

## CAPITULO 7 - ESTRUCTURAS HIDRAULICAS EN CANALES

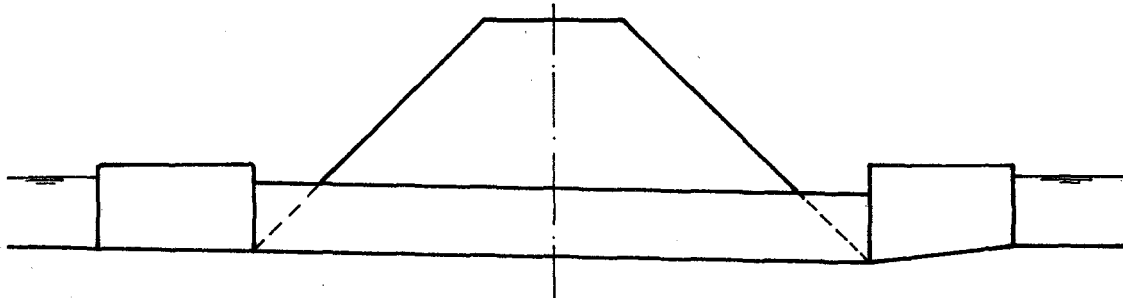
### 7.1 Descripción de las estructuras

Las estructuras aquí descritas son las contenidas en la referencia 9 de la Bibliografía. Se utilizan sólo para caudales de hasta 2,830 lps pero los principios de su diseño son aplicables a estructuras de mayor capacidad.

#### 7.1.1 Estructuras de conducción

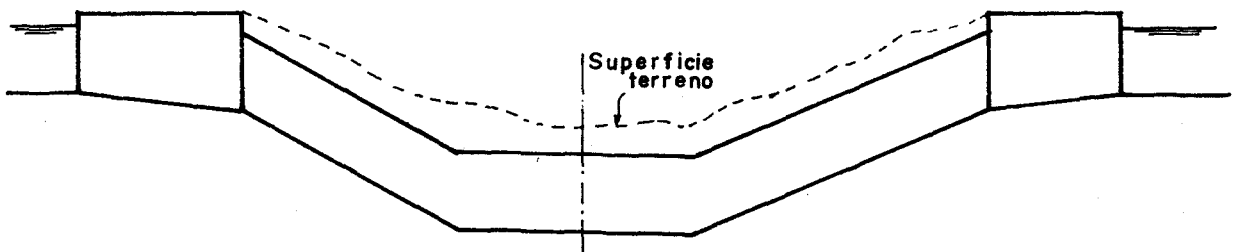
Son estructuras alineadas en el canal que se construyen para salvar singularidades naturales del terreno u obras hechas por el hombre.

Cruce de vía.- Conduce el agua del canal por debajo de una vía de carretera o ferrocarril. El conducto queda constituido por una tubería recta que trabaja llena pero sin presión.



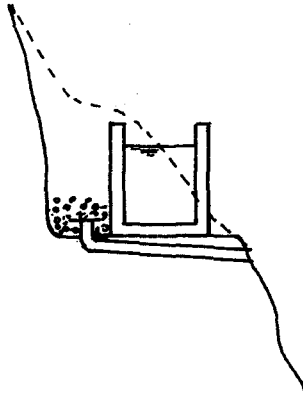
La alternativa a cruce de vía es un puente construido en la vía de carretera o ferrocarril. Para caudales moderados se usa siempre cruce de vía.

Sifón invertido.- Conduce el agua del canal por debajo de una depresión natural del terreno o de otra estructura. El conducto queda constituido por una tubería que trabaja a una cierta presión.



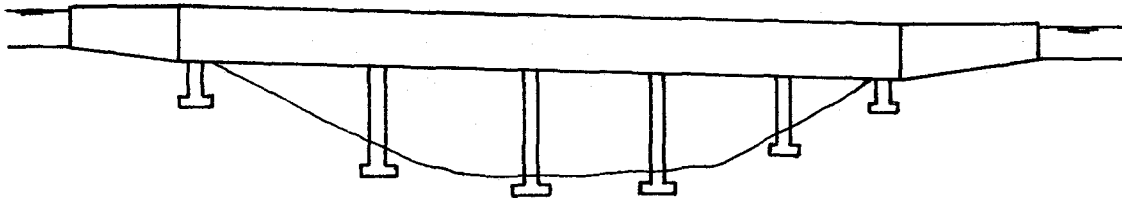
Flume.- Se denomina flume a todo canal corto. Es de sección rectangular y puede ser apoyado o elevado.

Flume apoyado.- Conduce el agua del canal en un tramo de ladera muy empinada, en un tramo de ladera con desprendimiento de piedras o en el cruce de un centro poblado. En el primer caso puede ser descubierto pero en los dos casos restantes tiene que ser necesariamente cubierto.



En canales pequeños la alternativa es una tubería enterrada que fluye parcialmente llena.

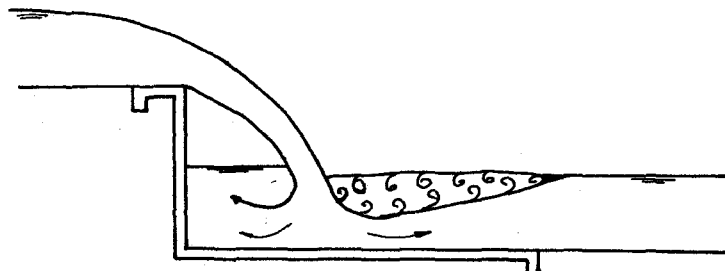
Flume elevado.- Conduce el agua por encima de una depresión del terreno o de otra estructura. Unas veces se apoya en un puente construido ex-profeso; otras veces se diseña estructuralmente para que se soporte a sí mismo (puente canal).



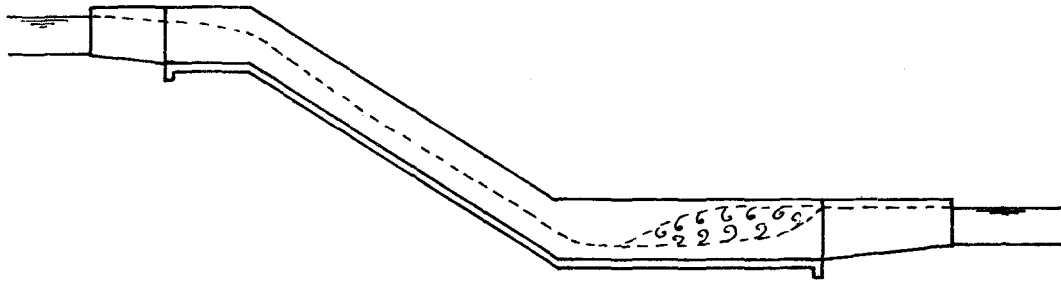
La decisión entre sifón invertido y flume elevado se toma en base a consideraciones económicas.

Caída.- Conduce el agua del canal en un desnivel abrupto del terreno.

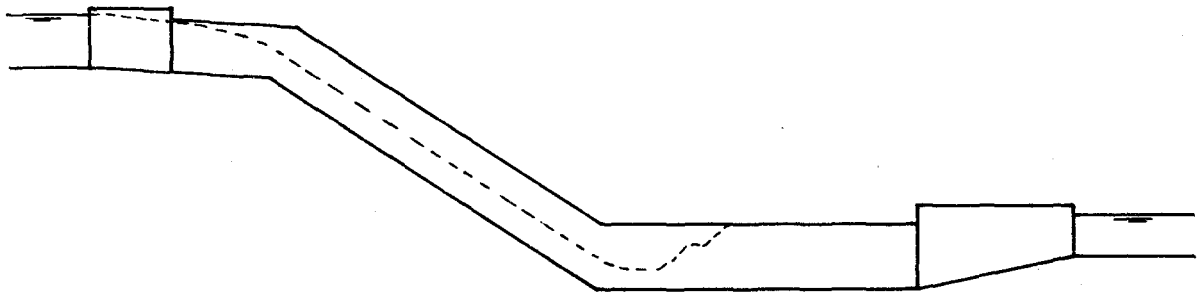
Caída vertical.- Se usa en desniveles de hasta 1 m pero cien por ciento abruptos.



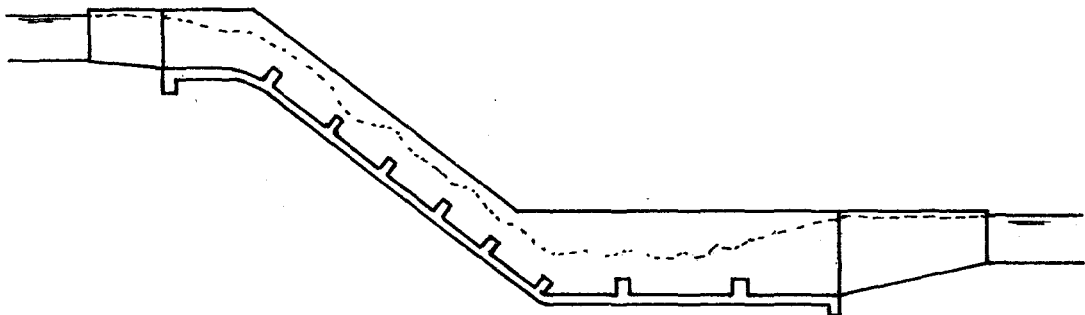
Caída rectangular inclinada.- Se usa en desniveles comprendidos entre 1 m y 4.50 m y caudales relativamente grandes.



Caída entubada.- Se usa en desniveles comprendidos entre 1 m y 4.50 m y caudales relativamente pequeños. Tiene la ventaja de permitir el uso del terreno en la superficie.

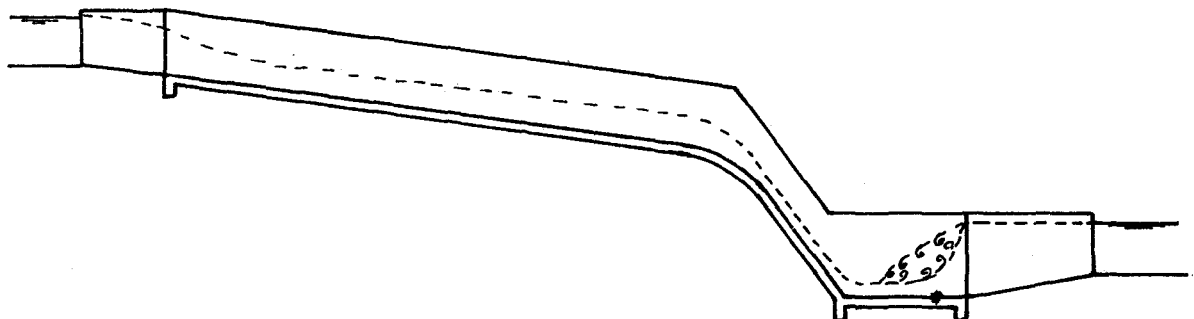


Caída dentada.- Se usa en desniveles mayores de 4.50 m que tienen lugar en distancias horizontales relativamente cortas.

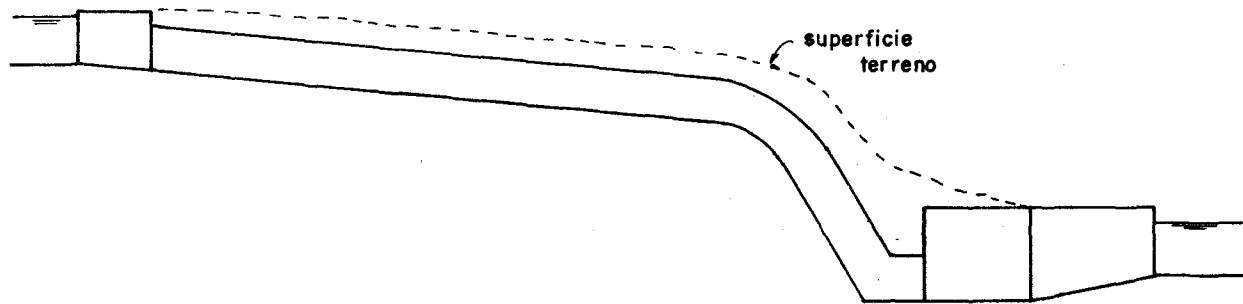


Chute.- Conduce el agua del canal en desniveles mayores de 4.50 m que tienen lugar en distancias horizontales relativamente grandes.

