

14 Flujo en canales abiertos

14.1 Panorama

Mapa de aprendizaje

- Un canal abierto es un sistema de flujo donde la superficie superior del fluido está expuesta a la atmósfera.
- Algunos ejemplos son las canaletas pluviales en los edificios, drenes pluviales, ríos y corrientes naturales y los canales construidos para drenar fluidos en forma controlada.
- El análisis de los canales abiertos requiere técnicas especiales algo diferentes de las que ha utilizado para analizar el flujo en tubos y tuberías.

Descubrimientos

- Observar dónde hay canales en la región donde radica.
- Buscar drenes pluviales, corrientes naturales y otras estructuras de drenaje.
- ¿Podrá encontrar otros?

En este capítulo presentamos algunos métodos básicos para analizar el flujo en canales abiertos.

Conceptos introductorios

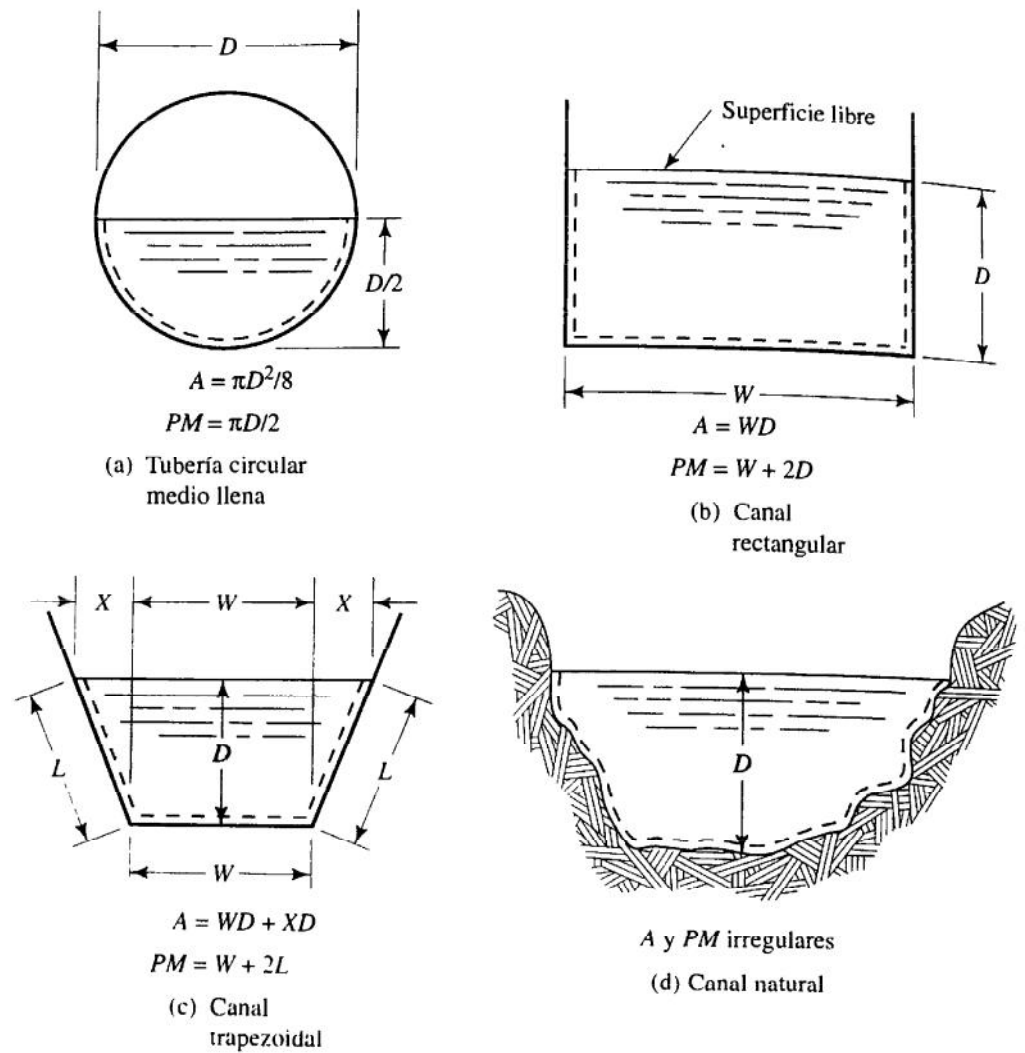
Al contrario de los conductos cerrados que presentamos en los capítulos anteriores, un *canal abierto* es un sistema de flujo en el que la superficie superior del fluido está expuesta a la atmósfera.

En la naturaleza hay muchos ejemplos de canales abiertos, así como en los sistemas diseñados para suministrar agua a las comunidades o drenar el agua que generan las tormentas y eliminarla en forma segura. Consulte la figura 14.1. Los ríos y corrientes son ejemplos obvios de canales naturales. Las canaletas pluviales en los edificios y los costados de las calles conducen agua pluvial. Los colectores pluviales, por lo general bajo la vía pública, reúnen la corriente de las calles y la conducen a una corriente o a un canal más grande construido por el hombre. En la industria, es frecuente que se emplee canales abiertos para conducir el agua de enfriamiento o los refrigerantes de los intercambiadores de calor y llevarla lejos de los sistemas de maquinado.

Observe dónde existen canales en la región donde radica. Conforme los ubique, trate de describirlos con el mayor detalle. Responda las preguntas siguientes:

- ¿Para qué se usa el canal?
- ¿Qué fluido circula por el canal?
- ¿El flujo en el canal parece suave y tranquilo o caótico y turbulento?
- ¿Cuál es la forma de la sección transversal del canal y cuáles son sus dimensiones?
- ¿La sección transversal es uniforme a lo largo de su longitud o varía?
- ¿Qué tan profundo era el fluido cuando lo observó? ¿Qué profundidad podría alcanzar el fluido en condiciones muy intensas de escurrimiento, antes de desbordarse?
- ¿Cómo cambia la forma de la corriente, si lo hace, conforme la profundidad se incrementa?
- ¿Podrá detectar si el canal se encuentra en una pendiente?

FIGURA 14.1 Ejemplos de secciones transversales de canales abiertos.



En este capítulo se presenta algunos métodos de análisis del flujo en canales abiertos. Cubrir el tema por completo es una labor muy extensa que requiere textos enteros, como los mencionados en las referencias 3 a 5 y 7 a 9, al final de este capítulo.

14.2 OBJETIVOS

Al terminar este capítulo podrá:

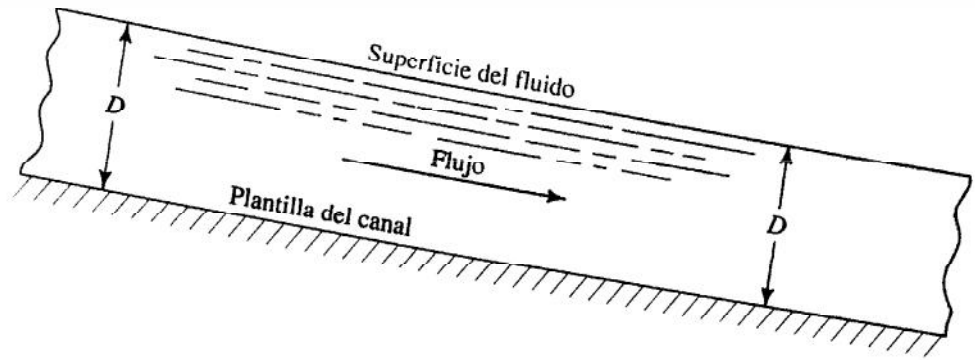
1. Calcular el radio hidráulico de los canales abiertos.
2. Describir el *flujo uniforme* y el *flujo variado*.
3. Emplear la ecuación de Manning para analizar el flujo uniforme.
4. Definir la pendiente de un canal abierto y obtener su valor.
5. Calcular la descarga normal de un canal abierto.
6. Calcular la profundidad normal del flujo en un canal abierto.
7. Diseñar un canal abierto para que conduzca una descarga dada con flujo uniforme.
8. Definir el *número de Froude*.
9. Describir el *flujo crítico*, el *flujo subcrítico* y el *flujo crítico*.
10. Definir la energía específica del flujo en canales abiertos.
11. Definir los términos *profundidad crítica*, *profundidad alterna* y *profundidad subsecuente*.
12. Describir el término *salto hidráulico*.
13. Describir el uso de los *vertedores* y los *aforadores* para medir el flujo en canales abiertos, y realizar los cálculos necesarios.

14.3 CLASIFICACIÓN DEL FLUJO EN CANALES ABIERTOS

El flujo en canales abiertos se clasifica en varios tipos.

El *flujo estable uniforme* ocurre cuando el flujo volumétrico (que en el análisis del flujo en canales abiertos es común llamar *descarga*) permanece constante en la sección de interés y la profundidad del fluido en el canal no varía. Para lograr el flujo estable uniforme, la sección transversal del canal no debe cambiar a lo largo de su longitud. Un canal así recibe el nombre de prismático. La figura 14.2 muestra la vista lateral de un flujo uniforme.

FIGURA 14.2 Flujo estable uniforme en un canal abierto —vista lateral.



El *flujo estable variado* ocurre cuando la descarga permanece constante, pero la profundidad del fluido varía a lo largo de la sección de interés. Esto sucede si el canal no es prismático.

El *flujo inestable variado* tiene lugar cuando la descarga cambia con el tiempo, lo que origina modificaciones en la profundidad del fluido a lo largo de la sección de interés, sea el canal prismático o no.

A su vez, el flujo variado se clasifica en flujo que *varía con rapidez* o *flujo que varía en forma gradual*. Como su nombre lo dice, la diferencia estriba en la tasa de cambio de la profundidad según el lugar del canal. La figura 14.3 ilustra una serie de condiciones en que ocurre un flujo variado. El análisis siguiente describe el flujo en las distintas partes de esta figura.

- **Sección 1** El flujo comienza en un depósito donde el fluido se encuentra prácticamente en reposo. La *compuerta de esclusa* es un dispositivo que permite que el fluido fluya del depósito por un punto bajo la superficie. La variación rápida del flujo ocurre cerca de la compuerta conforme el fluido acelera, con lo que es probable que su velocidad llegue a ser muy grande en esa zona.

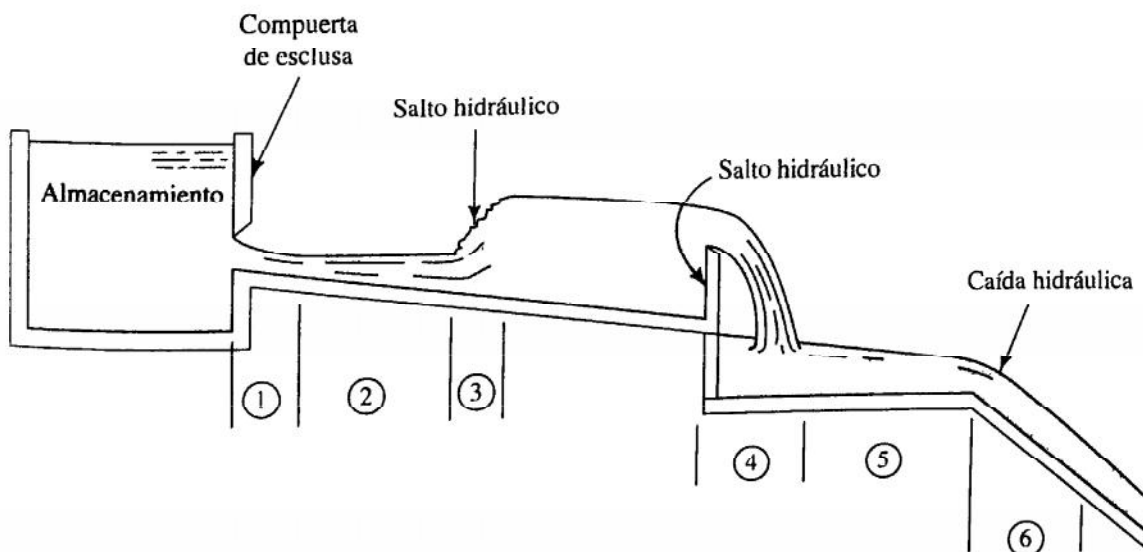


FIGURA 14.3 Condiciones que ocasionan un flujo variado.

- **Sección 2** Si el canal, aguas abajo de la compuerta de esclusa, es relativamente corto, y si su sección transversal no varía mucho, entonces ocurre un flujo variado en forma gradual. Si el canal es prismático y con longitud suficiente, entonces se desarrolla un flujo uniforme.
- **Sección 3** La formación de un *salto hidráulico* es un fenómeno curioso del flujo en canales abiertos. El flujo antes del salto es muy rápido y de poca profundidad relativa. En el salto, el flujo se vuelve muy turbulento y se disipa una gran cantidad de energía. Después del salto, la velocidad del flujo es mucho menor y la profundidad es mayor. Más adelante se abundará en el salto hidráulico.
- **Sección 4** Un *vertedor* es una obstrucción que se coloca ante la corriente y que ocasiona un cambio brusco en la sección transversal del canal. Los vertedores se usan como dispositivos de control o para medir el flujo volumétrico. Es común que el flujo varíe con rapidez cuando pasa sobre el vertedor, y forme una "cascada" (llamada *napa*) aguas abajo de éste.
- **Sección 5** Igual que en la sección 2, si el canal es prismático el flujo aguas abajo del vertedor varía en forma gradual, por lo general.
- **Sección 6** Una *caída hidráulica* ocurre cuando la pendiente del canal se incrementa en forma repentina con un ángulo empinado. El flujo acelera por acción de la gravedad y entonces se da la variación rápida.

14.4 RADIO HIDRÁULICO Y NÚMERO DE REYNOLDS EN EL FLUJO EN CANALES ABIERTOS



RADIO HIDRÁULICO

La dimensión característica de los canales abiertos es el *radio hidráulico*, definido como la relación del área transversal neta de una corriente al perímetro mojado de la sección. Es decir,

$$R = \frac{A}{PM} = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro mojado}} \quad (14-1)$$

La unidad de R es el metro, en el SI, y el pie en el Sistema Inglés.

En el cálculo del radio hidráulico, el área de la sección transversal debe ser evidente a partir de la geometría de la sección. Al *perímetro mojado* se le define como la suma de la longitud de las fronteras sólidas de la sección que entran en contacto con el fluido (es decir, éste las moja). En la figura 14.1 se da las expresiones para el área A y el perímetro mojado PM para las secciones ilustradas. Se observa una línea punteada adyacente a las fronteras que forman el perímetro mojado. Observe que la longitud de la superficie libre de un canal abierto *no* está incluida en el PM .

