

## TABLA DE CONTENIDO

ESTRUCTURAS ESPECIALES .....	261
10.1 INTRODUCCION .....	261
10.2 TRANSICIONES .....	261
10.3 PUENTE CANAL .....	265
10.4 SIFONES INVERTIDOS .....	268
10.4.1 Funcionamiento .....	269
10.4.2 Perdidas en el sifón .....	270
10.5 CAIDAS .....	272
10.6 RAPIDAS .....	274
10.7 ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS PARA MEDICIÓN DE CAUDALES .....	278
10.8 DESARENADOR .....	283
10.9 EJERCICIOS DE APLICACIÓN .....	289
10.10 APLICACIÓN DE SOFTWARE PARA DISEÑO DE CAIDAS .....	298
110.10.1 Ejemplo de aplicación .....	298
10.11 EJERCICIOS PROPUESTOS: .....	300
10.12 BIBLIOGRAFIA .....	301

## CAPITULO 10

### ESTRUCTURAS ESPECIALES

#### 10.1 INTRODUCCION.

La presencia de depresiones, cursos de agua o accidentes topográficos, incorporan condiciones especiales y particulares a un canal, de manera que será necesario considerar estructuras complementarias, que permitan superar estos obstáculos. Entre los tipos de estructuras más usados se estudiarán los siguientes:

**10.2 TRANSICIONES.**

**10.3 PUENTE CANAL.**

**10.4 SIFONES.**

**10.5 CAIDAS. Y**

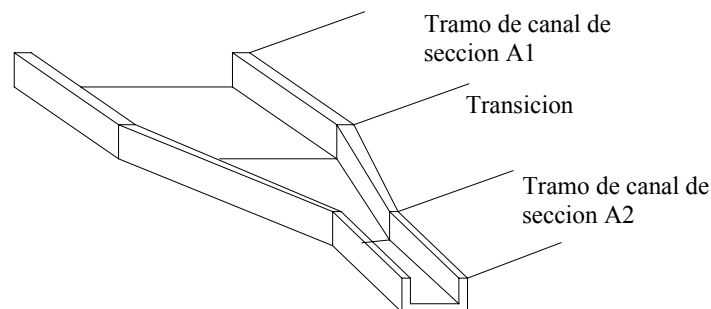
**10.6 RAPIDAS.**

**10.7 ESTRUCTURAS HIDRAULICAS DE MEDICION DE CAUDALES.**

**10.8 DESARENADORES.**

#### 10.2 TRANSICIONES.

La transición es una estructura que se usa para ir modificando en forma gradual la sección transversal de un canal, cuando se tiene que unir dos tramos con diferente forma de sección transversal, pendiente o dirección. La finalidad de la transición es evitar que el paso de una sección a la siguiente, de dimensiones y características diferentes, se realice de un modo brusco, reduciendo así las pérdidas de carga en el canal. Las transiciones se diseñan tanto a la entrada como a la salida de diferentes estructuras tales como: Tomas, rápidas, caídas, desarenadores, puentes canal, alcantarillas, sifones invertidos, etc.



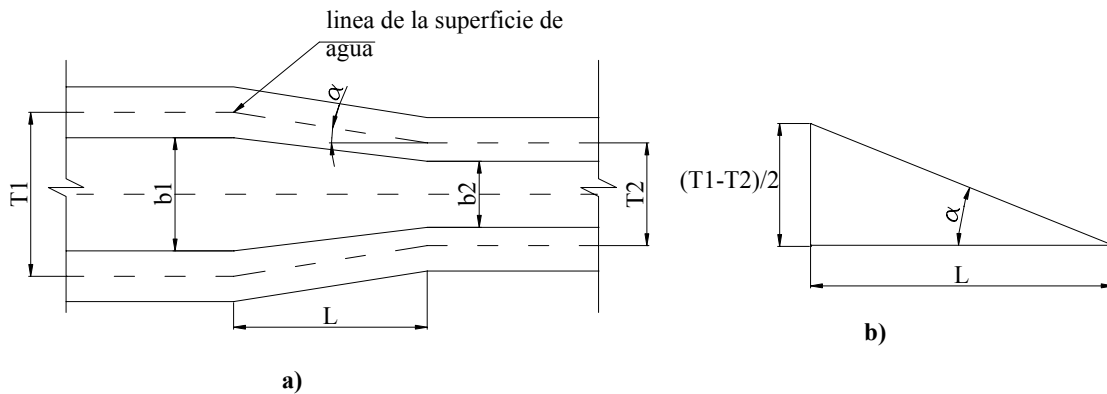
**Figura 10.1 transición en un canal.**

### a) TRANSICION RECTA DISEÑO SIMPLIFICADO DE TRANSICIONES.

Para el diseño de una transición recta, se debe definir la longitud de la transición de modo que las pérdidas en el paso entre dos tramos de características diferentes sean las mínimas posibles. En la hidráulica y en el diseño de estructuras hidráulicas, las formulas que representan los diseños se obtienen de forma experimental, es por eso que se tendrá confianza en las formulas siguientes.

### LONGITUD DE LA TRANSICION.

La Figura 10.2a muestra un esquema en planta de una transición que une dos tramos de diferente forma de un canal, donde T1, T2 representan los espejos de agua, b1, b2 los anchos de solera y  $\alpha$  el ángulo que forman los espejos de agua,



**Figura 10.2 a) Vista en planta de una transición, b) diferencia de alturas entre espejos de agua.**

De esta Figura se puede observar que se cumple que (ver la Figura 10.2.b), del triángulo, la  $\text{tg}\alpha$  se puede expresar como:

$$\text{tg}\alpha = \frac{T1 - T2}{L} \quad (10-1)$$

Despejando se tiene:

$$L = \frac{T1 - T2}{2\text{tg}\alpha} \quad (10-2)$$

Donde:

L= longitud de la transición, m.

T1, T2= espejos de agua, m.

$\alpha$ = ángulo que forman los espejos de agua.

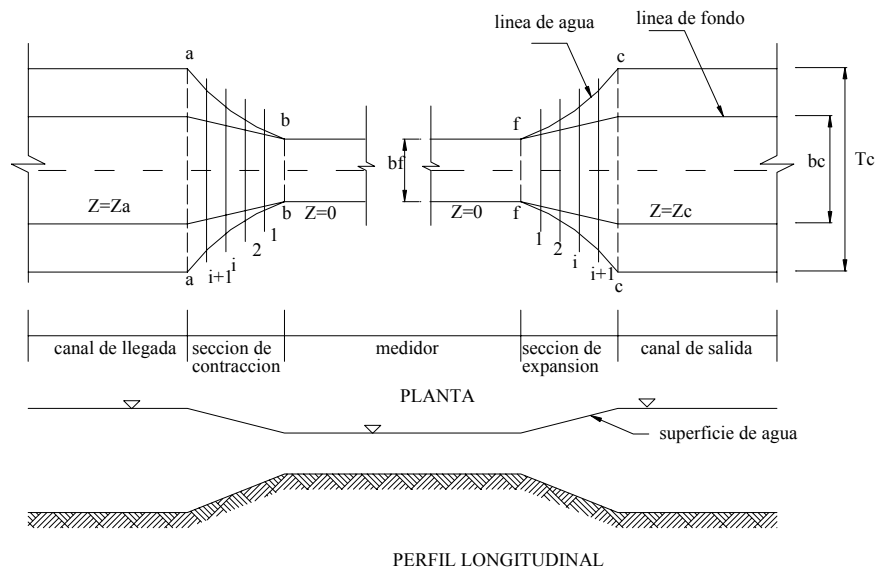
De (10-2), se observa que si  $\alpha$  crece, entonces  $\text{tg}\alpha$  crece y L decrece, según experiencias de Julian Hinds, y según el Bureau of Reclamation, se encontró que para  $\alpha = 12^\circ 30'$ , se consiguen pérdidas de carga mínimas en transición. Y que el ángulo  $\alpha$ , puede ser aumentado hasta  $22^\circ 30'$ <sup>1</sup> sin que el cambio de la transición sea brusco, por lo que se obtiene la ecuación (10-3), que es la ecuación que se aplica en forma practica para determinar la longitud de la transición recta.

<sup>1</sup> Según experiencias de la antigua Comisión nacional de Irrigación de México.

$$L = \frac{T1 - T2}{2 \cdot \operatorname{tg} 22^{\circ} 30'} \quad (10-3)$$

### b) TRANSICIONES ALABEADAS (método racional).

El diseño de transiciones para un régimen subcrítico, de la Figura 10.3, muestra la proyección en planta y el perfil longitudinal de una transición alabeada (tanto de contracción como de expansión), que une una sección rectangular con una trapezoidal, la que representa uno de los casos mas generales, ya que se da un cambio de sección (ancho de solera y talud) y la cota de fondo.



**Figura 10.3 planta y perfil de una sección alabeada.**

En la vista en planta de la Figura 10.3, las líneas punteadas representan los cortes de las secciones transversales:

*aa* : representa la sección de inicio de la transición de contracción, viniendo de aguas arriba o de izquierda a derecha, es el final del canal de llegada.

*bb* : representa la sección final de la transición de contracción, y es el inicio del canal intermedio.

*ff* : representa la sección de inicio de la transición de expansión, y el final del canal intermedio

*cc* : representa la sección final de la transición de expansión y es el inicio del canal de salida

En el diseño de la transición se trata de llegar a un diseño óptimo, es decir que el perfil que tiene la estructura, tanto en planta como en corte longitudinal obedezca al perfil hidrodinámico del flujo, de tal manera que cuando el flujo entre en la transición, la napa no se desprege de las paredes, sino que vaya con ellas.

Para el diseño de una transición existen varios métodos obtenidos en el laboratorio en forma experimental, cada uno de ellos fue desarrollado bajo ciertas hipótesis, dentro de los que se pueden mencionar:

- Método de Hind.
- Método de Mitra.
- Método de Chaturvedi.
- Método Racional.

Las ecuaciones que se plantean en esta sección, corresponden al método Racional, el mismo que fue producto de mucho trabajo desarrollado por diferentes investigadores entre los que se puede mencionar a Carde, Ranga, Raju, Mishra y Carnot, entre otros. La definición de la forma geométrica de la transición (por ejemplo para el caso de una transición de expansión), se realiza con las siguientes ecuaciones:

Longitud de la transición: 
$$L = 4.7 \cdot b + 1.65 Z_c \cdot y_c \quad (10-4)$$

Donde: 
$$b = \frac{bc - bf}{2} \quad (10-5)$$

L = longitud de transición.

Z<sub>c</sub> = talud en el canal trapezoidal, canal de salida.

y<sub>c</sub> = tirante en el canal de salida.

bc = ancho de solera en el canal de salida (canal trapezoidal).

bf = ancho de solera en el canal intermedio (canal rectangular).

Calculo del ancho de fondo (solera) en cada sección: 
$$b = bf + (bc - bf) \frac{x}{L} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{x}{L} \right)^{nb} \right] \quad (10-6)$$

Donde:  $nb = 0.8 - 0.26 Z_c^{1/2}$ ; y el talud en cada sección es: 
$$Z = Z_c \left[ 1 - \left( 1 - \frac{x}{L} \right)^{1/2} \right] \quad (10-6.a)$$

Z = talud a una distancia x.

Z<sub>c</sub> = talud del canal de sección trapezoidal.

X = distancia a la que se esta calculando el talud Z, tomando como inicio la sección rectangular.

L = longitud de la transición.

Calculo del desnivel de fondo en cada sección. 
$$\Delta h_i = \frac{\Delta h}{L} x \quad (10-7)$$

Donde:

Dh<sub>i</sub> = desnivel del fondo en cada sección.

Dh = desnivel total entre las dos secciones (rectangular y trapezoidal).

x = distancia a la que se encuentra la sección que se esta calculando, tomando como inicio la sección rectangular.

L = longitud de la transición.

El desnivel entre dos secciones consecutivas i y i+1 se calcula con la ecuación:

$$\Delta h_{i+1} = \frac{\Delta h}{L} (x_{i+1} - x_i) \quad (10-8)$$

Donde:

Dh<sub>i,i+1</sub> = desnivel del fondo entre las secciones i y i+1.

Dh= desnivel total entre las dos secciones (rectangular y trapezoidal).  
 $x_i, x_{i+1}$ = distancia a la que se encuentra la sección i y i+1, respectivamente.  
 L= longitud de la transición.

Para el cálculo del tirante y la energía específica en cada sección de la transición alabeada, se aplica la ecuación de la energía, es decir:

$$E_1 = E_2 + hf_{1-2} \quad (10-9)$$

Donde:

$$E_1, E_2 = \text{energía total en las secciones 1 y 2, respectivamente, } E = H + y + \frac{v^2}{2g} \quad (10-10)$$

H= carga de altura.

Y= tirante, carga de presión.

$v^2 / 2g$  = carga de velocidad.

$hf_{1-2}$ = pérdida por cambio de dirección entre las secciones 1 y 2, de acuerdo a HIND:

$$hf_{1-2} = K \left( \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \right) \quad (10-11)$$

Para una transición de salida (expansión)  $K=K_e= 0.20$ .

Para una transición de entrada (contracción)  $K=K_e=0.10$ .

En la tabla 10.1, se muestran valores de los coeficientes de pérdidas para diferentes tipos de transiciones.

