

Capítulo 15

Flujo en canales.



Historia

El conocimiento empírico del funcionamiento de los canales se remonta a varios milenios. En la antigua Mesopotamia se usaban canales de riego, en la Roma Imperial se abastecían de agua a través de canales construidos sobre inmensos acueductos, y los habitantes del antiguo Perú construyeron en algunos lugares de los Andes canales que aún funcionan. El conocimiento y estudio sistemático de los canales se remonta al siglo XVIII, con Chézy, Bazin y otros.

Los egipcios fueron sin duda también los primeros pueblos que se sirvieron de canales para fertilizar los campos con las aguas del Nilo y cuando las tierras se hallaban demasiado altas empleaban máquinas para elevar el agua a la altura necesaria. La mayoría de estas se dice las inventó Arquímedes en su viaje a Egipto. Algunos suponen que la mayor parte de las bocas del Nilo fueron canales abiertos por la mano del hombre.

Sesostris I y sus sucesores intentaron poner en comunicación el Nilo con el mar Rojo, en cuya empresa perecieron durante el reinado de Neco unos ciento veinte mil hombres. Este proyecto se abandonó por la predicción de un oráculo que manifestó que por este medio se abriría quizá un pasaje a los bárbaros. Más adelante continuó Darío este mismo canal, que según Herodoto tenía ya cuatro días de navegación.

Había en Egipto otros canales, pero estos servían más para el riego que para la navegación. El mayor de todos fue el que Moeris hizo construir para conducir las aguas del Nilo al gran lago que había mandado hacer. Se asegura que este canal tenía ochenta estadios de largo y trescientos pies de ancho, cuya entrada podía abrirse y cerrarse según convenía. El canal que el califa Omar hizo construir para trasportar a Medina los granos de Alejandría, creen algunos que fue siguiendo las huellas del antiguo.

Los célebres ríos de Asia el Éufrates y el Tigris estaban en comunicación por medio de un canal que algunos creen obra de Nabucodonosor y otro canal que unía el Tigris con el Euleo sirvió bastante a Alejandro en sus conquistas.

Los griegos y romanos proyectaron abrir un canal cortando el istmo de Corinto que une Acaya con Morea, a fin de poder pasar del mar Jónico al Archipiélago. Este istmo apenas tiene más de dos leguas y cortándolo ahorra a las embarcaciones una vuelta de ciento sesenta leguas alrededor del Peloponeso y el doblar un cabo muy peligroso por sus muchos escollos. Periandrio fue el primero que formó este proyecto 5 ó 6 años antes de la era cristiana. Demetrio Poliorcetas rey de Macedonia tres siglos después ensayó hacer una isla del Peloponeso, empresa que abandonó más adelante. Julio César, Cayo Calígula, Nerón y en fin Herodes

Ático procuraron entorpecer o frustrar esta tentativa. Tantas dificultades, muchas de ellas insuperables, dieron lugar a este proverbio latino: *Isthmum fodere*.

Los romanos, no menos que los egipcios y los pueblos del Asia, sin embargo promovieron la construcción de sus principales canales los que fueron obra de su



genio guerrero para facilitar los trasportes y hacer las marchas con más prontitud, pero no descuidaron por esto los canales de riego tan importantes para un pueblo agricultor. Así es que Catón y la mayoría de los escritores antiguos consideran como la más rica de las posesiones un campo que se pueda regar, *solum irrigunm*. Cicerón considera con razón el riego de los campos como la causa principal de su fertilidad y le

recomienda muy particularmente: *acide ductus aquarum, derivationes fluminum, agrorum irrigationes*. Vitrubio habla de la construcción de estos canales con mucha extensión, etc.

Los chinos aventajaron a los griegos, a los romanos y en una palabra, a todos los pueblos en la construcción de canales. Según todas las noticias que tenemos de este pueblo, se ocuparon ya desde la más remota antigüedad en la conducción y distribución de las aguas. El más célebre canal de China es el Yun-leang o canal real que emprendió en el año 1289 el emperador Chi-tsou jefe de la dinastía Fuen, el primero de los emperadores tártaros-mogoles que reinaron en la China. Corre el espacio de unas 140 leguas.

En América los mayas y los aztecas construyeron canales para regar sus tierras y acueductos para llevar el vital líquido a sus poblaciones. Durante la colonia al expandirse el territorio ocupado por ciudades se requirió la construcción de acueductos de los que quedan como testigos los construidos en la ciudad de México, en Querétaro y en Morelia.

Generalidades sobre canales.

El flujo de agua en un conducto puede ser flujo en canal abierto o flujo en tubería. Estas dos clases de flujos son similares en diferentes en muchos aspectos, pero estos se diferencian en un aspecto importante.

El flujo en canal abierto debe tener una superficie libre, en tanto que el flujo en tubería no la tiene, debido a que en este caso el agua debe llenar completamente el conducto.

Las condiciones de flujo en canales abiertos se complican por el hecho de que la composición de la superficie libre puede cambiar con el tiempo y con el espacio, y también por el hecho de que la profundidad de flujo el caudal y las pendientes del fondo del canal y la superficie libre son interdependientes.

En estas la sección transversal del flujo, es fija debida a que está completamente definida por la geometría del conducto. La sección transversal de una tubería por lo general es circular, en tanto que la de un canal abierto puede ser de cualquier forma desde circular hasta las formas irregulares en ríos. Además, la rugosidad en un canal abierto varía con la posición de una superficie libre. Por consiguiente la selección de los coeficientes de fricción implica una mayor incertidumbre para el caso de canales abiertos que para el de tuberías, en general, el tratamiento del flujo en canales abiertos es más que el correspondiente a flujo en tuberías. El flujo en un conducto cerrado no es necesariamente flujo en tuberías si tiene una superficie libre, puede clasificarse como flujo en canal abierto.

Canales abiertos y sus propiedades.

Clases de canales abiertos. Un canal abierto es un conducto en el cual el agua, fluye con una superficie libre. De acuerdo con su origen un canal puede ser natural o artificial.

Los canales naturales incluyen todos los tipos de corrientes de agua que existen de manera natural en la tierra, lo cuales varían en tamaño desde pequeños arroyuelos en zonas montañosas hasta quebradas, arroyos, ríos pequeños y grandes, y estuarios de mareas. Las corrientes subterráneas que transportan agua con una superficie libre también son consideradas como canales abiertos naturales.

Las propiedades hidráulicas de un canal natural por lo general son muy irregulares. En algunos casos pueden hacerse suposiciones empíricas razonablemente consistentes en las observaciones y experiencias reales, de tal modo que las condiciones de flujo en estos canales se vuelvan manejables mediante tratamiento analítico de la hidráulica teórica.

Los canales artificiales son aquellos construidos o desarrollados mediante el esfuerzo humano: canales de navegación, canales de centrales hidroeléctricas, canales y canaletas de irrigación, cunetas de drenaje, vertederos, canales de desborde, canaletas de madera, cunetas a lo largo de carreteras etc..., así como canales de modelos de laboratorio con propósitos experimentales las propiedades hidráulicas de estos canales pueden ser controladas hasta un nivel deseado o diseñadas para cumplir unos requisitos determinados.

La aplicación de las teorías hidráulicas a canales artificiales producirán, por tanto, resultados bastantes similares a las condiciones reales y, por consiguiente, son razonablemente exactos para propósitos prácticos de diseños.

La canaleta es un canal de madera, de metal, de concreto de mampostería, a menudo soportado en o sobre la superficie del terreno para conducir el agua a través de un de una depresión. La alcantarilla que fluye parcialmente llena, es un canal cubierto con una longitud corta instalado para drenar el agua a través de terraplenes de carreteras o de vías férreas. El túnel con flujo a superficie libre es un canal largo, utilizado para conducir el agua a través de una colina o a cualquier obstrucción del terreno.



El flujo de canales abiertos tiene lugar cuando los líquidos fluyen por la acción de la gravedad y solo están parcialmente envueltos por un contorno sólido. En el flujo de canales abiertos, el líquido que fluye tiene superficie libre y sobre él no actúa otra presión que la debida a su propio peso y a la presión atmosférica. El flujo en canales abiertos también tiene lugar en la naturaleza, como en ríos, arroyos, etc., si bien en general, con secciones rectas del

cauce irregulares. De forma artificial, creadas por el hombre, tiene lugar en los canales, acequias, y canales de desagüe. En la mayoría de los casos los canales tienen secciones rectas regulares y suelen ser rectangulares, triangulares o trapezoidales. También tienen lugar el flujo de canales abiertos en el caso de conductos cerrados, como tuberías de sección recta circular cuando el flujo no es a conducto lleno. En los sistemas de alcantarillado no tiene lugar, por lo general, el flujo a conducto lleno, y su diseño se realiza como canal abierto.