- **PROBLEMA MODELO 14.1** Determine el radio hidráulico de la sección trapezoidal de la figura 14.1(c), si $W = 4$ pies, $X = 1$ pie y $D = 2$ pies.

Solución El área de flujo neta es

$$\begin{aligned} A &= WD + 2(XD/2) = WD + XD \\ &= (4)(2) + (1)(2) = 10 \text{ pies}^2 \end{aligned}$$

Para encontrar el perímetro mojado, debemos determinar el valor de L :

$$\begin{aligned} PM &= W + 2L \\ L &= \sqrt{X^2 + D^2} = \sqrt{(1)^2 + (2)^2} = 2.24 \text{ pies} \\ PM &= 4 + 2(2.24) = 8.48 \text{ pies} \end{aligned}$$

Entonces, tenemos

$$R = A/PM = 10 \text{ pies}^2 / 8.48 \text{ pies} = 1.18 \text{ pies}$$

Hay que recordar que el número de Reynolds para secciones transversales circulares llenas es

$$N_R = \frac{vD}{\nu} \quad (14-2)$$

donde v = velocidad promedio del flujo, D = diámetro de la tubería y ν = viscosidad cinemática del fluido. Hemos visto que el flujo laminar ocurre cuando $N_R < 2000$, y el turbulento se da si $N_R > 4000$, para la mayoría de situaciones prácticas de flujo en tuberías. El número de Reynolds representa los efectos de la viscosidad relativa en relación con la inercia del fluido.

En el flujo en canales abiertos, la dimensión característica es el radio hidráulico R . En el capítulo 9 se demostró que, para una sección transversal circular llena, $D = 4R$. Para secciones transversales no circulares, cerradas, era conveniente sustituir $4R$ por D , de modo que el número de Reynolds tendría el mismo orden de magnitud que la de ductos y tuberías. Sin embargo, en el análisis de flujo en canales abiertos por lo general esto no se hace. Entonces, el número de Reynolds para el flujo en un canal abierto es

$$N_R = \frac{vR}{\nu} \quad (14-3)$$

Hechos experimentales (consulte la referencia número 4) demuestran que, en canales abiertos, el flujo laminar ocurre cuando $N_R < 500$. La región de transición está en el rango de 500 a 2000. El flujo turbulento ocurre cuando $N_R > 2000$, normalmente.

14.5 TIPOS DE FLUJO EN CANALES ABIERTOS

El número de Reynolds y los términos *laminar* y *turbulento* no bastan para caracterizar todas las clases de flujo en los canales abiertos. Además de la viscosidad *versus* los efectos inerciales, también es importante la relación de las fuerzas inerciales a las gravitacionales, dada por el *número de Froude* N_F , definido como

$$N_F = \frac{v}{\sqrt{gy_h}} \quad (14-4)$$

donde y_h , a la que se denomina profundidad hidráulica, está dada por

$$y_h = A/T \quad (14-5)$$

y T es el ancho de la superficie libre del fluido en la parte superior del canal.

Cuando el número de Froude es igual a 1.0, es decir cuando $v = \sqrt{gy_h}$, el flujo se llama *flujo crítico*. Cuando $N_F < 1.0$, el flujo es *subcrítico* y cuando $N_F > 1.0$, el flujo es *supercrítico*. Consulte también la sección 14.9.

Entonces, es posible que haya las clases de flujo siguientes:

1. Subcrítico-laminar: $N_R < 500$ y $N_F < 1.0$.
2. Subcrítico-turbulento: $N_R > 2000$ y $N_F < 1.0$.
3. Supercrítico-turbulento: $N_R > 2000$ y $N_F > 1.0$.
4. Supercrítico-laminar: $N_R < 500$ y $N_F > 1.0$.

Además, los flujos pueden ocurrir en la región de transición. Sin embargo, tales flujos son inestables y muy difíciles de caracterizar.

En este análisis, los términos *laminar* y *turbulento* tienen el mismo significado que en el flujo en tuberías. En el flujo laminar hay poca o ninguna mezcla del fluido, de modo que una corriente de tinta que se inyecte en él permanece virtualmente intacta. Pero en el flujo turbulento existe una mezcla caótica, y la corriente de tinta se disipa con rapidez en el fluido.

✓ NUMERO DE REYNOLDS PARA
CANALES ABIERTOS

✓ NUMERO DE FROUDE

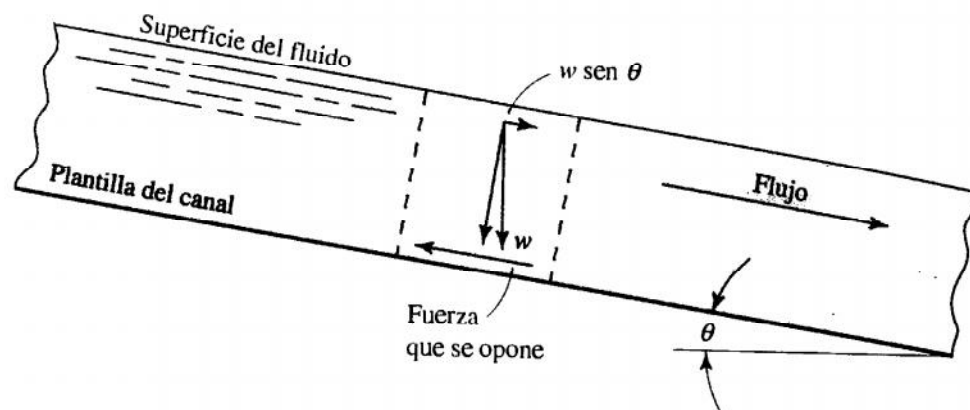
✓ PROFUNDIDAD HIDRÁULICA

14.6 FLUJO ESTABLE UNIFORME EN CANALES ABIERTOS

La figura 14.2 es una ilustración del flujo estable uniforme en un canal abierto. La característica distintiva del flujo uniforme es que la superficie del fluido es paralela a la pendiente de la plantilla del canal. Se empleará el símbolo S para indicar la pendiente de la plantilla del canal, y S_w para la pendiente de la superficie del agua. Entonces, para el flujo uniforme, $S = S_w$. En teoría, el flujo uniforme sólo existe si el canal es prismático, es decir, si sus lados son paralelos a un eje en dirección del flujo. Algunos ejemplos de canales prismáticos son aquellos con secciones rectangulares, trapezoidales, triangulares y circulares que van parcialmente llenos. Además, la pendiente del canal S debe ser constante. Si la sección transversal o pendiente del canal cambiara, entonces la corriente sería convergente o divergente, y habría flujo variado.

En el flujo uniforme, la fuerza impulsora del flujo la provee el componente del peso del fluido que actúa a lo largo del canal, como se observa en la figura 14.4. Esta fuerza es $w \sin \theta$, donde w es el peso de un elemento dado de fluido, y θ es el ángulo de la pendiente de la plantilla del canal. Si el flujo es uniforme, no debe acelerar. Por tanto, debe haber una fuerza opuesta igual que actúa a lo largo de la superficie del canal. Esta fuerza es la fricción, y depende de la rugosidad de las superficies del canal y del tamaño y forma de su sección transversal.

FIGURA 14.4 Flujo uniforme en un canal abierto.



Al igualar la expresión de la fuerza impulsora con la de aquella que se le opone, se obtiene una expresión para la velocidad promedio del flujo uniforme. Robert Manning desarrolló una forma de la ecuación resultante que es común utilizar. En unidades del SI, la ecuación de Manning se escribe así:

$$v = \frac{1.00}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (14-6)$$

En ésta, las unidades deben ser consistentes. La velocidad promedio del flujo, v , estará en m/s si el radio hidráulico R se expresa en m. La pendiente del canal, S , que se definirá más adelante, es adimensional. El término final n es un factor de resistencia que a veces recibe el nombre de n de Manning. El valor de n depende de la condición de la superficie del canal y, por tanto, es algo análogo a la rugosidad de la pared de un tubo, ϵ , que se ha utilizado en capítulos anteriores. Más adelante, en esta sección, se dará la forma de la ecuación de Manning para unidades del Sistema Inglés.

En la tabla 14.1 se presenta una lista de los valores comunes de diseño de n para los materiales más usados en la construcción de canales artificiales o que constituyen los cauces naturales. Un análisis muy amplio de la determinación de un valor cambiante de n , así como una tabla más completa de sus valores, la proporciona V. T. Chow (consulte la referencia 4). Los valores que aparecen en la tabla 14.1 son promedios que proporcionan una estimación buena para el diseño o para un análisis aproximado de canales existentes. Son de esperar variaciones de estos promedios.

ECUACIÓN DE MANNING
EN UNIDADES DEL SI

TABLA 14.1. Valores de la n de Manning.

Descripción del canal	n
Vidrio, cobre, plástico u otras superficies lisas	0.010
Acero liso sin pintar, madera plana	0.012
Acero pintado o hierro fundido revestido	0.013
Asfalto liso, arcilla común de revestimiento de drenajes, concreto con acabado, ladrillo vitrificado	0.013
Hierro fundido sin recubrimiento, tubería de hierro negro forjado, arcilla vitrificada para revestir drenajes	0.014
Ladrillo en concreto cementado, concreto flotado con acabado, tubo de concreto	0.015
Concreto colado, sin acabado, tubo de acero en espiral	0.017
Suelo suave	0.018
Suelo limpio excavado	0.022
Dren para avenidas*, de metal corrugado	0.024
Canal natural con piedras y maleza	0.030
Canal natural con vegetación rala	0.050
Canal natural con arbustos grandes y juncos	0.060
Canal natural con vegetación espesa	0.100

* Una avenida es un escurrimiento grande y súbito de agua generalmente pluvial. N. del T.

La pendiente S de un canal se expresa de modos diferentes. En forma ideal, se define como la relación de la caída vertical h a la distancia horizontal en que ocurre dicha caída. Para pendientes pequeñas, comunes en el flujo en canales abiertos, es más práctico utilizar h/L , donde L es la longitud del canal, como se muestra en la figura 14.5. Lo normal es que la magnitud de la pendiente de los cauces naturales y estructuras de drenaje sea muy pequeña, con un valor común de 0.001. Este número también se expresa como porcentaje, donde $0.01 = 1\%$. Por tanto, $0.001 = 0.1\%$. Debido a que $\text{sen } \theta = h/L$, también puede emplearse el ángulo que forma el fondo del canal con la horizontal. En resumen, es posible expresar una pendiente de 0.001 así:

1. El canal desciende 1 m por cada 1000 m que avanza.
2. La pendiente es de 0.1%.
3. $\text{sen } \theta = 0.001$. Entonces, $\theta = \text{sen}^{-1}(0.001) = 0.057^\circ$.

Debido a que el ángulo es tan pequeño, rara vez se emplea como medida de la pendiente.

El flujo volumétrico en el canal se calcula a partir de la ecuación de continuidad, que es la misma que se empleó para el flujo en una tubería:

$$Q = Av \quad (14-7)$$

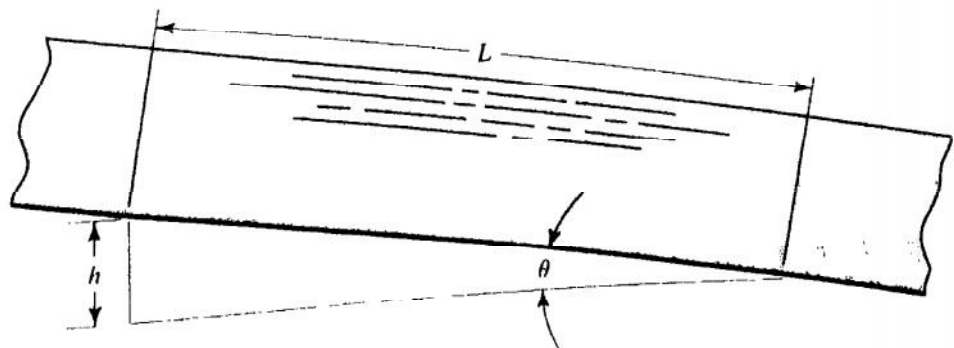


FIGURA 14.5 Pendiente de un canal.

En el análisis del flujo en canales abiertos, es común que Q reciba el nombre de *descarga*. Al sustituir la ecuación (14-6) en la (14-7), se obtiene una ecuación que relaciona en forma directa la descarga con los parámetros físicos del canal:

$$Q = \left(\frac{1.00}{n}\right) AR^{2/3} S^{1/2} \quad (14-8)$$

DESCARGA NORMAL
—UNIDADES DEL SI

Éste es el único valor de la descarga en el que habrá flujo uniforme para la profundidad dada del canal, y se denomina *descarga normal*. Las unidades de Q son m^3/s , si el área se expresa en metros cuadrados (m^2) y el radio en metros (m).

Otra forma útil de esta ecuación es

$$AR^{2/3} = \frac{nQ}{S^{1/2}} \quad (14-9)$$

El término en el lado izquierdo de la ecuación (14-9) sólo depende de la geometría de la sección. Por tanto, es posible determinar las características geométricas de un canal para una descarga, pendiente y tipo de superficie dadas. En forma alternativa, para un tamaño y forma de canal, se calcula la profundidad donde ocurriría la descarga normal. Esta profundidad se denomina *profundidad normal*.

Al analizar el flujo uniforme, los problemas comunes que se presentan son los cálculos de la descarga normal, profundidad normal, geometría de la sección del canal, pendiente y valor de la n de Manning. Estos cálculos se llevan a cabo por medio de las ecuaciones (14-6) a (14-9).

14.6.1 La ecuación de Manning en el Sistema Inglés

Aunque no es estrictamente cierto, es convencional que se tome los valores de la n de Manning como adimensionales, de modo que es posible utilizar los mismos datos para la ecuación (14-6), tanto en el SI como en el Sistema Inglés. La conversión cuidadosa de las unidades (consulte la referencia 4) permite que en la ecuación siguiente se emplee los mismos valores de n :

$$v = \frac{1.49}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (14-10)$$

ECUACIÓN DE MANNING
—UNIDADES DEL SISTEMA
INGLÉS

Así, la velocidad se expresará en pies por segundo (pies/s), si R está en pies. Ésta es la forma que adopta la ecuación de Manning en el Sistema Inglés.