Tipo de Transición	$K_e$	$K_s$
Curvado	0.10	0.20
Cuadrante cilíndrico	0.15	0.25
Simplificado en línea recta	0.20	0.30
Línea recta	0.30	0.50
Extremos cuadrados	0.30	0.75

**Tabla 10.1, Coeficientes de pérdidas recomendadas en transiciones.**

Para calcular una transición de entrada (contracción), de acuerdo a la Figura 10.3 sustituir para los cálculos:

$$ba = bc, \quad bb = bf, \quad Za = Zc.$$

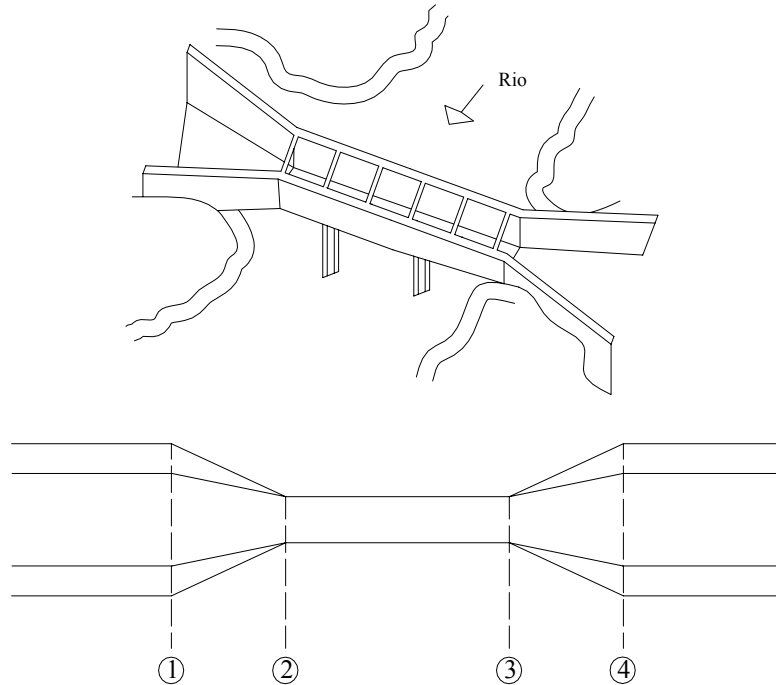
### 10.3 PUENTE CANAL.

El puente canal es una estructura utilizada para conducir el agua de un canal, logrando atravesar una depresión. La depresión puede ser otro canal, un camino, una vía de ferrocarril o un dren. El puente canal es un conjunto formado por un puente y un conducto, el conducto puede ser de concreto, hierro, madera u otro material resistente, donde el agua escurre por efectos de la gravedad.

El puente canal esta compuesto por los siguientes elementos hidráulicos:

1. Transición de entrada, une por un estrechamiento progresivo el canal con el puente canal, lo cual provoca un cambio gradual del agua en el canal.
2. conducto elevado, generalmente tiene una sección hidráulica mas pequeña que la del canal.
3. transición de salida, une el puente canal con el canal.

La forma de la sección transversal, por facilidades de construcción se adopta una sección rectangular, aunque puede ser semicircular o cualquier otra forma.



**Figura 10.4 esquema de un puente canal, y vista en planta**

Por lo general un puente canal tiene la forma de la Figura 10.4, vista en planta, se diseña para las condiciones del flujo subcrítico (aunque también se puede diseñar para flujo supercrítico), por lo que el puente canal representa una singularidad en el perfil longitudinal del canal, que crea efectos hacia aguas arriba. Por lo anterior en la sección 4 de la Figura 10.4, se tienen las condiciones reales, siendo su tirante real de flujo el correspondiente al  $y_n$  del canal, por lo que esta sección representa una sección de control. La ubicación de una sección de control, resulta importante para definir el sentido de los cálculos hidráulicos, en este caso, desde la sección 4 aguas abajo, hacia la sección 1 aguas arriba. Cabe recalcar que para el caso de un diseño en flujo supercrítico, el puente canal sería una singularidad que crea efectos hacia aguas arriba, por lo que la sección de control estaría en la sección 1, y los cálculos se efectuarían desde 1 hacia aguas abajo, hacia la sección 4.

El diseño del conducto elevado por condiciones económicas debe ser del menor ancho posible, pero manteniendo siempre el mismo tipo de flujo, en este caso flujo subcrítico. A fin de que las dimensiones sean las mínimas posibles se diseña para condiciones cercanas a las críticas. Para una sección rectangular, en condiciones críticas se cumplen las siguientes ecuaciones:

$$y_c = \frac{2}{3} E \min \quad (10-12)$$

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 g}} \quad (10-13)$$

Igualando 10-12 con 10-13, se tiene:

$$\frac{2}{3} E \min = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 g}}$$

De donde despejando b, se tiene:

$$b = \sqrt[3]{\frac{27 Q^2}{8 E_{\min}^3 g}} \quad (10-14)$$

De la ecuación 10-14, como Q es conocido (se debe conocer el caudal de diseño), para calcular b, se requiere conocer Emin. Entonces se toma como una aproximación de Emin el valor de E4 calculado como:

$$E4 = y_4 + \frac{v_4^2}{2g} = y_n + \frac{v_n^2}{2g}$$

Calculado el valor crítico de b critico (con la ecuación 10-14), para propiciar un flujo subcritico en el conducto, se toma un valor mayor que este. Un valor mayor del ancho de solera reduce el efecto de la curva de remanso que se origina en el conducto. Resulta aceptable que la curva de remanso afecte el 10% del borde libre. En resumen, para definir el ancho del conducto, se calcula b utilizando la ecuación 10-14, luego se amplía su valor en forma adecuada, recordando que un valor disminuye el efecto por curva de remanso, pero disminuye la velocidad en el conducto.

### Calculo de transiciones.

La transición a la salida, para el caso de una transición recta la ecuación utilizada es: la ecuación (10-3) donde:

T1=b= ancho de solera del conducto.

T2= espejo de agua del canal.

La transición de entrada se diseña en forma similar, siendo:

T1= espejo de agua en el canal.

T2=b= ancho de solera del conducto.

**Calculo de perdidas en las transiciones**, estas perdidas se calculan con la ecuación (10-11), siendo  $v_1 > v_2$ , y utilizando la tabla 10.1, para los valores Ke y Ks, coeficientes de entrada y salida respectivamente.

**Calculo de los efectos de la curva de remanso**, el efecto de la curva de remanso incide en los tirantes de las secciones 1, 2, 3 y 4 de la Figura 10.4

Calculo de y3, (y en la sección 3) al aplicar la ecuación de la energía entre las secciones 3 y 4:



$$\Delta Z_{3-4} + y_3 + \frac{v_3^2}{2g} = y_4 + \frac{v_4^2}{2g} + K_s \left( \frac{v_3^2}{2g} - \frac{v_4^2}{2g} \right) \quad (10-15)$$

Donde:  $\Delta Z_{3-4} = S \cdot L \quad (10-16)$

La ecuación 10.15, se resuelve por tanteos y se determina  $y_3$ .

Calculo de  $y_2$ , aplicar la ecuación de la energía entre las secciones 2 y 3:

$$\Delta Z_{2-3} + y_2 + \frac{v_2^2}{2g} = y_3 + \frac{v_3^2}{2g} + hf_{2-3} \quad (10-16)$$

Donde:  $hf_{2-3} = S_E \cdot L \quad (10-17)$

$$S_E = \left( \frac{vn}{R^{2/3}} \right)^2; \quad v = \left( \frac{v_2 + v_3}{2} \right); \quad R = \left( \frac{R_2 + R_3}{2} \right)$$

La ecuación 10-16, se resuelve por tanteos y se determina  $y_2$ .

Calculo de  $y_1$ , aplicar la ecuación de la energía entre las secciones 1 y 2:

$$\Delta Z_{1-2} + y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + K_e \left( \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} \right) \quad (10-17)$$

Donde:  $\Delta Z_{1-2} = S \cdot L$ , la ecuación 10-17 se resuelve por tanteos y se determina  $y_1$ .

Cálculo de la altura de remanso, esta altura será producida por:

$$H_{\text{remanso}} = y_1 - y_4.$$

#### 10.4 SIFONES INVERTIDOS.

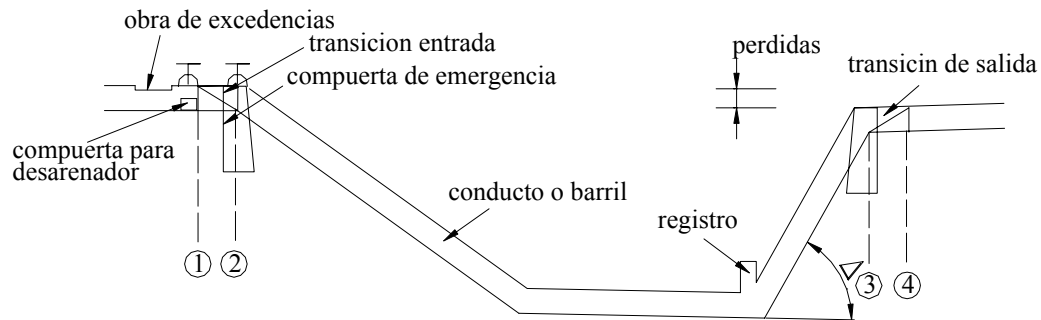
Los sifones invertidos son conductos cerrados que trabajan a presión, se utilizan para conducir el agua en el cruce de un canal con una depresión topográfica en la que está ubicado un camino, una vía de ferrocarril, un dren o incluso otro canal.

##### Partes de un sifón

Los sifones invertidos, como se muestra en la Figura 10.5, constan de las siguientes partes:

1. Desarenador.
2. Desagüe de excedencias.
3. Compuerta de emergencia y rejilla de entrada.
4. Transición de entrada.
5. Conducto o barril.
6. Registros para limpieza y válvulas de purga.
7. Transición de salida.

No siempre son necesarias todas las partes indicadas pudiendo suprimirse algunas de ellas.



**Figura 10.5 elementos de un sifón invertido.**

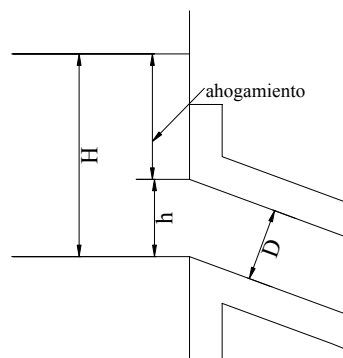
El *desarenador*, es una estructura que sirve para la limpieza de las aguas cuando estas contienen partículas sólidas, también para la limpieza en los sifones (sección 10.8). *Desagüe de excedencias*, es una estructura que evita que el nivel del agua suba mas de lo tolerable, generalmente es un vertedero lateral. *Compuerta de excedencias* se ubica al finalizar la transición de entrada, y consiste en compuertas deslizantes que se cierran para hacer limpieza del sifón u hacer reparaciones. *Transiciones de entrada y salida*, como la mayoría de los casos la sección del canal es diferente al del barril o conducto, es necesario diseñar transiciones (que se vio en el inciso 10.2). *Conducto o barril*, forma la parte más importante y necesaria de los sifones. Se recomienda profundizar el conducto, dejando un colchón mínimo de 1m en las laderas y de 1.5 m en el cruce del cauce para evitar probables fracturas que pudieran presentarse debido a cargas excesivas como el paso de camiones o tractores. *Registro para la limpieza y válvula de purga*, se coloca en la parte mas baja de los barriles, permite evacuar el agua que se quede almacenada en el conducto cuando se para el sifón, para su limpieza y reparación.

*Sección transversal*, por razones de construcción pueden ser: cuadradas, rectangulares H/B 0 1.5, circulares.

Las velocidades de diseño en el conducto del sifón en sifones grandes es de 2 – 3 m/s, mientras que en pequeños es de 1.6 m/s, un sifón es considerado grande, cuando su longitud es mayor que 500 veces el diámetro.

#### 10.4.1 Funcionamiento.

El sifón siempre funciona a presión, por lo tanto, debe estar ahogado a la entrada y a la salida.



**Figura 10.6, ahogamiento**

Ahogamiento  $\geq 10\%$ , puede tenerse ahogamiento  $< 50\%$ , ahogamiento  $= (H-h)/h \cdot 100$ .

El sifón funciona por diferencia de cargas, esta diferencia de cargas debe absorber todas las perdidas del sifón. La diferencia de carga DZ debe ser  $\geq$  perdidas totales.

El cálculo hidráulico del sifón, se lo realiza en base a los planos topográficos del terreno en el sitio de la obra, se traza el sifón y se procede a diseñar la forma y dimensiones de la sección del conducto mas económica y conveniente, esto se obtiene después de hacer varios tanteos, tomando en cuenta las perdidas de carga que han de presentarse. Las dimensiones de la sección transversal del conducto, dependen del caudal que deba pasar y de la velocidad que se pueda dar.

#### 10.4.2 Perdidas en el sifón.

Las principales perdidas que se presentan son las siguientes.

Perdidas de carga por transición de entrada y salida:

$$h_{te} = 0.4 \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2g} \quad (10-18)$$

$$h_{ts} = 0.7 \frac{(v_3^2 - v_4^2)}{2g} \quad (10-19)$$

Donde:

$v_1$ = velocidad en sección 1 de la transición, de entrada.

$v_2$ = velocidad en sección 2 de la transición, de entrada

$v_3$ = velocidad en sección 3 de la transición, de salida.

$v_4$ = velocidad en sección 4 de la transición, de salida.

En un flujo subcritico, la sección (4) de la Figura 10.5, tiene el tirante real igual al tirante normal. Para encontrar las perdidas por transición de salida es conveniente aplicar el teorema de Bernoulli entre los puntos (3) y (4). Lo mismo con la entrada pero entre los puntos (1) y (2). El tubo a la entrada, conviene que quede ahogado de un 10% a un 50% de  $h_v$  para evitar la entrada de aire que pueda producir un funcionamiento defectuoso.

Perdidas por rejillas, cuando la estructura consta de bastidores de barrotes y rejillas para el paso del agua, las perdidas originadas se calculan con la ecuación:

$$h_2 = K \frac{v_n^2}{2g} \quad (10-20)$$

Donde:

$$K = 1.45 - 0.45 \left( \frac{An}{Ag} \right) - \left( \frac{An}{Ag} \right)^2 \quad (10-21)$$

$K$ = coeficientes de perdidas en la rejilla.

$An$ = área neta de paso entre rejillas.

$Ag$ = área bruta de la estructura y su soporte, que quede dentro del área hidráulica.

$v_n$ = velocidad a través del área neta de la rejilla dentro del área hidráulica.

Perdidas de carga por entrada del conducto: 
$$h_3 = K_e \frac{v^2}{2g} \quad (10-22)$$

Donde:  $v$ = velocidad del agua en el barril.