ESTADO DE FLUJO. El estado o comportamiento del flujo en canales abiertos está gobernado básicamente por los efectos de viscosidad y gravedad con relación con las fuerzas inerciales del flujo.

EFFECTO DE VISCOSIDAD. El flujo puede ser laminar, turbulento o transaccional según el efecto de la viscosidad en relación de la inercia.

EL FLUJO ES LAMINAR: Si las fuerzas viscosas son muy fuertes en relación con las fuerzas inerciales, de tal manera que la viscosidad juega con un papel muy importante en determinar el comportamiento del flujo. En el flujo laminar, las partículas de agua se mueven en trayectorias suaves definidas o en líneas de corriente, y las capas de fluido con espesor infinitesimal parecen deslizarse sobre capas adyacentes.

EFFECTO DE LA GRAVEDAD: El efecto de la gravedad sobre el estado del flujo representa por relación por las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales.

GEOMETRIA DEL CANAL: Un canal con una sección transversal invariable y una pendiente de fondo constante se conoce como canal prismático. De otra manera, el canal es no prismático; un ejemplo es un vertedero de ancho variable y alineamiento curvo. Al menos que se indique específicamente los canales descritos son prismáticos.

El trapecio es la forma más común para canales con bancas en tierra sin recubrimiento, debido a que proveen las pendientes necesarias para la estabilidad.

El rectángulo y el triángulo son casos especiales del trapecio. Debido a que el rectángulo tiene lados verticales, por lo general se utiliza para canales construidos para materiales estables, como mampostería, roca, metal o madera. La sección transversal solo se utiliza para pequeñas asqueas, cunetas o a lo largo de carreteras y trabajos de laboratorio. El círculo es la sección más común para alcantarillados y alcantarillas de tamaño pequeño y mediano.

Ecuaciones de flujo.

Si se aplica la ecuación de Bernoulli para los puntos 1 y 2 de un canal se tiene que:

$$\Delta Z \frac{g}{gc} + \frac{\Delta u^2}{2gc} + \frac{\Delta P}{\rho} = -\frac{\sum F}{M} - \frac{\tau}{M} \quad (1)$$

En un canal la presión en el punto 1 y el punto 2 es la misma (Presión atmosférica), por lo tanto $\Delta P = 0$.

Si no cambia la sección del canal, la velocidad en el punto 1 y en el 2 es la misma, por lo tanto $\Delta U = 0$.

Si en el canal no hay bomba o molino o turbina entonces $\tau = 0$.

Por lo tanto la ecuación queda reducida a:

$$-\frac{\Sigma F}{M} = \Delta Z \frac{g}{gc} \quad (2)$$

O sea, que en un canal uniforme la disminución de la energía potencial es consumida totalmente por las pérdidas de fricción.

El término de pérdidas de fricción se puede calcular mediante la ecuación de Darcy:

$$-\frac{\Sigma F}{M} = f_D \frac{u^2 L}{2gc D} \quad (3)$$

En un canal el término de diámetro se sustituye por el del diámetro equivalente

$$D_{equivalente} = 4 \times \text{radio hidráulico} \quad (4)$$

En donde:

$$\text{radio hidráulico} = r_H = \frac{\text{área de flujo}}{\text{perímetro mojado}} \quad (5)$$

$$f_D = \text{factor de fricción de Darcy}$$

En un canal la superficie de contacto con la atmósfera prácticamente no sufre de pérdidas por rozamiento, por lo que el radio hidráulico en un canal será la superficie transversal ocupada por el flujo (llamada área hidráulica) y dividida por el perímetro mojado.

En el cálculo de los canales es costumbre hablar de la pendiente hidráulica definida como:

$$m = \frac{\Delta z}{L} \quad (6)$$

Sustituyendo 4, 6 y 3 en 2 nos queda:

$$f_D \frac{u^2}{2g4r_H} = m \quad (7)$$

Despejando la velocidad:

$$u = \sqrt{\frac{m 8gr_H}{f_D}} = \sqrt{\frac{8g}{f_D}} \sqrt{mr_H} = C \sqrt{mr_H} \quad (8)$$

La ecuación anterior recibe el nombre de ecuación de Chezy.

En esa ecuación:

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f_D}} \quad (9)$$

Es el coeficiente de la ecuación de Chezy ¹ es difícil de calcular, por lo que se usan otras ecuaciones para obtener ese coeficiente. Una de las más usadas es la de Bazin.

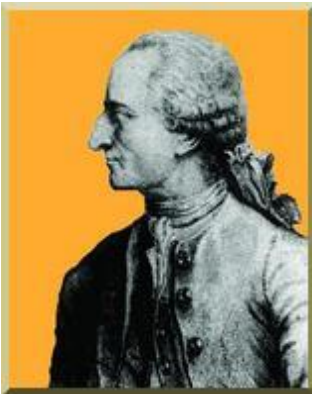
¹ **Antoine de Chézy**, (1 de septiembre de 1718, Châlons-en-Champagne - 4 de octubre de 1798, París), fue un ingeniero francés, conocido internacionalmente por su contribución a la hidráulica de los canales abiertos, en particular por la llamada ecuación o fórmula de Chézy.

$C = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{r_H}}}$ (10) en donde γ es un factor de rugosidad de Bazin² que se obtiene a partir de tablas.

Otro coeficiente muy empleado es el Manning³

$C = \frac{1}{n} r_H^{\frac{1}{6}}$ (11) en donde n es un factor de rugosidad de Manning que se obtiene a partir de tablas. Empleando el factor de Manning la ecuación de Chezy queda:

$$u = \frac{1}{n} r_H^{\frac{1}{6}} \sqrt{m r_H} = \frac{1}{n} r_H^{\frac{2}{3}} m^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$



Antoine



Chezy

Robert

Manning



Henri Emile Bazin

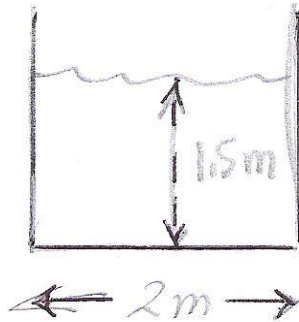
Ejemplo 1.

² **Henri-Émile Bazin**, nacido el 20 de octubre de 1829 en Nancy (Francia), muerto el 7 de febrero (otras fuentes indican el día 14 de febrero de 1917 en Chenôve, fue un hidráulico francés conocido, en particular, por: La fórmula de Bazin, aplicada frecuentemente y en especial para las redes de alcantarillado, y por su cálculo del coeficiente de Chézy;

³ **Robert Manning** (1816-1897) fue un ingeniero Irlandés, conocido por la creación de la fórmula de Manning.

Un canal rectangular de ancho igual a 2m y una tirante de 1.5 m tiene una pendiente de 0.0007 M/m. Determine la velocidad y el caudal de agua que pasan si el canal es de tierra recto y bien conservado.

1.- Traducción.



2.- Planteamiento.

2.1.- Ecuación para canales.

$$u = \sqrt{\frac{m 8gr_H}{f_D}} = \sqrt{\frac{8g}{f_D}} \sqrt{mr_H} = C \sqrt{mr_H}$$

2.2.- Coeficiente de Bazin.

De acuerdo con el enunciado, el coeficiente más cercano es el Bazin.

$$C = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{r_H}}}$$

3.- Cálculos.

3.1.- Radio hidráulico.

$$\text{radio hidráulico} = r_H = \frac{\text{área de flujo}}{\text{perímetro mojado}} = \frac{2 \times 1.5}{2 + (1.5 \times 2)} = 0.6$$

3.2.- Coeficiente de Bazin

Apéndice XXXIX. Valores del coeficiente de Bazin.

	γ
Canales y tubos extraordinariamente lisos	0.06
Cemento muy pulido o madera	0.11
Conductos comunes y alcantarillas	0.16
Mampostería, tubería de cemento	0.29
Tubería de fundición, cemento con pulido ordinario	0.4
Mampostería de piedra bruta	0.46
Paredes mixtas (parte revestida y parte sin revestir)	0.85
Canales de tierra rectos y bien conservados	1.5
Canales de tierra ordinarios	2.36
Canales labrados en roca	3.5
Ríos en buenas condiciones	3.0

De la tabla el valor γ es de 1.5

$$C = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{r_H}}} = \frac{87}{1 + \frac{1.5}{\sqrt{0.6}}} = 29.62$$

3.3.-Velocidad y caudal.

$$u = C\sqrt{mr_H} = 29.62\sqrt{0.6 \times 0.0007} = 0.6 \frac{m}{s}$$

$$\text{Caudal} = u \times A = 0.6 \times (3) = 1.8 \frac{m^3}{s}$$

4.- Resultado. La velocidad es de 0.6 m/s, el caudal de 1.8 m³/s.