También podemos obtener otras formas de esta ecuación equivalentes a la (14-8) y (14-9). Es decir,

$$Q = Av = \left(\frac{1.49}{n}\right) AR^{2/3} S^{1/2} \quad (14-11)$$

DESCARGA NORMAL
—UNIDADES DEL SISTEMA
INGLÉS

y

$$AR^{2/3} = \frac{nQ}{1.49S^{1/2}} \quad (14-12)$$

En estas ecuaciones, Q es la *descarga normal* expresada en pies cúbicos por segundo (pies^3/s), si A es el área de flujo y está en pies cuadrados (pies^2) y R se expresa en pies.

PROBLEMA MODELO 14.2

Determine la descarga normal para un drenaje con revestimiento de arcilla común de 200 mm de diámetro interno que opera lleno a la mitad, si se encuentra en una pendiente que desciende 1 m a lo largo de un recorrido de 1000 m.

Solución Se empleará la ecuación (14-8):

$$Q = \left(\frac{1.00}{n}\right) AR^{2/3} S^{1/2}$$

La pendiente $S = 1/1000 = 0.001$. En la tabla 14.1 encontramos que $n = 0.013$. La figura 14.6 muestra la sección transversal del drenaje medio lleno. Se tiene

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) = \frac{\pi D^2}{8} = \frac{\pi(200)^2}{8} \text{ mm}^2 = 5000\pi \text{ mm}^2$$

$$A = 15\,708 \text{ mm}^2 = 0.0157 \text{ m}^2$$

$$PM = \pi D/2 = 100\pi \text{ mm}$$

Entonces

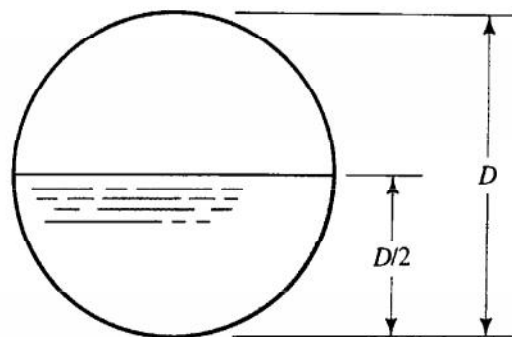
$$R = A/PM = 5000\pi \text{ mm}^2/100\pi \text{ mm} = 50 \text{ mm} = 0.05 \text{ m}$$

Por tanto, en la ecuación (14-8),

$$Q = \frac{(0.0157)(0.05)^{2/3}(0.001)^{1/2}}{0.013}$$

$$Q = 5.18 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

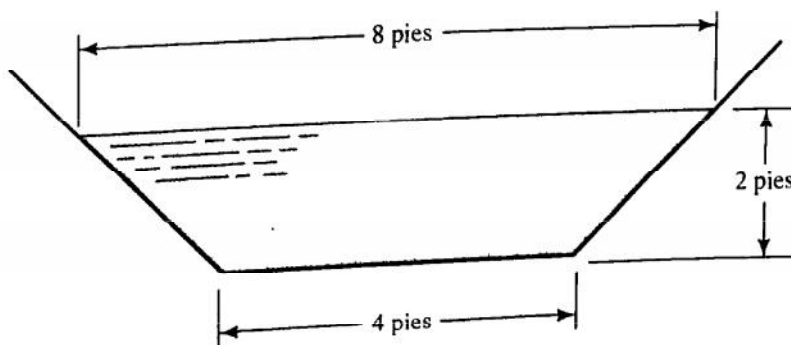
FIGURA 14.6 Dren circular que corre lleno a la mitad, para el problema modelo 14.2.



□ **PROBLEMA MODELO 14.3**

Calcule la pendiente mínima sobre la que debe situarse al canal de la figura 14.7, si ha de conducir $50 \text{ pie}^3/\text{s}$ de agua con profundidad de 2 pies. Los lados y la plantilla del canal están hechos de concreto colado sin acabado.

FIGURA 14.7 Canal trapezoidal para el problema modelo 14.3.



Solución De la ecuación (14-11) se despeja la pendiente S :

$$Q = \left(\frac{1.49}{n} \right) AR^{2/3} S^{1/2}$$

$$S = \left(\frac{Qn}{1.49AR^{2/3}} \right)^2 \quad (14-13)$$

En la tabla 14.1 encontramos que $n = 0.017$. Los valores de A y R se calculan a partir de la geometría de la sección:

$$A = (4)(2) + (2)(2)(2)/2 = 12 \text{ pies}^2$$

$$PM = 4 + 2\sqrt{4 + 4} = 9.66 \text{ pies}$$

$$R = A/PM = 12/9.66 = 1.24 \text{ pies}$$

Entonces, de la ecuación (14-13) tenemos

$$S = \left[\frac{(50)(0.017)}{(1.49)(12)(1.24)^{2/3}} \right]^2 = 0.00169$$

Por tanto, el canal debe descender al menos 1.69 pies por cada 1000 pies de longitud.

□ PROBLEMA MODELO 14.4

Diseñe un canal rectangular hecho de concreto colado, sin acabado, de modo que conduzca $5.75 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua cuando se le da una pendiente de 1.2%. La profundidad normal debe ser de la mitad del ancho de la plantilla del canal.

Solución Debido a que ha de determinarse la geometría del canal, es más conveniente emplear la ecuación (14-9):

$$AR^{2/3} = \frac{nQ}{S^{1/2}} = \frac{(0.017)(5.75)}{(0.012)^{1/2}} = 0.892$$

La figura 14.8 muestra la sección transversal. Como $y = b/2$, sólo hay que determinar el valor de b . Es posible expresar tanto A como R en términos de b :

$$A = by = \frac{b^2}{2}$$

$$PM = b + 2y = 2b$$

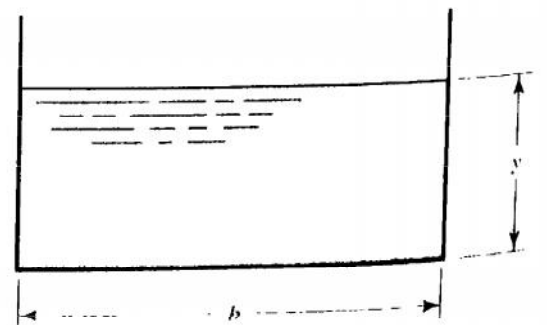
$$R = A/PM = \frac{b^2}{(2)(2b)} = \frac{b}{4}$$

Entonces, tenemos

$$AR^{2/3} = 0.892$$

$$\frac{b^2}{2} \left(\frac{b}{4} \right)^{2/3} = 0.892$$

FIGURA 14.8 Canal rectangular para el problema modelo 14.4.



$$\frac{b^{8/3}}{5.04} = 0.892$$

$$b = (4.50)^{3/8} = 1.76 \text{ m}$$

El ancho del canal debe ser de 1.76 m.

PROBLEMA MODELO 14.5

En el diseño final del canal descrito en el problema modelo 14.4, el ancho era de 2 m. La descarga máxima esperada es de $12 \text{ m}^3/\text{s}$. Determine la profundidad normal de esta descarga.

Solución

Otra vez se empleará la ecuación (14-9):

$$AR^{2/3} = \frac{nQ}{S^{1/2}} = \frac{(0.017)(12)}{(0.012)^{1/2}} = 1.86$$

En la figura 14.8 debe expresarse tanto A como R en términos de la dimensión y , con $b = 2.0 \text{ m}$:

$$A = 2y$$

$$PM = 2 + 2y$$

$$R = A/PM = 2y/(2 + 2y)$$

Entonces, tenemos

$$1.86 = AR^{2/3} = 2y \left(\frac{2y}{2 + 2y} \right)^{2/3}$$

No es fácil resolver ésta por medios algebraicos para obtener el valor de y . Por lo que se empleará el método de ensayo y error. Los resultados son:

y (m)	A (m^2)	PM (m)	R (m)	$R^{2/3}$	$AR^{2/3}$	Cambio que se requiere hacer en y
2.0	4.0	6.0	0.667	0.763	3.05	Hacer más pequeño el valor de y
1.5	3.0	5.0	0.600	0.711	2.13	Hacer más pequeño el valor de y
1.35	2.7	4.7	0.574	0.691	1.86	y está bien

Por tanto, cuando la descarga es de $12 \text{ m}^3/\text{s}$, la profundidad del canal debe ser de 1.35 m. ■

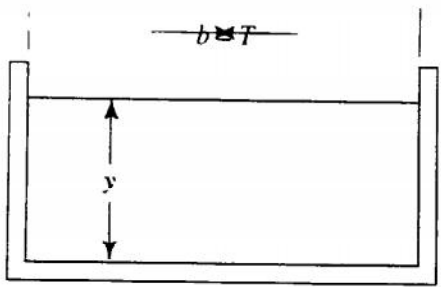
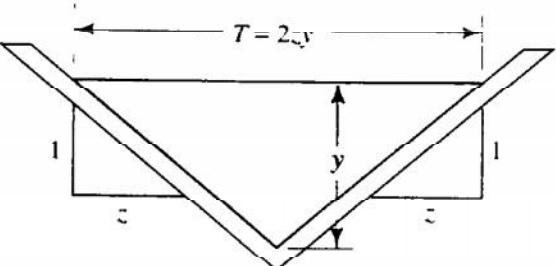
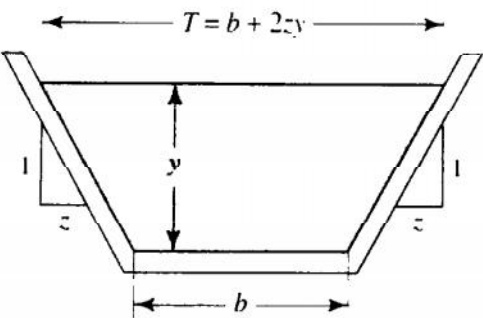
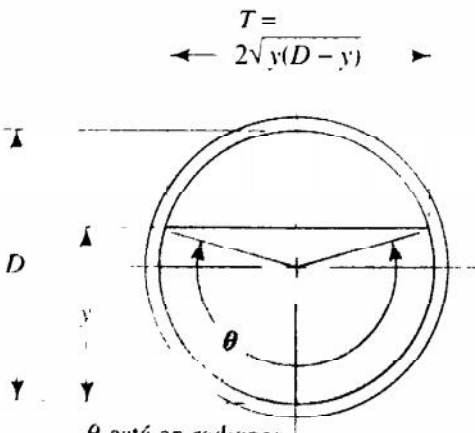
14.7
GEOMETRÍA DE LOS
CANALES ABIERTOS
MÁS COMUNES

Las formas que se utiliza con más frecuencia para los canales abiertos son la circular, rectangular, trapezoidal y triangular. La tabla 14.2 proporciona las fórmulas para obtener las características geométricas relacionadas con los cálculos del flujo en dichos canales.

La forma de trapecio es la más popular por varias razones. Es eficiente porque da un área de flujo grande en relación con el perímetro mojado. Los lados inclinados son convenientes para los canales que se excava, porque es posible darles el ángulo donde los materiales de construcción son estables.

La pendiente de los lados queda definida con el ángulo respecto de la horizontal, o por medio del *declive*, que es la relación de la distancia horizontal a la vertical. En la tabla 14.2, el declive se indica por medio del valor de z , que es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical. Los canales excavados en forma trapezoidal en la práctica, utilizan valores de z de 1.0 a 3.0.

TABLA 14.2. Geometría de las secciones de los canales abiertos más comunes.

Sección	Área A	Perímetro mojado PM	Radio hidráulico R
<p>Rectángulo</p> 	by	$b + 2y$	$\frac{by}{b + 2y}$
<p>Triángulo</p> 	zy^2	$2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1 + z^2}}$
<p>Trapecio</p> 	$(b + zy)y$	$b + 2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$
<p>Círculo</p>  <p>$T = 2\sqrt{y(D-y)}$</p> <p>θ está en radianes</p>	$\frac{(\theta - \text{sen } \theta) D^2}{8}$	$\theta D/2$	$\left[\frac{(\theta - \text{sen } \theta)}{\theta} \right] \frac{D}{4}$

Nota: θ debe estar en radianes.

Para $y < D/2$, $\theta = \pi - 2 \text{sen}^{-1}[1 - (2y/D)]$

Para $y > D/2$, $\theta = \pi + 2 \text{sen}^{-1}[(2y/D) - 1]$

El rectángulo es un caso especial del trapecio con pendiente de sus lados de 90° , o $z = 0$. Es frecuente que los canales construidos con concreto colado tengan esta forma. El canal triangular también es un caso especial del trapecio con ancho de plantilla igual a cero. Con frecuencia, las canaletas sencillas en tierra adoptan esta forma.

El cálculo de los datos para secciones circulares a varias profundidades se facilita con el empleo de la gráfica de la figura 14.9. En el lado izquierdo de la figura se muestra la mitad de una sección circular que corre parcialmente llena, en la que se denota con y a la profundidad del fluido. La escala vertical de la gráfica es la relación y/D . La curva A da la relación A/A_f , en la que A es el área real de flujo del fluido, y A_f es el área total transversal del círculo, que se calcula con facilidad por medio de $A_f = \pi D^2/4$. Se ilustra el uso de la curva A al observar que la figura está dibujada para el caso en que $y/D = 0.65$. Desde este valor, en la escala vertical, se sigue la línea punteada horizontal hacia la curva A, y de ahí se proyecta hacia abajo, hasta la escala horizontal, y se lee el valor de 0.70. Esto significa que para $y/D = 0.65$, $A/A_f = 0.70$. Como ejemplo, suponga que $D = 2.00$ pies. Entonces,