$K_e$ = coeficiente que depende de la forma de entrada.

Tipo de estructura	Ke
Compuerta en pared delgada-contracción suprimida en los lados y en el fondo	1.00
Para entrada con arista en ángulo recto	0.50
Para entrada con arista ligeramente redondeada	0.23
Para entrada con arista completamente redondeada R/D=0.15	0.10
Para entrada abocinada circular	0.004

**Tabla 10.2, valores de ke**

Perdidas por fricción en el conducto, una formula muy empleada para determinar las pérdidas por fricción es la de Manning:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}; \text{ Entonces: } H_f = S \cdot L = \left( \frac{v \cdot n}{R^{2/3}} \right)^2 L \quad (10-23)$$

Donde:

n= coeficiente de rugosidad.

S= pendiente del tramo.

V= velocidad del agua en el conducto.

R= radio hidráulico.

L= longitud total del conducto.

Cuando se trata de un conducto circular, el radio hidráulico es:  $R = d/4$ .

Perdidas de carga por cambio de dirección o codos, una formula muy empleada es:

$$h_c = K_c \sqrt{\frac{\Delta}{90^\circ}} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (10-24)$$

Donde:

D = ángulo de deflexión.

Kc = coeficiente para codos comunes igual a 0.25.

Perdidas por válvulas de limpieza, estas perdidas se originan en sifones que tienen valvulas para desagüe y limpieza, entonces estas perdidas se consideran por bifurcación de tuberías, esta perdida por ser pequeña y no se puede evaluar, se desprecia.

Perdidas por ampliación (perdidas por salida), algunas veces por exigencias topográficas no es posible localizar una transición a la salida del sifón para el cambio de sección, haciéndolo en una caja, de la cual saldrá el agua al canal. La perdida de carga será motivada por ampliación brusca en la sección y se aplica la formula de Borda.

$$h_s = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}$$

Donde:

v1= velocidad en el sifón.

v2= velocidad aproximada en la caja.

Según Archer:

$$h_s = 0.997 \frac{(v_1 - v_2)^{1.919}}{2g} = 0.0508(v_1 - v_2)^{1.919} \quad (10-25)$$

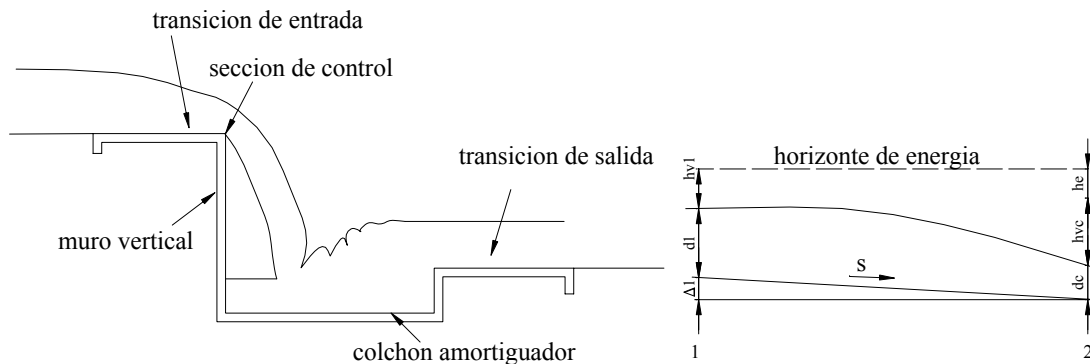
Forma practica:  $h_s = 2 \cdot h_e$

## 10.5 CAIDAS.

Las caídas son estructuras utilizadas en aquellos puntos donde es necesario efectuar cambios bruscos en la rasante del canal, permite unir dos tramos (uno superior y otro inferior) de un canal, por medio de un plano vertical, permitiendo que el agua salte libremente y caiga en el tramo de abajo. El plano vertical es un muro de sostenimiento de tierra capaz de soportar el empuje que estas ocasionan.

La finalidad de una caída es conducir agua desde una elevación alta hasta una elevación baja y disipar la energía generada por esta diferencia de niveles. La diferencia de nivel en forma de una caída se introduce cuando sea necesario de reducir la pendiente de un canal.

Una caída vertical esta compuesta por: *transición a la entrada*, que une por medio de un estrechamiento progresivo la sección del canal superior con la sección de control. *Sección de control*, es la sección correspondiente al punto donde se inicia la caída, cercano a este punto se presentan las condiciones críticas. *Caída en si*, la cual es de sección rectangular y puede ser vertical o inclinada. *Poza o colchón amortiguador*, es de sección rectangular, siendo su función la de absorber la energía cinética del agua al pie de la caída. *Transición de salida*, une la poza de disipación con el canal aguas abajo.



**Figura 10.7, elementos de una caída. Localización de la sección de control**

De la Figura 10.7 se tiene:  $d_1 + h_{v1} + D_1 = d_c + h_{vc} + h_e \quad (10-26)$

Donde:

$d_1$  = tirante normal en el canal superior, m.

$h_{v1}$  = carga de velocidad en el canal superior, m.

$D_1$  = desnivel entre el sitio donde comienza el abatimiento y la sección de control, cuyo valor se desprecia por pequeño, m.

$h_{vc}$  = carga de velocidad en la sección de control, m.

$d_c$  = tirante crítico, m.

$h_e$  = suma de las pérdidas ocurridas entre las dos secciones, m.

El segundo miembro de la ecuación 10-26, se obtiene suponiendo una sección de control, se calcula el tirante crítico correspondiente así como la velocidad y la carga de velocidad crítica. De acuerdo a las características de llegada a la sección, se estiman las pérdidas de carga. La suma del segundo miembro se compara con la suma del tirante del canal y su carga de velocidad.

La sección en estudio se tendrá que ampliar o reducir hasta lograr que las sumas sean iguales. Una sección adecuada y más sencilla de calcular es la rectangular, esto se logra haciendo los taludes verticales. Del régimen crítico para secciones rectangulares se tiene:

$$dc = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 g}} \quad (10-27)$$

Donde:

- dc = tirante crítico, m.
- q = caudal que circula por la sección, m<sup>3</sup>/s.
- b = plantilla de la sección, m.
- g = aceleración de la gravedad, 9.81 m/s<sup>2</sup>.

La carga de velocidad en la sección crítica esta dada por las siguientes ecuaciones:  
Para canales trapeciales:

$$hvc = \frac{A}{2T} \quad (10-28)$$

Donde:

- hvc = carga de velocidad en la sección crítica, m.
- A = área de la sección, m.
- T = ancho de la superficie libre del agua, m.

Para canales rectangulares:

$$hvc = \frac{1}{2} dc \quad (10-29)$$

**Diseño del colchón**, para el diseño del colchón, se determina la trayectoria de la vena media de la sección de control. El diseño del colchón consiste en determinar su longitud, así como la profundidad del mismo.

Obtención de la longitud del colchón, en relación al perfil de la caída, se tiene la distancia Xn, a la cual va a caer el chorro; es conveniente que este caiga al centro de un colchón de agua que favorezca la formación de un salto hidráulico, por lo que este colchón tendrá una longitud de

L = 2\*Xn, en la Figura 10.8 se muestra el perfil de una caída:

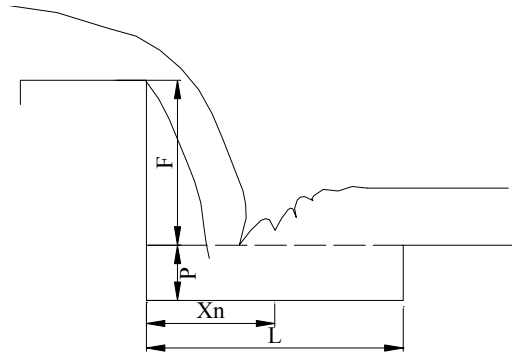
Xn se determina de acuerdo a las formulas de caída libre:

$$Xn = vc * t \quad (10-30)$$

Donde:

- Xn = ½ de la longitud L, m.
- vc = velocidad crítica, m/s.
- t = tiempo que tarda en llegar una partícula de agua desde la sección de control al fondo del colchón en caída libre, seg.

Si:  $Y = \frac{1}{2}gt^2$ ;  $t = \sqrt{\frac{2Y}{g}}$  (10-31)



**Figura 10.8, Perfil de una caída vertical.**

Sustituyendo 10-31 en 10-32, se tiene:

$$Xn = v_c \sqrt{\frac{2Y}{g}} = 0.452v_c Y^{1/2} \quad (10-32)$$

$$Y = F + P$$

Donde: F= distancia vertical entre las rasantes del canal aguas arriba y aguas debajo de la caída, m.

P= profundidad del colchón, m.

La profundidad del colchón se obtiene con la expresión:  $P = \frac{L}{6}$  (10-33)

Donde: L= longitud del colchón, m.

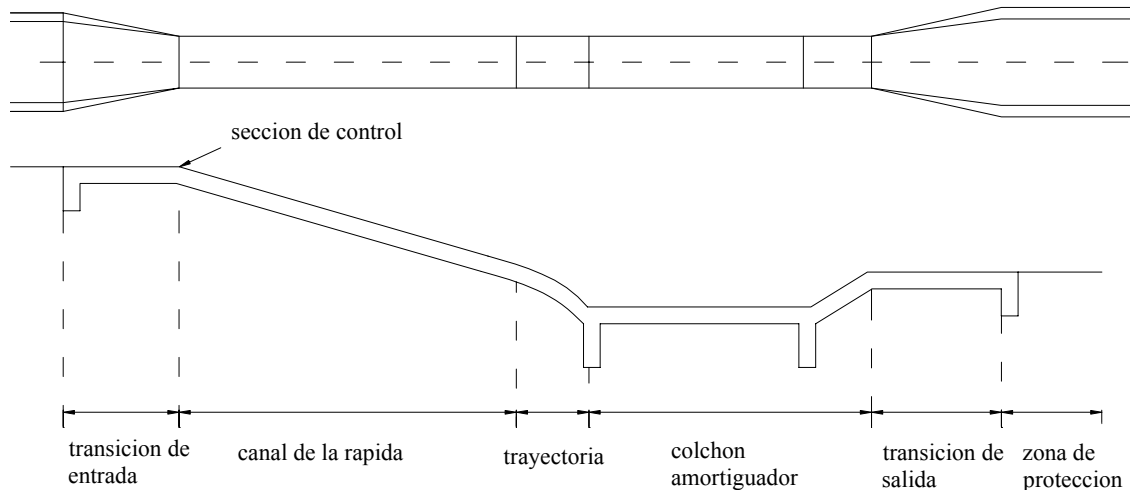
La salida del colchón puede ser vertical o inclinada, aconsejándose que cuando sea inclinada se haga con un talud en contra pendiente de 4:1 o de 2:1 según convenga.

El diseño estructural consiste en especificar las dimensiones, características y materiales que constituyen la caída vertical. Se recomienda que esta estructura, cuando se utiliza con gastos pequeños, menores de 2.8 m<sup>3</sup>/s, no tenga una caída mayor de 2.5 m, de desnivel entre plantilla y plantilla.

## 10.6 RAPIDAS.

Las rápidas se utilizan para unir dos tramos de canal cuyo desnivel considerable se presenta en una longitud de bastante importancia en comparación con el desnivel. Antes de decidir la utilización de una de estas estructuras, conviene realizar un estudio económico comparativo entre una rápida y una serie de caídas.

Elementos de una rápida, se muestran en la siguiente Figura la cual esta compuesta de:



**Figura 10.9, elementos de una rápida.**

La transición de entrada, une por un estrechamiento progresivo la sección del canal superior con la sección de control, la sección de control es el punto donde comienza la pendiente fuerte de la rápida, manteniéndose en este punto las condiciones críticas. En la rápida generalmente se mantiene una pendiente mayor que la necesaria para mantener el régimen crítico, por lo que el tipo de flujo que se establece es el supercrítico. Canal de la rápida, es la curva vertical parabólica que une la pendiente última de la rápida con el plano inclinado del principio del colchón amortiguador. Debe diseñarse de modo que la corriente de agua permanezca en contacto con el fondo del canal y no se produzcan vacíos. Si la trayectoria se calcula con el valor de la aceleración de la gravedad como componente vertical, no habrá presión del agua sobre el fondo y el espacio ocupado por el aire aumentara, limitándose así la capacidad de conducción del canal, por lo que se acostumbra usar como componente vertical un valor inferior a la aceleración de la gravedad o incrementar el valor de la velocidad para que la lamina de agua se adhiera al fondo del canal.

Tanque amortiguador, Colchón disipador, es la depresión de profundidad y longitud suficiente diseñada con el objetivo de absorber parte de la energía cinética generada en la rápida, mediante la producción del resalto hidráulico, y contener este resalto hidráulico dentro de la poza. Se ubica en el extremo inferior de la trayectoria.

Transición de salida, tiene el objetivo de unir la poza de disipación con el canal aguas abajo. Y la zona de protección, con el fin de proteger el canal sobre todo si es en tierra, se puede revestir con mampostería.

### DISEÑO DE UNA RAPIDA

El calculo es utilizando el análisis del flujo en un perfil longitudinal con tramos de pendiente fuerte y calculando las curvas de remanso. *Calculo del ancho de solera en la rápida y el tirante en la sección de control*, usando condiciones críticas, para una sección rectangular las ecuaciones que se cumplen son las siguientes:

El tirante critico de la ecuación 10-27, de donde: 
$$b = \sqrt{\frac{27Q^2}{8E_{\min}^3 g}} \quad (10-34)$$



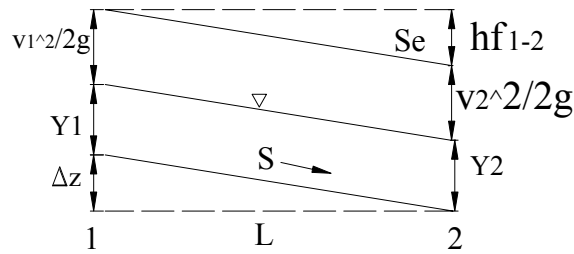
Para el inicio de los cálculos se puede asumir que  $E_{min} = E_n$  (energía específica en el canal), y posteriormente realizar la verificación. Y también se puede suponer un ancho de solera en la rápida, calcular el tirante crítico en la sección de control y por la ecuación de la energía calcular el tirante al inicio de la transición.

