirante normal aguas abajo del salto.

El análisis de un salto hidráulico también se puede hacer por medio de la ecuación de cantidad de movimiento (ecuación 44), aplicada entre las secciones 1 y 2 de la Figura 26.

$$\frac{Q^2}{gA_1} + A_1 y_{cg1} = \frac{Q^2}{gA_2} + A_2 y_{cg2} \quad (41)$$

Donde:

A₁ área hidráulica de la sección transversal i, m²

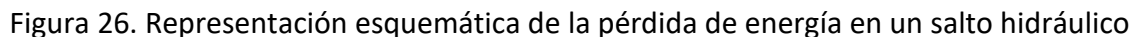
y_{cg} profundidad del agua, medida de la superficie libre al centro de gravedad, m

Sección trapecial

$$y_{cgi} = \frac{2b+B}{b+B} \left(\frac{y}{3} \right)_{Trapezoidal} \quad (42)$$

Sección rectangular

$$y_{cgi} = \frac{y}{2}_{Rectangular} \quad (43)$$



9. Medir la longitud en proyección horizontal desde el tirante inicial del salto hidráulico, hasta el tirante subsecuente, m.
10. Calcular la longitud del salto hidráulico, m.
11. Comparar longitud medida en el paso número 10, con la calculada en el paso 11
12. Discutir resultados

EQUIPO	MATERIAL/REACTIVOS
<ul style="list-style-type: none">Cinta métrica o regla	
DESARROLLO	
CÁLCULOS Y RESULTADOS	
ANÁLISIS DE DATOS Y CONCLUSIONES/COMENTARIOS	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
[1]	G. Sotelo, Hidráulica general, México: Limusa, 1997. (Capitulo 9, Paginas 275 a 301)
[2]	H. F. Richard, Hidráulica de canales abiertos, DF, México: Mc. GRAW-HILL, 1998.
ANEXOS	

PRÁCTICA No. 13

Flujo gradualmente variado, clasificación de perfiles y cálculo de su longitud.

INTRODUCCIÓN

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 y por lo mismo, la distribución hidrostática de presiones prevalece en cada sección. Debido a que el flujo gradualmente variado involucra cambios pequeños de profundidad, este flujo está relacionado con longitudes grandes del canal.

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.

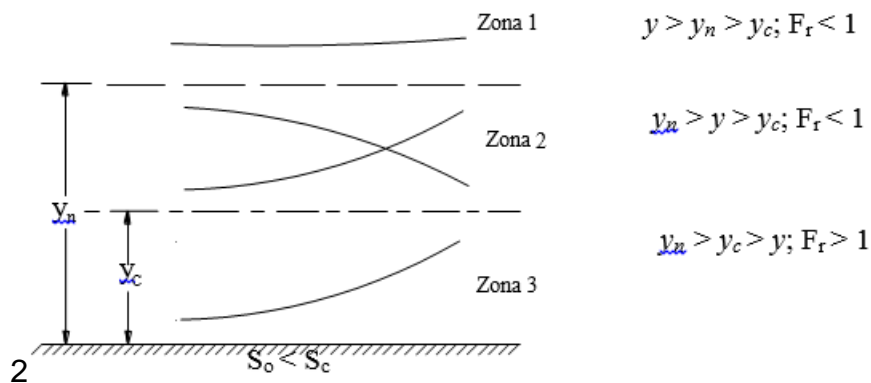


Figura 27. Clasificación por zonas para una pendiente subcrítica.

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, como lo muestra la Figura 28. 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

- Suave $y_n > y_c$ perfil tipo M
- Crítica $y_n = y_c$ perfil tipo C
- Pronunciada $y_n < y_c$ perfil S
- Horizontal y_n tiende a ∞ , perfil H
- Adversa $y_c < y_n$, perfil A

En el caso de pendiente cero (perfil tipo H), o negativa (perfil tipo A), no existe posibilidad de flujo uniforme.