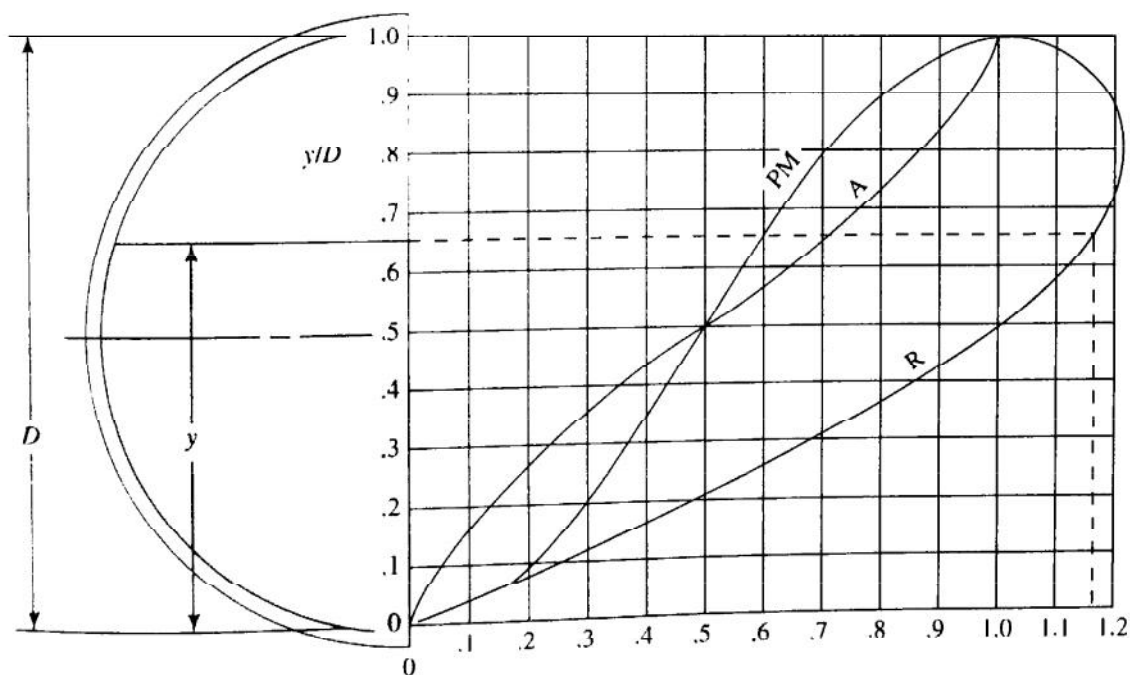
$$A_f = \pi D^2/4 = \pi(2.00 \text{ pies})^2/4 = 3.14 \text{ pies}^2$$

$$A = (0.70)A_f = (0.70)(3.14 \text{ pies}^2) = 2.20 \text{ pies}^2$$

En forma similar, debe ser capaz de leer que la relación del perímetro mojado es $PM/PM_f = 0.60$, y que la relación del radio hidráulico es $R/R_f = 1.16$. Entonces,

$$PM_f = \pi D \text{ para un círculo completo} = \pi(2.00 \text{ pies}) = 6.28 \text{ pies}$$

$$PM = (0.60)PM_f = (0.60)(6.28 \text{ pies}) = 3.77 \text{ pies}$$



Sólo se muestra
media sección

Curva A: Radio de A/A_f ; $A_f = \pi D^2/4$
 Curva PM: Radio de PM/PM_f ; $PM_f = \pi D$
 Curva R: Radio de R/R_f ; $R_f = D/4$

Ejemplo: $D = 2.0$ pies; $y = 1.30$ pies; $y/D = 0.65$

$A_f = 3.14 \text{ pies}^2$; $A/A_f = .7$; $A = 0.7(3.14) = 2.20 \text{ pies}^2$
 $PM_f = 6.28 \text{ pies}$; $PM/PM_f = 0.6$; $PM = 0.6(6.28) = 3.77 \text{ pies}$
 $R_f = 0.50 \text{ pie}$; $R/R_f = 1.16$; $R = 1.16(0.50) = 0.580 \text{ pie}$

FIGURA 14.9 Geometría de una sección circular llena parcialmente.

y

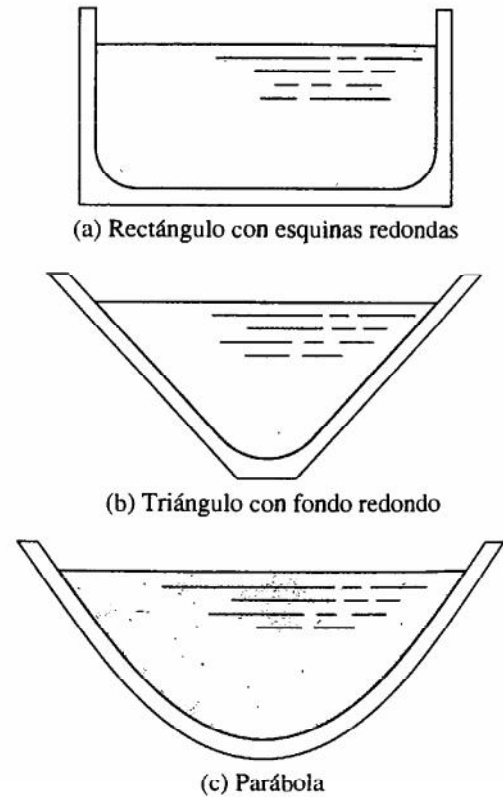
$$R_f = D/4 \text{ para un círculo completo} = (2.00 \text{ pies})/4 = 0.50 \text{ pies}$$

$$R = (1.16)R_f = (1.16)(0.50 \text{ pie}) = 0.580 \text{ pie}$$

Así, las curvas de la figura 14.9 le permitirán que calcule los valores de A , PM y R , para secciones circulares llenas parcialmente, con fórmulas sencillas y el empleo de los valores de las tres relaciones que se lee en la gráfica. De otro modo, las ecuaciones para hacer el cálculo directo de A , PM y R , serían muy complejas. El sitio 1 de Internet incluye una calculadora en línea para determinar el área, perímetro mojado y radio hidráulico para tuberías llenas parcialmente, o alcantarillas, cuando se introduce el diámetro y la profundidad.

En la figura 14.10 se ilustra otras tres formas empleadas en los canales abiertos. Es frecuente que los cauces naturales se aproximen a parábolas aplanadas. Es más práctico construir en tierra un triángulo con fondo plano, que otro agudo. El rectángulo con aristas redondeadas tiene mejor desempeño que el que las tiene cuadradas, y es más fácil de mantener. Sin embargo, es más difícil de construir. La referencia 4 proporciona fórmulas de las características geométricas de estos tipos de secciones transversales.

FIGURA 14.10 Otras formas para los canales abiertos.



14.8 LAS FORMAS MÁS EFICIENTES DE LOS CANALES ABIERTOS

Se utiliza el término *acarreo* para indicar la capacidad de conducción de los canales abiertos. Su valor se deduce de la ecuación de Manning. En unidades del SI, con la ecuación (14-8),

$$Q = \left(\frac{1.00}{n} \right) AR^{2/3} S^{1/2}$$

Todo lo que está en el lado derecho de ésta depende del diseño del canal, excepto la pendiente. Entonces, definimos el acarreo K como

$$K = \left(\frac{1.00}{n} \right) AR^{2/3} \quad (14-14)$$



En unidades del Sistema Inglés,

$$K = \left(\frac{1.49}{n} \right) AR^{2/3} \quad (14-15)$$

Entonces, la ecuación de Manning es

$$Q = KS^{1/2} \quad (14-16)$$

El acarreo de un canal sería máximo cuando el perímetro mojado es mínimo para un área dada. Con este criterio, encontramos que la forma más eficiente es el semi-círculo, es decir, la sección circular que va medio llena. En la tabla 14.3 se muestra los diseños más eficientes de otras formas.

14.9 FLUJO CRÍTICO Y ENERGÍA ESPECÍFICA

Por lo general, al estudiar la energía en el flujo en canales abiertos, se involucra la determinación de la energía que posee el fluido en una sección particular de interés. La energía total se mide en relación con la plantilla del canal, y se compone de la energía potencial debido a la profundidad del fluido, más la energía cinética debido a su velocidad.

Si E denota la energía total, obtenemos

$$E = y + v^2/2g \quad (14-17)$$

donde y es la profundidad y v es la velocidad promedio del flujo. Igual que con la ecuación de la energía que se usó antes, los términos de la ecuación (14-17) tienen las unidades de energía por unidad de peso de fluido en movimiento. En el análisis de flujo en canales abiertos, por lo general se hace referencia a E como la energía específica. Para una descarga dada Q , la velocidad es Q/A . Entonces,

$$E = y + Q^2/2gA^2 \quad (14-18)$$

Como el área se expresa en términos de la profundidad del fluido, la ecuación (14-18) relaciona la energía específica con la profundidad del flujo. Para visualizar los regímenes posibles de flujo en un canal, es útil una gráfica de la profundidad *versus* la energía específica E . Para una sección y descarga particulares en un canal, la curva de la energía específica se asemeja a la que se ilustra en la figura 14.11.

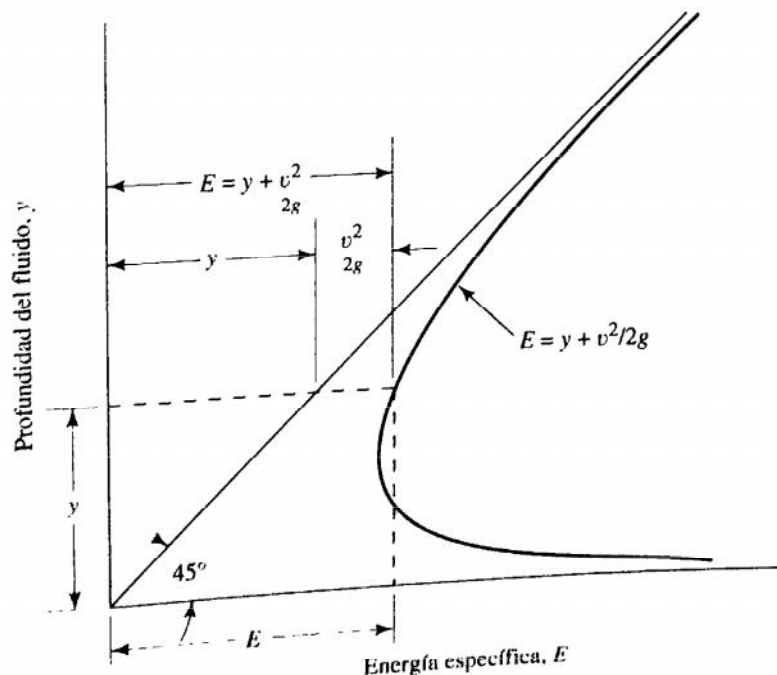
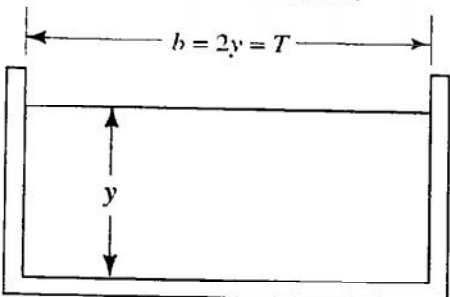
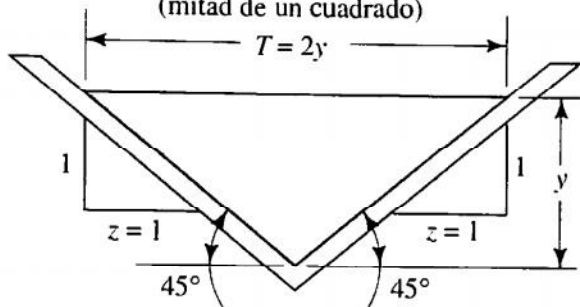
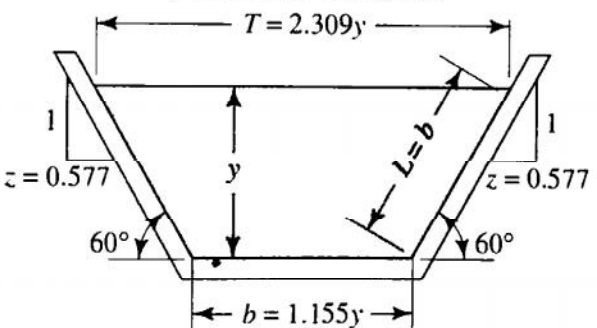
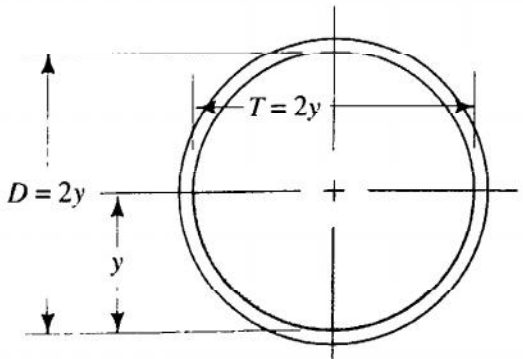


FIGURA 14.11 Variación de la energía específica con la profundidad.

ACARREO — UNIDADES DEL SISTEMA INGLÉS

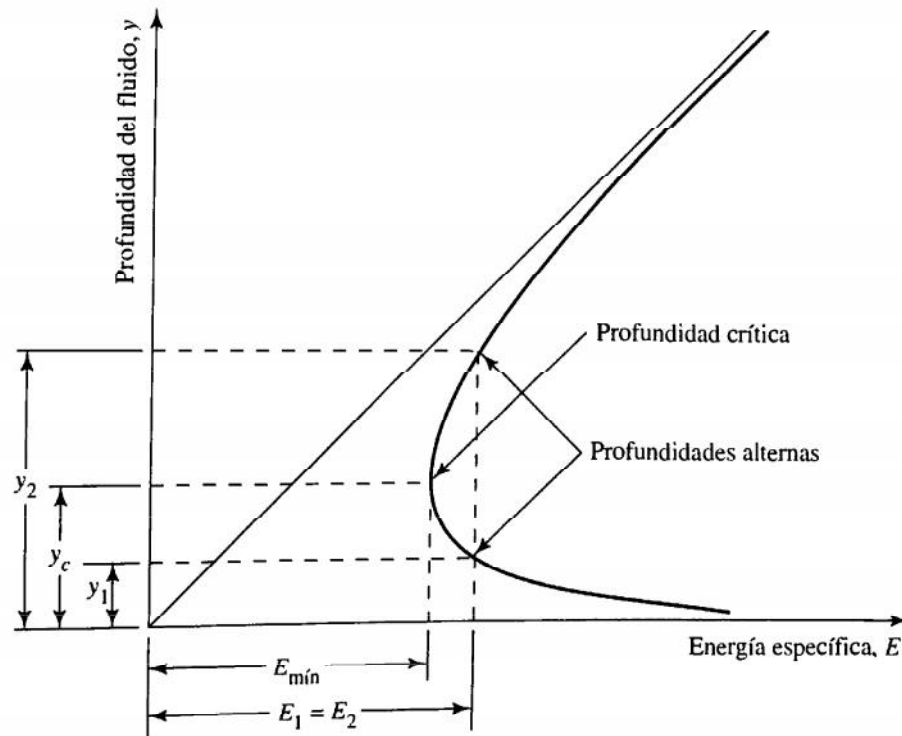
TABLA 14.3. Secciones de eficiencia máxima para canales abiertos.