Chute de canal abierto.- Se usa en caudales altos.



Chute entubado.- Se usa en caudales pequeños. Tiene la ventaja de permitir el uso del terreno en la superficie.



La alternativa a chute abierto consiste en emplear una serie de caídas verticales. El chute tiene un costo inicial elevado y un costo de mantenimiento bajo; en el juego de caídas verticales es al revés. Por lo general se prefiere el chute.

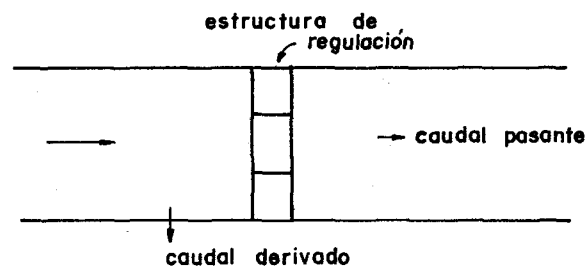
### 7.1.2 Estructuras de regulación

Regular el nivel del agua en el canal significa tenerlo relativamente alto a fin de facilitar la derivación lateral de una parte del agua.

Regular un caudal significa dejar pasar la cantidad de agua que uno expresamente desea.

Las estructuras de regulación regulan niveles y/o gastos.

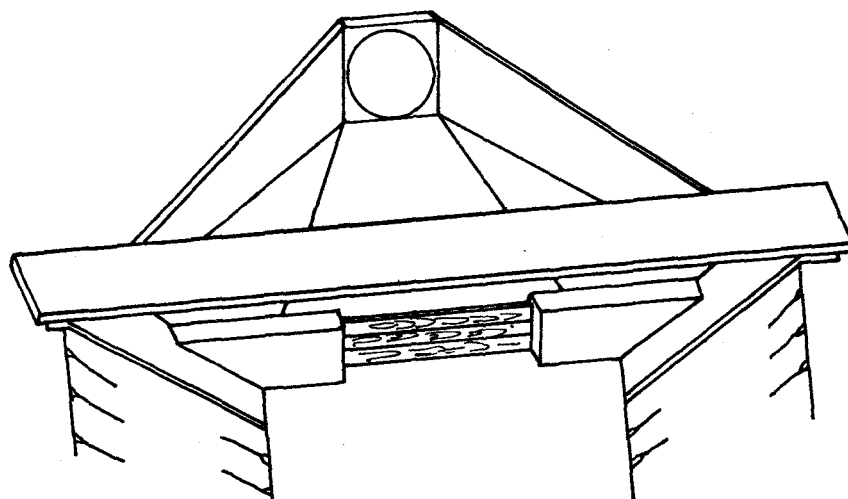
Tener los niveles y/o caudales regulados significa lo mismo que tenerlos controlados, pero no debe confundirse con el término "control hidráulico" que es otra cosa y que se explica en el apartado 7.2.



Represa.- Se construye transversalmente al canal y consta de dos partes; una parte siempre fija constituida por los muros a los costados y una parte:

a veces móvil, cuando se usa un dispositivo de regulación (compuertas deslizantes, tablonés o agujas y vertederos graduables);

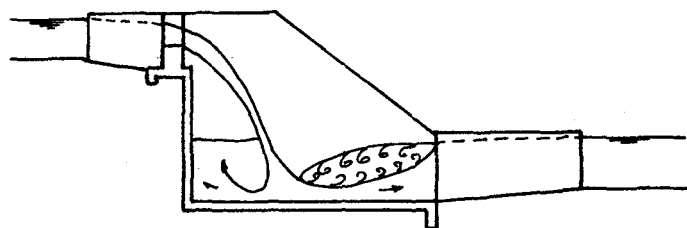
a veces fija, cuando se usa un dispositivo de control hidráulico (vertedero y escotadura trapezoidal de control hidráulico).



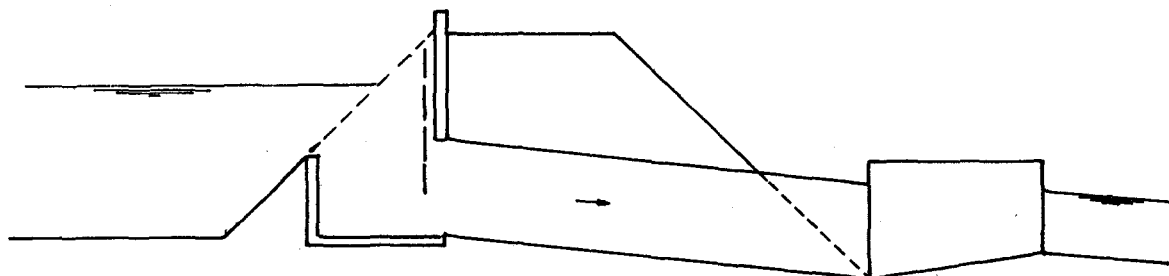
La represa se usa en un punto aislado del canal o antes de una estructura de conducción si uno desea tener ahí regulado el nivel y/o el gasto.

NOTA. Antes de las caídas y chutes se recomienda instalar como mínimo un dispositivo de control hidráulico (vertedero o escotadura trapezoidal) a fin de evitar el embalamiento del agua.

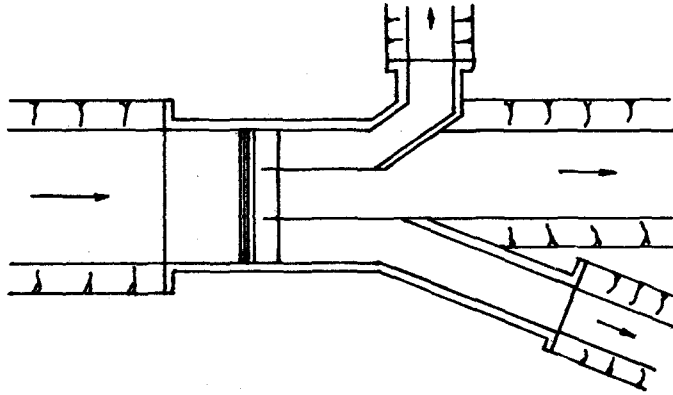
Represa y caída.- Consiste de una represa construida antes de una caída. Aparte de su función reguladora, la represa aquieta el agua antes de la caída con lo que se aminora el peligro de erosión.



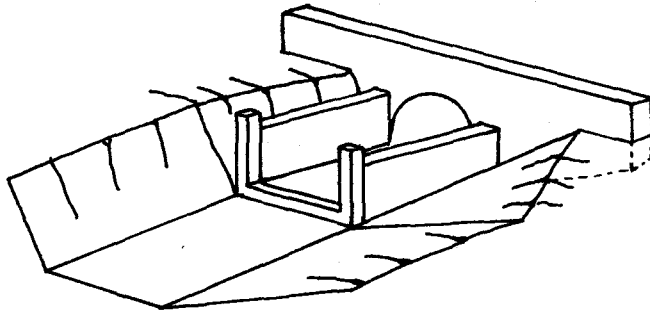
Toma.- Se ubica en la pared del canal con el fin de derivar una parte del agua.



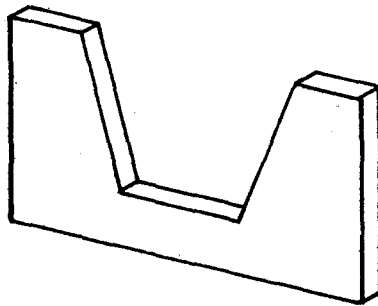
Partidor.- Se usa para dividir el gasto total en dos o más gastos parciales que son guiados en las direcciones deseadas.



Represa a la entrada de tubería.- Se usa para derivar una parte del agua del canal antes que ésta ingrese a una estructura de conducción de tubería (cruce de vía, sifón invertido, caída entubada, chute entubado). Se emplean compuertas deslizantes, agujas y vertederos graduables como elemento de regulación.



Escotadura de control a la entrada de tubería.- Se usa de manera similar a la estructura anterior pero sobre todo antes de caída entubada y chute entubado, es decir tuberías de fuerte inclinación. En vez de escotaduras se emplean a veces vertederos. Las escotaduras trapezoidales y los vertederos son elementos de control hidráulico que sobre todo impiden el embalamiento del agua.



### 7.1.3 Estructuras de protección

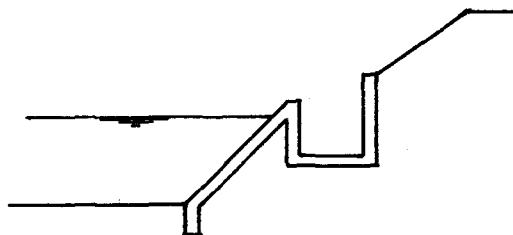
Son estructuras que tienen por objeto proteger el canal tanto interior como exteriormente.

Estructuras de protección interior.- Se usan para eliminar los excedentes de agua del canal provenientes de una mala operación de las compuertas o de lluvias intensas. Se llaman desfogues y se clasifican así:

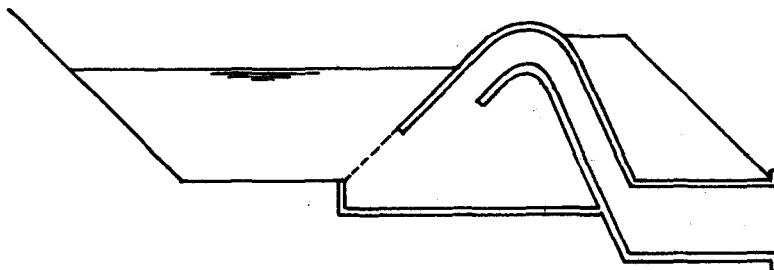
desfogues	{	de alivio	{	aliviadero lateral
		de vaciado	{	aliviadero de sifón
			{	desfogue lateral
			{	desfogue terminal

El agua evacuada debe ser eliminada en forma segura por lo que cada estructura de estas consta de: entrada, salida y canal de descarga. La descripción que sigue se refiere sólo a la entrada.

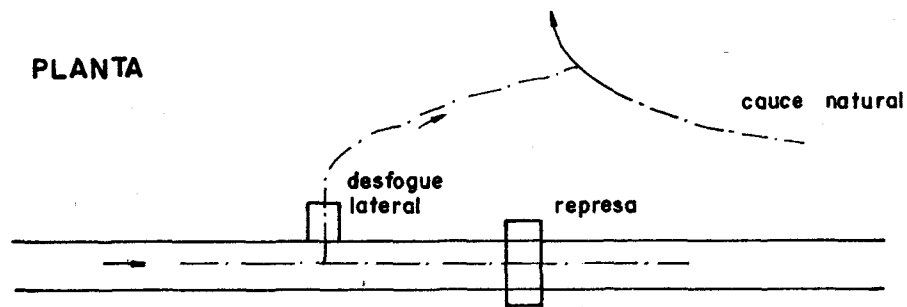
Aliviadero lateral.- Se ubica en la pared del canal con la cresta paralela al eje del canal.