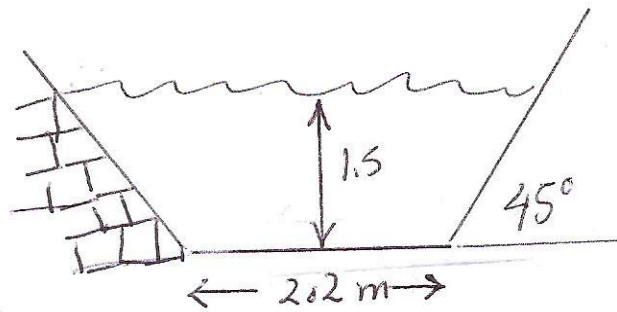
Ejemplo 2.

Un canal de sección trapezoidal tiene una pendiente de 0.0007 m/m, el fondo del canal tiene una anchura de 2.2 m. El tirante es de 1.5 m. El talud del canal es de 45°. Determine la velocidad media y el caudal que pasan si el canal está formado por mampostería de piedras rectangulares.

Talud= Inclinación de las paredes del canal.

Tirante= Profundidad del agua en el canal.

1.- Traducción.



2.- Planteamiento.

2.1.- Ecuación de diseño.

$$u = C\sqrt{mr_H}$$

2.2.- Coeficiente de Manning.

$$C = \frac{1}{n} r_H^{\frac{1}{6}}$$

3.-Cálculos.

3.1.- Radio hidráulico.

Por tratarse de un trapecio.

$$\text{radio hidráulico} = r_H = \frac{\text{área de flujo}}{\text{perímetro mojado}}$$

$$\text{Área de flujo} = \frac{\text{Base mayor} + \text{Base menor}}{2} \times \text{altura}$$

Del dibujo se tiene que:

Base menor = 2.2 m; altura = 1.5 m

$$\text{Base mayor} = 2.2 + 2(1.5) = 5.2$$

$$\text{Área de flujo} = \frac{\text{Base mayor} + \text{Base menor}}{2} \times \text{altura} = \frac{(5.2 + 2.2)}{2} \times 1.5 = 5.52 \text{ m}^2$$

$$\text{Perímetro mojado} = 2.2 + 2(2.12) = 6.44 \text{ m}$$

$$\text{Radio hidráulico} = 5.52 / 6.44 = 0.86 \text{ m}$$

3.2.- Coeficiente de Manning

Apéndice XXXVII. Valores del coeficiente (*n*) de Manning.

<i>Naturaleza de las paredes del conducto</i>	<i>n</i>
Mampostería de piedra bruta	0.02
Mampostería de piedras rectangulares	0.017
Mampostería de ladrillos sin revestimiento	0.015
Mampostería de ladrillos revestida	0.012
Canales de concreto, terminación ordinaria	0.014
Canales de concreto, con revestimiento liso	0.012
Canales con revestimiento muy liso	0.010
Canales de tierra en buenas condiciones	0.025
Canales de tierra con plantas acuáticas	0.035
Canales irregulares y mal conservados	0.040
Conductos de madera	0.011
Tubos de acero	0.011
Tubos de concreto	0.013
Tubos de hierro fundido	0.012
Tubos de asbesto cemento	0.011

De las tablas $n = 0.017$

$$C = \frac{1}{n} r_H^{\frac{1}{6}} = \frac{1}{0.017} 0.86^{\frac{1}{6}} = 57.36$$

3.3.- Velocidad y caudal.

$$u = C \sqrt{mr_H} = 57.36 \sqrt{0.0007 \times 0.86} = 1.4 \text{ m/s}$$

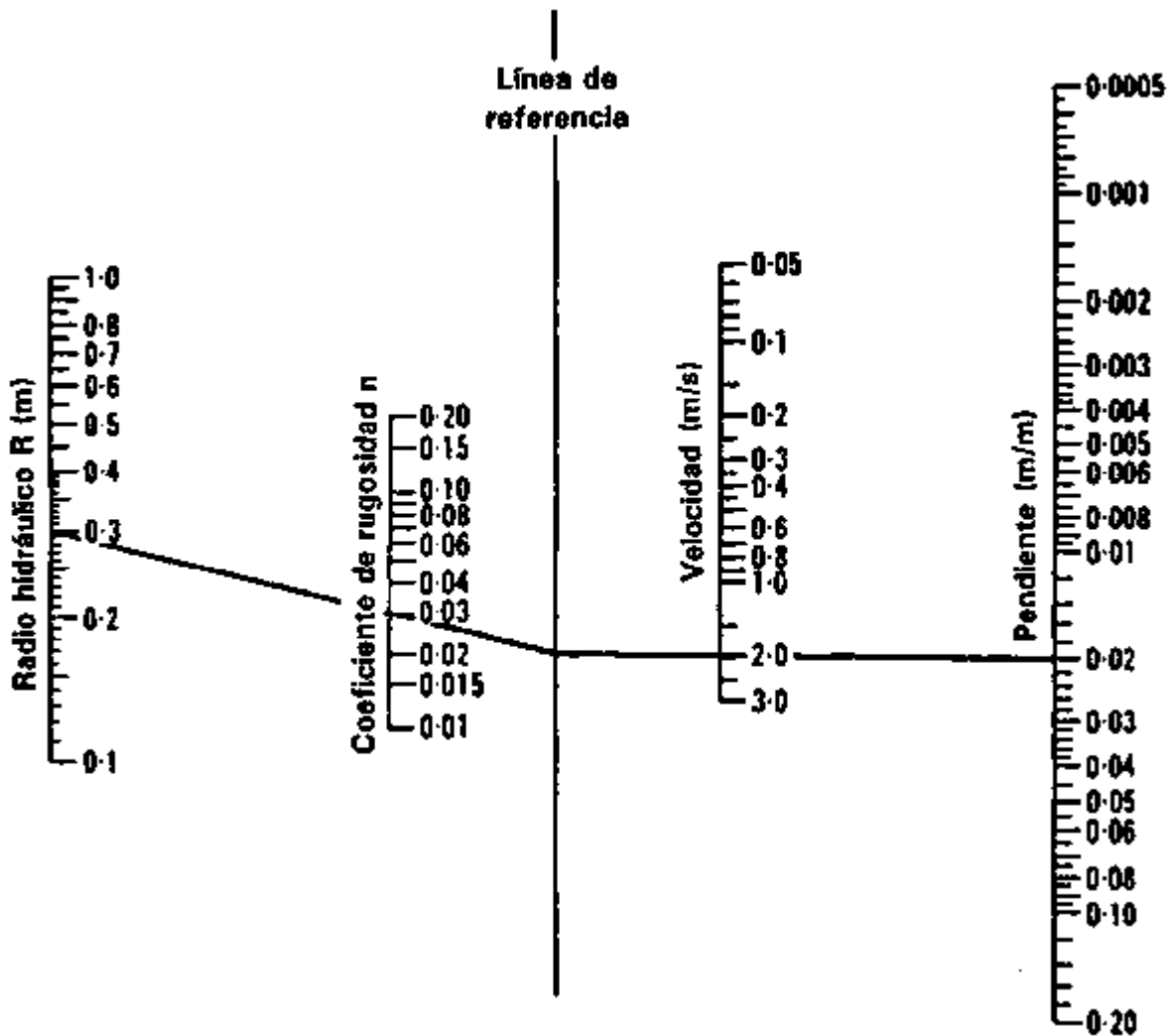
Caudal

$$\text{Caudal} = u \times A = 1.4 \times (5.52) = 7.728 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

4.- Resultados. La velocidad media es de 1.4 m/s y el caudal de 7.728 m³/s

Otra forma de resolver estos problemas es mediante el nomograma que se presenta a continuación.

FIGURA 25 - Nomograma para resolver la fórmula de Manning. Si se conocen tres variables, es posible encontrar la cuarta



Ejemplo 3.

Dado $R = 0,3$ m, $n = 0,03$, pendiente = 2% o 0,02 m por m, encontrar la velocidad V .

Solución: Únase $R = 0,3$ y $n = 0,03$ y proyéctese la línea de referencia. Únase el punto situado en la línea de referencia con la pendiente = $0,02$. La intersección de la escala de velocidad da $V = 2,0$ m/s.

Límites de velocidad. Tanto en canales como en las tuberías de drenaje la velocidad media del agua normalmente no se aleja de una gama de valores impuesta por las buenas condiciones de funcionamiento y mantenimiento. La siguiente tabla muestra los valores de diseño más comunes.

Tipo de conducción	Velocidades recomendadas
Canales de navegación	Hasta 0.5 m /s
Canales industriales sin revestimiento	0.4 a 0.8 m /s
Canales industriales con revestimiento	0.6 a 1.4 m /s
Acueductos para agua potable	0.6 a 1.3 m /s
Alcantarillas	0.6 a 1.5 m /s

Elementos geométricos de la sección del canal

Los elementos geométricos son propiedades de una sección del canal que puede ser definida enteramente por la geometría de la sección y la profundidad del flujo. Estos elementos son muy importantes para los cálculos del escurrimiento.