Clasificación de perfiles en flujos gradualmente variados

Pendiente del canal	Notación del perfil	Profundidad de flujo	Número de Froude	Pendiente del perfil	Perfil de superficie
Suave (M) $y_c < y_n$ $S_0 < S_c$	M1	$y > y_n$	$Fr < 1$	$\frac{dy}{dx} > 0$	
	M2	$y_c < y < y_n$	$Fr < 1$	$\frac{dy}{dx} < 0$	
	M3	$y < y_c$	$Fr > 1$	$\frac{dy}{dx} > 0$	
Pronunciada (S) $y_c > y_n$ $S_0 < S_c$	S1	$y > y_c$	$Fr < 1$	$\frac{dy}{dx} > 0$	
	S2	$y_n < y < y_c$	$Fr > 1$	$\frac{dy}{dx} < 0$	
	S3	$y < y_n$	$Fr > 1$	$\frac{dy}{dx} > 0$	
Crítica (C) $y_c = y_n$ $S_0 < S_c$	C1	$y > y_c$	$Fr < 1$	$\frac{dy}{dx} > 0$	
	C3	$y < y_c$	$Fr > 1$	$\frac{dy}{dx} > 0$	
Horizontal (H) $y_n \rightarrow \infty$ $S_0 = 0$	H2	$y > y_c$	$Fr < 1$	$\frac{dy}{dx} < 0$	
	H3	$y < y_c$	$Fr > 1$	$\frac{dy}{dx} > 0$	
Adversa (A) $S_0 < 0$ y_n : no existe	A2	$y > y_c$	$Fr < 1$	$\frac{dy}{dx} < 0$	
	A3	$y < y_c$	$Fr > 1$	$\frac{dy}{dx} > 0$	

Conocer la longitud de un perfil es de gran importancia para: el diseño de estructura hidráulicas, delimitar cargas hidráulicas en estructuras derivadoras, para definir áreas de inundación, etc. Para ésta práctica se propone el método de Integración gráfica (figura 32), para el cálculo del perfil, ya que se puede aplicar a cualquier tipo de perfil de flujo en canales prismáticos y no prismáticos de cualquier forma y pendiente y, en general es fácil de seguir. Su valor depende de la relativa facilidad con que puede ser calculada la función $f(y)$.

Método de integración gráfica. Este método consiste en integrar la ecuación dinámica del flujo gradualmente variado mediante un procedimiento gráfico, considerando dos secciones transversales del canal con una distancia x entre ellas, igual a:

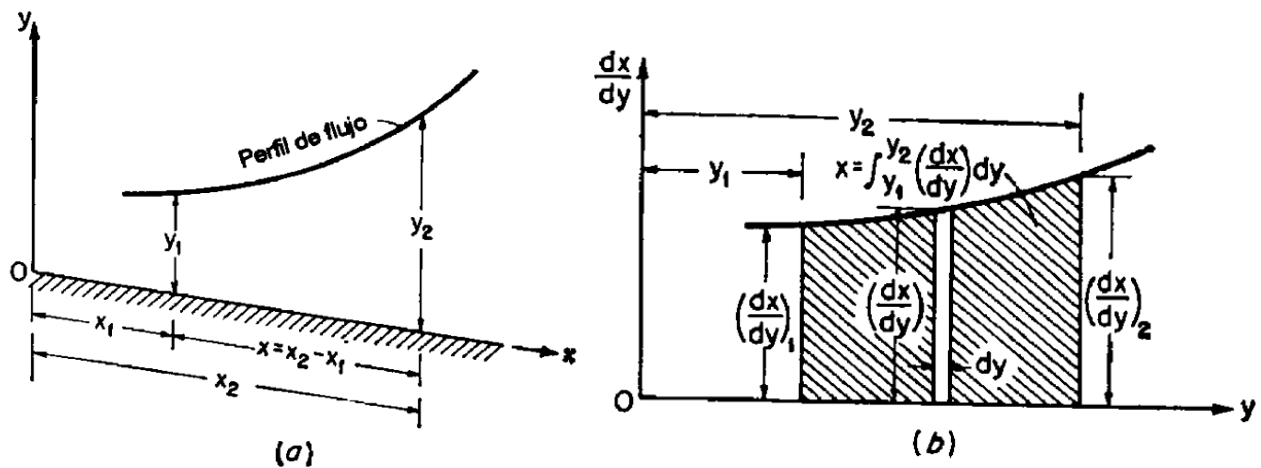
$$x = x_2 - x_1 \quad (46)$$

Con profundidades del flujo y_1 y y_2 , (Figura 29a), la distancia del perfil del flujo gradualmente variado a lo largo del fondo del canal es