Existe una formula empírica para el cálculo del ancho de la rápida, la cual en el sistema métrico es:

$$b = \frac{18.78\sqrt{Q}}{10.11 + \sqrt{Q}} \quad (10-35)$$

**Calculo hidráulico en el canal de la rápida**, el cálculo de tirantes y distancias consiste en calcular los tramos (distancias) con respecto a la sección de control, puede usarse:

Cualquier método para el cálculo de la curva de remanso, recomendándose el método de tramos fijos, usando el proceso grafico de esta metodología.



**Figura 10.10, líneas de energía.**

La ecuación utilizada es la ecuación de la energía:  $E_1 + \Delta Z = E_2 + \Delta hf_{1-2}$  (10-36)

Donde:  $DZ = S \times L$   
 $Dhf = Se \times L$

$$Se = \left( \frac{n \cdot v}{R^{2/3}} \right)^2$$

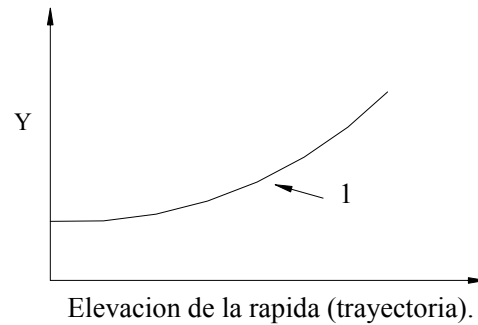
Esta ecuación se resuelve gráficamente.

El borde libre en el canal de la rápida se puede obtener utilizando la formula empírica:

$$B \cdot L = 0.61 + 0.0371 \cdot v \cdot \sqrt{y} \quad (10-37)$$

Para utilizar la formula es necesario determinar los tirantes de agua "y" y las velocidades "v" existentes en distintos puntos a lo largo de la rápida. Estas se pueden obtener considerando un tirante crítico en la energía en tramos sucesivos. Los tirantes obtenidos se deben considerar perpendiculares al fondo, las velocidades y las longitudes se miden paralelas a dicha inclinación, el borde libre se mide normal al fondo.

El cálculo de la curva elevación- tirante en el canal de la rápida (trayectoria), es similar a la curva parabólica, cuyo cálculo se basa en la ecuación de Bernoulli despreciando perdidas.



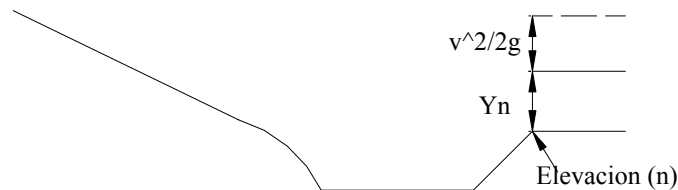
**Figura 10.11, curva I, elevación de la trayectoria en la rápida vs. Tirante.**

Proceso: 1. calcular la elevación del gradiente de energía en la sección donde se inicia la trayectoria.

$$\text{Elevación Gradiente energía} = \text{Elev}(0) + Y_0 + V_0^2 / 2g,$$

Calcular los valores para trazar la curva elevación tirante en el canal de la rápida, suponer tirantes menores que  $Y_0$ , calcular  $E$  y restar de la elevación del gradiente de energía calculado en el paso 1; por ultimo trazar la curva (1), esta se obtiene ploteando: elevación de la trayectoria en la rápida vs tirante.

Calculo de la curva, elevación – tirante conjugado menor, la curva elevación –tirante conjugado menor se calcula con el siguiente proceso: 1. calcular la elevación del gradiente de energía en la sección del canal después de la rápida, una muestra grafica de los cálculos se indican en la siguiente Figura.

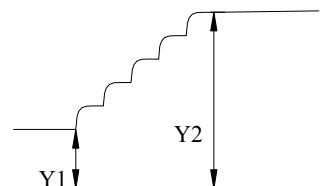


**Figura 10.12, Esquema de calculo de la elevación del gradiente de energía después del resalto.**

La elevación del gradiente de energía después del resalto se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Elevación gradiente de energía} = \text{Elev(II)} + Y_n + V_n^2 / 2g$$

2. elegir  $Y_1$  y calcular el tirante conjugado mayor del resalto  $Y_2$ .



Para una sección rectangular la ecuación es:

$$y_2 = -\frac{y_1}{2} + \sqrt{\frac{2q^2}{gy_1} + \frac{y_1^2}{4}}; \text{ Luego calcular: } E_2 = y_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

3. calcular la elección del fondo del colchón amortiguador de la poza

Elevación = elevación gradiente energía- E2,

4. trazar la curva (II), planteando elevación del colchón amortiguador vs tirante conjugado menor.

Graficar las curvas (I) y (II) e interpolarlas, en el punto de intersección se obtiene: La elevación del tanque amortiguador y Tirante conjugado menor Y1.

El cálculo de la longitud del colchón se lo hace usando la formula de Sieñchin:

$L = K (Y2 - Y1)$ ; siendo K igual a 5 para un canal de sección rectangular.

Calculo de las coordenadas y elevaciones de la trayectoria parabólica de la rápida, se calcula mediante la ecuación parabólica de la siguiente ecuación:

$$Y = - \left( x \tan \Phi + \frac{gx^2}{2v_{\max}^2} \cdot (1 + \tan^2 \Phi) \right) \quad (10-38)$$

Donde: Y: coordenada vertical (ordenada).

X: coordenada horizontal (abcisa).

F: ángulo formado por la horizontal y el fondo del canal de la rápida ( $\tan F = S$ )

$V_{\max} = 1.5 v$  al principio de la trayectoria, con lo cual la ecuación se simplifica de la siguiente manera:

$$y = - \left( xS + \frac{gx^2}{4.5v^2} (1 + S^2) \right) \quad (10-39)$$

Para los cálculos se dan valores a x y se calcula y, siendo las elevaciones:

$$\text{Elevación} = \text{elevación (0)} + Y,$$

Con estos valores tabular una tabla de elevación.

Por ultimo diseñar la transición de entrada, con los pasos dados al principio del capítulo.

## 10.7 ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS PARA MEDICIÓN DE CAUDALES.

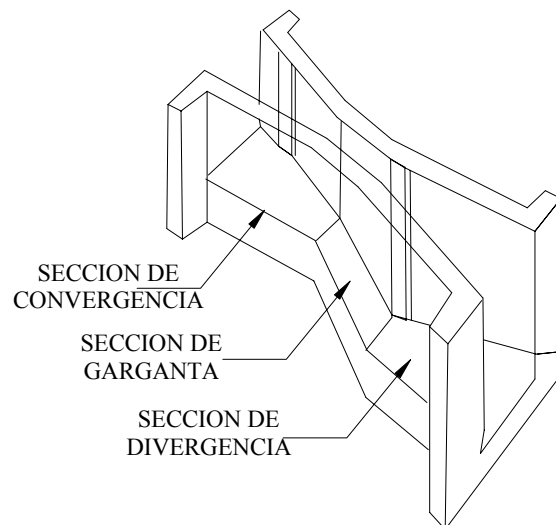
Estas son estructuras diseñadas y desarrolladas en laboratorios hidráulicos de Países Bajos, por lo que sus unidades de calibración están en pies por segundo (pps), el método práctico consiste en construir los aforadores según las especificaciones originales en pies y utilizar las conversiones métricas de los índices de los caudales calculadas por los laboratorios hidráulicos.

La razón de este enfoque es el diseño complicado de las diferentes dimensiones de los aforadores, que se normalizaron después de años de pruebas y errores y que luego se calibraron.

Las diferentes dimensiones de los aforadores no son modelos a escala hidráulicos, de manera que no se puede asumir que una dimensión en un aforador de cuatro pies será el doble de las

dimensiones correspondientes de un aforador de dos pies. Algunas dimensiones o proporciones son constantes para algunas partes, pero otras varían para cada medida. Como resultado de ello, cada una de las 22 variaciones que se pueden encontrar en los canales de aforo Parshall, y cada uno de los aforadores en H debe considerarse como un dispositivo diferente. Tendrán algunas características comunes, pero cada uno de ellos tiene sus propias especificaciones de fabricación y sus propias tablas de calibración.

A pesar de esta complicación, los aforadores se utilizan ampliamente debido a sus ventajas: se construyen para satisfacer una necesidad particular; son dispositivos de medición "normalizados", es decir, que se fabrican e instalan de acuerdo con las especificaciones y no necesitan calibración, y la medición se puede tomar directamente de las tablas publicadas. Al igual que los vertederos, es preferible que los aforadores funcionen con descarga libre; algunos tipos pueden funcionar de manera satisfactoria en situación en parte sumergida, es decir, cuando las aguas descansan en el aforador y crean cierta restricción de la corriente. Si el efecto es previsible y cuantificable, el problema no es grave, pero implica que se debe medir la profundidad del caudal en dos puntos en el aforador, como se indica en la Figura 10.13 y que se aplique un factor de corrección a las tablas de aforo.



**Figura 10.13 Canal de aforo Parshall**

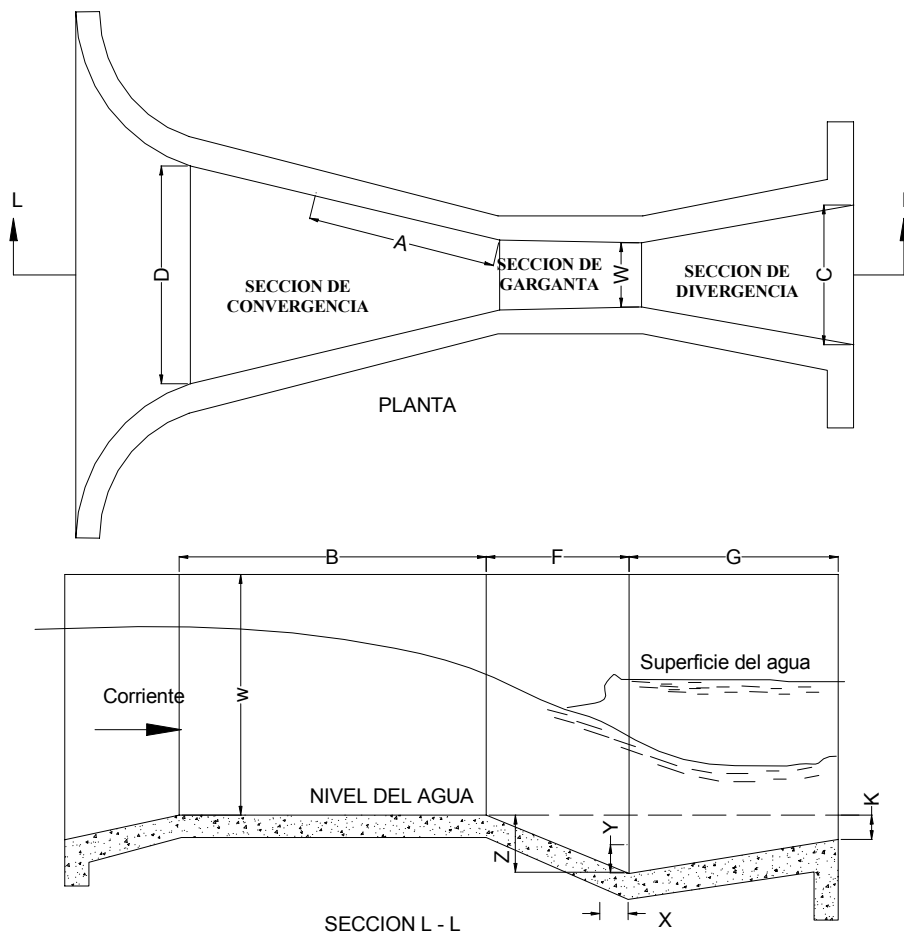
#### **a) Canal de aforo Parshall**

Llamado así por el nombre del ingeniero de regadío estadounidense que lo concibió, se describe técnicamente como un canal Venturi o de onda estacionaria o de un aforador de profundidad crítica. Sus principales ventajas son que sólo existe una pequeña pérdida de carga a través del aforador, que deja pasar fácilmente sedimentos o desechos, que no necesita condiciones especiales de acceso o una poza de amortiguación y que tampoco necesita correcciones para una sumersión de hasta el 70%. En consecuencia, es adecuado para la medición del caudal en los canales de riego o en las corrientes naturales con una pendiente suave. El principio básico se ilustra en la Figura 10.13. El aforador está constituido por una sección de convergencia con un piso nivelado, una garganta con un piso en pendiente hacia aguas abajo y una sección de divergencia con un piso en pendiente hacia aguas arriba. Gracias a ello el caudal avanza a una velocidad crítica a través de la garganta y con una onda estacionaria en la sección de divergencia.

Con un flujo libre el nivel del agua en la salida no es lo bastante elevado como para afectar el caudal a través de la garganta y, en consecuencia, el caudal es proporcional al nivel medido en el punto especificado en la sección de convergencia (Figura 10.13). La relación del nivel del agua aguas abajo con el nivel aguas arriba se conoce como el grado de sumersión; una ventaja del canal de aforo Parshall es que no requiere corrección alguna hasta un 70% de sumersión

La dimensión de los aforadores con un ancho de garganta de uno a ocho pies se indica en la Tabla 10.3 y en la Figura (10.14)

Para fabricar los canales de aforo Parshall se han utilizado muy diversos materiales. Se pueden prefabricar a partir de láminas de metal o madera o se pueden construir sobre el terreno con ladrillo y argamasa utilizando un armazón de metal prefabricado para garantizar mediciones exactas. Si hacen falta varios aforadores, se pueden moldear en hormigón empleando tableros reutilizables. Se pueden tomar medidas eventuales de la profundidad del caudal a partir de un puesto de aforo establecido en el muro del canal o, si se requieren registros constantes, es posible instalar en una poza de amortiguación colocada en una situación específica un registrador de flotante.