- **Profundidad del flujo, calado o tirante:** la profundidad del flujo (**h**) es la distancia vertical del punto más bajo de la sección del canal a la superficie libre.
- **Ancho superior:** el ancho superior (**T**) es el ancho de la sección del canal en la superficie libre.
- **Área mojada:** el área mojada (**A**) es el área de la sección transversal del flujo normal a la dirección del flujo.
- **Perímetro mojado:** el perímetro mojado (**P**) es la longitud de la línea de la intersección de la superficie mojada del canal con la sección transversal normal a la dirección del flujo.
- **Radio hidráulico:** el radio hidráulico (**R**) es la relación entre el área mojada y el perímetro mojado, se expresa como: $R = A / P$
- **Profundidad hidráulica:** la profundidad hidráulica (**D**) es la relación del área mojada con el ancho superior, se expresa como: $D = A / T$

El perfil más difundido para canales es el trapezoidal

EFICIENCIA EN CANALES ABIERTOS.

Se conoce que los sistemas de canales abiertos se diseñan con el fin de trasportar líquidos desde un lugar determinado hasta otro con una altura de cota menor a la inicial, manteniendo un caudal o una razón de flujo constante bajo la influencia de la gravedad al menor precio posible. Debido a que no es necesario la aplicación de energía al sistema el costo de construcción se traduce al valor inicial una vez comenzados los trabajos, traduciéndose en el tamaño físico de la obra, por tal razón para una longitud establecida el perímetro de la sección representara también el costo del sistema; por lo cual debe mantenerse al mínimo para no incrementar los costos y los tamaños de la sección. Debido a lo anteriormente mencionado, la eficiencia de un canal tiene relación con encontrar un área de paso (A) mínima para trasportar un caudal (Ca) dado, con una pendiente del canal (m) y coeficiente de Manning (n) dados.

Por lo cual, escribiendo el radio hidráulico como $r_H = A/P$ la ecuación de caudal se puede reescribir de la siguiente forma:

$$Ca = \frac{1}{n} A \left(\frac{A}{P}\right)^{\frac{2}{3}} m^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{n} A^{\frac{5}{3}} \frac{m^{\frac{1}{2}}}{P^{\frac{2}{3}}} \quad (14)$$

Despejando el área (A)

$$A = \left(\frac{nCa}{m^{\frac{1}{2}}}\right)^{\frac{3}{5}} P^{\frac{2}{5}} \quad (15)$$

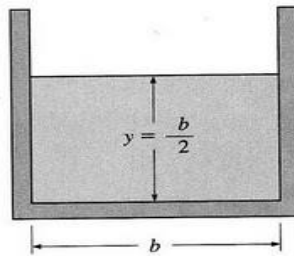
Donde la cantidad entre paréntesis es constante. La ecuación anterior indica que un área de paso mínima está asociada a un perímetro mojado mínimo y por lo tanto las necesidades de excavación como de material, para cubrir las superficies del canal, son mínimas, influyendo directamente en los costos de construcción como se mencionó anteriormente. La forma con el perímetro mínimo por unidad de área es el círculo, por lo tanto tomando en cuenta la mínima resistencia del flujo en esta sección, la mejor sección transversal para un canal abierto es el semicírculo. Sin embargo en el campo de la construcción resulta más económico construir un canal con lados rectos como las

secciones trapezoidales o rectangulares en vez de un semicírculo, lo que lleva a analizar cuál de las diferentes secciones a utilizar es la más conveniente para el sistema.

Secciones Rectangulares

Criterio para mejor sección transversal hidráulica (para canal rectangular):

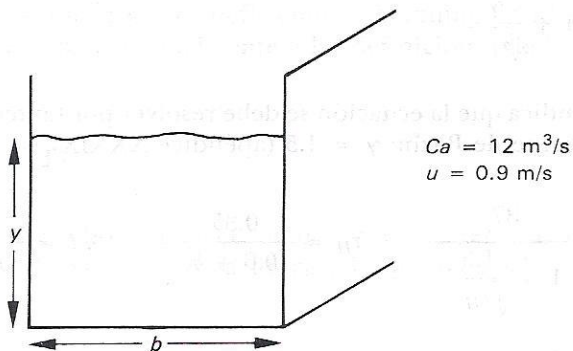
$$y = \frac{b}{2}$$



Ejemplo 4.

Determine la sección óptima que deberá tener un canal de tierra para transportar $12 \text{ m}^3/\text{s}$ a una velocidad máxima de 0.9 m/s . ¿Cuál deberá ser la pendiente?

1. Traducción.



2.-Planteamiento.

2.1.- Caudal.

$$Ca = u \times A$$

$$u = C\sqrt{m \times r_H}$$

$$C = \frac{1}{n} r_H^{\frac{1}{6}}$$

$$r_H = \frac{b \times y}{2y + b}$$

2.2.- Sección óptima.

Del examen de las ecuaciones anteriores se desprende que el caudal será el máximo si el radio hidráulico es el máximo. El radio hidráulico será el máximo cuando el perímetro mojado sea el mínimo.

Área: $A = by$; perímetro = $P_m = 2y + b$

Por lo tanto $P_m = 2y + A/y$

Derivando P_m con respecto a y :

$$\frac{dP_m}{dy} = 2 - \frac{A}{y^2}$$

Igualando a cero:

$$\frac{dP_m}{dy} = 2 - \frac{A}{y^2} = 0$$

Por lo tanto:

$$A = 2y^2$$

Pero $by = 2y^2$ por lo tanto $y = b/2$

Así pues, la profundidad es la mitad de la anchura y por lo tanto el radio hidráulico óptimo

será: $r_H = \frac{2y^2}{2y + 2y} = \frac{y}{2}$

El radio hidráulico óptimo es la mitad de la profundidad o tirante.

3.- Cálculos.

3.1.- Sección

$$A = \frac{12}{0.9} = 13.33 \text{ m}^2 = 2y^2$$

$$y = \sqrt{\frac{13.33}{2}} = 2.58 \text{ m} ; \quad b=5.163 \text{ m}$$

3.2.- Pendiente.

Para este caso $n = 0.025$; $r_H = 1.29 \text{ m}$,

$$C = \frac{1}{n} r_H^{\frac{1}{6}} = \frac{1}{0.025} (1.29)^{\frac{1}{6}} = 41.73$$

$$u = 0.9 \frac{m}{s} = 41.73 \sqrt{m \times 1.29}$$

$$m = 3.605 \times 10^{-4} \frac{m}{m}$$

4.- Resultados. La pendiente es de $3.605 \times 10^{-4} \text{ m/m}$. El área de flujo es de 13.33 m^2 ; la anchura es de 5.163 m y la profundidad de 2.58 m .

Canales Trapezoidales.

Para canales trapezoidales se toman los mismos criterios para la sección hidráulica más eficiente:

$$y = \frac{b \operatorname{sen} \theta}{2(1 - \cos \theta)}$$

Como conclusión se puede decir que la mejor sección transversal hidráulica para un canal abierto es la que tiene el máximo radio hidráulico o, proporcionalmente, la que tiene menor perímetro mojado para una sección transversal específica.

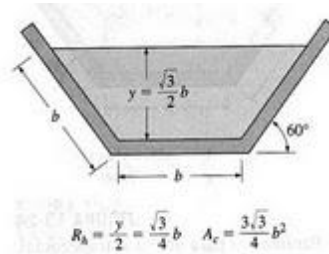
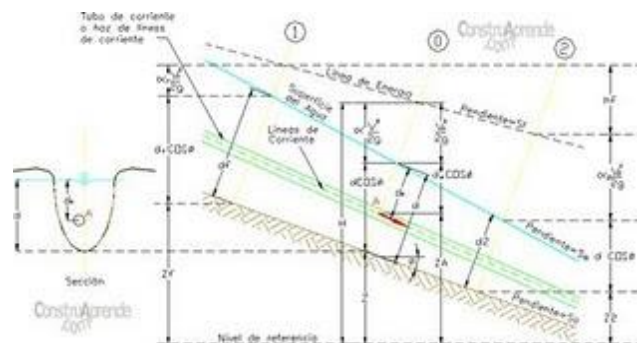


FIGURA 13-25
 La mejor sección transversal para canales trapecoidales es la mitad de un hexágono.

ENERGIA EN CANALES ABIERTOS.

En hidráulica se sabe que la energía total del agua en metros-kilogramos por kilogramos de cualquier línea de corriente que pasa a través de una sección de canal puede expresarse como la altura total en pies de agua, que es igual a la suma de la elevación por encima del nivel de referencia, la altura de presión y la altura de velocidad.

Energía de un flujo gradualmente variado en canales abiertos.