Sección	Área A	Perímetro mojado PM	Radio hidráulico R
<p>Rectángulo (mitad de un cuadrado)</p> 	$2.0y^2$	$4y$	$y/2$
<p>Triángulo (mitad de un cuadrado)</p> 	y^2	$2.83y$	$0.354y$
<p>Trapezio (mitad de un hexágono)</p> 	$1.73y^2$	$3.46y$	$y/2$
<p>Semicírculo</p> 	$\frac{1}{2}\pi y^2$	πy	$y/2$

Varias características de esta curva son importantes. La línea a 45° sobre la gráfica representa $E = y$. Entonces, para cualquier punto sobre la curva, la distancia horizontal entre esta línea y el eje y representa la energía potencial y . La distancia restante a la curva de la energía específica es la energía cinética $v^2/2g$. Aparece un valor mínimo definido de E , y se demuestra que ocurre cuando el flujo se halla en el estado crítico, es decir cuando $N_F = 1$. Consulte la sección 14.5, ecuación (14-4), sobre la definición del número de Froude, N_F .

La profundidad correspondiente a la energía específica mínima, entonces, se denomina *profundidad crítica* y_c . El flujo es subcrítico para cualquier profundidad mayor que y_c . A la inversa, para cualquier profundidad menor que y_c , el flujo es supercrítico. Observe que para cualquier nivel de energía mayor que el mínimo, pueden existir dos profundidades diferentes. En la figura 14.12, tanto y_1 por debajo de la profundidad crítica y_c , como y_2 por arriba de y_c , tienen la misma energía. En el caso de y_1 , el flujo es supercrítico, y gran parte de la energía es cinética debido a su velocidad elevada. A la profundidad mayor y_2 , el flujo es más lento y sólo una parte pequeña de la energía es cinética. Se denomina a las dos trayectorias, y_1 y y_2 , como trayectorias alternas de la energía específica E .

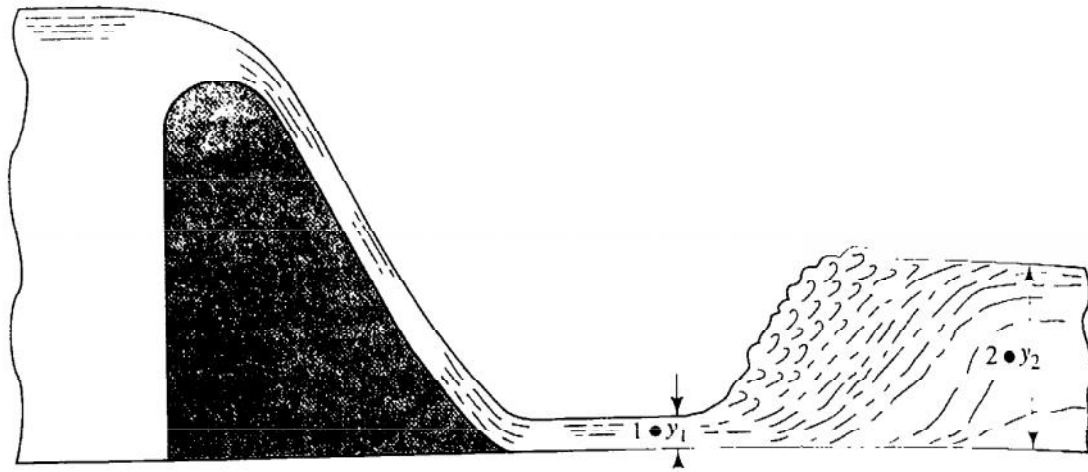
FIGURA 14.12 Profundidad crítica y profundidades alternas.



14.10 SALTO HIDRÁULICO

Para comprender el significado del fenómeno que se conoce como *salto hidráulico*, hay que considerar uno de sus usos más prácticos, que se ilustra en la figura 14.13. Es común que el agua que escurre por un vertedor lleve una velocidad grande en el rango supercrítico cuando llega al fondo de la pendiente relativamente empinada, en la sección 1. Si hubiera de mantenerse esta velocidad en la corriente natural que está después de la estructura cementada del vertedor, los lados y la plantilla del cauce se erosionarían mucho. En lugar de ello, un diseño correcto haría que ocurriera un salto hidráulico, como se muestra, en el sitio en que la profundidad del flujo cambia en forma abrupta, de y_1 a y_2 . De un salto hidráulico resultan dos beneficios. En primer lugar, la velocidad de flujo disminuye en forma sustancial, lo que baja la tendencia del flujo a erosionar el fondo de la corriente. En segundo lugar, en el salto se disipa gran parte del exceso de energía que contiene el flujo a velocidad alta. La disipación de la energía se da porque en el salto el flujo es turbulento en extremo.

FIGURA 14.13 Salto hidráulico en la base de un vertedor.



Para que tenga lugar un salto hidráulico, el flujo antes de él debe estar en el rango supercrítico. Es decir, en la sección 1 de la figura 14.13, y_1 es menor que la profundidad crítica del canal, y el número de Froude N_{F_1} es mayor que 1.0. En la sección 2, la profundidad y_2 después del salto se calcula con la ecuación

$$y_2 = (y_1/2)(\sqrt{1 + 8N_{F_1}^2} - 1) \quad (14-19)$$

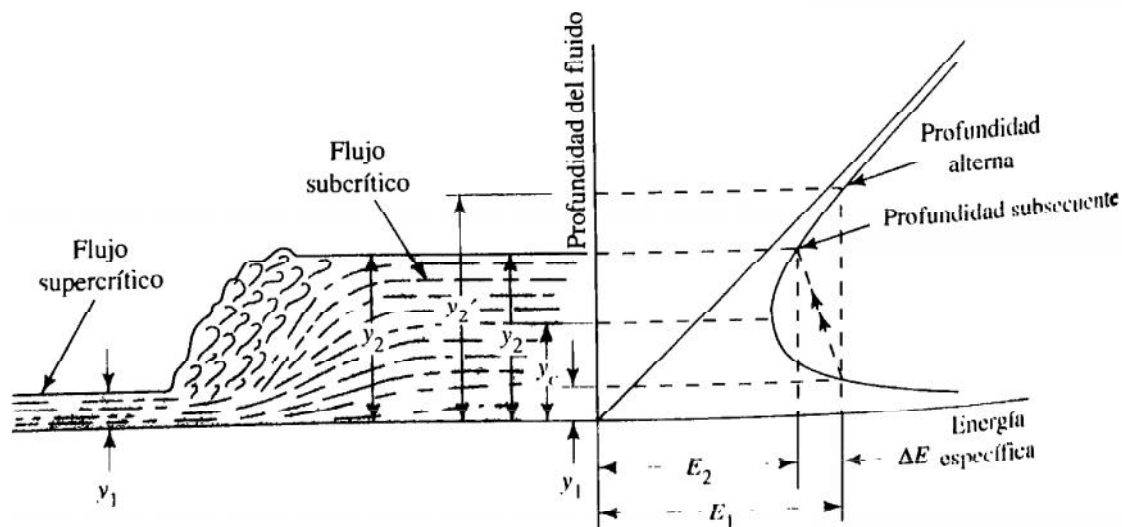
La pérdida de energía en el salto depende de las dos profundidades y_2 y y_1 :

$$E_1 - E_2 = \Delta E = (y_2 - y_1)^3 / 4y_1y_2 \quad (14-20)$$

La figura 14.14 ilustra lo que sucede en un salto hidráulico, por medio de una curva de la energía específica. El flujo llega al salto con una energía E_1 que corresponde a la profundidad supercrítica y_1 . En el salto, la profundidad aumenta en forma brusca. Si no se perdiera energía, la profundidad nueva sería y_2' , que es la profundidad alterna para y_1 . Sin embargo, debido a que se disipó algo de energía ΔE , la profundidad nueva real y_2 corresponde al nivel de energía E_2 . Todavía y_2 está en el rango subcrítico, y aguas abajo del salto se mantendrá un flujo tranquilo. El nombre que se da a la profundidad real y_2 después del salto es *profundidad subsecuente*.

El problema modelo que sigue ilustra otro caso práctico en el que podría ocurrir un salto hidráulico.

FIGURA 14.14 Energía y profundidades en un salto hidráulico.

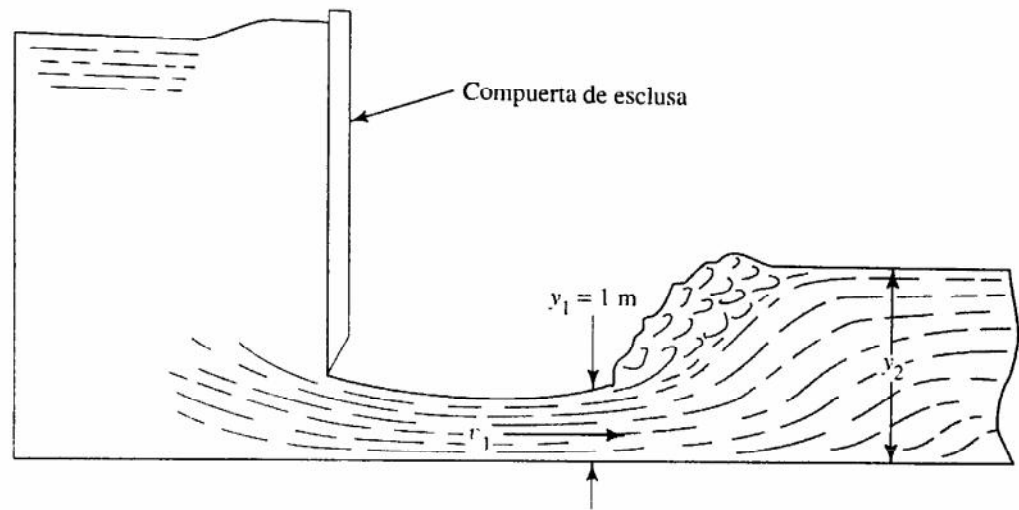


PROBLEMA MODELO 14.6

Como se muestra en la figura 14.15, se descarga agua de un depósito por debajo de una compuerta de esclusa, a razón de $18 \text{ m}^3/\text{s}$, hacia un canal rectangular horizontal de 3 m de ancho, hecho de concreto formado sin acabado. En un punto en que la profundidad es de 1 m, se observa que ocurre un salto hidráulico. Determine lo siguiente:

- Velocidad antes del salto.
- Profundidad después del salto.
- Velocidad después del salto.
- Energía que se disipa en el salto.

FIGURA 14.15 Salto hidráulico para el problema modelo 14.6.



Solución a. La velocidad antes del salto es

$$v_1 = Q/A_1$$

$$A_1 = (3)(1) = 3 \text{ m}^2$$

$$v_1 = (18 \text{ m}^3/\text{s})/3 \text{ m}^2 = 6.0 \text{ m/s}$$

b. Se utiliza la ecuación (13-19) para determinar la profundidad después del salto y_2 :

$$y_2 = (y_1/2)(\sqrt{1 + 8N_{F_1}^2} - 1)$$

$$N_{F_1} = v_1/\sqrt{gy_1}$$

La profundidad hidráulica es igual a A/T , donde T es el ancho de la superficie libre. Entonces, para un canal rectangular, $y_h = y$. Por tanto, tenemos

$$N_{F_1} = 6.0/\sqrt{(9.81)(1)} = 1.92$$

El flujo se encuentra en el rango supercrítico. Tenemos

$$y_2 = (1/2)(\sqrt{1 + (8)(1.92)^2} - 1) = 2.26 \text{ m}$$

c. Por continuidad,

$$v_2 = Q/A_2 = (18 \text{ m}^3/\text{s})/(3)(2.26) \text{ m}^2 = 2.65 \text{ m/s}$$

d. De la ecuación (14-20) obtenemos

$$\Delta E = (y_2 - y_1)^3/4y_1y_2$$

$$= \frac{(2.26 - 1.0)^3}{(4)(1.0)(2.26)} \text{ m} = 0.221 \text{ m}$$

Esto significa que se disipa 0.221 N·m de energía por cada newton de agua que fluye por el salto.

14.11 MEDICIÓN DEL FLUJO EN CANALES ABIERTOS

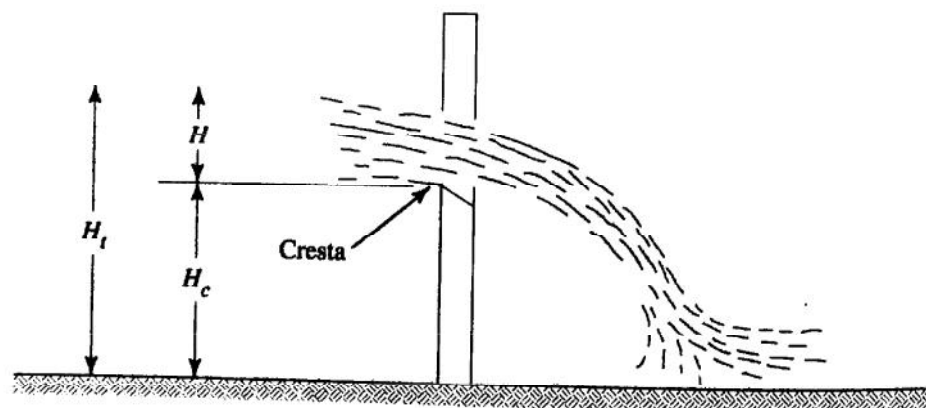
Un canal abierto es aquel cuya superficie superior está abierta a la atmósfera. Algunos ejemplos familiares son las corrientes naturales, los drenajes que corren llenos parcialmente, sistemas de tratamiento de aguas residuales y estructuras para manejar avenidas. Es frecuente que las industrias utilicen canales abiertos para conducir refrigerantes fuera de la maquinaria y reúnan el exceso de fluidos de los procesos, para llevarlos a tanques de almacenamiento.

Dos dispositivos que se emplean mucho para medir el flujo en canales abiertos son los *vertedores* y los *aforadores*. Ambos hacen que el área de la corriente cambie, lo que a su vez modifica el nivel de la superficie de fluido. El nivel que resulta, relativo a alguna característica del dispositivo, se relaciona con la cantidad de flujo. Con los vertedores y los aforadores se mide flujos volumétricos grandes. Consulte las referencias 4 y 13.

14.11.1 Vertedores

Un *vertedor* es una barrera de forma especial que se instala en un canal abierto, a través de la cual el fluido pasa como chorro libre al otro lado de ella. La figura 14.16 ilustra la vista lateral del diseño común de un vertedor. La cresta debe ser afilada, y no es raro que esté hecha de una hoja delgada de metal que se integra a una base grande. La superficie superior de la base se corta con ángulo agudo en el lado de aguas abajo para asegurar que el fluido salte como chorro libre, lo que se llama napa, con una ventilación buena bajo ella.

FIGURA 14.16 Flujo sobre un vertedor.