**Figura 10.14 Dimensiones de un canal de aforo Parshall (de USDA SCS 1965)**

Ancho de la Garganta "W" (pies)	A (pies, pulgadas)	B	C	D
1	3-0	4-4 7/8	2-0	2-9 1/4
1½	3-2	4-7 7/8	2-6	3-4 3/8
2	3-4	4-10 7/8	3-0	3-11 ½
3	3-8	5-4 3/4	4-0	5-1 7/8
4	4-0	5-10 5/8	5-0	6-4 1/4
5	4-4	6-4 ½	6-0	7-6 5/8
6	4-8	6-10 3/8	7-0	8-9
7	5-0	7-4 ½	8-0	9-11 3/8
8	5-4	7-10 1/8	9-0	11-1 3/4

**Tabla 10.3**      **Dimensiones de algunos canales de aforo Parshall.**

### b.) Aforadores en H

El Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos diseñó un grupo de aforadores especiales denominados aforadores H para medir los caudales con exactitud y continuidad a partir de parcelas de escorrentía o de pequeñas cuencas experimentales. Los requisitos del diseño eran que el aforador debería medir caudales escasos con exactitud, pero tener también una buena capacidad para caudales elevados, y que no necesitara una poza de amortiguación. Otro requisito consistía en que pudiera dar paso a una escorrentía que contuviera una fuerte carga de sedimentos. La solución práctica que se encontró en los Estados Unidos como para la construcción de canales de aforo Parshall fue dar las especificaciones originales en pies y utilizar las conversiones métricas para el caudal (Bos 1976).

Existen tres tipos de aforadores en H. El más pequeño (HS) puede registrar caudales de hasta 22 l/s, el tipo normal (H) puede medir caudales de hasta 2,36 m³/s y el mayor (HL) caudales de hasta 3,32 m³/s. Cada tipo se puede construir en diversas dimensiones que se determinan por la profundidad máxima del caudal (D); las dimensiones de fabricación se dan como proporciones de D, pero las proporciones de los lados del aforador, son diferentes para cada uno de los tres tipos HS, H y HL. El tipo HS se puede construir en cuatro dimensiones, de 0,4 a 1,0 pie, el tipo H en ocho dimensiones de 0,5 a 4,5 pies y el tipo HL en dos dimensiones, de 3,5 y 4,0 pies. Existen, por tanto, 14 posibles especificaciones de fabricación y 14 tablas de calibración diferentes. A título de ejemplo, en la Figura 10.15 se dan las dimensiones del tipo H y en la tabla 10.4 la calibración del tipo H de la dimensión de 1,5 pies (0,457 m).

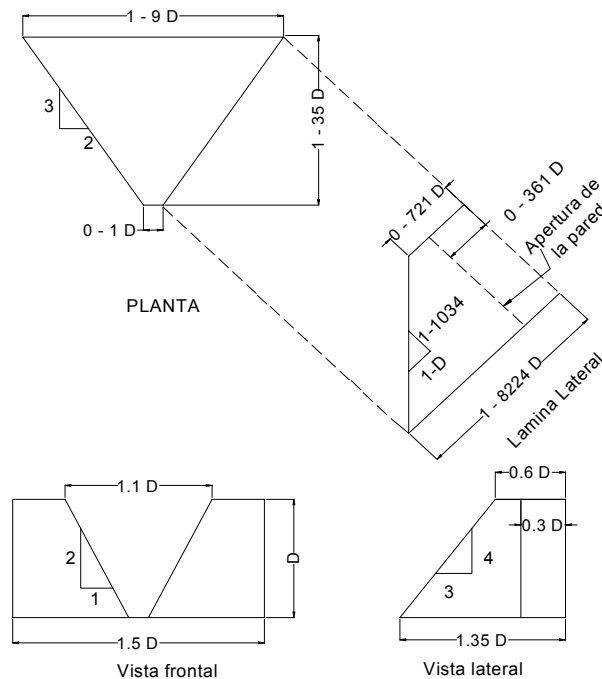
Los aforadores en H pueden funcionar parcialmente sumergidos y la corrección se indica en la Figura 10.15. La sumersión aguas abajo produce un efecto de remanso del agua en el aforador y un aumento de la profundidad del caudal. La curva de corrección muestra en cuánto se debe reducir la profundidad medida en el aforador para obtener la profundidad equivalente de un caudal libre con el fin de utilizar las tablas de calibración.

Los aforadores en H se suelen prefabricar con láminas de metal y pueden utilizarse en forma provisional empleando sacos de arena para formar un canal de acceso o también como instalaciones permanentes, utilizando hormigón o mampostería. Al igual que con el canal de aforo Parshall, se pueden efectuar mediciones en un punto de la profundidad del caudal a partir de una plancha de medición situada en el muro del canal, o en un registro constante a partir de un registrador de un flotador

h (mm)	0	2	4	6	8
20	0,27	0,32	0,37	0,42	0,48
40	0,91	1,00	1,09	1,18	1,28
60	1,75	2,08	2,21	2,35	2,49
80	3,43	3,60	3,78	3,96	4,15
100	5,38	5,60	5,83	6,06	6,29
150	12,5	12,9	13,2	13,6	14,0
200	23,3	23,8	24,3	24,9	25,4
250	38,2	38,9	39,6	40,3	41,0
300	57,7	58,6	59,5	60,4	61,3
350	82,3	83,4	84,5	85,6	86,7
400	112	114	115	116	118
450	148	150			

**Tabla 10.4 Descarga de caudal libre a través de un aforador en H de 1,5 pies en l/s Tomado de Bos (1976)**

En todos los aforadores existe una curva del cono de depresión, es decir, el nivel de superficie descende cuando el agua se acelera en el punto de descarga; es esencial, por consiguiente, que la medida de la profundidad del caudal se efectúe exactamente a la distancia especificada aguas arriba desde la sección de control.



**Figura 10.15- Proporciones del aforador en H (de USDA-ARS 1979)**

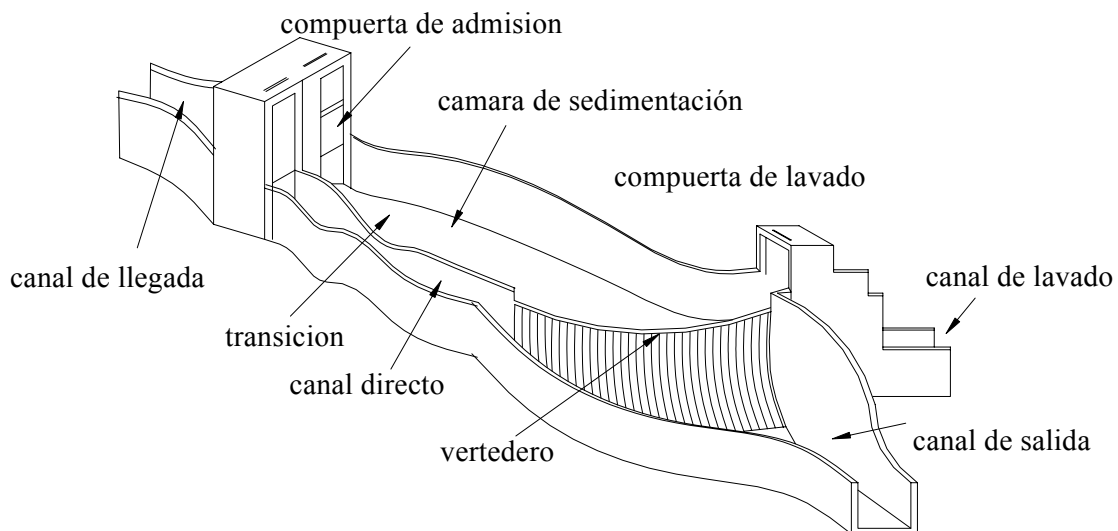
Los aforadores en H tienen otras dos ventajas. El agua fluye a través de la escotadura rápidamente de manera que no se produce depósito de sedimentos en el aforador. Por otro lado, el diseño de salida con una escotadura con pendiente del fondo hacia aguas arriba no queda

obstruido por residuos flotantes. Si en la escotadura se retiene algún residuo, el agua se remansa hasta que la obstrucción es arrastrada por la corriente por encima de la escotadura.

### 10.8 DESARENADOR.

Un Desarenador es una estructura hidráulica que sirve para separar (decantar) y remover (evacuar), las partículas finas en suspensión que lleva el agua de un canal. Este material ocasiona perjuicios a las obras. El dimensionamiento de esta obra se fundamenta en dos condiciones:

- Deberá permitir la retención del material sólido que tenga diámetros mayores al diámetro máximo permitido por las condiciones de escurrimiento de la estructura de conducción.
- Los sedimentos atrapados deberán ser rápidamente evacuados durante las operaciones de limpieza.



**Figura 10.16, Esquema de un Desarenador de lavado intermitente.**

Los desarenadores están compuestos por tres partes, como se muestra en la Figura 10.16:

- *Transición de entrada*, la cual une el canal con el desarenador.
- *Cámara de sedimentación*, en la cual las partículas sólidas caen al fondo, debido a la disminución de la velocidad producida por el aumento de la sección transversal. Según Dubuat, las velocidades límites por debajo de las cuales el agua cesa de arrastrar diversas materias son:
 

Para la arcilla	0,081 m/s.
Para la arena fina	0,16 m/s.
Para la arena gruesa	0,216 m/s.

De esto se tiene el diseño de desarenadores para una velocidad entre 0,1 m/s y 0,4 m/s con profundidad media entre 1,5 m y 4 m. con sección transversal rectangular o trapezoidal dando mejor resultado hidráulico la sección trapezoidal para pendientes entre 1:5 y 1:8.

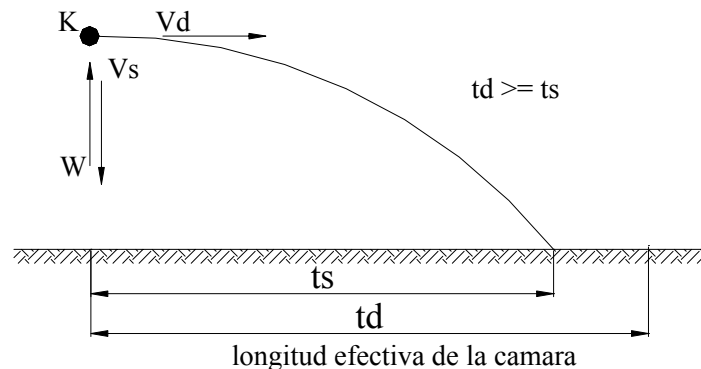
- *Vertedero*, al final de la cámara se construye un vertedero sobre el cual pasa el agua limpia hacia el canal. Las capas superiores son las que primero se limpian, es por esto que la salida del agua desde el desarenador se hace por medio de un vertedero, que hasta donde sea posible debe trabajar con descarga libre. La velocidad límite es 1 m/s, para evitar turbulencias.



- *Compuerta de lavado*, sirve para desalojar los materiales depositados en el fondo, para facilitar el movimiento de las arenas hacia la compuerta, al fondo del desarenador se le da una gradiente fuerte del 2 al 6%, el incremento de la profundidad obtenido por efecto de esta gradiente no se incluye en el tirante de calculo, si no que el volumen adicional se lo toma como deposito para las arenas sedimentadas entre dos lavados sucesivos.
- *Canal directo*, por el cual se da servicio mientras se esta lavando el desarenador, tiempos cortos.

### **Diseño hidráulico del desarenador.**

El principio consiste en reducir la corriente del agua a una velocidad mínima y distribuirla uniformemente a lo largo de la sección de la cámara. El tiempo de transcurso del agua por la cámara, no debe ser menor que el tiempo que la partícula en suspensión necesite para depositarse. El tiempo de sedimentación ( $t_s$ ) debe ser mas corto que el tiempo de recorrido o desplazamiento del agua a lo largo de la cámara. En general las materias en suspensión, están compuestas de partículas de diferentes tamaños de grano. El agua ingresa al desarenador con turbulencia. Para lograr una corriente tranquila uniforme hay que prever un tramo de transición bien diseñado.



**Figura 10.17, Curva esquemática de un grano de arena "K", Depositándose bajo la influencia de la turbulencia.**

Donde:

- Vd: Velocidad horizontal.
- Vs: Velocidad vertical de sedimentación.
- W: Empuje ascensional dinámico que se debe a turbulencias.
- ts: Tiempo de sedimentación.
- td: Tiempo de desplazamiento.

Según Pöpel. Vs es función del movimiento del agua del estado de la corriente, de la viscosidad cinemática de la forma y dimensión de la partícula en suspensión y el peso específico de las partículas. Depende del estado de escurrimiento durante el proceso de sedimentación, por lo tanto del número de Reynolds.

$Re < 1$  Ley de Stokes (flujo laminar).

$$V_s = (s - 1) \frac{g}{18\nu} d^2 \quad (10-40)$$

$Re > 2000$  Ley de Newton (flujo turbulento)

$$V_s = \sqrt{(s-1) \frac{4gd}{3c}} \quad (10-41)$$

$1 < Re < 2000$  Zona en transición según Rubey

$$V_s = \sqrt{(S-1) \frac{49d}{3Cd}}; \quad Cd = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34 \quad (10-41a)$$

d: diámetro granular.

S: Peso específico de los granos dividido por la masa específica del agua. (2,5 – 2,7 g/cm<sup>3</sup> para arena).

n: viscosidad cinemática de agua (0,0132 cm<sup>2</sup>/s 10° C en agua limpia).

C: Coeficiente de resistencia de los granos (0,5 para granos redondos).

Sin embargo en el desarenador predomina una corriente turbulenta con un número de Reynolds:

$$Re = \frac{Vd * D}{\nu} \quad (10-42)$$

D: diámetro equivalente.

$$4 \frac{F}{U} = 4 \frac{B * h}{B + 2h} = 4R_h \quad (10-43)$$

Donde:

B: ancho de la cámara.