Por ejemplo, con respecto al plano de referencia, la altura H de una sección 0 que contiene el punto A en una línea de corriente del fluido de un canal de pendiente alta, puede escribirse como:

$$H = z_A + d_A \cos \phi + \frac{V_A^2}{2g}$$

De acuerdo con el principio de conservación de energía, la altura de energía total en la sección 1 localizada aguas arriba debe de ser igual a la altura de energía total en la sección 2 localizada aguas abajo más la pérdida de energía h_f entre las dos secciones, ver figura.

$$z_1 + d_1 \cos \phi + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + d_2 \cos \phi + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f$$

Esta ecuación es aplicable a flujos paralelos o gradualmente variados. Para un canal de pendiente pequeña, esta se convierte en

$$z_1 + y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f \rightarrow \cos \phi \cong 0$$

ENERGIA ESPECÍFICA.

La energía específica en una sección de canal se define como la energía de agua en cualquier sección de un canal medida con respecto al fondo de este.

$$E = d \cos \phi + \alpha \frac{V^2}{2g}$$

O, para un canal de pendiente pequeña $\cos \phi = 1$, la ecuación se convierte en

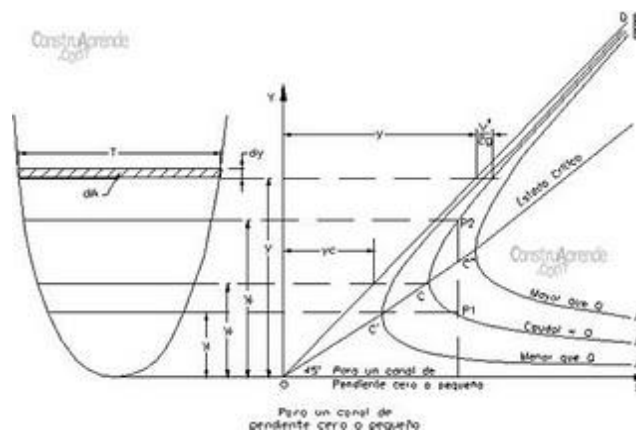
$$E = y + \frac{V^2}{2g}$$

La cual indica que la energía específica es igual a la suma de la profundidad del agua más la altura de velocidad. Para propósitos de simplicidad, el siguiente análisis se basará en un canal de pendiente pequeña. Como $u=Ca/A$, puede escribirse como:

$$E = y \frac{g}{gc} + \frac{Ca^2}{2gcA^2}$$

Puede verse que, para una sección de canal y caudal Ca determinados, la energía específica en una sección de canal sólo es función de la profundidad de flujo. Cuando la profundidad de flujo se gráfica contra la energía para una sección de canal y un caudal determinados, se obtiene una curva de energía específica, como se muestra en la siguiente figura. Esta curva tiene dos ramas, AC y BC. La rama AC se aproxima asintóticamente al eje horizontal hacia la derecha. La rama BC se aproxima a la línea OD a medida que se extiende hacia arriba y hacia la derecha. La línea OD es una línea que pasa a través del origen y tiene un ángulo de inclinación. Para un canal de pendiente alta, el ángulo de inclinación de la línea OD será diferente de 45° . En cualquier punto P de esta curva, la ordenada representa la profundidad y la abscisa representa la energía específica, que es igual a la suma de la altura de presión "y" y la altura de velocidad $\frac{u^2}{2gc}$

Curva de energía específica



La curva muestra que, para una energía específica determinada, existen dos posibles profundidades, la profundidad baja y_1 y la profundidad alta y_2 . La profundidad baja es la profundidad alterna de la profundidad alta, y viceversa. En el punto C, la energía específica es mínima. Por consiguiente, en el estado crítico es claro que las dos profundidades alternas se convierten en una, la cual es conocida como profundidad crítica

yc. Cuando la profundidad de flujo es mayor que la profundidad crítica, la velocidad de flujo es menor que la velocidad crítica para un caudal determinado y, por consiguiente, el flujo es subcrítico. Cuando la profundidad de flujo es menor que la profundidad crítica, el flujo es supercrítico. Por tanto, y_1 es la profundidad de un flujo supercrítico y y_2 es la profundidad de un flujo subcrítico. Si para un flujo dado la profundidad es mayor a la crítica, el flujo es tranquilo y para profundidades menores que la crítica el flujo es rápido

Para canales rectangulares el tirante crítico está definido por aquel que produzca la energía mínima, es decir:

$$E = y \frac{g}{gc} + \frac{Ca^2}{2gcA^2}$$

$$\frac{dE}{dy} = 0$$

Para un canal rectangular $A = b \times y$

Por lo tanto:

$$E = y \frac{g}{gc} + \frac{Ca^2}{2gc(y \times b)^2} = y \frac{g}{gc} + \frac{Ca^2}{2gcb^2} y^{-2}$$

Por lo tanto:

$$\frac{dE}{dy} = \frac{g}{gc} + \frac{Ca^2}{b^2 2gc} (-2y^{-3})$$

Igualando la derivada a cero y re arreglando queda:

$$\frac{Ca^2}{b^2 gcy^3} = \frac{g}{gc}$$

De donde:

$$yc = \left(\frac{Ca^2}{gb^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

En donde b es el ancho del canal.

Ejemplo 5.

Un canal rectangular de 9 metros de ancho transporta 10 m³/s de agua con un tirante de 1 m. ¿Cuál es la energía específica? ¿Qué tipo de flujo se presenta?

1.- Planteamiento.

1.1.- Energía específica.

$$E = y \frac{g}{gc} + \frac{Ca^2}{2gc(y \times b)^2} = y \frac{g}{gc} + \frac{Ca^2}{2gcb^2} y^{-2}$$

1.2.- Tirante crítico.

$$y_c = \left(\frac{Ca^2}{gb^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

2.- Cálculos.

2.1.- Energía específica.

$$E = y \frac{g}{gc} + \frac{Ca^2}{2gc(y \times b)^2} = y \frac{g}{gc} + \frac{Ca^2}{2gcb^2} y^{-2} = 1 \frac{\overrightarrow{kgm}}{kg} + \frac{10^2}{2 \times 9.81 \times (9 \times 1)^2} = 1.06$$

2.2.- Tirante crítico.

$$y_c = \left(\frac{Ca^2}{gb^2} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{10^2}{9.81 \times 9^2} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.501 \text{ m}$$

3.- Resultado. La energía específica es de 1.06 kgm /kg, el tirante crítico es de 0.501 m, por lo tanto el flujo es rápido.

Ejemplo 6.

Una alcantarilla formada por tubos de acero tiene un diámetro de 1 metro. La alcantarilla está llena de agua hasta una altura de 0.7 m, si la pendiente es de 0.007 m/m, encuentre el caudal que lleva la alcantarilla. ¿Cuál será la energía específica? Determine también el tipo de flujo que se presenta.

1.- Planteamiento.

1.1.- Velocidad y caudal.

$$u = C\sqrt{m r_H}$$

$$Ca = u \times A$$

1.2.- Energía específica.

$$E = y \frac{g}{gc} + \frac{Ca^2}{2gc(y \times b)^2}$$

1.3.- Tirante crítico.

$$y_c = \left(\frac{Ca^2}{gb^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

2.- Cálculos.

2.1.- radio hidráulico.

La obtención del radio hidráulico requiere del área de flujo y del perímetro mojado. Ambas se pueden obtener por trigonometría. La práctica más común es la de consultar tablas como la que se presenta a continuación.

APÉNDICES

Apéndice XXXVIII. Valores del área de la sección viva y del radio hidráulico para el tubo de sección circular con diferente profundidad.

<i>y</i> profundidad	Área de sección viva	Radio hidráulico <i>r_H</i>	<i>y</i> profundidad	Área de sección viva	Radio hidráulico <i>r_H</i>
0.05 <i>d</i>	0.0147 <i>d</i> ²	0.0326 <i>d</i>	0.55 <i>d</i>	0.4426 <i>d</i> ²	0.2649 <i>d</i>
0.10 <i>d</i>	0.0400 <i>d</i> ²	0.0635 <i>d</i>	0.60 <i>d</i>	0.4920 <i>d</i> ²	0.2776 <i>d</i>
0.15 <i>d</i>	0.0739 <i>d</i> ²	0.0929 <i>d</i>	0.65 <i>d</i>	0.5404 <i>d</i> ²	0.2881 <i>d</i>
0.20 <i>d</i>	0.1118 <i>d</i> ²	0.1206 <i>d</i>	0.70 <i>d</i>	0.5872 <i>d</i> ²	0.2962 <i>d</i>
0.25 <i>d</i>	0.1435 <i>d</i> ²	0.1466 <i>d</i>	0.75 <i>d</i>	0.6319 <i>d</i> ²	0.3017 <i>d</i>
0.30 <i>d</i>	0.1982 <i>d</i> ²	0.1709 <i>d</i>	0.80 <i>d</i>	0.6736 <i>d</i> ²	0.3042 <i>d</i>
0.35 <i>d</i>	0.2450 <i>d</i> ²	0.1935 <i>d</i>	0.85 <i>d</i>	0.7115 <i>d</i> ²	0.3033 <i>d</i>
0.40 <i>d</i>	0.2934 <i>d</i> ²	0.2142 <i>d</i>	0.90 <i>d</i>	0.7445 <i>d</i> ²	0.2960 <i>d</i>
0.45 <i>d</i>	0.3428 <i>d</i> ²	0.2331 <i>d</i>	0.95 <i>d</i>	0.7707 <i>d</i> ²	0.2865 <i>d</i>
0.50 <i>d</i>	0.3927 <i>d</i> ²	0.2500 <i>d</i>	1.00 <i>d</i>	0.7854 <i>d</i> ²	0.2500 <i>d</i>

De la tabla se obtiene que dado que $y = 0.7 d$, el radio hidráulico es $0.2962 d = 0.2962 m$ y el área de flujo es de $0.5872 d^2 = 0.5872 m^2$.