La figura 14.17 muestra cuatro formas comunes de vertedores, para las que se ha desarrollado ecuaciones de medición que permiten calcular la descarga Q como función de las dimensiones del vertedor, y la carga del fluido sobre la cresta H . Consulte las referencias 4 y 13. Para todos estos diseños, la carga H debe medirse aguas arriba de la cara del vertedor, a una distancia de al menos $4H_{máx}$. La razón de este requisito es que conforme la corriente se aproxima a la cresta, la superficie disminuye su pendiente, debido a la aceleración del fluido mientras se contrae para pasar sobre la cresta.

La medición de la carga se lleva a cabo por medio de un medidor fijo, denominado *medidor estándar*, que se halla incrustado a un lado de la corriente, y cuya graduación de cero está al nivel de la cresta del vertedor. También se emplea dispositivos flotadores que generan una señal que se trasmite a un tablero de control o se graba para tener un registro continuo del flujo. Se emplea dispositivos electrónicos que son

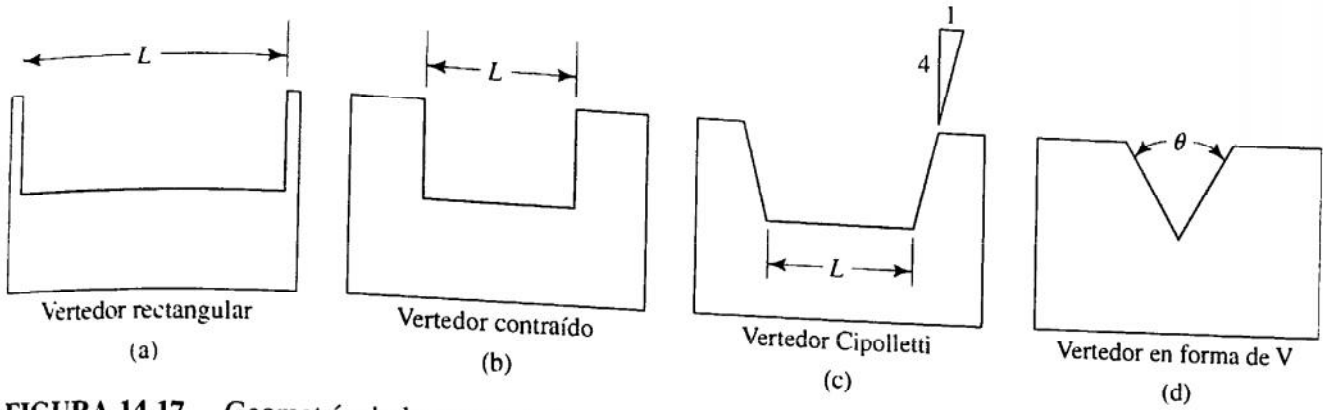


FIGURA 14.17 Geometría de la ranura de los vertedores.

sensibles a la superficie superior del fluido en movimiento. Consulte los sitios 8 y 7 de Internet, para conocer las unidades que existen comercialmente.

El *vertedor rectangular*, también llamado *vertedor suprimido*, tiene una cresta de longitud L que se extiende a todo lo ancho del canal en el que se halla instalado. El diseño estándar requiere:

1. La altura de la cresta sobre el fondo del canal es $H_c \geq 3H_{m\acute{a}x}$.
2. La carga mínima sobre la cresta es $H_{m\acute{i}n} > 0.2$ pie.
3. La carga máxima sobre la cresta es $H_{m\acute{a}x} < L/3$.

La ecuación de medición es

$$Q = 3.33LH^{3/2} \quad (14-21)$$

donde L y H están en pies y Q en pie^3/s .

Un *vertedor contraído* es un vertedor rectangular que tiene sus lados extendidos hacia adentro por los lados del canal en una distancia de al menos $2H_{m\acute{a}x}$. La corriente del fluido debe entonces contraerse conforme fluye por los lados del vertedor, disminuyendo ligeramente la longitud efectiva del vertedor. Los diseños estándar requieren:

1. La altura de la cresta sobre la plantilla del canal $H_c \geq 2H_{m\acute{a}x}$.
2. La carga máxima sobre la cresta $H_{m\acute{i}n} > 0.2$ pie.
3. La carga máxima sobre la cresta $H_{m\acute{a}x} < L/3$.

La ecuación de medición es

$$Q = 3.33(L - 0.2H)H^{3/2} \quad (14-22)$$

donde L y H están en pies y Q en pie^3/s .

El *vertedor Cipolletti* también está contraído respecto de los lados de la corriente, en una distancia de al menos $2H_{m\acute{a}x}$ y tiene sus lados con pendiente hacia fuera, como se ilustra en la figura 14.17(c). Se aplican los mismos requerimientos para el vertedor rectangular contraído. La ecuación de medición es

$$Q = 3.367LH^{3/2} \quad (14-23)$$

El ajuste de la longitud que se incluye para el vertedor rectangular contraído, no se aplica en este caso porque los lados en pendiente tienden a compensarse.

El *vertedor triangular* se emplea sobre todo para bajos flujos volumétricos porque la ranura en forma de V produce una carga H más grande, que puede obtenerse con una

✓ VERTEDOR RECTANGULAR

✓ VERTEDOR CONTRAÍDO

✓ VERTEDOR CIPOLLETTI

ranura rectangular. El ángulo de la ranura en V es un factor en la ecuación de la descarga. Son satisfactorios los ángulos entre 35° y 120° , pero los que se usa más comúnmente son los de 60° y 90° . La ecuación teórica de un vertedor triangular es

$$Q = \frac{8}{15} C \sqrt{2g} \tan(\theta/2) H^{5/2} \quad (14-24)$$

donde θ es el ángulo total incluido entre los lados de la ranura. Una simplificación adicional de esta ecuación da

$$Q = 4.28 C \tan(\theta/2) H^{5/2} \quad (14-25)$$

El valor de C depende algo de la carga H , pero un valor nominal es 0.58. Con éste y los valores comunes de 60° y 90° para θ , obtenemos

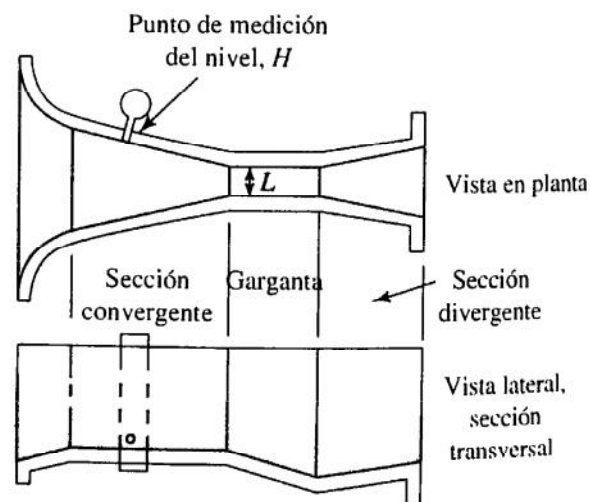
$$Q = 1.43 H^{5/2} \quad (60^\circ \text{ ranura}) \quad (14-26)$$

$$Q = 2.48 H^{5/2} \quad (90^\circ \text{ ranura}) \quad (14-27)$$

14.11.2 Aforadores

Los *aforadores de flujo crítico* son contracciones en la corriente que hacen que el flujo alcance su profundidad crítica dentro de dichas estructuras. Hay una relación definida entre la profundidad y la descarga cuando se da el flujo crítico. Consulte los sitios 8 a 10 de Internet para ver una muestra de aforadores existentes en el comercio. Un tipo de embudo de *flujo crítico* que se utiliza mucho es el de *Parshall*, cuya geometría se presenta en la figura 14.18. La descarga depende del ancho de la sección de garganta L y de la carga H , donde H se mide en la ubicación específica a lo largo de la sección convergente del embudo.

FIGURA 14.18 Aforador de Parshall.



Las ecuaciones de la descarga para el aforador de Parshall fueron desarrolladas en forma empírica para estructuras diseñadas y construidas en dimensiones del Sistema Inglés. En la tabla 14.4 se muestra las ecuaciones de la descarga para varios tamaños de embudo. El valor resultante de Q se convierte a unidades del SI por medio del factor

$$1.0 \text{ pie}^3/\text{s} = 0.02832 \text{ m}^3/\text{s}$$

En construcciones nuevas se recomienda utilizar *aforadores de garganta larga*, en lugar de los de Parshall, debido a que son más sencillos y baratos de construir y se adaptan con más facilidad a formas distintas de los canales. Se instalan en canales rectangulares, trapezoidales o circulares. En la tabla 14.5 se presenta la forma general, que

⇒ ECUACIÓN GENERAL PARA UN VERTEDOR TRIANGULAR

⇒ VERTEDOR CON RANURA EN FORMA DE V A 60°

⇒ VERTEDOR EN FORMA DE V A 90°

TABLA 14.4. Ecuaciones de la descarga para aforadores de Parshall.

Ancho de garganta <i>L</i>	Rango de flujo (pie ³ /s)		Ecuación (<i>H</i> y <i>L</i> en pies, <i>Q</i> en piec ³ /s)
	Mín.	Máx.	
3 pulg	0.03	1.9	$Q = 0.992H^{1.547}$
6 pulg	0.05	3.9	$Q = 2.06H^{1.58}$
9 pulg	0.09	8.9	$Q = 3.07H^{1.53}$
1 pie	0.11	16.1	$Q = 4.00 LH^n$ $\left\{ \begin{array}{l} n=1.55 \\ n=1.55 \\ n=1.58 \\ n=1.59 \\ n=1.61 \end{array} \right.$
2 pies	0.42	33.1	
4 pies	1.3	67.9	
6 pies	2.6	103.5	
8 pies	3.5	139.5	
10 pies	6	200	
20 pies	10	1000	$Q = (3.6875L + 2.5)H^{1.6}$
30 pies	15	1500	
40 pies	20	2000	
50 pies	25	3000	

consiste en una rampa recta desde la plantilla del canal, una sección de garganta plana y un descenso súbito. Asimismo, se muestra las ecuaciones básicas de medición y algunos ejemplos de dimensiones para cada forma. La dimensión *Y* es la profundidad máxima del canal. En las referencias 2, 6 y 13, se hacen análisis amplios sobre los datos y diseño de aforadores de garganta larga.

PROBLEMA MODELO 14.7

Seleccione un diseño de la tabla 14.5 de un embudo de garganta larga para medir un flujo volumétrico dentro del rango de 2.5 a 6.0 piec³/s de agua. Después, calcule la descarga *Q* para varios valores de carga *H*.

Solución

Cualquiera de los diseños rectangular, trapezoidal o circular, que se denotará respectivamente con C, A y B, es apropiado para el rango de flujo que se desea. En este caso se ilustrará el canal trapezoidal. En la tabla 14.5 se encuentra la ecuación de medición y los valores de sus variables. Tenemos

$$Q = K_1(H + K_2)^n$$

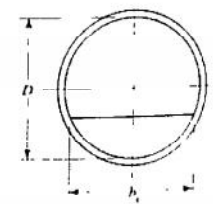
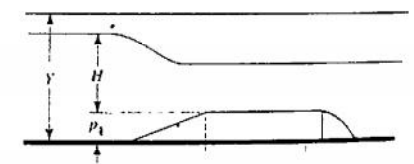
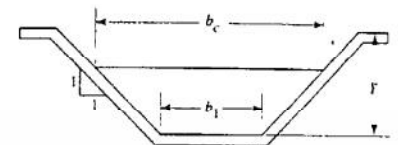
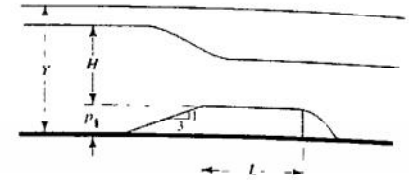
$$Q = 9.29(H + 0.03)^{1.878}$$

Al evaluar esta ecuación entre *H* = 0.50 pie y 0.80 pie, se obtiene los resultados siguientes:

Carga <i>H</i> (pie)	Flujo <i>Q</i> (piec ³ /s)
0.50	2.820
0.60	3.901
0.70	5.114
0.80	6.547

TABLA 14.5. Datos para un embudo de garganta larga.

Diseño A		Diseño B		Diseño C	
Canales rectangulares: $Q = b_c K_1 (H + K_2)^n$					
b_c	0.500 pie	b_c	1.000 pie	b_c	1.500 pies
L	0.750 pie	L	1.000 pie	L	2.250 pies
p_1	0.125 pie	p_1	0.250 pie	p_1	0.500 pies
K_1	3.996	K_1	3.696	K_1	3.375
K_2	0.000	K_2	0.004	K_2	0.011
n	1.612	n	1.617	n	1.625
$H_{mín}$	0.057 pie	$H_{mín}$	0.082 pie	$H_{mín}$	0.148 pie
$H_{máx}$	0.462 pie	$H_{máx}$	0.701 pie	$H_{máx}$	1.500 pies
$Q_{mín}$	0.020 pie ³ /s	$Q_{mín}$	0.070 pie ³ /s	$Q_{mín}$	0.255 pie ³ /s
$Q_{máx}$	0.575 pie ³ /s	$Q_{máx}$	2.100 pie ³ /s	$Q_{máx}$	9.900 pie ³ /s
Canales trapezoidales: $Q = K_1 (H + K_2)^n$					
b_1	1.000 pie	b_1	1.000 pie	b_1	2.000 pies
b_c	2.000 pies	b_c	4.000 pies	b_c	5.000 pies
L	0.750 pie	L	1.000 pie	L	1.000 pie
p_1	0.500 pie	p_1	1.500 pies	p_1	1.500 pies
K_1	9.290	K_1	14.510	K_1	16.180
K_2	0.030	K_2	0.053	K_2	0.035
n	1.878	n	1.855	n	1.784
$H_{mín}$	0.400 pie	$H_{mín}$	0.579 pie	$H_{mín}$	0.580 pie
$H_{máx}$	0.893 pie	$H_{máx}$	0.808 pie	$H_{máx}$	1.456 pies
$Q_{mín}$	1.900 pie ³ /s	$Q_{mín}$	6.200 pie ³ /s	$Q_{mín}$	6.800 pie ³ /s
$Q_{máx}$	8.000 pie ³ /s	$Q_{máx}$	11.000 pie ³ /s	$Q_{máx}$	33.000 pie ³ /s
Canales circulares: $Q = D^{2.5} K_1 (H/D + K_2)^n$					
D	1.000 pie	D	2.000 pies	D	3.000 pies
b_c	0.866 pie	b_c	1.834 pies	b_c	2.940 pies
L_a	0.600 pie	L_a	1.100 pies	L_a	1.350 pies
L_b	0.750 pie	L_b	1.800 pies	L_b	3.600 pies
L	1.125 pies	L	2.100 pies	L	2.700 pies
p_1	0.250 pie	p_1	0.600 pie	p_1	1.200 pies
K_1	3.970	K_1	3.780	K_1	3.507
K_2	0.004	K_2	0.000	K_2	0.000
n	1.689	n	1.625	n	1.573
$H_{mín}$	0.069 pie	$H_{mín}$	0.140 pie	$H_{mín}$	0.180 pie
$H_{máx}$	0.599 pie	$H_{máx}$	1.102 pies	$H_{máx}$	1.343 pies
$Q_{mín}$	0.048 pie ³ /s	$Q_{mín}$	0.283 pie ³ /s	$Q_{mín}$	0.655 pie ³ /s
$Q_{máx}$	1.689 pie ³ /s	$Q_{máx}$	8.112 pie ³ /s	$Q_{máx}$	15.448 pie ³ /s