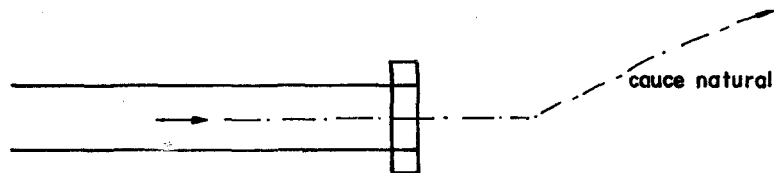
Aliviadero de sifón.- Se usa cuando no hay espacio suficiente para la cresta del aliviadero lateral.



Desfogue lateral.- Está constituido por una compuerta (deslizante o radial) en la pared del canal que en su oportunidad se abre íntegramente para vaciar el canal. Ligeramente aguas abajo se instala una represa para facilitar la evacuación.



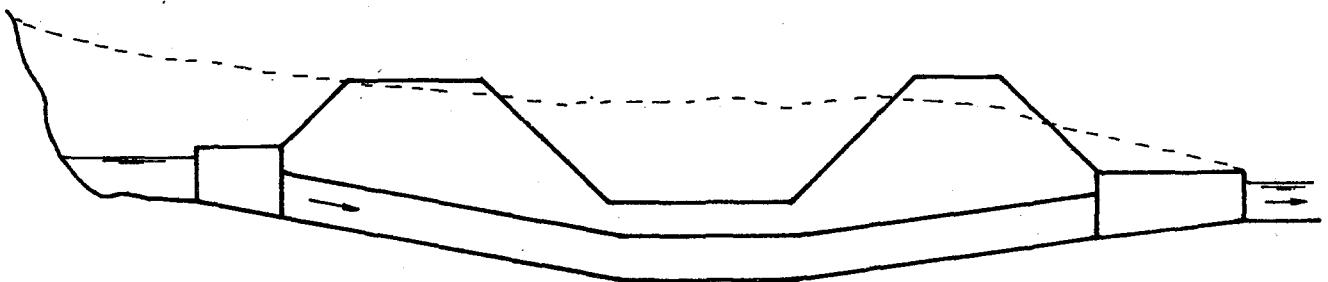
Desfogue terminal.- Está constituido por una compuerta deslizante en el extremo del canal que en su oportunidad se abre íntegramente para vaciar el canal.



NOTA. Obsérvese cómo una estructura terminal de tubería con represa a la entrada cumple el doble cometido: evacuación del exceso de agua en el canal por encima de los muros de rebose y vaciado del canal levantando la compuerta deslizante o las agujas. De la misma manera se puede usar una estructura terminal tipo caída rectangular inclinada con represa a la entrada.

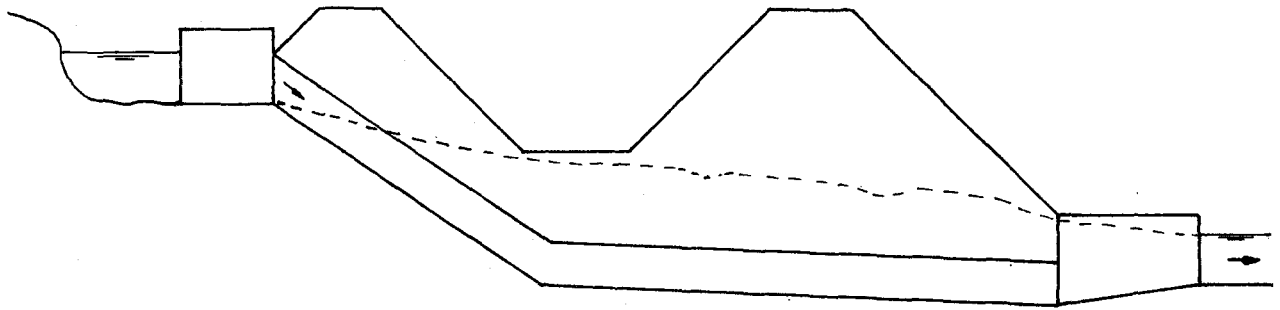
Estructuras de protección exterior.- Se usan para eliminar las aguas de lluvia, del lado del cerro, transversalmente al canal.

Sifón invertido.- Se usa con bastante frecuencia porque lo usual es que la sección del canal quede en corte.

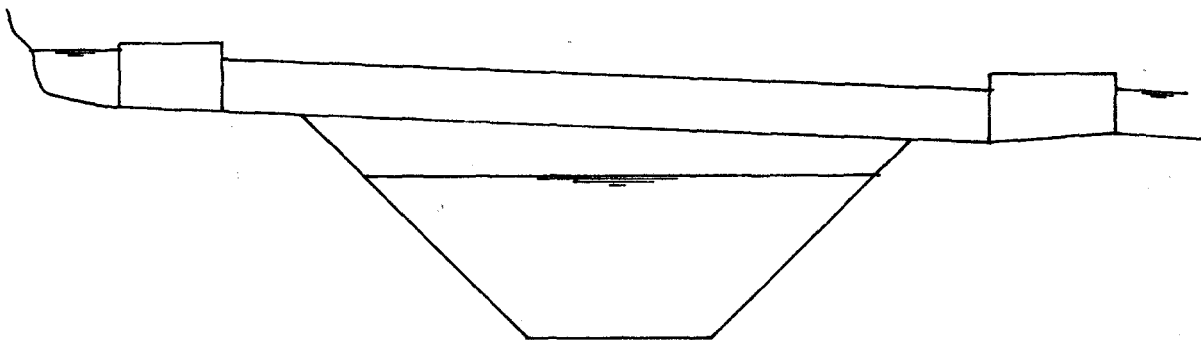


Alcantarilla.- Se usa muy eventualmente, cuando la sección del canal queda en relleno.



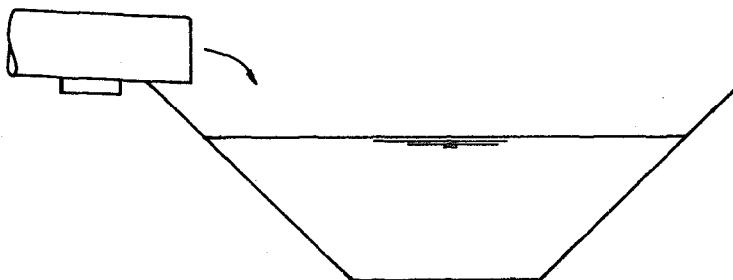


Paso superior.- Se usa cuando el nivel del agua en el canal es bajo en relación al nivel del agua de lluvia por eliminar. El paso superior puede consistir de un flume elevado o de una canoa.



El flume elevado puede ser de concreto o de tubería. La canoa es siempre de concreto.

Entrada al canal.- Se usa cuando el caudal de agua de lluvia es tan pequeño que el canal puede absorberlo. La estructura en sí puede ser de concreto o de tubería y la entrega del agua de lluvia se hace siempre por encima del nivel de agua en el canal.

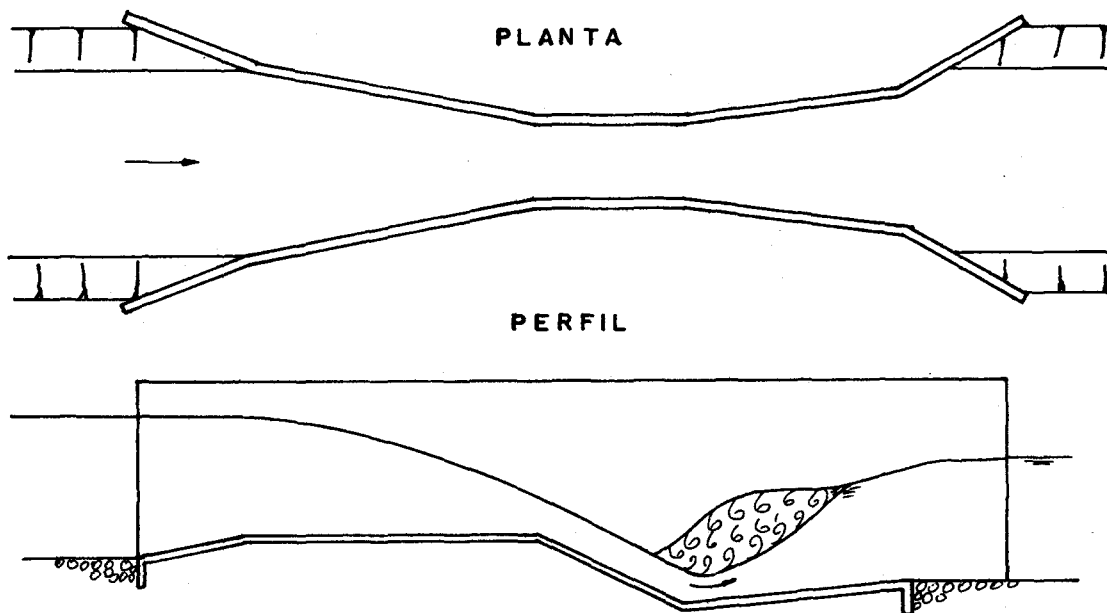


NOTA. El agua de lluvia arrastra sedimentos provenientes de la erosión del terreno, por lo que en el diseño de las estructuras de protección exterior es necesario tener en cuenta la presencia de estos sedimentos.

#### 7.1.4 Estructuras de medición

Permiten averiguar de una manera sencilla el caudal de agua que circula por el canal.

Flume Parshall.- Es un conducto que consta de una entrada convergente, una garganta de ancho constante y una salida divergente. El dimensionamiento se hace de modo que al pasar el agua por la garganta se produzca escurrimiento crítico.

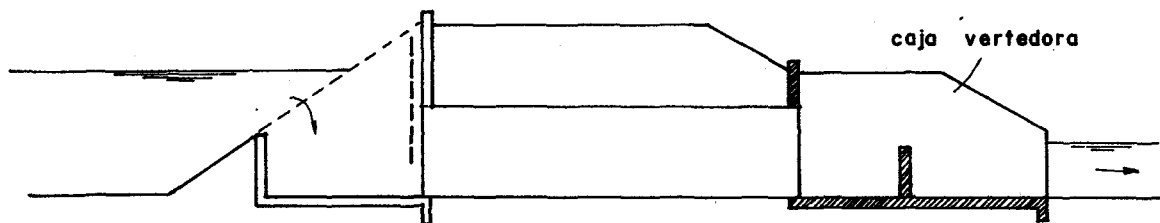


Flume Parshall modificado.- Es un flume Parshall en el que la sección de salida se adecúa a un perfil particular del canal, generalmente un chute corto.

Vertedero.- Consiste de una placa con una escotadura. La forma de la escotadura define el nombre del vertedero. Los vertederos fueron estudiados en el apartado 5.1.

Los vertederos graduables tienen la escotadura variable, de manera que permiten medir un rango más amplio de caudales con la misma precisión.

Caja vertedora.- Es una estructura, utilizada en combinación con una toma de tubería, que permite disipar el exceso de energía del agua y medir el caudal en el canal derivado.



Medidor de flujo abierto.- Es un dispositivo que tiene básicamente una rueda calibrada y que por lo general se instala a la salida de una toma de tubería, en vez de la caja vertedora.

Orificio de carga constante.- Es una estructura que basa su funcionamiento en el principio general de los orificios y que se instala en una toma, antes que el agua ingrese al cuerpo de la toma.

### 7.1.5 Estructuras de disipación de energía

Se usan para disipar el exceso de energía cinética que en ocasiones posee el agua circulante. Por lo general forman parte de otras estructuras mayores, constituyendo el elemento disipador de tales estructuras.

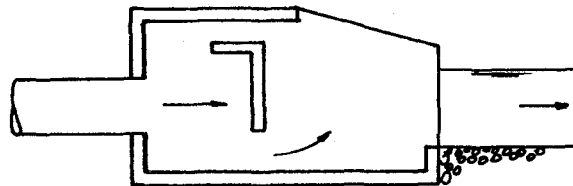
Estructuras de disipación de tipo impacto.- Dirigen el agua a una obstrucción de donde luego es desviada en todas las direcciones. De ese modo se produce la disipación.