2.1.- Coeficiente de Manning.

De la tablas: $n = 0.011$

$$C = \frac{1}{n} r_H^{\frac{1}{6}} = \frac{1}{0.011} (0.2962)^{\frac{1}{6}} = 74.22$$

2.3.- Velocidad y caudal.

$$u = C \sqrt{m r_H} = 74.22 \sqrt{0.2962 \times 0.007} = 3.37 \text{ m}$$

$$Ca = u \times A = 3.37 \times 0.5872 = 1.984 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

2.4.- Velocidad específica.

$$E = y \frac{g}{gc} + \frac{Ca^2}{2gc(y \times b)^2} = 0.7 + \frac{(1.984)^2}{2 \times 9.81 \times (0.5872)^2} = 1.28 \frac{\overrightarrow{\text{kgm}}}{\text{kg}}$$

2.5.- Tirante crítico.

Si se supone un canal cuadrado, entonces. $A = 0.5872 \text{ m}^2$ y el lado o sea la base sería = 0.7662 m

Entonces:}

$$y_c = \left(\frac{Ca^2}{gb^2} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{[1.984]^2}{9.81 \times (0.7662)^2} \right)^{0.33} = 0.88 \text{ m}$$

3.- Resultados.

El caudal será de $1.984 \text{ m}^3/\text{s}$, la energía específica de 1.28 y de acuerdo con el tirante crítico estimado el flujo será tranquila.

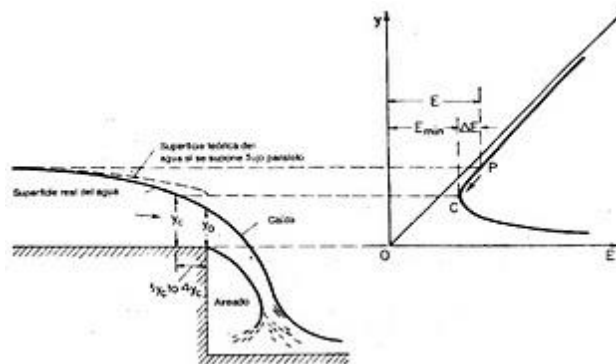
Interpretación de fenómenos locales.

En los canales abiertos es muy común apreciar cambios en el estado del flujo, (de supercrítico a subcrítico, o viceversa, tales cambios se dan con un correspondiente cambio en la profundidad del flujo. Si el cambio ocurre de forma rápida, a lo largo de una distancia considerablemente corta, el flujo es rápidamente variado y se conoce como Fenómeno Local.

Dentro de este tipo de fenómenos encontramos la caída hidráulica y el resalto hidráulico:

1. Caída Hidráulica: un cambio rápido en la profundidad de un flujo de nivel alto a un nivel bajo, resultará en una depresión abrupta de la superficie del agua. Por lo general este fenómeno es consecuencia de un cambio brusco de pendiente o de la sección transversal del canal. En la región de transición de la caída, suele aparecer una curva invertida que conecta las superficies del agua antes y después de dicha caída. El punto de inflexión de la curva, indica la Posición aproximada de la profundidad crítica para la cual la energía es mínima y el flujo pasa de ser subcrítico a supercrítico. Cuando existe una discontinuidad en el fondo de un canal plano, ocurre una caída hidráulica especial, conocida como caída libre. A medida que la caída avanza en el aire en forma de lámina, no existirá curva invertida en la superficie del agua hasta que esta choque con algún obstáculo en la elevación más baja. Es sabido que si no se añade energía externa, la superficie del agua buscará siempre la posición más baja posible, la cual corresponde al menor contenido de disipación de energía. Si la energía específica en una sección localizada aguas arriba es E , como se muestra en la curva, la energía continuará disipándose en el recorrido hacia aguas abajo hasta alcanzar una energía mínima E_{min} . La curva indica que la sección crítica (sección de energía mínima) debe ocurrir en el borde de la caída. La profundidad en el borde no puede ser menor que la profundidad crítica debido a que una disminución adicional en la profundidad implicaría un incremento en la energía específica lo cual es imposible a menos que se suministre energía externa compensatoria.

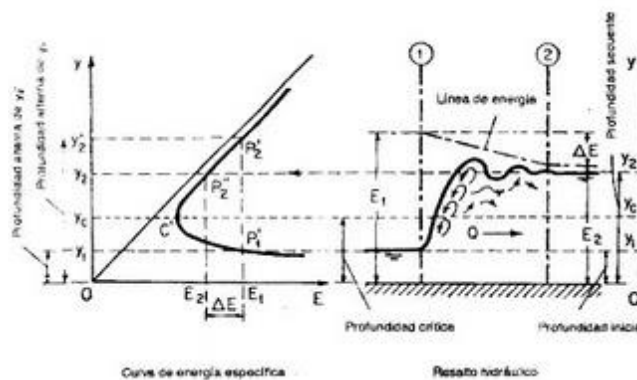
Interpretación de Caída libre mediante una curva de energía específica.



Por otro lado, es importante mencionar, a modo de aclaración que, si el cambio en la profundidad de flujo desde un nivel alto a un nivel bajo se da de forma gradual, este se convierte en un flujo gradualmente variado, el cual tiene una curva inversa prolongada en la superficie del agua, sin embargo este fenómeno no es considerado local.

2. Resalto Hidráulico: este fenómeno ocurre cuando el cambio de profundidad del flujo es desde un nivel bajo a un nivel alto. Si el cambio de profundidad es pequeño, se denominará resalto ondulatorio, puesto que el agua no subirá de manera abrupta y obvia, sino que pasará de un nivel a otro, a través de una serie de ondulaciones que van disminuyendo gradualmente de tamaño. Si por el contrario el cambio de profundidad es grande, se conoce como resalto directo. Este involucra una pérdida de energía relativamente grande mediante la disipación en el cuerpo turbulento de agua dentro del resalto. En consecuencia el contenido de energía en el flujo después del resalto es considerablemente menor que el contenido antes del mismo.

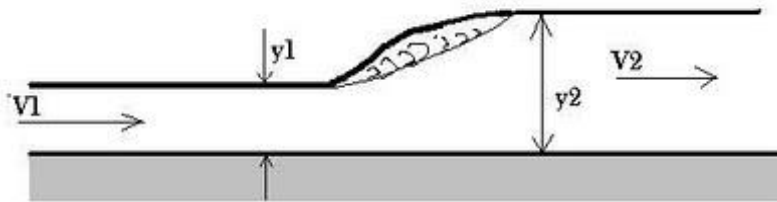
Interpretación de Resalto Hidráulico mediante la curva de energía específica.



RESALTO HIDRAULICO O SALTO HIDRAULICO.

El resalto hidráulico es el ascenso brusco del nivel del agua que se presenta en un canal abierto a consecuencia del retardo que sufre una corriente de agua que fluye a elevada velocidad. Este fenómeno presenta un estado de fuerzas en equilibrio, en el que tiene lugar un cambio violento del régimen de flujo, de supercrítico a subcrítico.

Este involucra una pérdida de energía relativamente grande mediante disipación en el cuerpo turbulento de agua dentro del resalto. En consecuencia, el contenido de energía en el flujo después del resalto es apreciablemente menor que el de antes del mismo.



La profundidad antes del resalto es siempre menor que la profundidad después del resalto. La profundidad antes del resalto se conoce como profundidad inicial y_1 , y después del resalto se conoce como profundidad final y_2 .

Para flujo supercrítico en un canal horizontal, la energía de flujo se disipa a través de la resistencia a la fuerza de fricción a lo largo del canal, dando como resultado un descenso en la velocidad y un incremento en la profundidad en la dirección del flujo. El resalto hidráulico se formará en el canal si el número de Froude F_1 del flujo, la Profundidad de flujo y_1 y la profundidad y_2 aguas abajo satisfacen la ecuación de razón de profundidades:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \sqrt{1 + 8F_1^2} - 1$$

El número de Froude siempre es mayor que la unidad antes del resalto y menor que la unidad después de él.