De la ecuación de flujo también se despeja el valor H , lo que dará el flujo Q que se desea,

$$H = \left(\frac{Q}{K_1} \right)^{1/n} - K_2$$

Ahora, se determina los valores de carga que corresponden a los extremos del rango de flujo que se quiere:

Para $Q = 2.50 \text{ pies}^3/\text{s}$, $H = 0.467 \text{ pie}$

Para $Q = 6.00 \text{ pies}^3/\text{s}$, $H = 0.762 \text{ pie}$

REFERENCIAS

1. Baker, R. C. 2003. *Introductory Guide to Flow Measurement*. Nueva York: ASME Press.
2. Bos, M. G., ed. 1989. *Discharge Measurement Structures*, 3a. ed., Wageningen, Netherlands: International Institute for Land Reclamation and Improvement.
3. Chanson, Hubert. 2004. *Hydraulics of Open Channel Flow*, 2a. ed., Nueva York: Elsevier Science & Technology.
4. Chow, V. T. 1959. *Open Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill. [A classic reference for open-channel flow.]
5. Chow, Ven T., D. R. Maidment y L. W. Mays. 1988. *Applied Hydrology*. Nueva York: McGraw-Hill.
6. Clemmens, A. J., T. L. Wahl, M. G. Bos y J. A. Replogle. 2001. *Water Measurement with Flumes and Weirs*. Wageningen, Netherlands: International Institute for Land Reclamation and Improvement. [Available from Water Resources Publications at www.wrpllc.com/books/wmfv.html.]
7. Jain, C. Subhash. 2000. *Open-Channel Flow*. Nueva York: Wiley.
8. Mays, Larry W. 1999. *Hydraulic Design Handbook*. Nueva York: McGraw-Hill.
9. Montes, S. 1998. *Hydraulics of Open Channel Flow*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
10. Munson, B. R., D. F. Young, T. H. Okiishi y B. G. Young. 2003. *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 4a. ed., Nueva York: Wiley.
11. Prakash, Anand. 2003. *Water Resources Engineering*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
12. Simon, A. L., y S. F. Korom. 2002. *Hydraulics*, 5a. ed., San Diego, CA: Simon Publications.
13. U.S. Bureau of Reclamation and the U.S. Department of Agriculture. 2001. *Water Measurement Manual*, 3a. ed., Washington, DC: U.S. Department of the Interior.
14. White, F. M. 2002. *Fluid Mechanics*, 5a. ed., Nueva York: McGraw-Hill.

SITIOS DE INTERNET

1. LMNO Engineering, Research, and Software, Ltd. www.LMNOeng.com LMNO Engineering es una compañía consultora y desarrolladora de software. El sitio muestra productos de software numerosos para flujo en canales abiertos, flujo en tuberías, medición de flujo, hidrología y cálculos para agua subterránea. Algunos programas son gratis, incluso aquellos para la ecuación de Manning, geometría de alcantarillas circulares, vertedor con ranura en forma de V y vertedor de Cipolletti.
2. Milam Engineering www.geocities.com/Eureka/Concourse/3075/programs.html Conjunto de calculadoras en línea para el campo de la ingeniería civil, inclusive para canales abiertos rectangulares o trapezoidales y la ecuación de Hazen Williams para tubos que operan llenos.
3. U.S. Bureau of Reclamation www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/ El Water Resources Research Laboratory proporciona servicios de pruebas, análisis e investigación hidráulicos, y aplica su experiencia en modelos hidráulicos para la solución de problemas de recursos hidráulicos, hidráulica y mecánica de fluidos.
4. U.S. Bureau of Reclamation www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/winflume/ El U.S. Bureau of Reclamation, en cooperación con el U.S. Water Conservation Laboratory y el International Institute for Land Reclamation and Improvement, desarrolló un programa de computadora llamado Win-Flume, para diseñar y calibrar estructuras de medición de flujo con aforadores de garganta larga y vertedores de cresta ancha. El software se carga desde este sitio.

5. U.S. Bureau of Reclamation www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/pubs/wmm/ El U.S. Bureau of Reclamation, en cooperación con el U.S. Department of Agriculture, publicó el Water Measurement Manual como guía de las prácticas mejores para la medición hidráulica eficaz, con el fin de ejercer la administración óptima del agua. Este documento contiene mucha información sobre el diseño, instalación y operación de aforadores y vertedores, y desde este sitio es posible obtenerla.
6. Marsh-McBirney, Inc. www.marsh-mcBirney.com Fabricante de una variedad de fluxómetros para uso en canales abiertos con técnicas de medición electromagnéticas, radar, ultrasónicas y de presión. Se combina mediciones de velocidad, nivel y profundidad, para obtener el flujo volumétrico. Algunos dispositivos son portátiles y se utilizan en corrientes, canales, estructuras de drenaje y ríos.
7. EESIFLO, Inc. www.eesiflo.com/open_channel_flow_meter.html Fabricante de un fluxómetro para canales abiertos que detecta en forma ultrasónica el nivel del fluido en puntos definidos de vertedores y aforadores, y convierte la lectura a flujo volumétrico, con base en el tipo y dimensiones de la estructura.
8. Plasti-Fab, Inc. www.plasti-fab.com Fabricante de una variedad de aforadores de plástico de fibra de vidrio reforzado, resistentes a la corrosión, inclusive Parshall, Palmer-Bowlus, Trapezoidal, Cutthroat y otros que se instalan en canales existentes.
9. Tracom, Inc. www.tracomfrp.com/flumes.html Fabricante de aforadores tipo H con un rango amplio de tamaños para medir flujos en canales abiertos, desde 0.07 gal/min a más de 50 000 gal/min.
10. Accuraflo, Inc. www.accuraflo.com Fabricante del sistema propietario Accura-Flo™ para medición hidráulica en aplicaciones potables, municipales, residuales, irrigación e industriales, de flujo en canales abiertos.

PROBLEMAS

- 14.1M Calcule el radio hidráulico de una tubería de drenaje circular que corre llena a la mitad, si su diámetro interior es de 300 mm.
- 14.2M Un canal rectangular tiene un ancho de plantilla de 2.75 m. Calcule el radio hidráulico cuando la profundidad del fluido es de 0.50 m.
- 14.3E Una estructura de drenaje para un parque industrial tiene una sección transversal trapezoidal similar a la que se muestra en la figura 14.1(c). El ancho de plantilla es de 3.50 pies, y los lados están inclinados con un ángulo de 60° con respecto de la horizontal. Calcule el radio hidráulico de este canal, cuando la profundidad del fluido es de 1.50 pies.
- 14.4E Repita el problema 14.3, si la pendiente de los lados es de 45° .
- 14.5E Calcule el radio hidráulico de un canal trapezoidal con ancho de plantilla de 150 mm y con lados cuyo declive es de 15 mm en horizontal, para un cambio vertical de 10 mm. Es decir, la relación de X/D en la figura 14.1(c) es de 1.50. La profundidad del fluido en el canal es de 62 mm.
- 14.6E Calcule el radio hidráulico para la sección de la figura 14.19, si el agua fluye con una profundidad de 2.0 pulgadas. La sección corresponde a la de una canaleta pluvial doméstica.

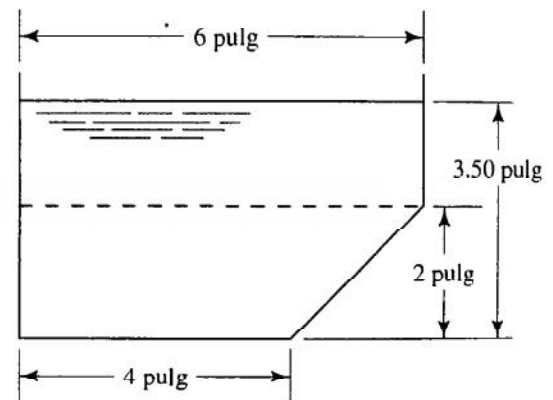
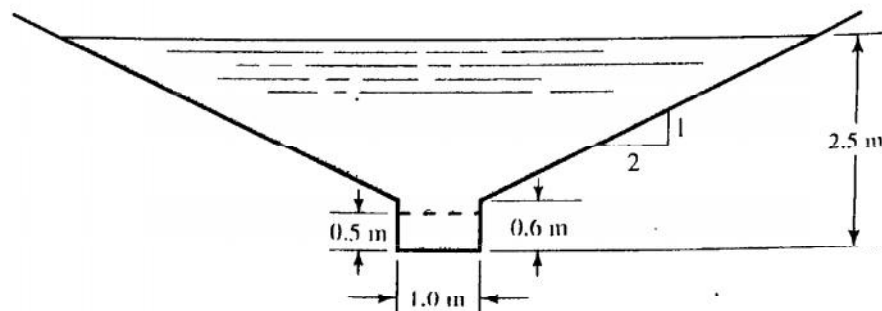


FIGURA 14.19 Problemas 14.6, 14.7 y 14.11.

- 14.7E Repita el problema 14.6 para una profundidad de 3.50 pulgadas.
- 14.8M Calcule el radio hidráulico del canal de la figura 14.20, si la profundidad del agua es de 0.50 m.
- 14.9M Calcule el radio hidráulico del canal de la figura 14.20, si el agua tiene una profundidad de 2.50 m.

FIGURA 14.20 Problemas 14.8, 14.9 y 14.14.



- 14.10M** Por un canal rectangular de concreto colado sin acabado, que mide 3.5 m de ancho, fluye agua. Para una profundidad de 2.0 m, calcule la descarga normal y el número de Froude del flujo. La pendiente del canal es de 0.1%.
- 14.11E** Determine la descarga normal para un canalón pluvial de aluminio con la forma que se muestra en la figura 14.19, y que opera con una profundidad de 3.50 pulgadas. Utilice $n = 0.013$. El canalón cae 4 pies en una longitud de 60 pies.
- 14.12E** Una alcantarilla circular bajo una autopista tiene 6 pies de diámetro y está hecha de metal corrugado. Desciende 1 pie en una longitud de 500 pies. Calcule la descarga normal cuando la alcantarilla opera medio llena.
- 14.13M** Un aforador de madera se construye para que de manera temporal conduzca 5000 L/min de agua, hasta que se instale un dren permanente. El aforador es rectangular, con 205 mm de ancho de plantilla y profundidad máxima de 250 mm. Calcule la pendiente que se requiere para manejar la descarga esperada.
- 14.14M** Un canal de drenaje de avenidas en una ciudad con lluvias súbitas e intensas, tiene la forma que se presenta en la figura 14.20. Está hecho de concreto sin acabado y tiene una pendiente de 0.5%. En tiempos normales, el agua permanece en la sección rectangular pequeña. La sección superior permite que el canal conduzca volúmenes grandes. Determine la descarga normal para profundidades de 0.5 y 2.5 m.
- 14.15E** La figura 14.21 representa la forma aproximada de un cauce natural con terrazas a cada lado. El canal es de tierra y está cubierto de pasto. Emplee $n = 0.04$. Si la pendiente promedio es de 0.000 15, determine la descarga normal para profundidades de 3 y 6 pies.

- 14.16E** Calcule la profundidad del flujo de agua en un canal rectangular de 10 pies de ancho, construido de ladrillos cementados con mortero, para una descarga de 150 pie³/s. La pendiente es de 0.1%.
- 14.17M** Calcule la profundidad del flujo en un canal trapecoidal con ancho de plantilla de 3 m y cuyas paredes tienen una pendiente de 45° respecto de la horizontal. El canal está hecho de concreto sin acabado y se encuentra en una pendiente de 0.1%. La descarga es de 15 m³/s.
- 14.18M** Un canal rectangular debe conducir 2.0 m³/s de agua, de un condensador de refrigeración enfriado por agua hacia un estanque de enfriamiento. La pendiente disponible es de 75 mm en una distancia de 50 m. La profundidad máxima del flujo es de 0.40 m. Determine el ancho del canal, si su superficie es de concreto aplastado terminado.
- 14.19M** El canal que se muestra en la figura 14.22 tiene una superficie de concreto flotado con acabado, y se encuentra en una pendiente que desciende 0.1 m por 100 m de longitud. Calcule la descarga normal y el número de Froude para una profundidad de 1.5 m. Para esa descarga, calcule la profundidad crítica.
- 14.20E** Una bodega cuadrada está equipada con rociadores automáticos para protección contra incendios, que arrojan 1000 gal/min de agua. El piso está diseñado para drenar este flujo en forma uniforme hacia depresiones (canales) cerca de cada pared exterior. Las depresiones tienen la forma que se muestra en la figura 14.23. Cada depresión conduce 250 gal/min, se encuentra en una pendiente de 1% y está hecha de concreto colado sin acabado. Determine la profundidad mínima h .

FIGURA 14.21 Problema 14.15.

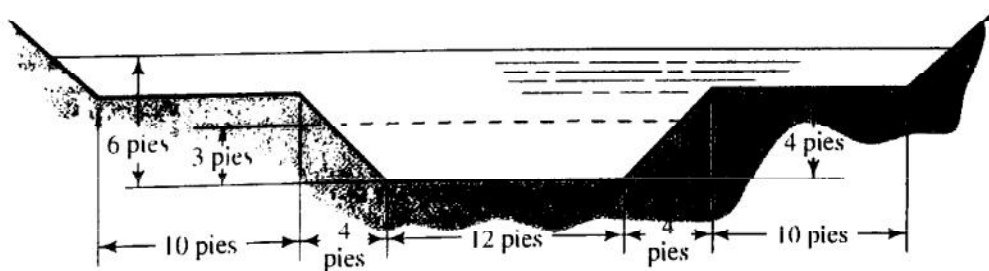


FIGURA 14.22 Problema 14.19.