H: altura efectiva.

F: área transversal.

U: Perímetro mojado.

R<sub>h</sub>: Radio hidráulico.

La velocidad horizontal no debe sobrepasar un valor máximo para que:

- La partícula pueda depositarse.
- La partícula depositada no sea arrastrada nuevamente.
- La partícula en proceso de descenso no sea puesta nuevamente en flotación.

$$Vd = a\sqrt{d} \quad (10-44)$$

Donde: Vd: velocidad del flujo en tanque (cm/s).

d: diámetro granular (mm).

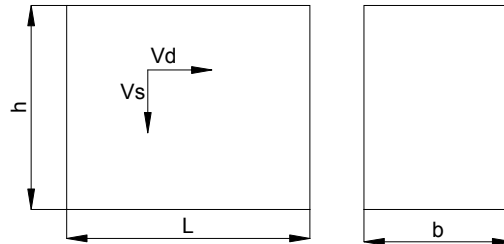
a: Constante en función del diámetro,

a	d (mm)
51	0.1
44	0.1 – 1
36	1

**Tabla 10.5**

*Calculo del diámetro de las partículas a sedimentar*, en esta parte se define el diámetro máximo de las partículas que se van a depositar en el desarenador, por ejemplo en sistemas hidroeléctricos es 0,25mm, en sistemas de riego se acepta hasta d =0,5 mm.

*Calculo de las dimensiones del tanque*, despreciando el efecto del flujo turbulento sobre la velocidad de sedimentación, se pueden plantear las siguientes relaciones:



Caudal:  $Q = b h v$ , entonces el ancho del desarenador:  $b = Q/h V$

Tiempo de caída:  $V_s = \left(\frac{h}{t}\right) \rightarrow t = \frac{h}{V_s}$  (10-45)

Tiempo de sedimentación:  $V_d = \frac{L}{t} \rightarrow t = \frac{L}{V_d}$  (10-46)

Igualando (10-45) con (10-46):  $\frac{h}{V_s} = \frac{L}{V_d}$

De donde la longitud, aplicando la teoría de simple sedimentación es:  $L = \frac{h \cdot V_d}{V_s}$  (10-47)

*Considerando los efectos retardatorios de la turbulencia*, en el cálculo de los desarenadores de bajas velocidades se puede realizar una corrección, mediante el coeficiente K, que varía de acuerdo a las velocidades de escurrimiento en el tanque, es decir:

$$L = K \frac{h \cdot V_d}{V_s} \quad (10-48)$$

Donde K se obtiene de la tabla (10.6)

Velocidad de escurrimiento (m/s)	K
0.20	1.25
0.30	1.50
0.50	2

**Tabla 10.6, Coeficiente para el cálculo de desarenadores de baja velocidad.**

En los desarenadores de altas velocidades, entre 1 m/s a 1.50 m/s, Montagre, precisa que la caída de los granos de 1 mm están poco influenciados por la turbulencia, el valor de K en términos del diámetro, se muestra en la tabla 10.7

Dimensiones de las partículas a eliminar d (mm)	K
1	1
0.50	1.3
0.25-0.30	2

**Tabla 10.7, Coeficiente para el cálculo de desarenadores de alta velocidad.**

*Cálculo de la longitud de la transición*, esta longitud se la calcula con las formulas del capítulo 8, con la formula:

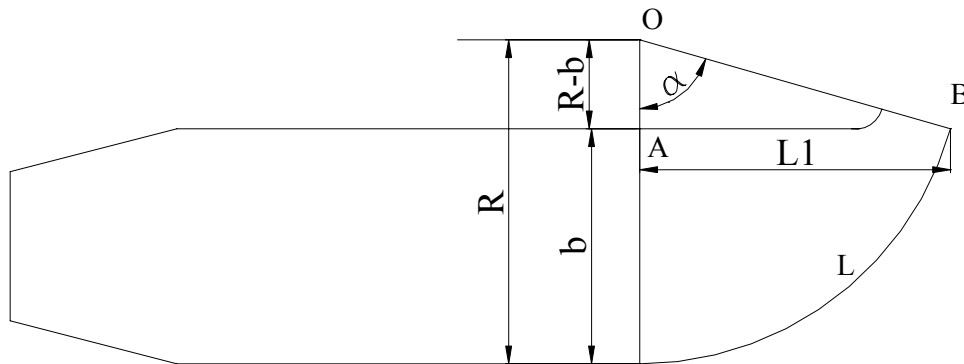
$$L = \frac{T1 - T2}{2 \tan 12.5^\circ}$$

*Cálculo de la longitud del vertedero*, con la formula para vertederos se despeja L:

$$Q = CLh^{3/2} \quad \text{Despejando L: } L = \frac{Q}{Ch^{3/2}} \quad (10-49)$$

Por lo general la longitud del vertedero L, es mayor que el ancho del desarenador b, lo que se debe ubicar a lo largo de una curva circular en uno de los muros laterales y continua hasta la compuerta de lavado, como se muestra en la Figura 10.16.

*Calculo del ángulo central a y el radio R con que se traza la longitud del vertedero*, en la Figura 10.18, se muestra un esquema del tanque del desarenador donde se muestran los elementos a, R y L.



**Figura 10.18, Esquema del tanque desarenador.**

Calculo de a: se sabe que:

$$\frac{2\pi R}{L} = \frac{360}{a}$$

De donde:

$$L = \frac{2\pi R \alpha}{360} = \frac{\pi R \alpha}{180}$$

$$\text{Despejando R se tiene: } R = \frac{180L}{\pi \alpha} \quad (10-50)$$

De la Figura 10.18, tomando el triangulo OAB, se tiene:  $\cos \alpha = \frac{R-b}{R}$

De donde  $R \cos \alpha = R - b$

Despejando R se tiene:  $R = \frac{b}{1 - \cos \alpha}$  (10-51)

Igualando las ecuaciones (10-50), (10-51), se tiene:  $\frac{b}{1 - \cos \alpha} = \frac{180L}{\pi \alpha}$

Donde la incógnita es a:  $\frac{\alpha}{1 - \cos \alpha} = \frac{180L}{\pi * b}$  (10-52)

*Calculo de la longitud de la proyección longitudinal del vertedero (L<sub>1</sub>), de la Figura 10.18, tomando el triangulo OAB, se tiene:*

$$\text{sen} \alpha = \frac{L_1}{R} \rightarrow L_1 = R \text{sen} \alpha \quad (10-53)$$

Calculo de la longitud promedio (L<sub>m</sub>),

$$L_m = \frac{L + L_1}{2} \quad (10-54)$$

Calculo de la longitud total del tanque desarenador:

$$L_T = L_t + L + L_m \quad (10-55)$$

Donde:

L<sub>T</sub>: longitud total.

L<sub>t</sub>: longitud de la transición de entrada.

L: longitud del tanque.

L<sub>m</sub>: longitud promedio por efecto de la curvatura del vertedero.

### **Cálculos complementarios.**

*Calculo de la caída del fondo,*  $\Delta Z = L * S$  (10-56)

Donde: DZ: diferencia de catas del fondo del desarenador.

L = L<sub>T</sub> - L<sub>t</sub>

S= pendiente del fondo del desarenador (2%)

*Calculo de la profundidad del desarenador frente a la compuerta de lavado:*  $H = h + \Delta Z$

Donde: H: profundidad del desarenador frente a la compuerta de lavado.

h: profundidad de diseño del desarenador.

*Calculo de la altura de cresta del vertedero con respecto al fondo:*  $h_c = H - 0.25$

h<sub>c</sub>: altura de la cresta del vertedero con respecto al fondo.

H: profundidad del desarenador frente a la compuerta de lavado.

Calculo de las dimensiones de la compuerta de lavado, suponiendo una compuerta cuadrada de lado L, el área será  $A = l^2$ , la compuerta funciona como un orificio, siendo su ecuación:

$$Q = C_d A_o \sqrt{2gh} \quad (10-57)$$

Donde: Q: caudal a descargar por el orificio.

$C_d$ : coeficiente de descarga 0.60 para un orificio de pared delgada.

$A_o$ : área del orificio, en este caso igual al área A de la compuerta.

h: carga sobre el orificio (desde la superficie del agua hasta el centro del orificio).

g: aceleración de la gravedad, 9.81 m/s<sup>2</sup>.

Calculo de la velocidad de salida:  $v = \frac{Q}{A_o}$

Donde:

V: velocidad de salida por la compuerta, debe ser de 3 a 5 m/s, para el concreto el límite erosivo es de 6 m/s.

Q: caudal descargado por la compuerta.

$A_o$ : área del orificio, en este caso igual al área A de la compuerta.

## 10.9 EJERCICIOS DE APLICACIÓN.

### **Ejemplo 1. (Diseño transiciones)**

En un tramo del perfil longitudinal de un canal que conduce 5 m<sup>3</sup>/s, se tiene que construir una transición de salida para unir un canal de sección rectangular con ancho de solera 3 m y  $n = 0.015$ , con un canal trapezoidal con talud 1.5 y ancho de solera 5m, el cual tiene una pendiente de 0.5% y coeficiente de rugosidad de 0.025; el desnivel de fondo entre ambos tramos es de 0.10 m, como se muestra en la siguiente figura. Considerando el coeficiente  $K=0.2$ , realizar el diseño de una transición: Recta y Alabeada.

Datos: Para la transición recta.  $Q = 5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,

Sección recta:  $T1 = bf = 3.00 \text{ m}$   $n = 0.015$   $s = 0.005$

Sección trapezoidal: T2 en función de la ecuación de Manning. Talud  $z = 1.5$   $n = 0.025$   $K = 0.2$   
ancho solera =  $bc = 5.00 \text{ m}$ .

Se tiene la ecuación 10.3:  $L = \frac{T1 - T2}{2 \cdot \tan 22^\circ 30'}$ , ecuación practica de transición recta.

De la ecuación de Manning:  $Q = n \cdot \frac{A^{5/3}}{P^{2/3}} S^{1/2}$

Dado que canales trapezoidales<sup>2</sup>:  $P = b + 2y\sqrt{1+z^2}$  y  $A = (b + z \cdot y) \cdot y$

Reemplazando en Manning.  $5 = \frac{1}{0.025} \frac{((5 + 1.5y)y)^{5/3}}{(5 + 2y\sqrt{1+1.5^2})^{2/3}} 0.005^{1/2}$

Despejando y se tiene:  $yc = 0.526\text{m}$ ,

<sup>2</sup> Pag. 21 Ven Te Chow, Hidráulica de Canales abiertos

El ancho en la sección trapezoidal es<sup>2</sup>:  $T2 = b + 2 \cdot z \cdot y = 5 + 2 \cdot 1.5 \cdot 0.526 = 6.578m$ ,

Entonces: 
$$L = \frac{T1 - T2}{2 \cdot \tan 22^\circ 30'} = \frac{3 - 6.578}{2 \cdot \tan 22^\circ 30'} = 4.32m.$$

### DISEÑO TRANSICIÓN ALABEADA:

Longitud de la ecuación 10.5: 
$$b = \frac{bc - bf}{2} = \frac{5 - 3}{2} = 1m.$$

De la ecuación 10.4: 
$$L = 4.7 \cdot b + 1.65 Zc \cdot yc = 4.7 \cdot 1 + 1.65 \cdot 1.5 \cdot 0.526 = 6.00m.$$

Calculo ancho solera de fondo de la ec 10.6: 
$$b = bf + (bc - bf) \frac{x}{L} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{x}{L} \right)^{nb} \right]$$

$nb = 0.8 - 0.26 \cdot 1.5^{0.5} = 0.482$  entonces: 
$$b = 3 + (5 - 3) \frac{x}{6} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{x}{6} \right)^{0.482} \right] \quad (1)$$

Calculo del talud en cada sección 10.6.a: 
$$Z = Zc \left[ 1 - \left( 1 - \frac{x}{L} \right)^{1/2} \right] = 5 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{x}{6} \right)^{0.5} \right] \quad (2)$$

Calculo del desnivel de fondo en cada sección: ec. 10.7: 
$$\Delta h_i = \frac{\Delta h}{6} x \quad (3)$$

X (formula 1)	B (2)	Z (3)	Dh
0.00	3.00	0.00	0.00
0.50	3.007	.064	0.0083
1.00	3.03	0.13	0.0166
1.50	3.06	0.20	0.025
2.00	3.12	0.275	0.033
2.50	3.19	0.35	0.0416
3.00	3.28	0.44	0.05
3.50	3.40	0.53	0.0583
4.00	3.55	0.63	0.066
4.50	3.73	0.75	0.075
5.00	3.96	0.89	0.083
5.50	4.28	1.07	0.0916
6.00	5.00	1.50	0.10

**Tabla solución a formulas (1), (2) y (3)**

En resumen el diseño de la sección de transición se da en la tabla para tramos, cada 0.50 m. El borde libre en transiciones 0.25, para tirantes entre 0.40 a 0.60 m.

**Ejemplo 2. (Diseño caídas)**

Dados los siguientes datos hidráulicos de un canal en sus tramos superior e inferior, y el desnivel a salvar. Como la Figura 10.8

Datos:  $Q = 0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $A = 0.15 \text{ m}^2$   
 $B = 0.20 \text{ m}$ ,  $P = 1.048 \text{ m}$ .  
 $d = 0.30 \text{ m}$ ,  $R = 0.143 \text{ m}$ .  
 $m = 1:1$ ,  $n = 0.016$  (concreto)  
 $s = 0.001$ ,  $v = 0.54 \text{ m/s}$ .  
 $F = 1.50 \text{ m}$ , (desnivel a salvar).