Caída vertical.- Ya descrita como estructura de conducción.

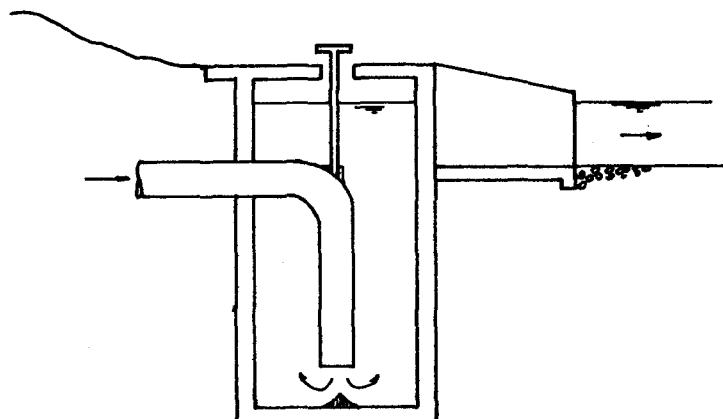
Represa y caída.- Ya descrita como estructura de regulación.

Caída dentada.- Ya descrita como estructura de conducción.

Salida con placa de choque

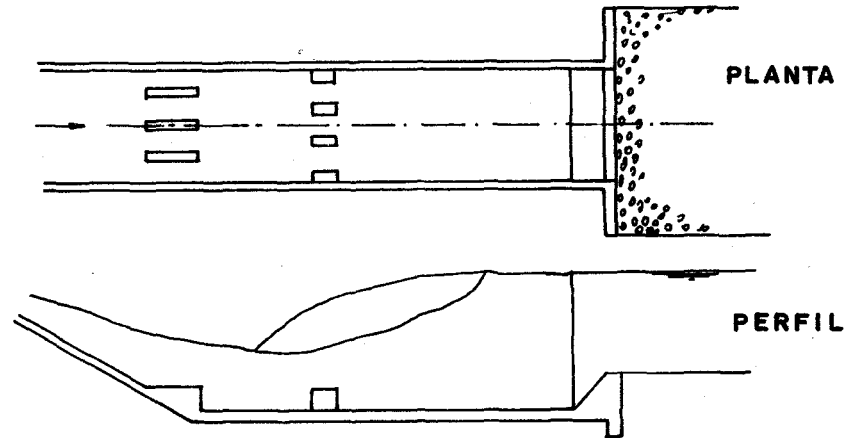


Pozo disipador con válvula de manga



Estructuras de disipación de tipo salto hidráulico.- El agua afluyente, a gran velocidad, es forzada a un salto hidráulico. De ese modo se produce la disipación.

#### Tanque amortiguador



Caída entubada.- Ya descrita como estructura de conducción.

#### 7.1.6 Elementos de seguridad

A lo largo de un canal y en el sitio mismo de algunas estructuras, existen con frecuencia zonas de riesgo o peligro para el personal de operación, para la gente o para los animales.

Se hace imperativo en tales circunstancias instalar elementos de seguridad consistentes en:

- Cercas
- Barandales
- Avisos de advertencia
- Alambradas
- Mallas
- Cables
- Rejillas
- Escaleras

#### 7.2 Control hidráulico

En el apartado 4.4 se trató el tema de las secciones de control en un canal. La idea ahora es describir el mismo concepto de control hidráulico pero en las estructuras ubicadas en el canal.

Para el diseño adecuado de algunas estructuras hidráulicas es importante precisar dónde tiene lugar el control del nivel del agua. Se dice que el CH queda aguas abajo de la estructura si el nivel del agua después de la estructura influye en el nivel del agua antes de la estructura. Si no es así el CH queda aguas arriba de la estructura.

En una alcantarilla, por ejemplo, si el nivel del agua descargada queda por debajo de la boca de salida el CH queda aguas arriba, porque el nivel del agua después de la alcantarilla no influye en el nivel del agua antes de la alcantarilla.

En un sifón invertido adecuadamente diseñado:

- \* si fluye el caudal de diseño el CH queda aguas abajo del sifón, porque el nivel del agua después del sifón controla el nivel del agua a la entrada;
- \* si fluyen caudales menores que el de diseño el CH queda aguas arriba del sifón, si es que el nivel del agua a la salida es tan bajo que permite el control de cresta (tirante crítico en la entrada).

En general, la localización del CH se determina por inspección del perfil de la estructura y del canal, o del nivel del agua en cada extremo de la estructura. La formación de un resalto hidráulico en el cuerpo de la estructura significa el aislamiento de la corriente de aguas abajo: lo que ocurra aguas abajo no va a repercutir aguas arriba, en la entrada se presenta tirante crítico y por lo tanto el CH queda en la entrada de la estructura (control de cresta).

### 7.3 Protección contra la erosión

A menudo se hace necesario usar algún tipo de protección de rip-rap y grava junto a las estructuras y otros lugares de un canal de tierra.

El US Bureau of Reclamation considera cuatro tipos de protección:

- Tipo 1 ... 15 cm de grava gruesa;
- Tipo 2 ... 30 cm de grava gruesa;
- Tipo 3 ... 30 cm de rip-rap sobre una cama de 15 cm de arena y grava;
- Tipo 4 ... 45 cm de rip-rap sobre una cama de 15 cm de arena y grava.

Requerimientos de protección.- Las siguientes son las protecciones mínimas recomendadas para las diferentes estructuras.

Estructuras de conducción : cruce de vía, caída rectangular inclinada, caída entubada, chute.

Estructuras de regulación : represa, represa y caída, toma.

Estructuras de medición : flume Parshall.

Tirante de agua d en metros	Tipo de protección	
	entrada	salida
0 a 0.60	ninguna	tipo 2
0.61 a 1.05	ninguna	tipo 2
1.06 a 2.10	tipo 1	tipo 3

En caso de que la velocidad exceda de 1.50 m/seg deberá utilizarse como mínimo la protección tipo 3, sin importar el tirante de agua.

La longitud de la protección en la salida debe ser 2.5 veces el tirante o 1.50 m mínimo, pero cuando puede ocurrir turbulencia del agua a la salida la longitud de la protección debe ser 4 veces el tirante.

Sifón invertido:

Tirante de agua d en metros	Tipo de protección		Longitud en metros	
	entrada	salida	entrada	salida
0 a 0.60	ninguna	ninguna	ninguna	ninguna
0.61 a 1.05	ninguna	tipo 1	ninguna	2.5 d (1.50 mín)
1.06 a 2.10	tipo 1	tipo 2	d (0.90 mín)	2.5 d (1.50 mín)

En caso de que la velocidad exceda de 1.50 m/seg deberá utilizarse como mínimo la protección tipo 3 sin importar el tirante de agua.

Estructura de drenaje transversal:

Caudal Q lps	Tipo de protección		Longitud a la salida en metros
	entrada	salida	
0 a 810	ninguna	tipo 2	2.40
811 a 2430	ninguna	tipo 2	3.60
2431 a 6480	tipo 1	tipo 3	4.80

Cuando la velocidad a la salida es mayor que 4.50 m/seg deberá utilizarse como mínimo la protección tipo 3.

## 7.4 Protección contra la percolación

En ciertas estructuras puede ocurrir que el agua se infiltre aguas arriba, percole en la dirección de la estructura y remueva las partículas finas del suelo (fenómeno de la tubificación) poniendo en peligro la estabilidad de la estructura.

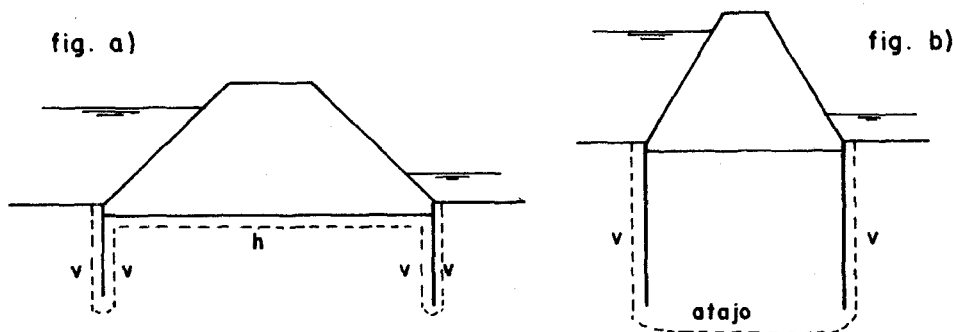
Para prevenir esto muchas veces es necesario construir collares a lo largo de la estructura. Los collares son aletas transversales que rodean la estructura y penetran en el terreno. Actúan como barreras para el agua de percolación alargando su recorrido, frenando su velocidad y minimizando con ello el riesgo de tubificación. En cualquier estructura en la que la superficie libre del agua a la entrada es significativamente más alta que un punto potencial de desfogue del agua de percolación (gradiente mayor o igual que 5:1), debe examinarse para ver si necesita collares de protección.

El requerimiento de collares se estudia con el método del factor de percolación de Lane. Cada suelo tiene su propio factor de percolación, como una medida de su resistencia a la tubificación, de modo que el método consiste en garantizar para la estructura un factor de percolación menor que el que corresponde al suelo en que se asienta.

Se define factor de percolación al cociente de la longitud ponderada de percolación entre la carga hidráulica efectiva. La carga hidráulica efectiva es la diferencia de niveles de la superficie libre del agua en el inicio de la trayectoria y el punto de desfogue. La longitud ponderada de percolación se refiere a la trayectoria del agua y es la suma de:

- \* las distancias verticales (más empinadas que 45°)
- \* un tercio de las distancias horizontales (más echadas que 45°)
- \* dos veces cualquier distancia que signifique un atajo del agua.

Conviene aclarar esto último y para ello se va a considerar el tablaestacado debajo de una pequeña presa. La línea de puntos representa la trayectoria. La figura a) corresponde a la disposición ordinaria de dos tablaestacas normales y la figura b) al uso de dos tablaestacas de gran longitud, las mismas que propician que el agua busque el atajo.



Los factores de percolación recomendados por Lane son:

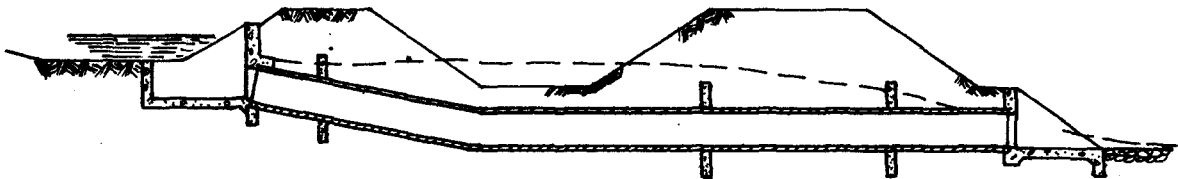
arena muy fina .....	8.5
arena fina .....	7.0
arena media .....	6.0
arena gruesa .....	5.0

grava fina .....	4.0
grava media .....	3.5
grava gruesa con guijarros .....	3.0
cantos rodados con guijarros y grava .....	2.5
arcilla blanda .....	3.0
arcilla media .....	2.0
arcilla dura .....	1.8
arcilla muy dura o hardpan .....	1.6

En ausencia de información debe considerarse 2.5 como valor mínimo en estructuras normales y un valor mayor en estructuras importantes.

Si el factor de percolación calculado es menor que el recomendado deberá agregarse collares a la estructura de tubería.

La figura muestra una estructura de tubería (alcantarilla) con collares mínimos contra la percolación.