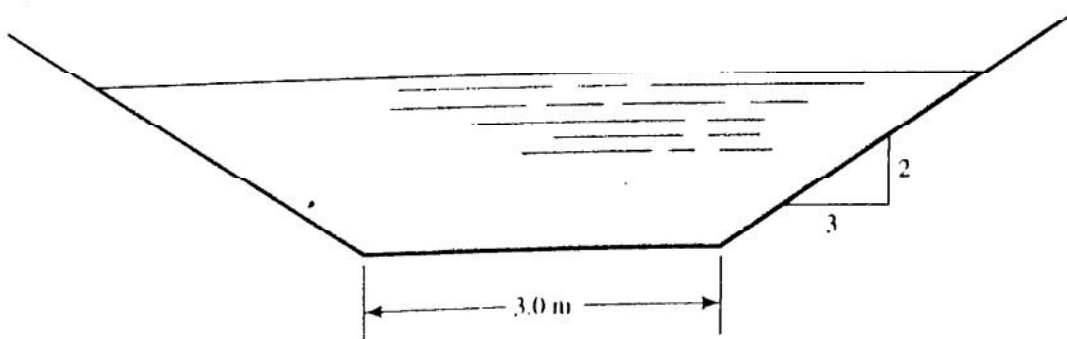
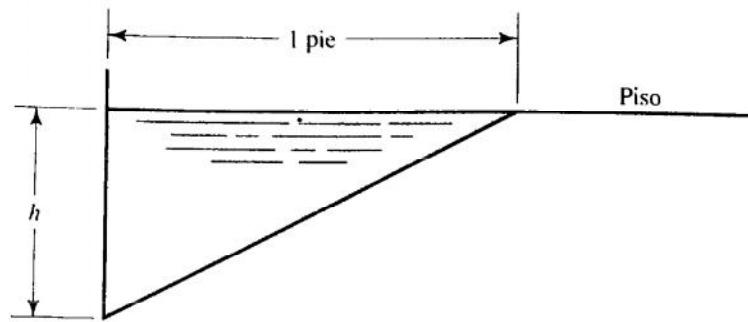


FIGURA 14.23 Problemas 14.20 y 14.21.



- 14.21E** El flujo desde dos de las depresiones (canales) descritas en el problema 14.20 pasa a una cisterna, donde un drenaje circular de arcilla común con revestimiento lo conduce hacia un colector de avenidas. Determine el tamaño del drenaje que se requiere para conducir el flujo (500 gal/min) cuando opera medio lleno. La pendiente es de 0.1%.
- 14.22M** Para un canal rectangular con ancho de plantilla de 1.00 m, calcule el área de flujo y radio hidráulico para profundidades que van de 0.10 m a 2.0 m. Trace una gráfica del área y el radio hidráulico versus la profundidad.
- 14.23M** Se desea conducir 2.00 m³/s de agua a una velocidad de 3.0 m/s en un canal abierto rectangular. El ancho de plantilla es de 0.80 m. Calcule la profundidad del flujo y el radio hidráulico.
- 14.24M** Para el canal que se diseñó en el problema 14.23, calcule la pendiente que se requiere, si el canal es de concreto flotado con acabado.
- 14.25M** Se desea conducir 2.00 m³/s de agua a una velocidad de 3.0 m/s en un canal abierto rectangular. Calcule la profundidad y radio hidráulico para un rango de diseños del canal, con anchos de plantilla de 0.50 m a 2.00 m. Grafique la profundidad y el radio hidráulico versus el ancho de plantilla.
- 14.26M** Para cada uno de los canales que se diseñó en el problema 14.25, calcule la pendiente que se requiere, si el canal es de concreto flotado con acabado. Grafique la pendiente versus el ancho.
- 14.27E** Un canal trapezoidal tiene un ancho de plantilla de 2.00 pies y un declive de sus lados de $z = 1.50$. Calcule el área de flujo y el radio hidráulico para una profundidad de 20 pulgadas.
- 14.28E** Para el canal del problema 14.27, calcule la descarga normal que se esperaría para una pendiente de 0.005, si el canal está hecho de concreto colado sin terminado.
- 14.29E** Repita el problema 14.28, pero con el canal revestido con losetas de plástico lisas.
- 14.30E** Un canal trapezoidal tiene un ancho de plantilla de 2.00 pies y un declive de sus lados de $z = 1.50$. Calcule el área de flujo y el radio hidráulico para profundidades que van de 6.00 a 24.00 pulgadas. Grafique el área de flujo y el radio hidráulico versus la profundidad.
- 14.31E** Para cada profundidad de canal que se diseñó en el problema 14.30, calcule la descarga normal esperada si tiene una pendiente de 0.005, y está hecho de concreto colado sin acabado.
- 14.32M** Calcule el área de flujo y radio hidráulico para una tubería de drenaje circular de 375 mm de diámetro y una profundidad de 225 mm.
- 14.33M** Repita el problema 14.32 para una profundidad de 135 mm.
- 14.34M** Para el canal del problema 14.32, calcule la descarga normal esperada, si tiene una pendiente de 0.12%, y está hecho de acero pintado.
- 14.35M** Para el canal que se diseñó en el problema 14.33, encuentre la descarga normal esperada para una pendiente de 0.12%, si el canal está hecho de acero pintado. Compare el resultado con el del problema 14.34.
- 14.36E** Se desea conducir 1.25 pies³/s de agua a una velocidad de 2.75 pies/s. Diseñe la sección transversal del canal para cada forma de las mostradas en la tabla 14.3, donde se presenta las secciones más eficientes para canales abiertos.
- 14.37E** Para cada sección diseñada en el problema 14.36, calcule la pendiente requerida, si el canal está hecho de concreto flotado con acabado. Compare los resultados.
- 14.38E** Calcule el número de Froude y diga si el flujo es subcrítico o supercrítico, para cada sección diseñada en el problema 14.36.
- Realice las tareas siguientes para cada uno de los problemas 14.39 a 14.42:
- Calcule la profundidad crítica.
 - Calcule la energía específica mínima.
 - Grafique la curva de la energía específica.
 - Determine la energía específica para la profundidad dada y la profundidad alterna para esta energía.
 - Determine la velocidad de flujo y el número de Froude para cada profundidad en pulgadas en (d).
 - Calcule las pendientes del canal requeridas, si las profundidades que se obtuvo en (d) han de ser las normales para el flujo volumétrico dado.
- 14.39M** Un canal rectangular de 2.00 m de ancho conduce 5.5 m³/s de agua, y está hecho de concreto colado sin acabado. Utilice $y = 0.50$ m en el inciso (d).
- 14.40M** Un tubo de drenaje de concreto con acabado, circular con diámetro de 1.20 m, conduce 1.45 m³/s. Utilice $y = 0.50$ m en (d).

14.41E Un canal triangular con pendientes laterales de 1:1.5, conduce $0.68 \text{ pie}^3/\text{s}$ de agua, y está hecho de tierra suave, excavada y limpia. Utilice $y = 0.25 \text{ pie}$ en (d).

14.42E Un canal trapezoidal con ancho de plantilla de 3.0 pies y pendientes laterales de 1:0.75, conduce $0.80 \text{ pie}^3/\text{s}$ de agua, y está hecho de concreto lanzado con acabado. Utilice $y = 0.05 \text{ pie}$ en (d).

Vertedores y aforadores

14.43E Determine el flujo volumétrico máximo posible sobre un vertedor con ranura en forma de V a 60° , si el ancho de la ranura de la parte superior es de 12 pulgadas.

14.44E Determine la longitud que se requiere de un vertedor contraído, similar al que se muestra en la figura 14.17(b), para que pasen $15 \text{ pie}^3/\text{s}$ de agua. La altura de la cresta ha de ser de 3 pies desde la plantilla del canal, y la altura máxima sobre la cresta debe ser de 18 pulgadas.

14.45E Trace una gráfica de Q versus H para un vertedor a todo lo ancho, con longitud de cresta de 6 pies, y ésta se encuentra a 2 pies de la plantilla del canal. Considere valores de la carga H de 0 a 12 pulgadas, en intervalos de 2 pulgadas.

14.46E Repita los cálculos de Q versus H para un vertedor similar al del problema 14.45, pero ahora está ubicado en un canal más ancho que 6 pies. Por ello se convierte en un vertedor contraído.

14.47E Compare las descargas sobre los vertedores siguientes cuando la carga H es de 18 pulgadas:

- Ancho total, rectangular: $L = 3 \text{ pies}$, $H_c = 4 \text{ pies}$.
- Contraído, rectangular: $L = 3 \text{ pies}$, $H_c = 4 \text{ pies}$.
- Ranura en V a 90° (el ancho de la parte superior también es de 3 pies).

14.48E Trace una gráfica de Q versus H para un vertedor con ranura en forma de V a 90° , para valores de la carga de 0 a 12 pulgadas, en intervalos de 2 pulgadas.

14.49E Para un aforador de Parshall con ancho de garganta de 9 pulgadas, calcule la carga H correspondiente a los flujos mínimo y máximo.

14.50E Para un aforador de Parshall con ancho de garganta de 8 pies, calcule la carga H que corresponde a los flujos mínimo y máximo. Grafique Q versus H , por medio de cinco valores de H espaciados aproximadamente igual entre el mínimo y el máximo.

14.51E Un flujo volumétrico de $50 \text{ pie}^3/\text{s}$ cae dentro del rango de ancho de 4 y 10 pies de un aforador de Parshall. Compare la carga H para este flujo volumétrico en cada tamaño.

14.52E Se instala un aforador de garganta larga en un canal trapezoidal, que utiliza el diseño C de la tabla 14.5. Calcule la descarga para una carga de 0.84 pie.

14.53E Se instala un aforador de garganta larga en un canal trapezoidal, que utiliza el diseño B de la tabla 14.5. Calcule la descarga para una carga de 0.65 pie.

14.54E Se instala un aforador de garganta larga en un canal rectangular, que utiliza el diseño A de la tabla 14.5. Calcule la descarga para una carga de 0.35 pie.

14.55E Se instala un aforador de garganta larga en un canal rectangular, que utiliza el diseño C de la tabla 14.5. Calcule la descarga para una carga de 0.40 pie.

14.56E Se instala un aforador de garganta larga en un tubo circular, que utiliza el diseño B de la tabla 14.5. Calcule la descarga para una carga de 0.25 pie.

14.57E Se instala un aforador de garganta larga en un canal circular, que utiliza el diseño A de la tabla 14.5. Calcule la descarga para una carga de 0.09 pie.

14.58E Calcule la carga correspondiente a una tasa de flujo volumétrico de $1.25 \text{ pies}^3/\text{s}$, para un aforador de garganta larga de diseño B en un canal rectangular.

14.59E Calcule la carga correspondiente a una tasa de flujo volumétrico de $6.80 \text{ pies}^3/\text{s}$, para un aforador de garganta larga de diseño C en un canal circular.

14.60E Seleccione un aforador de garganta larga de la tabla 14.5, que conduciría un rango de flujo de 30 gal/min a 500 gal/min. Calcule la carga para cada uno de dichos flujos, y después calcule el flujo que resultaría de cuatro cargas adicionales espaciadas aproximadamente igual entre sí.

14.61C Seleccione un aforador de garganta larga de la tabla 14.5 que conduciría un rango de flujo de $50 \text{ m}^3/\text{h}$ a $180 \text{ m}^3/\text{h}$. Calcule la carga para cada uno de dichos flujos, y después calcule el flujo que resultaría de cuatro cargas adicionales espaciadas aproximadamente igual entre sí.

TAREA DE PROGRAMACIÓN DE COMPUTADORAS

1. Diseñe una hoja de cálculo o un programa para calcular las características geométricas de cada sección de las mostradas en la tabla 14.2. Incluya el área, perímetro mojado y radio hidráulico.

2. Diseñe una hoja de cálculo o un programa para calcular las características geométricas de cada sección de las mostradas en la tabla 14.3. Incluya el área, perímetro mojado y radio hidráulico.

3. Diseñe una hoja de cálculo o un programa para calcular la descarga normal de las formas de canal abierto que se ilustra en la tabla 14.2, con una pendiente dada. Incluya la posibilidad de calcular las características geométricas del canal y una lista de valores de la n de Manning, donde el usuario seleccione el de diseño. Compruebe su trabajo con los datos del problema modelo 14.2.

4. Diseñe una hoja de cálculo o un programa para calcular la pendiente que requiere un canal de cualquiera de las formas de la tabla 14.2, con las dimensiones dadas y la descarga normal deseada. Compruebe su trabajo con los datos del problema modelo 14.3.
5. Diseñe una hoja de cálculo o un programa para calcular la profundidad normal que requiere un canal rectangular de ancho dado, que conduce una descarga normal dada y con una pendiente conocida. Se requiere un método de ensayo y error. Verifique su trabajo con los datos del problema modelo 14.5.
6. Diseñe una hoja de cálculo o un programa para calcular la descarga a través de un vertedor rectangular de ancho completo, con la ecuación (14-21); a través de un vertedor contraído, con la ecuación (14-22); a través de un vertedor Cipolletti, con la ecuación (14-23); y a través de un vertedor triangular (ranura en forma de V), con las ecuaciones (14-26) y (14-27).
7. Diseñe una hoja de cálculo o un programa para calcular la descarga a través de cualquiera de los vertedores de Parshall presentados en la tabla 14.4.
8. Utilice la tarea 6 para resolver los problemas 14.45 a 14.48.
9. Utilice la tarea 7 para resolver los problemas 14.49 a 14.51.
10. Diseñe una hoja de cálculo o un programa para obtener el flujo volumétrico Q , de cualquiera de los vertedores de garganta larga en los canales rectangulares mostrados en la tabla 14.5, para cualquier valor de entrada de carga H .
11. En la tarea 10, incluya el cálculo de la carga H que corresponda a cualquier valor de entrada de el flujo Q .
12. Diseñe una hoja de cálculo o un programa para calcular el flujo volumétrico Q de cualquiera de los aforadores de garganta larga en los canales trapezoidales mostrados en la figura 14.5, para cualquier valor de entrada de la carga H .
13. En la tarea 12, incluya el cálculo de la carga H que corresponda a cualquier valor de entrada de el flujo volumétrico Q .
14. Diseñe una hoja de cálculo o un programa que calcule el flujo volumétrico Q , de cualquiera de los aforadores de garganta larga en los canales circulares mostrados en la tabla 14.5, para cualquier valor de entrada de la carga H .
15. En la tarea 14, incluya el cálculo de la carga H que corresponda a cualquier valor de entrada de el flujo volumétrico Q .