Determinación de la sección de control, del la ecuación 10.26 se tiene:

$$d1 + hv1 + D1 = dc + hvc + he$$

$$d1 = 0.30 \text{ m},$$

$$hv1 = v^2/2g = (0.54)^2/19.62$$

$$hv1 = 0.015 \text{ m}.$$

$D1 =$  se desprecia por pequeña.

$$d1 + hv1 = 0.30 + 0.015 = 0.315 \text{ m}.$$

Se propone una sección de control rectangular de ancho  $B = 0.20 \text{ m}$ , el tirante crítico en esta sección se obtiene con la expresión 10.27:

$$dc = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 g}} = \left( \frac{0.08^2}{0.20^2 \cdot 9.81} \right)^{1/3} = 0.25 \text{ m}.$$

La carga de velocidad en la sección crítica de acuerdo a la ecuación 10.29, es igual a:

$$hvc = \frac{1}{2} dc = \frac{0.25}{2} = 0.125 \text{ m}.$$

Calculo de la velocidad crítica:

$$hvc = Vc^2 / 2g, \text{ despejando } vc \text{ tenemos: } vc = \sqrt{2g \cdot hvc}$$

$$\text{Sustituyendo tenemos: } vc = \sqrt{19.62 \cdot 0.125} = 1.57 \text{ m/s}.$$

Como el paso de la sección del canal a la sección de control se hace sin transición de sección, las perdidas de carga se determinan tomando los cinco decimos del incremento de las cargas de velocidad, entre la sección de control y el canal.

$$he = 0.5 \frac{v_c^2 - v^2}{2g} \quad \text{Formula de perdidas en transición.}$$

$$\text{Sustituyendo la ecuación se tiene: } he = 0.5 \cdot \frac{1.57^2 - 0.54^2}{19.62} = 0.055 \text{ m}.$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación 10.26 segundo termino:

$$dc + hvc + he = 0.25 + 0.125 + 0.055 = 0.430 \text{ m}.$$



Como en la ecuación 10.26 el segundo miembro resulto mayor que el primer miembro es necesario ampliar la sección de control. El cálculo se repite a partir del tirante crítico.

Se propone un valor nuevo de B igual a 0.32 m; cuyo tirante crítico nuevo es:

$$dc = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 g}} = \left( \frac{0.08^2}{0.32^2 \cdot 9.81} \right)^{1/3} = 0.185m.$$

la carga de velocidad en la sección critica es:

$$hvc = \frac{1}{2} dc = \frac{0.185}{2} = 0.093m.$$

La velocidad crítica es:

$$vc = \sqrt{2g \cdot hvc} = \sqrt{19.6 \cdot 1.82} = 1.35m/s$$

Las pérdidas de carga se obtienen tomando en cuenta que solo se hace una transición de plantilla sin hacer cambio de sección, por lo que:

$$he = 0.5 \cdot \frac{1.35^2 - 0.54^2}{19.62} = 0.039m.$$

Sustituyendo valores en la ecuación:

$$dc + hvc + he = 0.185 + 0.093 + 0.039 = 0.317$$

Debido a que este resultado es igual a  $d1 + hv1 = 0.315m$ , se acepta como buena la sección propuesta.

Calculo del colchón hidráulico, para obtener la longitud del colchón L, se supone una profundidad P del mismo. Para este ejemplo en donde la altura de la caída es  $F = 1.50m$ , se supone una profundidad  $P = 0.30m$ , de acuerdo a esto se tiene:

$$Y = P + F \\ Y = 0.30 + 1.50 = 1.80 m$$

De acuerdo con la formula 8.32:

$$Xn = v_c \sqrt{\frac{2Y}{g}} = 0.452 v_c Y^{1/2} = 0.451 \cdot 1.35 \cdot 1.8^{1/2} = 0.82m.$$

Si se sabe que:

$$L = 2 Xn = 2 \times 0.82 = 1.62m.$$

Se adopta (redondeando):

$$L = 1.65 m.$$

La profundidad del colchón se obtiene con la expresión 8.33:

$$P = L / 6 = 1.65 / 6 = 0.28 m.$$

Como la altura P, es casi igual a la calculada, se acepta la profundidad propuesta de  $P = 0.30m$ .

### Ejemplo 3.

Se debe diseñar un desarenador para un  $Q_{maximo}$ , de grano de 0.3 mm cuando el caudal de toma es  $0.5 m^3/s$ , para una temperatura de agua de  $10^\circ C$ , dado el ancho del canal igual a 1.50 m, peso específico del grano  $2.65 g/cm^3$

**Solución:**

Datos:

 $S = 2.65 \text{ g/cm}^3$  (peso específico de los granos). $d = 0.0003 \text{ m}$ . $Q = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ . $\nu = 0.00000132 \text{ m}^2/\text{s}$ , (viscosidad cinemática de agua).Paso 1) calcular  $V_s$ , asumir flujo laminar:  $V_s = (s-1) \frac{g}{18\nu} d^2$ 

$$V_s = (2.65 - 1) \frac{9.81}{18 \cdot 0.00000132} 0.0003^2 = 0.061 (\text{m/s})$$

$$\text{Re} = \frac{V_s \cdot d}{\nu} = \frac{0.061 \cdot 0.0003}{0.00000132} = 13.93 \Rightarrow \text{Re} > 1, \text{régimen en transición.}$$

Para régimen en transición se tiene:  $V_s = \sqrt{(S-1) \frac{49d}{3Cd}} (1); \quad Cd = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{3}{\sqrt{\text{Re}}} + 0.34 (2)$ 

$$\text{Re} = \frac{V_s \cdot d}{\nu} (3)$$

Re (dato)	Cd ecuación (2)	Vs (m/s) ecuación (1)	Re ecuación (3)
1,000	27,340	0,017	3,908
3,900	8,013	0,032	7,219
7,219	4,781	0,041	9,346
9,346	3,889	0,046	10,362
10,362	3,588	0,047	10,788
10,788	3,478	0,048	10,958

**Cuadro, solución sistema de ecuaciones.**Paso 2) cálculo de las dimensiones del tanque.  $Q = V \cdot \text{área} = b \cdot h \cdot V$ 

$$L = \frac{h \cdot V_d}{V_s} \quad \text{De la ecuación (10-47), aplicando la teoría de simple sedimentación}$$

Donde:  $h = 0.8 \text{ m}$ , asumido.

$$V_d = a\sqrt{d} = 44\sqrt{3} = 21.4 \text{ cm/s} = 0.214 \text{ m/s. (tal que } a = 44 \text{ para } d = 0.3 \text{ mm).}$$

$$W = V_s = 0.048 \text{ m/s.}$$

$$L = \frac{h \cdot v}{w} = \frac{0.8 \cdot 0.24}{0.0484} = 4.00 \text{ m.}$$

$$b = \frac{Q}{V_d \cdot h} = \frac{0.5}{0.24 \cdot 0.8} = 2.60 \text{ m}$$

Entonces las dimensiones del tanque son:

$$L = 4.00 \text{ m.} \quad b = 2.60 \text{ m.} \quad h = 0.80 \text{ m.}$$

Tiempo de sedimentación.  $t = h/V_s = 0.80/0.048 = 16.67(s)$

Volumen de agua:  $v = Q \cdot t = 0.50 \cdot 16.67 = 8.33(m^3)$

Verificar la capacidad del tanque:  $Vol = b \cdot h \cdot L = 4.00 \cdot 0.8 \cdot 2.60 = 8.32(m^3)$

Calculo de la longitud del desarenador L, con turbulencia:  $L = K \frac{h \cdot V_d}{V_s} \quad (10-48)$

Donde: K = 1.25, de la tabla (10.6),

Entonces:  $L = K \frac{h \cdot V_d}{V_s} = 1.25 \frac{0.80 \cdot 0.24}{0.048} = 5.00(m)$

Paso 3) calculo Longitud de transición:  $L_t = \frac{T_1 - T_2}{2 \tan 12.5^\circ}$ , T1 en la sección del canal, T2 ancho desarenador.

Entonces:  $L_t = \frac{2.60 - 1.50}{2 \cdot \tan 12.5^\circ} = 2.48 = 2.50(m)$

Paso 4) cálculo de la longitud del vertedero.  $L = \frac{Q}{C h^{3/2}}$ , dada la ecuación de vertederos con C = 2 (para perfil tipo creager). Asumo una altura h = 0.15 (altura de carga sobre el vertedero)

Entonces:  $L = \frac{Q}{C h^{3/2}} = \frac{0.50}{2 \cdot 0.15^{3/2}} = 4.30(m)$

Ahora de la ecuación (10-52) calcular a:  $\frac{\alpha}{1 - \cos \alpha} = \frac{180L}{\pi \cdot b}$ , de donde:

$\frac{180 \cdot 2}{\pi \cdot 2.60} = 44.075 = \frac{\alpha}{1 - \cos \alpha}$ , en esta ecuación la incógnita es a resolviendo:  $a = 82.57^\circ$ .

$R = \frac{180L}{\pi \alpha}$  Ecuación (10-50), sustituyendo valores:  $R = \frac{180 \cdot 2}{\pi 82.57} = 2.98(m)$

$L_1 = R \sin \alpha = 2.98 \cdot \sin(82.57) = 2.96(m)$

$L_m = \frac{L + L_1}{2} = \frac{4.30 + 2.96}{2} = 3.63(m)$

Entonces la longitud total del desarenador es:  $L_T = L_t + L + L_m = 2.50 + 5.00 + 3.65 = 11.15 (m)$

Paso 5) cálculo de la caída de fondo: dado S = 2 por ciento

$\Delta Z = L \cdot S = (L_T - L_t) \cdot S = (11.15 - 2.50) \cdot 2/100 = 0.173 \approx 0.20(m)$

Paso 6) Cálculo de la profundidad del desarenador frente a la compuerta de lavado:

$H = h + \Delta Z$ ,  $h = 0.80$  m, (altura de diseño del desarenador).

Entonces:  $H = 0.80 + 0.20 = 1.00$  (m)

Paso 7) cálculo de la altura de cresta del vertedero con respecto al fondo:

$h_c = H - 0.15$ , sustituyendo:  $h_c = 1.00 - 0.15 = 0.85$  (m),

Paso 8) cálculo de las dimensiones de la compuerta de lavado:  $Q = C_d A_o \sqrt{2gh}$  ecuación para orificios.

Para un orificio cuadrado  $A_o = b^2$ ,  $h = H - b/2 = 1.00 - b/2$ , sustituyendo en la ec. De orificios para un  $C_d = 0.6$  (orificio de pared delgada):

Se tiene:  $0.5 = 0.6 * b^2 \sqrt{2 \cdot 9.81(1.00 - b/2)}$ , Resolviendo la ecuación:  $b = 0.46$  (m)

Tomar  $b = 0.40$  (m)

Entonces la velocidad de salida:  $v = Q / A_o = 0.5 / 0.40^2 = 3.125$  (m/s), este valor esta dentro de las permitidos entre 3 a 5 m/s. entonces todas las partes del desarenado restan diseñadas.

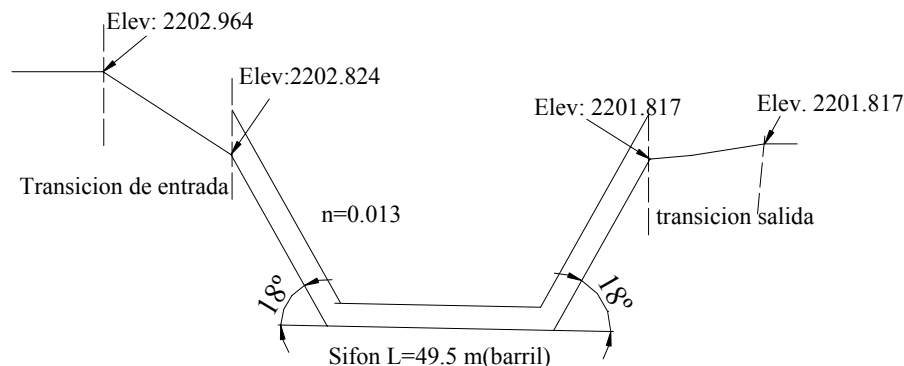
#### Ejemplo 4.

Diseñar un Sifón invertido como se muestra en la figura, para un gasto de  $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ , para un canal de llegada y salida revestidos de concreto, los datos del flujo en los canales son los siguientes.

Tirante normal del canal aguas arriba  $d = 0.30$  m.

Velocidad del agua en el canal aguas arriba,  $V = 0.541 \text{ m/s}$ .

Carga de velocidad en el canal aguas arriba  $h_{vc} = V^2/2g = 0.015$  m.



#### Solución.

Según lo expuesto antes se comienza con el diseño de transiciones, las longitudes tanto para entrada como salida, este paso obviaremos para abocarnos directamente al diseño de la tubería, entonces:

Paso 1) Elegir tubería, esta se elige de acuerdo a la disponibilidad del lugar, para el ejemplo tomar tubería de concreto.  $n = 0.013$  (número de Manning).

Paso 2) Velocidad media del agua en el conducto, esta velocidad como máximo puede alcanzar hasta 3 m/s, entonces asumir 2 m/s.

Paso 3) Diámetro de la tubería, de la ecuación de continuidad, se despeja el diámetro y se tiene:

$$D = 2\sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot V}} = 2\sqrt{\frac{0.08}{\pi \cdot 2}} = 0.2256m,$$

En pulgadas 8.80, redondeando a un diámetro comercial tomar un diámetro de 10 pulgadas.