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g y_1}}$$

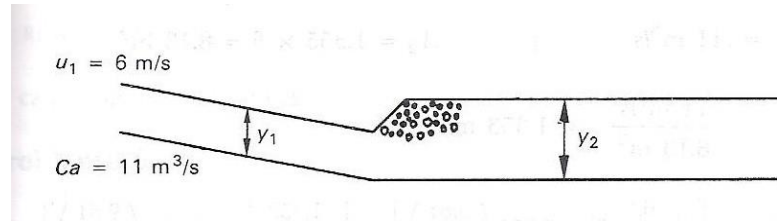
Si $F_1 > 1$ Flujo Supercrítico.

$$F_2 = \frac{V_2}{\sqrt{g y_2}}$$

Ejemplo 7.

Un canal rectangular de 6 m de ancho transporta 11 m³/s de agua y descarga en un canal de 6 m de ancho, de pendiente nula a la velocidad de 6 m/s. ¿Cuál es la altura del resalto hidráulico? ¿Cuáles son las pérdidas de energía?

1.- Traducción.



2.- Planteamiento.

2.1.- Resalto hidráulico.

$$y_2 = -\frac{y_1}{2} + \sqrt{\frac{2 \times u^2 \times y_1}{g} + \frac{y_1^2}{4}}$$

2.2.-Pérdidas.

$$\frac{\Sigma F}{M} = \left[\frac{u_1^2}{2gc} + y_1 \frac{g}{gc} \right] - \left[\frac{u_2^2}{2gc} + y_2 \frac{g}{gc} \right]$$

3.- Cálculos.

3.1.- Altura en la posición (1)

$$u_1 = 6 \frac{m}{s}$$

$$A_1 = \frac{11}{6} = 1.833 \text{ m}^3$$

$$y_1 = \frac{1.833}{6} = 0.306 \text{ m}$$

3.2.- Altura en la posición (2)

$$y_2 = -\frac{0.306}{2} + \sqrt{\frac{2 \times 0.306 \times (6)^2}{9.81} + \frac{(0.306)^2}{4}} = 1.355 \text{ m}$$

Altura del resalto $1.355 - 0.306 = 1.0494 \text{ m}$

3.3.- Pérdidas por fricción.

$$Ca_2 = 11 \frac{m^3}{s}$$

$$A_2 = 1.355 \times 6 = 8.13m^2$$

$$u_2 = \frac{11}{8.13} = 1.353 \frac{m}{s}$$

$$\frac{\Sigma F}{M} = \left[\frac{(6)^2}{2 \times 9.81} + 0.306 \left(\frac{9.81}{9.81} \right) \right] - \left[\frac{(1.353)^2}{2 \times 9.81} + 1.355 \left(\frac{9.81}{9.81} \right) \right] = 0.6916 \frac{\overrightarrow{kgm}}{kg}$$

4.- Resultados. La altura aguas abajo es de 1.355m. La altura del resalto es de 1.0494 m. Las pérdidas son de 0.6916 kgm /kg.

Medidores de flujo en canales. Vertederos.

Fundamento teórico.

Se llama vertedero a la estructura hidráulica sobre la cual se efectúa una descarga a superficie libre. El vertedero puede tener diversas formas según las finalidades a las que se destine. Si la descarga se efectúa sobre una placa con perfil de cualquier forma pero de arista aguda, el vertedero se llama de pared delgada; cuando la descarga se realiza sobre una superficie, el vertedero se denomina de pared gruesa. Ambos tipos pueden utilizarse como dispositivos de aforo en el laboratorio o en canales de pequeñas dimensiones. El vertedero de pared gruesa se emplea además como obra de control o de excedencias en una presa y como aforador en grandes canales.

Los vertederos de paredes delgadas son [vertederos hidráulicos](#), generalmente usados para medir [caudales](#). Para obtener resultados fiables en la medición con el vertedero de pared delgada es importante que:

- tenga la pared de aguas arriba vertical,
- esté colocado perpendicularmente a la dirección de la corriente, y,
- la cresta del vertedero sea horizontal o, en el caso de que esta sea triangular, la [bisectriz](#) del [ángulo](#) esté vertical.

Además, debe cuidarse de mantener la presión atmosférica debajo de la lámina vertida; el canal aguas arriba debe ser recto y estar desobstruido. La carga h , sobre la cresta del vertedero debe ser medida a una distancia suficiente, aguas arriba, para no tener influencia de la curvatura de la superficie líquida en la proximidad del vertedero. Para mantener la presión del aire, y evitar que este se vea succionado, acercando la lámina de agua al aliviadero, se instalan sistemas e aireación (generalmente tubos a los lados por donde entra el aire).

Vertedero rectangular.

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre el punto 1 y el 2.

$$\frac{u_1^2}{2gc} + z_1 \frac{g}{gc} = \frac{u_2^2}{2gc} + z_2 \frac{g}{gc}$$

De donde:

$$u_2 = \sqrt{\frac{u_1^2}{2gc} + 2gc(Z_1 - Z_2)}$$

Si el ancho del vertedero es b , Z_2 es variable.

$$dCa = b \, u \, dZ_2$$

Y por lo tanto:

$$dCa = b \sqrt{2g} \sqrt{\frac{u_1^2}{2} + (Z_1 - Z_2)} dZ_2$$

$$\text{Si } H = Z_1 - Z_2 + \frac{u_1^2}{2g}$$

$$\text{Entonces: } dH = -dZ_2$$

$$\text{Y } dCa = -b \sqrt{2gH} dH$$

Para un canal rectangular el ancho del canal b es constante, por lo que la ecuación puede integrarse. Los límites escogidos son:

$$Z_2 = 0 \quad ; \quad Z_2 = Z_1$$

$$Ca = \frac{-2}{3} b \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}} + C$$

$$Ca = \frac{2}{3} b \sqrt{2g} \left[\left(Z_1 + \frac{u_1^2}{2g} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{u_1^2}{2g} \right)^{\frac{3}{2}} \right]$$

Despreciando u_1 o sea la velocidad de acercamiento y si no existe fricción

$$Ca = \frac{2}{3} Cd b \sqrt{2g} Z_1^{\frac{3}{2}}$$

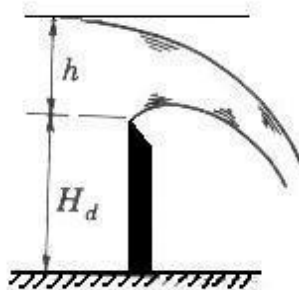
En donde generalmente $Cd = 0.62$

Por lo que $Ca = 1.83 b Z_1^{\frac{3}{2}}$ Fórmula de Francis

Ca es el caudal en m^3/s ; b el ancho del canal en metros

Z_1 = altura del líquido en metros. Esta altura de ser medida aguas arriba del vertedero a una distancia comprendida entre $5 Z_1$ y $10 Z_1$.

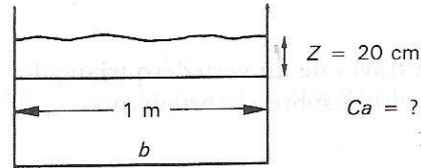
• .



Ejemplo 8.

Un vertedero rectangular sin contracciones da una altura de agua sobre el vertedero (carga) de 20 cm. Si el ancho del vertedero o longitud de cresta es de 1m. ¿Cuál será el flujo volumétrico?

1.- Traducción.



2.- Planteamiento.

2.1.- Ecuación para el vertedero. Rectangular sin contracciones.

$$Ca = 1.83 b Z^{1.5}$$

3.- Cálculos.

3.1.- Caudal.

$$Ca = 1.83 b Z^{1.5} = 1.83(1)(0.2)^{1.5} = 0.1643 \frac{m^3}{s}$$

4.- **Resultado.** El caudal es de 164.3 L /s.

Las características del tipo de flujo que afectan Cd pueden ser definidas por h y $\frac{H_d}{h}$

Donde:

- H_d = altura del vertedero en m

Los valores de Cd se encuentran en la tabla siguiente

H_d/h	$h=0.05$	$h=0.10$	$h=0.20$	$h=0.40$	$h=0.60$	$h=0.80$	$h=1.00$	$h=1.50$
0.5	2.316	2.285	2.272	2.266	2.263	2.262	2.262	2.261
1.0	2.082	2.051	2.037	2.030	2.027	2.026	2.025	2.024
2.0	1.964	1.933	1.919	1.912	1.909	1.908	1.907	1.906

10.0	1.870	1.839	1.824	1.817	1.815	1.814	1.813	1.812
\infty	1.846	1.815	1.801	1.793	1.791	1.790	1.789	1.788

Vertedero triangular.