## 7.5 Diseño hidráulico de algunas estructuras

### 7.5.1 Diseño hidráulico de un cruce de vía

El diseño consiste en determinar el diámetro  $D$  de la tubería de manera tal que si  $V$  es la velocidad media del agua en la tubería resulte:

$$V \leq 1.05 \text{ m/seg si se usan transiciones de tierra}$$

$$V \leq 1.50 \text{ m/seg si se usan transiciones de concreto}$$

La cota máxima del fondo de la tubería en la entrada es igual a:

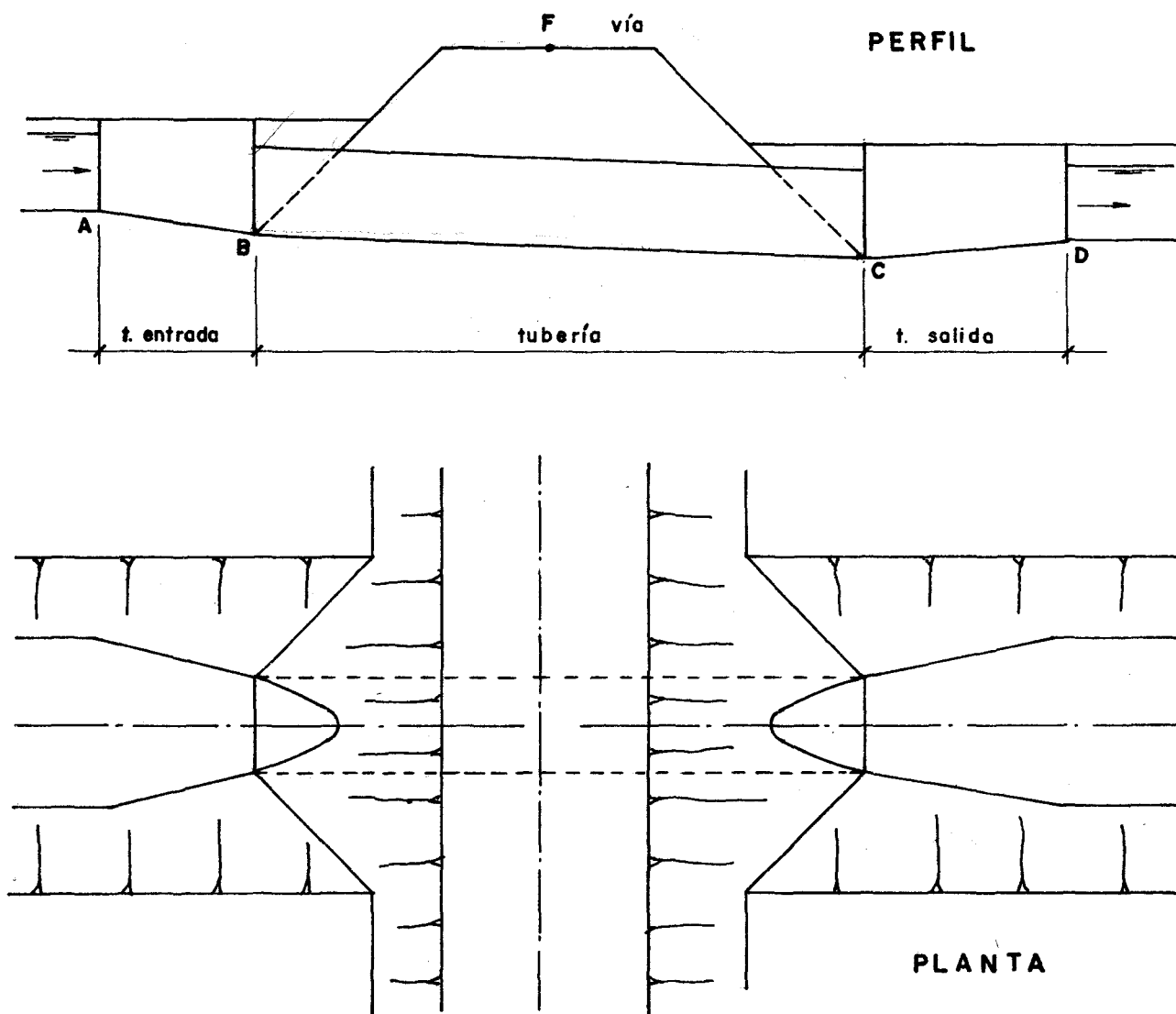
$$\text{SNAA} - (D + 1.5 \text{ hvt})$$

SNAA ... superficie normal del agua en el punto A.

hvt ... altura de velocidad del agua en la tubería

La pendiente mínima de la tubería ( $S_0$ ) debe ser 0.005, para facilitar que escurra el agua cuando se seca el canal.





### Relleno mínimo

- \* en todas las vías de ferrocarril y carreteras principales 0.90 m de tierra.
- \* en carreteras rurales 0.60 m. En este caso para cumplir con el relleno mínimo se pueden usar en la carretera rampas de hasta 10%.

Transiciones.- Requieren transiciones de concreto a la entrada y salida:

- \* los cruces de vías férreas y carreteras principales;
- \* los cruces de vía de  $D \geq 36"$ ;
- \* los cruces de vía en canales de tierra si  $V > 1.05$  m/seg.

Control.- Si se requiere tener controlado el nivel del agua aguas arriba del cruce se instala a la entrada una represa o una escotadura. De ser

así resulta económico determinar el diámetro D de la tubería para una velocidad  $V = 1.50$  m/seg.

Ejemplo.- Diseñar el siguiente cruce de vía.

a) Datos

- 1) canal de tierra
- 2) carretera rural
- 3)  $Q = 425$  lps
- 4) cota A = 1.647.83 m
- 5)  $d_1 = 0.48$  m
- 6) SNAA = cota A +  $d_1 = 1,648.31$  m
- 7) Cota D = 1,647.74 m (obtenida de un perfil)
- 8)  $d_2 = 0.48$  m
- 9) SNAD = cota D +  $d_2 = 1,648.22$  m
- 10)  $\Delta SNA = SNAA - SNAD = 0.09$  m (carga disponible)
- 11) ancho de la carretera = 5.50 m
- 12) talud de la carretera = 1.5
- 13) cota F = 1,649.19 m
- 14) control a la entrada no requerido.

b) Determinar

- \* diámetro de la tubería
- \* transiciones
- \* protección contra la erosión

c) Desarrollo

- 1) Si se emplean transiciones de tierra  $V = 1.05$  m/seg,  
 $A = 0.405 \text{ m}^2 \rightarrow D \approx 30''$

Si se emplean transiciones de concreto  $V = 1.50$  m/seg,  
 $A = 0.283 \text{ m}^2 \rightarrow D \approx 24''$

Como ambos diámetros son menores que 36" no tienen que emplearse necesariamente transiciones de concreto. Se puede optar por cualquiera de los dos tipos. Por tratarse de un camino rural se escoge aquí transiciones de tierra y  $D = 30''$

- 2)  $D = 30'' = 0.76$  m

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = 0.456 \text{ m}^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = 0.93 \text{ m/seg}$$

$$hvt = \frac{V^2}{2g} = 0.05 \text{ m}$$

$$P = \pi D = 2.39 \text{ m}$$

$$R = \frac{A}{P} = 0.19 \text{ m}$$

$$n = 0.013$$

$$S_f = \left( \frac{V n}{R^{2/3}} \right)^2 = 0.00133$$

- 3) cota B = SNAA - (D + 1.5 hvt) = 1,647.48 m
- 4) longitud aproximada de tubería =  
 $1.5 (\text{cota F} - \text{cota B}) \times 2 + \text{ancho vía} = 10.64 \text{ m}$
- 5)  $\Delta$  tubería =  $S_0 L = 0.005 \times 10.64 = 0.05 \text{ m}$
- 6) cota C = cota B -  $\Delta$  tubería = 1,647.43 m
- 7) longitud de las transiciones de tierra =  $3 D \approx 2.30 \text{ m}$
- 8)  $p_{\text{entrada}} = \text{cota A} - \text{cota B} = 0.35 \text{ m}$   
 $p_{\text{salida}} = \text{cota D} - \text{cota C} = 0.31 \text{ m}$
- 9) asumir que la pérdida total de carga es =  
 $1.5 \text{ hvt} + S_f L = 0.08 \text{ m}$

d) Chequeo

- 1) pérdida de carga calculada ( $c_9$ ) = 0.08 m  
 pérdida de carga disponible ( $a_{10}$ ) = 0.09 m  
 Es decir bien, porque el exceso de carga de 1 cm es intrascendente.
- 2) pendiente de fondo en las transiciones  
 de entrada =  $\frac{\text{longitud}}{p} = \frac{c_7}{c_8} = \frac{2.30}{0.35} = \frac{6.6}{1}$ , bien  
 de salida =  $\frac{\text{longitud}}{p} = \frac{c_7}{c_8} = \frac{2.30}{0.31} = \frac{7.7}{1}$ , bien
- 3) relleno mínimo para camino rural = 0.60 m  
 relleno disponible = cota F - (cota B + D) = 0.95, bien

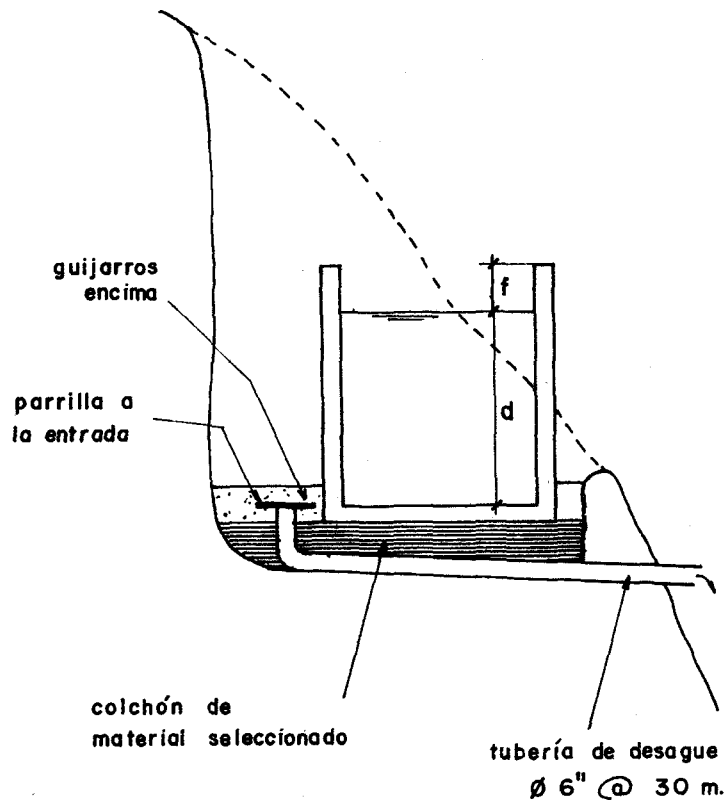
e) Protección contra la erosión

- 1)  $d = 0.48 \text{ m}$ , luego:
  - a la entrada ... ninguna
  - a la salida ... tipo 2 (0.30 m de grava en una longitud  $4 d \approx 2.00 \text{ m}$ ).

En vista de que la longitud de la transición de tierra no es mucho mayor (2.30 m) se extenderá la protección en toda la transición. En sentido vertical se extenderá la protección 0.30 m por encima de la superficie normal del agua.

### 7.5.2 Diseño hidráulico de un flume apoyado

Los flumes apoyados tienen sección rectangular y son de concreto armado. El siguiente esquema corresponde a un flume apoyado utilizado para pasar una ladera muy empinada.



Relación b/d.- A la sección rectangular más eficiente corresponde un valor 2. Por razones constructivas se usan valores por lo general comprendidos entre 1 y 3. Para este rango de valores de la relación b/d los valores de A, V y P varían muy poco para el rango usual de valores  $S_0$  y caudales pequeños.