Paso 4) Calcular las propiedades hidráulicas del conducto.

$$\text{Área del tubo: } A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0.254^2}{4} = 0.0507m^2$$

$$\text{Velocidad media en la tubería: } V = \frac{Q}{A} = \frac{0.08}{0.0507} = 1.58m/s$$

$$\text{Carga de velocidad en la tubería: } h_v = \frac{V^2}{2 \cdot g} = \frac{1.58^2}{2 \cdot 9.81} = 0.127 \approx 0.13m$$

$$\text{Radio hidráulico para sección circular: } R = \frac{D}{4} = \frac{0.254}{4} = 0.064m$$

Paso 5) Calcular las pérdidas:

a) Perdida por transición de entrada. Ecuación (10-18)

$$h_{te} = 0.4 \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2g} = 0.4 \frac{(0.13 - 0.015)}{2 \cdot 9.8} = 0.046m$$

b) Perdida por entrada al conducto, ecuación (10-22), para  $K_e = 0.5$ , entrada de concreto.

$$h_3 = K_e \frac{v_{tub}^2}{2g} = 0.5 \cdot 0.127 = 0.064m$$

c) Perdida por fricción: primero hallar S con la ecuación de Manning. Y la longitud del grafico es 49.5 m.

$$\text{Despejando S de Manning: } S = \left( \frac{V \cdot n}{R^{2/3}} \right)^2 = \left( \frac{1.58 \cdot 0.013}{0.064^{2/3}} \right)^2 = 0.0166$$

$$\text{De la ecuación (10-23): } H_f = S \cdot L = 0.0166 \cdot 49.5 = 0.824m$$

d) Perdida por codos, de la grafica el ángulo en ambos lechos es igual a  $18^\circ$ , en la ecuación (10-24)

$$\text{Con } K_c = 0.25 \text{ se tiene: } h_c = k_c \sqrt{\frac{\Delta}{90^\circ}} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0.25 \sqrt{\frac{18}{90}} 0.13 = 0.0145m$$

Como son dos codos  $h_c = 0.028m$ .

e) perdida por transición de salida: ecuación (10-19)

$$h_{ts} = 0.7 \frac{(v_3^2 - v_4^2)}{2g} = 0.7 \frac{0.13 - 0.015}{2 \cdot 9.8} = 0.080m.$$

f) sumatoria de pérdidas:

$$ht = h_{te} + h_e + h_f + h_c + h_{ts} = 0.046 + 0.064 + 0.824 + 0.028 + 0.08 = 0.99m$$

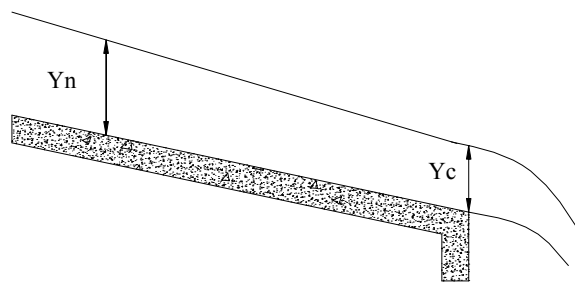
Paso 6) calcular diferencia de cotas, del grafico se tiene:

$$\Delta z = \cot a1 - \cot a4 = 2202.964 - 2201.817 = 1.147m$$

Como las pérdidas son menores a la diferencia de cotas el diseño del sifón invertido cumple con la relación:  $ht \leq \Delta z$ . entonces para estas condiciones usar tubería de 10 pulgadas de diámetro.

### Ejemplo 5.

A través de un canal que termina en caída brusca, circulan  $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$  de agua. Sabiendo que  $b = 0.85 \text{ m}$ ;  $s = 0.002 \text{ m/m}$ ,  $n = 0.012$ . Se pide determinar el perfil de la superficie libre del flujo en el canal de sección rectangular.



**Solución:**

**Paso 1)** calcular la profundidad normal de escurrimiento: aplicando la ecuación de Manning.

$$\frac{Q \cdot n}{S^{1/2}} = \frac{(b \cdot y)^{5/2}}{(b + 2 \cdot y)^{2/3}};$$

Reemplazando valores se tiene:

$$\frac{4.5 \cdot 0.012}{0.002^{1/2}} = \frac{(1.85 \cdot y)^{5/2}}{(1.85 + 2 \cdot y)^{2/3}}$$

Se obtiene  $Y = 1.05 \text{ m}$ .

**Paso 2)** Cálculo de la profundidad crítica:

$$Y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 \cdot g}} = \sqrt[3]{\frac{4.5^2}{1.85^2 \cdot 9.8}} = 0.84m$$

**Paso 3)** Elaborar la tabla que define la curva del flujo en el canal<sup>1</sup>:

Y	A	P	R	$v^2/2g$	E	$\Delta E$	Sf	$\hat{S}f$	So- $\hat{S}f$	$\Delta x$	x
0.84	1.55	3.53	0.44	0.427	1.267	---	0.0036				
0.90	1.67	3.65	0.46	0.372	1.272	-0.005	0.003	0.0033	-0.0013	3.82	3.82
1.00	1.85	3.85	0.48	0.302	1.302	-0.030	0.00226	0.0026	-0.0006	50.00	53.82
1.02	1.89	3.89	0.49	0.290	1.310	-0.008	0.00215	0.0022	-0.0002	40.00	43.82
1.03	1.91	3.91	0.44	0.284	1.314	-0.004	0.00209	0.0021	-0.0001	33.33	127.15
1.04	1.92	3.93	0.49	0.279	1.319	-0.005	0.00204	0.0020	-0.00007	71.43	198.58
1.05	1.94	3.95	0.49	0.274	1.323	-0.004	0.00199	0.0020	-0.0002	200.00	398.58

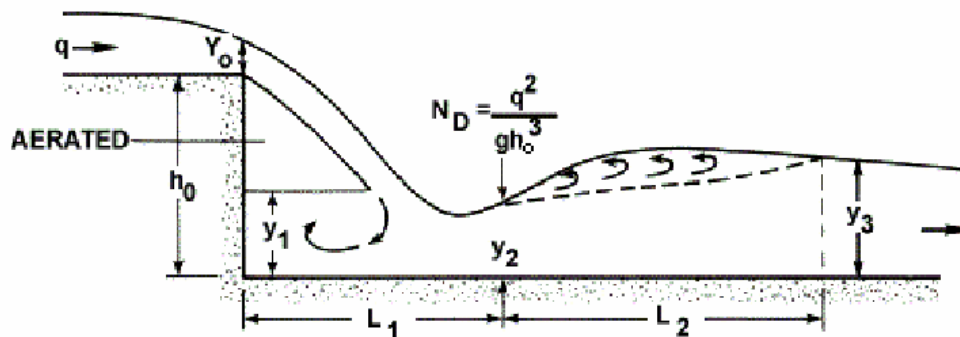
## 10.10 APLICACIÓN DE SOFTWARE PARA DISEÑO DE CAIDAS

El programa HY8Energy, de la FHWA, como se menciona en el capítulo 6, resuelve disipadores y además puede resolver caídas de hasta 4.5 m. El diseño esta basado en las condiciones de flujo y en la geometría de la sección de entrada de la caída. El programa diseña la altura del colchón como un dado disipador ubicado al final del colchon amortiguador de la caída

Los datos de entrada son:

- El caudal de entrada ( $m^3/s$ ).
- Ancho del canal de entrada (m).
- La pendiente del canal trapezoidal (hor. /ver.).
- El coeficiente de Manning para la sección superior.
- La Pendiente en el canal de salida (hor. / ver.).
- $V_o$ , Velocidad de aproximación en la cresta (m/s).
- $Y_o$ , altura de agua en la cresta.

Como muestra la siguiente Figura:



La salida de datos muestra la altura del colchón, la longitud del colchón, las propiedades hidráulicas de salida.

### 110.10.1 Ejemplo de aplicación.

Comprobar los resultados del ejemplo de aplicación 2.

Datos:  $Q = 0.08 m^3/s$ ,  $A = 0.15 m^2$

<sup>1</sup> Método del paso directo, Ven Te Chow.

$B = 0.20 \text{ m}$ ,  $P = 1.048 \text{ m}$ .  
 $d = 0.30 \text{ m}$ ,  $R = 0.143 \text{ m}$ .  
 $m = 1:1$ ,  $n = 0.016 \text{ (concreto)}$   
 $s = 0.001$ ,  $v = 0.54 \text{ m/s}$ .  
 $F = 1.50 \text{ m}$ , (desnivel a salvar).

**Solución.** La solución se muestra en la ventana: **External / Straight Drop Basin** de diseño del programa HY8Energy, como muestra la siguiente Figura  
La interpretación de resultados es la siguiente:

El programa calculo la altura de la sección de entrada  $Y_o = 0.298 \text{ m}$ , y la velocidad  $V_o = 0.539 \text{ m/s}$ , valores que son iguales a “d” y “v”.

En los datos de salida se tiene: la longitud del cuenco  $L_1 + L_2 = 1.347 \text{ m}$ , y la altura del colchón  $0.161 \text{ m}$ .

**Straight Drop Basin**

File External View Options Help

Input for the channel

Title: CAIDA Side slope: 1

Flow (Q): 0.08 m³/s Manning's n: 0.016

Width: 0.200 m New slope: 0.00100

Calculate new hydraulic characteristics

$V_o$ : 0.539 m/s

$Y_o$ : 0.298 m

TWL: 0.298 m

Input for the basin

Basin height (H0): 1.5 m

Output for the basin

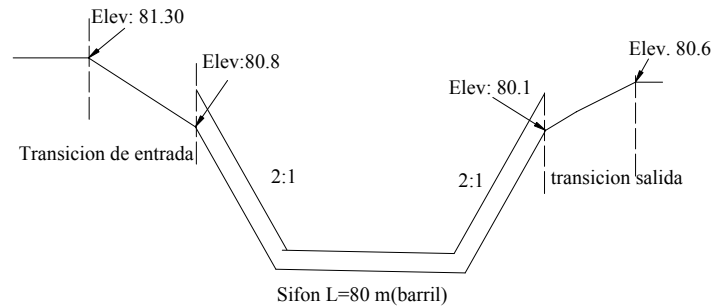
Length (LB): 1.699 m	Block Spacing: 0.080 m	Fro: 0.096
$L_1 + L_2$ : 1.347 m	Percent blocks: 40	$Y_c$ : 0.201 m
Width ( $W_o$ ): 0.200 m	End Sill Height: 0.080 m	H2: -1.068 m
Number of Blocks: 1	Ht. above TWL: 0.171 m	$Y_3$ : 0.432 m
Block Height: 0.161 m	Floor above grade: -0.132 m	$H_o/Y_c$ : -7.466
Block Width: 0.080 m	Upstream riprap: 0.603 m	H2/ $Y_c$ : -5.316

Ventana diseño Caídas HY8Energy

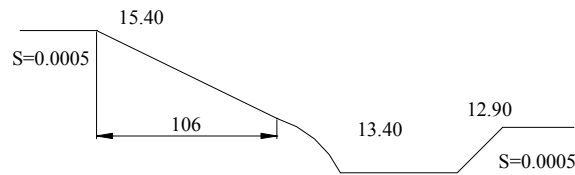


### 10.11 EJERCICIOS PROPUESTOS:

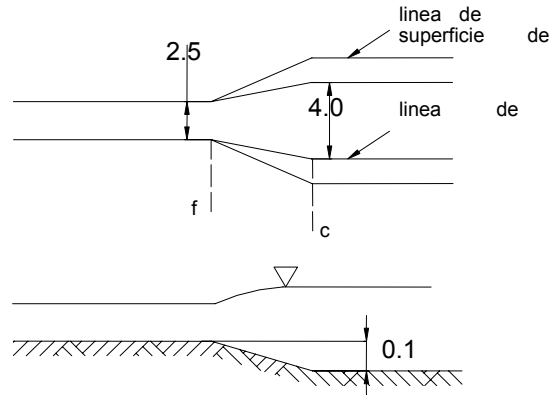
- 10.1** Un canal trapezoidal de ancho de solera de 1 m, talud 1, en tierra ( $n = 0.025$ ), está trazado con una pendiente de 0.55 y conduce un caudal de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ . En cierto tramo de su perfil longitudinal como se muestra en la figura se tiene que construir un sifón invertido. Realizar el diseño hidráulico del sifón invertido.



- 10.2** En un proyecto de riego, se tiene un canal lateral que conduce un caudal de  $0.35 \text{ m}^3/\text{s}$ , trazado en tierra ( $n=0.025$ ) de sección trapezoidal con un talud  $Z=1$ , ancho de solera  $b=0.75 \text{ m}$ , y trazado con una pendiente de 0.5%. En un tramo de su perfil longitudinal tiene que atravesar un perfil como se muestra en la figura.



- 10.3** Se debe diseñar un Desarenador para un  $Q_{\text{maximo}}$ , de grano de 0.3 mm. Cuando el caudal de toma es  $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ , para una temperatura de agua de  $10^\circ \text{C}$ , dado el ancho del canal igual a 0.5 m, peso específico del grano  $2.65 \text{ g/cm}^3$ .
- 10.4** Diseñar un desarenador para sedimentar las partículas que conduce un canal de riego revestido, con un caudal de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ , el desarenador debe ser de velocidad lenta ( $V_s = 0.2 \text{ m/s}$ ), peso específico del material  $2.43 \text{ gr/cm}^3$ .
- 10.5** En un tramo del perfil longitudinal de un canal que conduce  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ , se tiene que construir una transición de salida para unir un canal de sección rectangular con ancho de solera 2.5 m y  $n = 0.020$ , con un canal trapezoidal con talud 1.2 y ancho de solera 4 m, el cual tiene una pendiente de 0.8% y coeficiente de rugosidad de 0.025; el desnivel de fondo entre ambos tramos es de 0.15 m, como se muestra en la siguiente figura. Considerando el coeficiente  $K=0.2$ , realizar el diseño de una transición: Recta y Alabeada



**10.6** Diseñar una caída para un caudal de  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , para un canal trapezoidal de  $0.75 \text{ m}$  de ancho, talud lateral de  $1:1$ , con una altura de agua de  $0.45 \text{ m}$ , la pendiente del canal  $0.002$ , el canal es de concreto ( $n=0.014$ ), para una caída de  $2 \text{ m}$ . Comprobar con el programa HY8Energy.

#### 10.12 BIBLIOGRAFIA.

- ✍ Villón Béjar Máximo. "Diseño de estructuras hidráulicas". Instituto Tecnológico de Costa Rica – Departamento de Ingeniería Agrícola. Primera edición, agosto del 2000.
- ✍ Institución de enseñanza en ciencias agrícolas. "Manual de Proyectos de Pequeñas obras Hidráulicas para riego, Tomo 2, Chapingo 1980.
- ✍ Ven Te Chow. "Hidráulica de Canales Abiertos". Editorial McGraw Hill. Año 1994
- ✍ Silva Medina Gustavo A. Estructuras Hidráulicas, Última revisión, 29 de Julio de 2003