$$x = x_2 - x_1 = \int_{x_1}^{x_2} dx = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dx}{dy} dy \quad (47)$$

Determinando los valores correspondientes para dx/dy y suponiendo valores de y , se construye una curva (Figura 29 b) con los ejes de coordenadas y y dx/dy , donde el valor de x corresponde al área sombreada que puede ser medida.

Figura 29. Principio del método de integración gráfica



Los valores de la ordenada, dx/dy correspondientes a los tirantes y_1 y y_2 , en función a la pendiente del fondo del canal S_0 y de las características hidráulicas, se obtienen con

$$\frac{dx}{dy} = \frac{1}{S_0} \frac{1 - \left(\frac{Z_c}{Z}\right)^2}{1 - \left(\frac{K_n}{K}\right)^2} \quad (48)$$

Donde:

$$K = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} \quad (49)$$

$$Z = \sqrt{\frac{A^3}{B}} \quad (50)$$

$$K_n = \frac{Q}{\sqrt{S_0}} \quad (51)$$

$$Z_c = \frac{Q}{\sqrt{\frac{g}{\alpha}}} \quad (52)$$

So Pendiente longitudinal del canal

INDICADORES DEL RESULTADO DE APRENDIZAJE

FUNDAMENTO

Observar el comportamiento del flujo gradualmente variado en un canal a superficie libre, clasificar los perfiles y calcular la longitud de los mismos.

PROCEDIMIENTO

1. Aforar el modelo, m³/s.
2. Medir tirantes a lo largo del canal (tirante real), m.
3. Calcular tirantes normal y crítico, m.
4. Localizar las condiciones fronteras de cada uno de los perfiles generados
5. Identificar los perfiles y clasificarlos
6. Seleccionar uno de los perfiles generados y medir su longitud, m.
7. Trazar un perfil longitudinal del modelo, acotando los tirantes real, normal y crítico.
8. Del perfil seleccionado para cálculo, proponer variaciones en el valor de y y calcular los valores de dx/dy, empleando la ecuación 51.
9. Para cálculos, se recomienda el uso de una tabla como la siguiente, para facilitar los cálculos.

Y	b	A	R	R ^{2/3}	K	Z	dx/dy	ΔA	X

10. Comparar perfil medido en el paso número 2, con el calculado en el paso 9.

EQUIPO

MATERIAL/REACTIVOS

- Cinta métrica o regla

DESARROLLO
CÁLCULOS Y RESULTADOS
ANÁLISIS DE DATOS Y CONCLUSIONES/COMENTARIOS
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
<p>[1] G. Sotelo, Hidráulica general, México: Limusa, 1997. (Capítulo 9, Páginas 275 a 301)</p> <p>[2] H. F. Richard, Hidráulica de canales abiertos, DF, México: Mc. GRAW-HILL, 1998.</p>
ANEXOS

ANEXO 1. VALORES DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA

<i>Temperatura °C</i>	<i>Viscosidad cinemática (m²/s)</i>
5	<i>1.520 * 10⁻⁶</i>
10	<i>1.308 * 10⁻⁶</i>
15	<i>1.142 * 10⁻⁶</i>
20	<i>1.007 * 10⁻⁶</i>
25	<i>0.897 * 10⁻⁶</i>
30	<i>0.804 * 10⁻⁶</i>
35	<i>0.727 * 10⁻⁶</i>
40	<i>0.661 * 10⁻⁶</i>
50	<i>0.556 * 10⁻⁶</i>
65	<i>0.442 * 10⁻⁶</i>