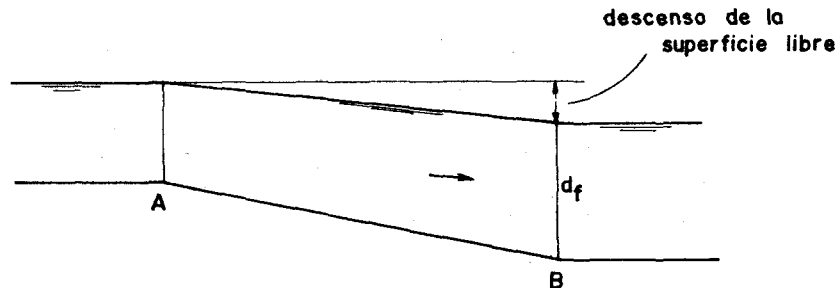
Velocidad y pendiente.- Por economía, el área mojada del flume se escoge menor que el área mojada del canal. De este modo la velocidad del agua en el flume resulta mayor que en el canal y la pendiente del flume mayor que la del canal. El flujo es siempre subcrítico.

Se ha realizado un estudio orientado a determinar el valor de la pendiente del flume  $S_0$  para valores de b/d comprendidos entre 1 y 3 y caudales de hasta 2,800 lps, encontrándose que este valor  $S_0$  no debe pasar de 0.002. Después del diseño del flume con régimen subcrítico debe hacerse una verificación de que no se está cerca del flujo crítico, usando para ello un valor de n menor en un 20% que el valor nominal.

Freeboard.- El valor del freeboard en un flume depende de varios factores, de una manera similar a lo que ocurre en los canales. Como una guía se puede emplear la gráfica del U.S. Bureau del apartado 2.1, que proporciona el valor de f según el valor de Q.

Transición de entrada.- Se asume como pérdida de carga  $0.3 \Delta h_v$ , de manera que el descenso de la superficie libre del agua resulta  $(1+0.3) \Delta h_v$ , es decir  $1.3 \Delta h_v$ . El fondo del extremo inicial de la transición se deja al mismo nivel que el fondo del canal y el fondo del extremo final de la transición tiene una cota:

$$SNAB - d_f$$

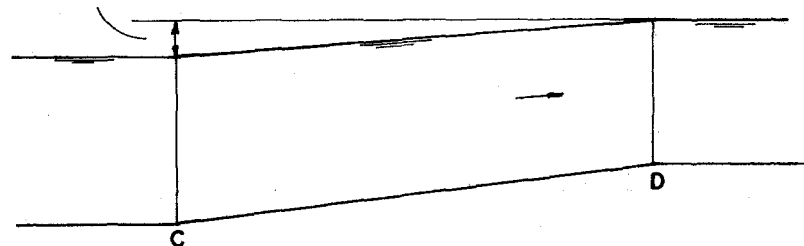


Transición de salida.- Se asume como pérdida de carga  $0.5 \Delta h_v$ , de manera que el ascenso de la superficie libre del agua resulta  $(1 - 0.5) \Delta h_v$ , es decir  $0.5 \Delta h_v$ .

El freeboard en ambas transiciones se maneja así:

- \* en el extremo que da al canal,  $f$ , según lo establecido para las transiciones que aquí se usan;
- \* en el extremo que da al flume,  $f^*$ , según el valor del freeboard en el flume.

ascenso de la S.L.



Ejemplo.- Diseñar el siguiente flume apovado.

a) Datos

- 1) flume apoyado para pasar una ladera empinada; excavación en roca. No es zona de desprendimiento de piedras.
- 2) la zona es lluviosa; el estudio hidrológico indica que es necesario colocar drenes de 6" espaciados 30 m.
- 3) existe un camino casi paralelo al flume desde el cual se van a habilitar los accesos, de modo que no se requiere construir un camino especial.
- 4) canal de tierra con las siguientes características:

$Q = 2,830 \text{ lps}$	$A = 4.041 \text{ m}^2$
$S = 0.00056$	$V = 0.70 \text{ m/seg}$
$n = 0.025$	$R = 0.64 \text{ m}$
$d = 0.91 \text{ m}$	$h_v = 0.02 \text{ m}$
$b = 3.05 \text{ m}$	$T = 5.78 \text{ m}$
$t = 1.5$	$f = 0.58 \text{ m}$

También se conoce:

cota A = 1,000.00 m  
 estaca A = 1 + 00 ; estacado cada 10 m  
 cota D = 999.63 m  
 estaca D = 17 + 05

$$\Delta SNA = SNA - SNAD = 0.37 \text{ m (carga disponible)}$$

- 5) usar transiciones de concreto en la entrada y en la salida.
- 6) para el flume  $n = 0.014$ .

b) Determinar

- \* sección del flume
- \* transiciones
- \* control contra la erosión

c) Desarrollo (con chequeo simultáneo)

1) sección del flume

Conviene una sección más honda que la sección más eficiente;  
 usar  $b/d = 1$ .

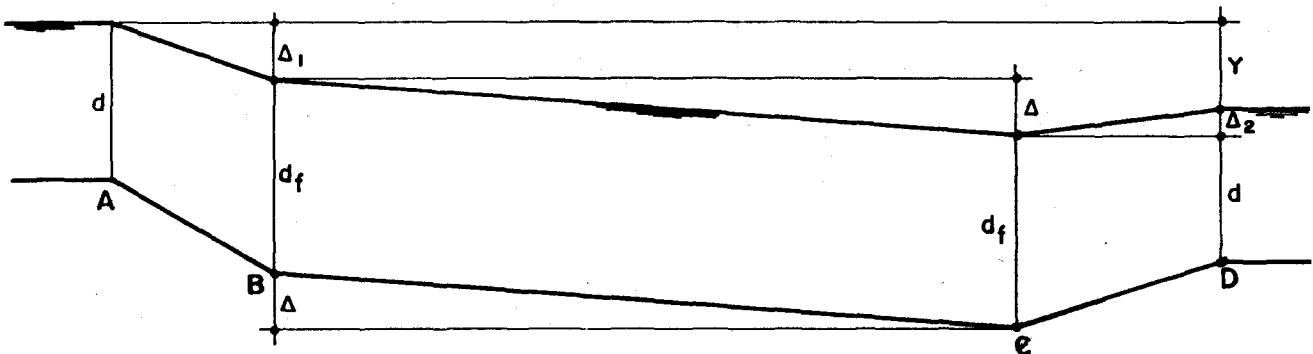
Para condiciones hidráulicas ideales,

si:  $\Delta_1 =$  descenso de la SL en la transición de entrada =  $1.3 \Delta h_v$

$\Delta_2 =$  ascenso de la SL en la transición de salida =  $0.5 \Delta h_v$

$\Delta =$  descenso del fondo del flume

$Y =$  carga disponible



se cumple:

$$\begin{aligned}\Delta_1 + \Delta - \Delta_2 &= Y \\ \Delta &= Y - \Delta_1 + \Delta_2 \\ \Delta &= Y - (\Delta_1 - \Delta_2) \\ \Delta &= Y - 0.8 \Delta h_v\end{aligned}$$

Asumir aquí que la velocidad en el flume será  $V \approx 1.50$  m/seg, en cuyo caso  $h_v = 0.12$  m,

$$\begin{aligned}\Delta &= 0.37 - 0.8 (0.12 - 0.02) \\ \Delta &= 0.29 \text{ m}\end{aligned}$$

Asumir las siguientes longitudes para las transiciones:

$$\begin{aligned}\text{entrada} &\dots 4.50 \text{ m} \\ \text{salida} &\dots 6.00 \text{ m}\end{aligned}$$

La longitud del flume resulta:

$$\begin{aligned}L &= (\text{estaca D} - \text{estaca A}) - 4.50 - 6.00 \\ &= (175.00 - 10.00) - 4.50 - 6.00 \\ &= 154.50 \text{ m}\end{aligned}$$

y la pendiente de fondo del flume:

$$S_o = \frac{A}{L} = \frac{0.29}{154.50} = 0.0018$$

como este valor es menor que 0.002 todo va bien.

Verificación:

$$\begin{aligned}Q &= 2.83 \text{ m}^3/\text{seg} & d &= 1.28 \text{ m} \\ S_o &= 0.0018 & b &= 1.28 \text{ m} \\ n &= 0.014 & V &= 1.72 \text{ m/seg} \\ \frac{b}{d} &= 1\end{aligned}$$

como esta velocidad es parecida a la que se asumió para hallar  $S_o$  se puede continuar.

Ahora,  $S_c = ?$

$$n = 0.011 \text{ (80\% del valor nominal 0.014)}$$

$$b = 1.30 \text{ m (valor redondeado)}$$

$$q = \frac{Q}{b} = 2.18 \text{ m}^3/\text{seg por metro}$$

$$d_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} = 0.79 \text{ m}$$

$$A_c = b \cdot d_c = 1.020 \text{ m}^2$$

$$V_c = \frac{Q}{A_c} = 2.78 \text{ m/seg}$$

$$P_c = b + 2 d_c = 2.87 \text{ m}$$

$$R_c = \frac{A_c}{P_c} = 0.36 \text{ m}$$

$$S_c = \left( \frac{V_c \cdot n^2}{R_c^{2/3}} \right) = 0.0037$$

como la pendiente de diseño, 0.0018, es bastante menor el flujo subcrítico es estable.

Como el valor de b fue redondeado hay que recalcular el tirante d.

$$Q = 2.83 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$d = 1.27 \text{ m}$$

$$S_o = 0.0018$$

$$V = 1.73 \text{ m/seg}$$

$$n = 0.014$$

$$h_v = 0.15 \text{ m}$$

$$b = 1.30$$

Corresponde ahora averiguar la pérdida total de carga:

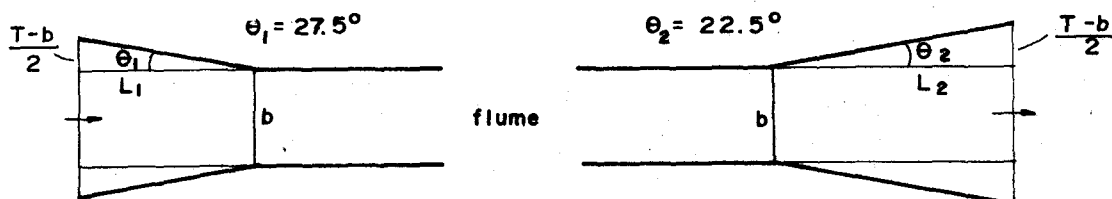
$$\begin{aligned} \Delta H &= \text{en transición entrada} + \text{en flume} + \text{en transición salida} \\ &= 0.3 \Delta h_v + S_f L + 0.5 \Delta h_v \\ &= 0.8 \Delta h_v + S_f \cdot L \\ &= 0.8 (0.15 - 0.02) + 0.0018 \times 154.50 \\ &= 0.39 \text{ m} \end{aligned}$$

Como la carga disponible es 0.37 m, la diferencia resulta intrascendente; es de esperar que se forme un ligero remanso con perfil  $M_1$ .

En caso de resultar una diferencia significativa, se puede optar por cambiar uno de los valores siguientes:

- \* el ancho del flume, b
- \* la pendiente de fondo del flume,  $S_o$
- \* la cota de fondo del canal, en A o en D.

2) longitud de las transiciones:



$$L_1 = \frac{\frac{T-b}{2}}{\text{tg } \theta_1} = 4.33 \text{ m}$$

$$\text{USAR } L_1 = 4.50 \text{ m}$$

$$L_2 = \frac{\frac{T-b}{2}}{\text{tg } \theta_2} = 5.43 \text{ m}$$

$$\text{USAR } L_2 = 6.00 \text{ m}$$



3) cotas de la transición de salida.