Para medir caudales muy pequeños (menos de 6 litros por segundo), se obtiene mejor precisión utilizando aliviaderos de pared delgada de sección triangular, pues la presión varía con la altura, dándose un gran gradiente de velocidad entre la parte inferior del triángulo y la superior. El caudal sobre un aliviadero triangular es dado por la fórmula:

$$Ca = Cd \frac{8}{15} \sqrt{2g} Z_1^{\frac{5}{2}} \tan\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

Dónde:

- β = ángulo del vértice del triángulo
- Cd = aproximadamente a 0.58 variando ligeramente con la carga y el ángulo de la abertura.

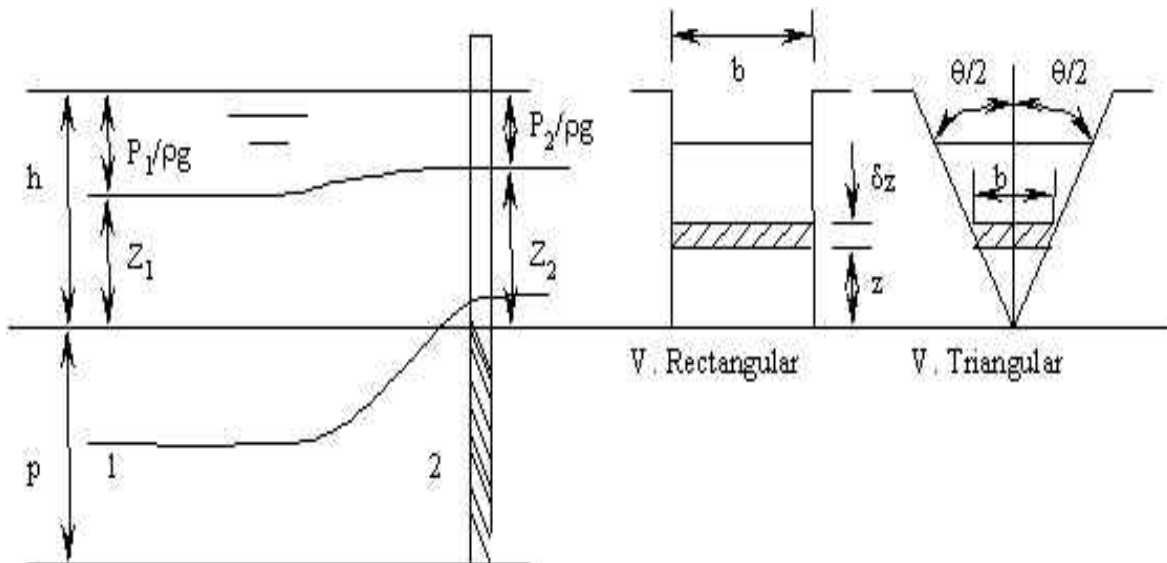


Figura 1. Flujo ideal sobre un vertedero de pared delgada

En general los vertederos triangulares más usados son los que forman un triángulo isósceles, siendo los más usuales los de 90 °. Para estos vertederos se aplica la fórmula de Thompson.

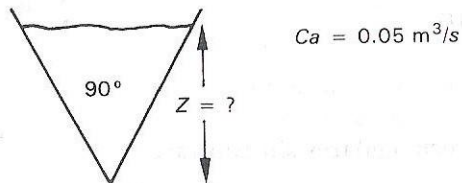
$$Ca = 1.4 Z^{\frac{5}{2}}$$

En donde Z es la altura del líquido en el vertedero.

Ejemplo 9.

El caudal a través de un vertedero triangular de 90° es de $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$. Determine la altura de líquido sobre el vertedero.

1.- Traducción.



2.- Planteamiento.

2.1.- Ecuación para vertedero triangular.

$$Ca = 1.4 Z^{\frac{5}{2}}$$

3.- Cálculos.

3.1. Altura.

$$0.05 = 1.4Z^{2.5}$$

$$Z=0.2637 \text{ m}$$

4.- Resultado. La altura deberá ser de 0.2637 m.

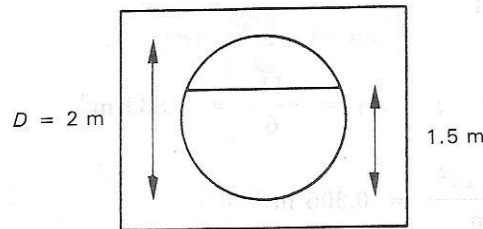
Vertederos circulares situados sobre una pared vertical.

Para estos vertederos el caudal se mide como:

$$Ca = 1.518 D^{0.693} Z^{1.807}$$

Ejemplo 10.

¿Cuál es el caudal que sale por el siguiente vertedero?



1.- Planteamiento.

1.1.- Ecuación para el vertedero circular.

$$Ca = 1.518 D^{0.693} Z^{1.807}$$

2.- Cálculos.

2.1.- Caudal.

$$Ca = 1.518 D^{0.693} Z^{1.807} = 1.518(2)^{0.693} (1.5)^{1.807} = 3.363 \frac{m^3}{s}$$

3.- Resultado. El caudal es de $3.363\text{ m}^3/\text{s}$.

Apéndice

Consumo de agua en litros

Bebida, cocina, limpieza, etc. Por persona por día	20-30
Lavado de ropa, por persona, día	10-15
Excusados por cada descarga, de 8 L, por persona día	20-30
Una ducha por persona	40-80
Lavado de dientes, manos, persona , día	8-10
Lavado de un coche	20
Riego de patios, jardines y aceras, por metro cuadrado, cada vez	2
Consumo medio por habitante aproximadamente	200 L

Ejercicios sugeridos de autoevaluación.

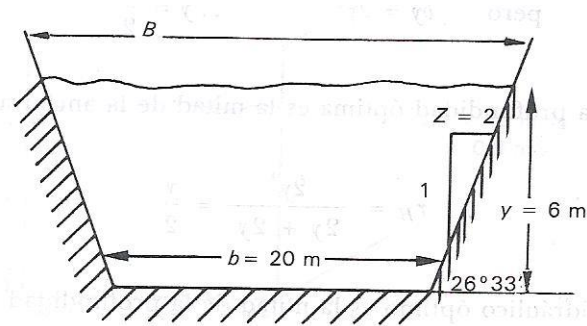
1.- ¿Cuál será la velocidad a la cual se desplaza el agua en un canal de concreto u hormigón de 1 m de ancho y con una pendiente de 0.01m/m si la altura en el canal es de 0.5 m?

R.-La velocidad es de 3.5 m/s.

2.-Determine el ancho que debe tener un canal rectangular de tierra cuando el caudal es de 132 L/s, la altura del líquido es de 0.3 m y la pendiente de 0.1.

R.- El ancho del canal debe ser de 62.53 cm

3.-Obtenga el radio hidráulico, el área de flujo y el perímetro mojado de un canal trapezoidal semejante al ilustrado. ¿Cuál será la velocidad y el caudal si la pendiente es de 0.0005?



R.- El área es de 192m^2 , el perímetro de 46.8 m y el r_H de 4.1 m la velocidad es de 3.209 m/s y el caudal de $616.25\text{ m}^3/\text{s}$.

5.- Una alcantarilla para desagüe de lluvias deberá dar paso a un caudal de 500 L/s . La pendiente es de 0.005 . Determine el diámetro requerido si ese caudal funciona con la sección totalmente llena.

R.- El diámetro es de dos pies.

6.- Determine el gasto y la velocidad en un tubo redondo de alcantarillado de 0.6 m de diámetro si está lleno hasta una altura igual al 75% del diámetro y la pendiente es de 0.005 .

R.- La velocidad será de 1.55 m/s y el caudal de $0.354\text{ m}^3/\text{s}$.

7.- Una canal rectangular de 10 m de ancho transporta un caudal de $7\text{ m}^3/\text{s}$ con una profundidad de $i\text{ m}$. Calcule la energía específica y la tirante crítica. ¿Qué tipo de flujo se tiene?

R.- La energía específica es de 1.025 kgm/kg , la tirante crítica es de 0.368 m . El flujo es tranquilo.

8.- El caudal a través de un vertedero triangular de 90° es de $0.05\text{ metros cúbicos sobre segundo}$. Determine la altura sobre el vertedero.

R.- La altura es de 0.26 m .

9.- En un canal de sección rectangular de 2.5 m de ancho con un caudal de $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ se forma un resalto hidráulico. Si el tirante aguas arriba es de 0.9 m ¿Cuál es la altura del resalto?

R.- La altura del resalto es de 0.47 m

10.- Un canal de sección trapezoidal de tierra tiene una pendiente de 0.0004. El ancho del fondo es de 2m, el tirante es de 1.2 m y el ancho superior de 4 m. Determine la velocidad media en el canal, el caudal y la posibilidad de que el canal se deteriore debido a la velocidad.

R.-La velocidad es de 0.636 m /s. La velocidad en los canales sin revestimiento oscila entre 0.4 y 0.8 m/s, por lo que el canal descrito no presentará ni arrastre ni enfangamiento.