Como el control queda aguas abajo, es necesario diseñar primero la transición de salida y luego regresar por el flume para diseñar la transición de entrada.

$$\begin{aligned} \text{cota D} &= 999.63 \text{ m} \\ \text{cota C} &= \text{cota D} + d - \Delta_2 - d_f \\ &= 999.63 + 0.91 - 0.06 - 1.27 \\ &= 999.21 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_2 &= 0.5 \Delta h_v \\ &= 0.5 (0.15 - 0.02) \\ &= 0.06 \text{ m} \end{aligned}$$

4) cotas de la transición de entrada.

$$\begin{aligned} \text{cota B} &= \text{cota C} + S_0 L \\ &= 999.21 + 0.0018 (\text{estaca C} - \text{estaca B}) \\ &= 999.21 + 0.0018 | (17+05 - 6.00) - (1+00 + 4.50) | \\ &= 999.21 + 0.0018 | 154.50 | \\ &= 999.50 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{cota A} = 1,000.00 \text{ m}$$

Valor del tirante de agua en el canal

$$\begin{aligned} \text{línea energía en B} &= \text{cota B} + d_f + h_v \\ &= 999.50 + 1.27 + 0.15 \\ &= 1,000.92 \text{ m} \end{aligned}$$

línea energía en A = ?

$$\begin{aligned} \text{línea energía A} &= \text{línea energía B} + K_1 \Delta h_v \\ &= 1,000.92 + 0.3 (h_{vf} - h_v) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{línea energía A} &= \text{cota A} + d + h_v \\ &= 1,000.00 + d + h_v \end{aligned}$$

igualando:

$$\begin{aligned} 1,000.92 + 0.3 (h_{vf} - h_v) &= 1,000.00 + d + h_v \\ d + h_v - 0.3 (h_{vf} - h_v) &= 0.92 \end{aligned}$$

después de probar varios valores para d:

$$\begin{aligned} d &= 0.93 \text{ m} & A &= 4.134 \text{ m}^2 \\ Q &= 2.83 \text{ m}^3/\text{seg} & V &= \frac{Q}{A} = 0.685 \text{ m/seg} \\ b &= 3.05 \text{ m} & h_v &= 0.024 \text{ m} \\ t &= 1.5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0.93 + 0.024 - 0.3 (0.15 - 0.024) &= 0.92 \\ 0.916 &= 0.92 \end{aligned}$$

quiere decir que el tirante de agua en el canal, antes de entrar al flume, va a ser 0.93 m en vez del tirante normal 0.91 m.

Se asume que el ligero remanso no va a afectar las estructuras de aguas arriba y que la disminución del freeboard del canal en 2 cm es intrascendente.

5) freeboard del flume

Asumir aquí que un eventual desborde del flume ocasionará menor daño que un desborde del canal. El freeboard del canal es 0.58 m y de la gráfica del Bureau se obtiene para el flume 0.23 m. Usar pues un freeboard en el flume de 0.25 m con lo que la altura de las paredes es 1.50 m.

6) Protección contra la erosión.

en la entrada ... ninguna

en la salida ... tipo 2, es decir una capa de 0.30 m de grava gruesa extendida unos 2.40 m más allá de la transición y hasta una altura de 0.30 m por encima del nivel normal del agua.

Comentario.- Si se trata de una zona con desprendimiento de piedras, se puede rellenar el espacio que da hacia el cerro hasta una altura un poco menor que la de las paredes del flume. Si el desprendimiento de piedras es severo se puede cubrir el flume.

Cuando la zona es de desprendimiento severo de piedras y el caudal es pequeño, la mejor alternativa es pasar la zona con una tubería enterrada. La tubería debe ser resistente (tubería de presión) porque el relleno mínimo en tal circunstancia es 1 m. También deben merecer especial atención los aspectos de colocación de la tubería y eliminación de las aguas de lluvia.

### 7.5.3 Diseño hidráulico de un sifón invertido.

Estas estructuras se usan para conducir agua por gravedad bajo caminos, vías férreas, otras estructuras, drenes y depresiones. Un sifón es un conducto cerrado diseñado para escurrir lleno y bajo presión. Debe operar sin exceso de carga. Los conductos cerrados con exceso de carga son la caída entubada y el chute entubado. Los conductos cerrados rectos bajo caminos o vías férreas pueden también funcionar como sifones invertidos con presión interna.

Alternativas: El uso de un flume elevado sería una alternativa a un sifón que cruza una depresión, dren u otro canal. El uso de un puente sería una alternativa a un sifón invertido bajo un camino o vía férrea. Generalmente, para caudales pequeños de hasta 100 pie<sup>3</sup>/seg el sifón invertido es más económico.

#### Componentes

a) Tubería.- Los conductos cerrados a que nos referimos aquí son tuberías. Como la tubería está sujeta a presión debe llevar uniones de

jefe. La selección de la tubería de presión depende de las disponibilidades y costos.

Las tuberías de presión están clasificadas según su capacidad para soportar cargas externas (relleno + relleno equivalente a la sobrecarga) y presión hidrostática interna medida al eje. Se usan a veces nomenclaturas como la siguiente: las designaciones A, B, C, D representan alturas de relleno de 5, 10, 15 y 20 pies respectivamente y el número asociado tal como 20, 50, 75, 100, 125 y 150 representa presión hidrostática en pies.

Ejemplo: C-50 representa una tubería de presión para 15' de relleno y 50' de presión, ambos valores como máximo.

El perfil de la tubería se determina de modo que se satisfagan ciertos requerimientos de relleno, pendientes, ángulos y sumergencia de la entrada y la salida.

Los requerimientos de relleno son:

(1) 3' en caminos y vías férreas. Si existen cunetas el borde inferior de las cunetas debe quedar a 2' del borde superior de la tubería.

2' en caminos de chacra. A estos caminos se les da generalmente rampas de 10% cuando es necesario a fin de lograr los 2' de relleno.

(2) 3' debajo de canales de drenaje

(3) 2' debajo de canales de tierra

(4) 1/2' debajo de canales revestidos

El ancho del camino y la inclinación de los taludes en el cruce deben ser los mismos del camino existente. Los taludes no deben ser más pa-  
rados que 1 1/2:1.

Las tuberías no deben ser más paradas que 2:1 y no deben ser más tendidas que 0.005.

b) Transiciones.- Los siguientes sifones requieren ya sea una transición de entrada de concreto o algún tipo de estructura de control en la entrada y una transición de salida de concreto:

- Todos los sifones que cruzan vías estatales y vías férreas.

- Todos los sifones  $\geq 36"$  que cruzan caminos.

- Todos los sifones en canales no revestidos con velocidades en la tubería  $> 3.5$  pie/seg.

Si hay necesidad de controlar la elevación de la superficie del agua aguas arriba del sifón se usa una entrada de retención y tubería (check and pipe inlet) o una entrada de control y tubería (control and pipe inlet).

c) Tapones.- Se ubican en o cerca del punto más bajo de sifones relativamente largos para permitir drenar la tubería con fines de inspec-

ción y mantenimiento. Básicamente consisten de un tubo con válvula de acero.

Los taponos (blowoffs) pueden usarse también para evacuar el agua del canal en caso de emergencia. Los sifones cortos son secados, cuando es necesario, por bombeo desde cualquier extremo del sifón. Junto con el blowoff se dispone de un agujero en sifones de 36" o mayores para permitir un punto intermedio de acceso de los operarios con fines de inspección y mantenimiento.

- d) Freeboard y protección contra la erosión.- El freeboard del canal aguas arriba del sifón debe incrementarse en 50% (1' como máximo) para prevenir excesos de agua mayores que los previstos para el canal debido a tormentas u operación deficiente. El freeboard incrementado debe extenderse hasta una distancia de la estructura tal que el efecto del posible derrame sea mínimo, pero en ningún caso menos de 50 .

La protección contra la erosión es usada en sifones en canales de tierra.

- e) Evacuadores (wasteways).- Se colocan a menudo aguas arriba del sifón con el propósito de desviar el agua en caso de emergencia.

- f) Medidas de seguridad.- Deben tomarse cerca del sifón a fin de proteger a las personas y animales.

### Consideraciones de diseño

La carga disponible, economía y velocidades permisibles en la tubería determinan el diámetro D.

Es necesario asumir dimensiones internas para el sifón y calcular las pérdidas de carga a la entrada, fricción, codos, curvas y a la salida. La suma de todas las pérdidas calculadas deberá ser aproximadamente igual a la diferencia de la línea de energía entre los extremos del sifón (carga disponible).

En general la velocidad en el sifón puede caer entre 3.5 y 10 pie/seg dependiendo de la carga disponible y consideraciones económicas. Los siguientes criterios de velocidad pueden servir en la determinación del diámetro.

- 3.5 pie/seg o menos para un sifón relativamente corto con sólo transiciones de tierra en la entrada y salida.
- 5 pie/seg o menos para un sifón relativamente corto con transición de concreto o estructura de control a la entrada y transición de concreto a la salida.
- 10 pie/seg o menos para un sifón relativamente largo con transición de concreto o estructura de control a la entrada y transición de concreto a la salida.

La velocidad o tamaño de un sifón relativamente largo es de particular importancia, económicamente, porque un pequeño cambio en el tamaño puede repercutir en un gran cambio en el costo de la estructura.

Las pérdidas de carga deben considerarse como sigue:

- (1) pérdida de convergencia en la transición de entrada;
- (2) pérdidas en la estructura de retención cuando es usada;
- (3) pérdidas en la estructura de control cuando se usa;
- (4) pérdidas por fricción y menores en la tubería;
- (5) pérdida de divergencia en la transición de salida;
- (6) las pérdidas de fricción en las transiciones son usualmente despreciables;
- (7) las pérdidas de convergencia y divergencia en las transiciones de enlace cuando se requieren, son despreciables.

La pérdida total es incrementada en un 10% como un factor de seguridad contra la posibilidad de que el sifón provoque remanso.

La pérdida en una transición depende de la diferencia de alturas de velocidad entre el canal y la tubería. Valores considerados adecuados son:

0.4 $\Delta h_v$	... transición de entrada	}	de concreto
0.7 $\Delta h_v$	... transición de salida		
0.5 $\Delta h_v$	... transición de entrada	}	de tierra
1.0 $\Delta h_v$	... transición de salida		

Para una pérdida mínima es deseable proveer de un sello de  $1.5 \Delta h_v$  (3" mínimo) en la tubería de entrada y no sumergencia en la salida. Si el sifón tiene ambas transiciones (entrada y salida) de concreto, es económicamente deseable construir las 2 iguales.

Si el sello a la salida es mayor que  $\frac{1}{6} D$  la pérdida debe calcularse sobre la hipótesis de ensanchamiento brusco y la pérdida para transiciones tanto de tierra como de concreto sería  $1.0 \Delta h_v$ .

Si hay una entrada de retención y tubería o una entrada de control y tubería, el diseño hidráulico es diferente al descrito aquí.

Consideraciones hidráulicas especiales deben tenerse presentes para la entrada de sifones largos donde para ciertas condiciones la entrada no resultará sellada. En sifones largos tales condiciones pueden resultar cuando el canal es operado a flujo parcial (flujos menores al de diseño) o a flujo lleno pero el coeficiente actual de fricción es menor que el asumido en el diseño. Bajo tales condiciones ocurre un resalto hidráulico en la tubería y puede causar condiciones insatisfactorias de flujo.

Otra forma de resolver el problema del aire es colocando ventosas de aire adecuadamente diseñadas en los sitios donde se puede acumular el aire. Este procedimiento es ordinariamente utilizado sólo como una medida de remedio en un sifón existente con problemas de aire.

#### Procedimiento de diseño

- (1) Determine qué estructuras de entrada y salida se requieren y el tipo y tamaño aproximado de la tubería.

- (2) Haga un bosquejo preliminar del perfil del sifón (incluyendo estructuras de entrada y salida) usando la línea de terreno existente, las propiedades del canal y las secciones y elevaciones del canal en los extremos del sifón. Este esquema proveerá los requerimientos de la tubería sobre relleno, pendiente y ángulos de curvas y los requerimientos de sumergencia de la tubería en las transiciones, entradas de retención y tubería o entradas de control y tubería.
- (3) Calcule las pérdidas en este esquema. Si las pérdidas calculadas están en desacuerdo con la carga disponible puede ser necesario hacer algún reajuste en el diámetro de la tubería o aún en el perfil del canal.  
 Si las pérdidas calculadas son mayores que la diferencia entre las superficies de agua en el canal, el sifón probablemente causará remanso. En tal caso aumentar el diámetro o revisar el perfil del canal para proveer la carga adecuada.  
 Si las pérdidas calculadas son mucho menores que la diferencia entre las superficies de agua en el canal, puede ser posible disminuir el diámetro o revisar el perfil del canal de modo que la carga disponible sea aproximadamente igual a las pérdidas de carga.
- (4) En sifones largos donde la entrada puede no estar sellada hay la posibilidad de aire atrapado y condiciones insatisfactorias de operación. La entrada se chequeará para funcionamiento adecuado y se harán los ajustes necesarios.
- (5) Determine la clase de tubería según las cargas externas y la presión interna que muestra el perfil de la tubería.

### Ejemplo

Asumir que un canal de tierra cruza una vía principal y que se proyecta un sifón.

a) Datos: el esquema preliminar adjunto (p. 181)

- (1) Tipo de conducción: canal de tierra
- (2) Obra que cruza: vía principal a 90° con el eje del canal
- (3)  $Q = 15 \text{ pie}^3/\text{seg}$
- (4) Estaca A = 149 + 47 Cota fondo A = 5,406.52' (del perfil)
- (5)  $d_1 = 1.25'$   
 $V_1 = 2.1 \text{ pie}/\text{seg} \rightarrow h_{v1} = 0.07'$
- (6) Cota NWSA = Cota fondo A +  $d_1 = 5,406.52 + 1.25 = 5,407.77'$
- (7) Estaca H = 150 + 49 Cota fondo H = 5,405.50' (del perfil)
- (8)  $d_2 = 1.25'$   
 $V_2 = 2.1 \text{ pie}/\text{seg} \rightarrow h_{v2} = 0.07'$
- (9) Cota NWSH = Cota fondo H +  $d = 5,405.50 + 1.25 = 5,406.75'$
- (10) Ancho del camino = 26'
- (11) Taludes en camino y canal = 1 1/2 ; 1

- (12) Cota cresta camino = J = 5,407.26'
- (13) Cota bordes camino = 5,407.00'
- (14) Control a la entrada: no requerido
- (15) Profundidad de cunetas = 18"
- (16) Estaca J (en el alineamiento del canal) = 150 + 00
- (17) Ancho banquetas del camino = 10.00'
- (18) Freeboard del canal a la salida = 1.3' (freeboard normal).

b) Determinar:

- (1) Requerimientos de estructuras de entrada y salida.  
Usar transiciones iguales de concreto a la entrada y salida.
- (2) Tipo de tubería: estará bajo presión por lo que tiene que ser con uniones de jebe.
- (3)  $D = ?$        $Q = 15 \text{ pie}^3/\text{seg}$  ,       $V = 5 \text{ pie}/\text{seg} \rightarrow D = 24"$
- (4) Propiedades hidráulicas de la tubería:  
 $A = 3.14 \text{ pie}^2$        $V = 4.77 \text{ pie}/\text{seg}$        $h_{vt} = 0.35'$        $P = 6.28'$   
 $R = 0.5'$        $n = 0.013$        $S_f = 0.0044$
- (5) Freeboard adicional del canal aguas arriba del sifón:  
0.5 del freeboard normal =  $0.5 \times 1.3 = 0.65'$  → USAR = 0.7'
- (6) Cota banqueta canal en A =  $NWSA + f + \Delta f = 5407.77 + 1.3 + 0.7$   
= 5,409.77'

Extender la banqueta del canal con esta cota una distancia de 50' aguas arriba del sifón para minimizar los daños por rebose.

- (7) Cota banqueta canal en H =  $NWSH + f = 5,406.75 + 1.3$   
= 5,408.05'
- (8) Hidráulica de la transición de entrada:  
Cota invert C = ? ... se basa en el sello requerido  
sello = 1.5       $h_v = 1.5 (0.35 - 0.07) = 0.42'$  ( 3" mínimo)  
Cota invert C = cota NWSA - sello -  $D_v$   
=  $5,407.77 - 0.42 - \frac{2.00}{\cos 12^\circ}$   
=  $5,407.77 - 0.42 - 2.04 = 5,405.31'$

Si el invert de la transición en su inicio (B) se deja a nivel con el fondo del canal, el desnivel en la transición (p) es:

$$p = 5,406.52 - 5,405.31 = 1.21'$$

$$\left. \begin{array}{l} p \text{ máx. entrada} = \frac{3}{4} D \\ p \text{ máx. salida} = \frac{1}{2} D \end{array} \right\} \text{ haciendo las transiciones iguales}$$

$$p \text{ máx} = \frac{1}{2} D = 1.0'$$

$$\text{USAR } p = 1.0'$$

Luego: invert B = invert C + p = 5,405.31 + 1.00 = 5,406.31'  
o sea 0.21' por debajo del invert en A

Estos 0.21' se desarrolla en la transición de enlace de tierra de 10' de largo, por eso su pendiente en el fondo es  $\frac{10}{0.21}$  más tendida que la límite  $\frac{4}{1}$ , BIEN

(9) Hidráulica de la transición de salida:

Para minimizar sumergencia de la salida dejar el invert de G al nivel del invert del canal (H).

Luego: invert G = invert H = 5,405.50'

Como la transición de salida es igual a la de entrada p = 1.0'

Luego: invert F = invert G - p = 5,404.50'

Sumergencia del top de la abertura =  $d_2 + p - D_v$   
= 1.25 + 1.00 - 2.04 = 0.21'

Chequeo: 0.21' debe ser  $< \frac{D_v}{6} = 0.34'$  BIEN

Luego la pérdida en la transición de salida es mínima =  $0.7 \Delta h_v$

(10) Caída en la superficie del agua (carga disponible)

$$\text{NWSA} - \text{NWSH} = 1.02'$$

(11) Con el esquema preliminar hallar todas las pérdidas y comparar con la carga disponible. Esto indicará si deben revisarse el D de la tubería o el perfil del canal.

Pérdida total + 10% = 1.1 (transición ent. + fricción + curvas + t. salida)

$$= 1.1 | 0.4 (0.35 - 0.07) + 72 \times 0.0044 + 0.04 \times 0.35 + 0.7 (0.35 - 0.07) |$$

$$= 0.73'$$

L del esquema a escala  $\approx 72'$

$$\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx 12^\circ$$

El exceso de carga (0.29') provocará una velocidad en el canal de salida mayor que la velocidad normal en una distancia corta. Suponemos en este ejemplo que esta velocidad no provoca erosión de modo que no es necesario revisar el D de la tubería o el perfil.



- (12) Dimensión "y" de la transición.

Se determina de modo que el freeboard en el inicio de la transición sea 0.5'

$$y = \text{NWSA} - \text{invert B} + f_b = 5,407.77 - 5,406.31 + 0.5 = 1.96'$$

USAR 2.0'

- (13) Dimensión "a" de la transición

El freeboard en la pared de entrada para tuberías de 24" y menores puede ser el mismo que en el inicio de la transición.

$$\text{Luego: } a = \text{cota B} + y - \text{cota C} = 5,406.31 + 2.00 - 5,405.31 = 3.0'$$

- (14) Dimensión C de la transición

Para transiciones de entrada y salida iguales usar un ángulo de 25°.

$$\frac{D}{d} = \frac{2}{1.25} \rightarrow D = 1.6 d$$

Interpolando en la tabla C = 1.9 D = 3.8' ... USAR 4.0'

Este valor puede o no coincidir con el ancho del fondo del canal. La transición de enlace de tierra resolverá esto.

- (15) Valores e y  $t_w$  de la transición

$$\text{Según tablas: } e = 24" \quad t_w = 6"$$

- (16) Valor L de la transición

$$L = 3 D = 6'$$

- (17) Valor B de la transición

$$B = 0.303 D = 7.272" \dots \text{USAR } 8"$$

- (18) Entrada de la tubería y curvas (el libro de la referencia 9 ofrece detalles).

- (19) Perfil final del sifón

Las estaciones C y F vienen controladas por las dimensiones de la vía, taludes y espesor de la pared vertical de las aberturas.

De la figura se ve que C debe quedar al menor 34.36' aguas arriba del eje.

$$\text{Luego: } C = J - 34.36 = (150 + 00) - 34.36 = 149 + 65.64 \text{ o menos}$$

$$\text{USAR } \dots C = 149 + 65$$

$$B = C - 6.00 = 149 + 59 \quad A = B - 10.00 = 149 + 49$$

La pequeña diferencia entre el valor dado para A (149 + 47) y el calculado (149 + 49) no es significativa como para exigir cambios en el perfil del canal.

F, G y H ... análogamente:

$$F = J + 30.38 = (150 + 00) + 30.38 = 150 + 30.38 \text{ o más}$$

$$\text{USAR ... } F = 150 + 31$$

$$G = F + 6.00 = 150 + 37$$

$$H = G + 10.00 = 150 + 47$$

Cabe el mismo comentario anterior.

Las estaciones D y E se escogen de modo de asegurar relleno de 2' en los invert de las cunetas. Los invert de las cunetas que dan a 15.25' del eje, por eso los invert de las curvas de la tubería deben ubicarse a unos 16' del eje.

$$D = J - 16.00 = (150 + 00) - 16.00 = 149 + 84$$

Cota D = borde cuneta - prof. cuneta - relleno mín - espesor tubería - D tubería

$$D = 5,407.00 - 1.5 - 2.00 - 0.25 - 2.00 = 5,401.25$$

$$E = J + 16 = (150 + 00) + 16.00 = 150 + 16$$

$$\text{Cota E} = \text{Cota D} - L_{DE} \times 0.005 = 5,401.25 - 0.16 = 5,401.09$$

Pendiente de la tubería aguas arriba ( $S_1$ ) entre C y D:

$$\Delta H = \text{estaca D} - \text{estaca C} = (149 + 84) - (149 + 65) = 19'$$

$$\Delta V = \text{cota C} - \text{cota D} = 5,405.31 - 5,401.25 = 4.06'$$

$$S_1 = \frac{\Delta H}{\Delta V} = \frac{4.06}{19} = 0.214$$

$$\alpha_1 = \text{arc tg } 0.214 \rightarrow \alpha_1 = 12^\circ 05'$$

Análogamente, para  $S_3$ :

$$\Delta H = \text{estaca F} - \text{estaca E} = 150 + 31 - 150 + 16 = 15'$$

$$\Delta V = \text{cota F} - \text{cota E} = 5,404.50 - 5,401.09 = 3.41'$$

$$\alpha_3 = 12^\circ 51'$$

(20) Pérdidas de carga finales en el sifón.

$$H_L = 1.1 (h_i + h_f + h_b + h_o) = 1.1 (0.4 \Delta h_v + L S_f + \xi hvt \times 2 + 0.7 \Delta h_v)$$

$$L_{CD} = \frac{\text{estaca D} - \text{estaca C}}{\cos \alpha_1} = \frac{19}{\cos 12^\circ 05'} = 19.4'$$

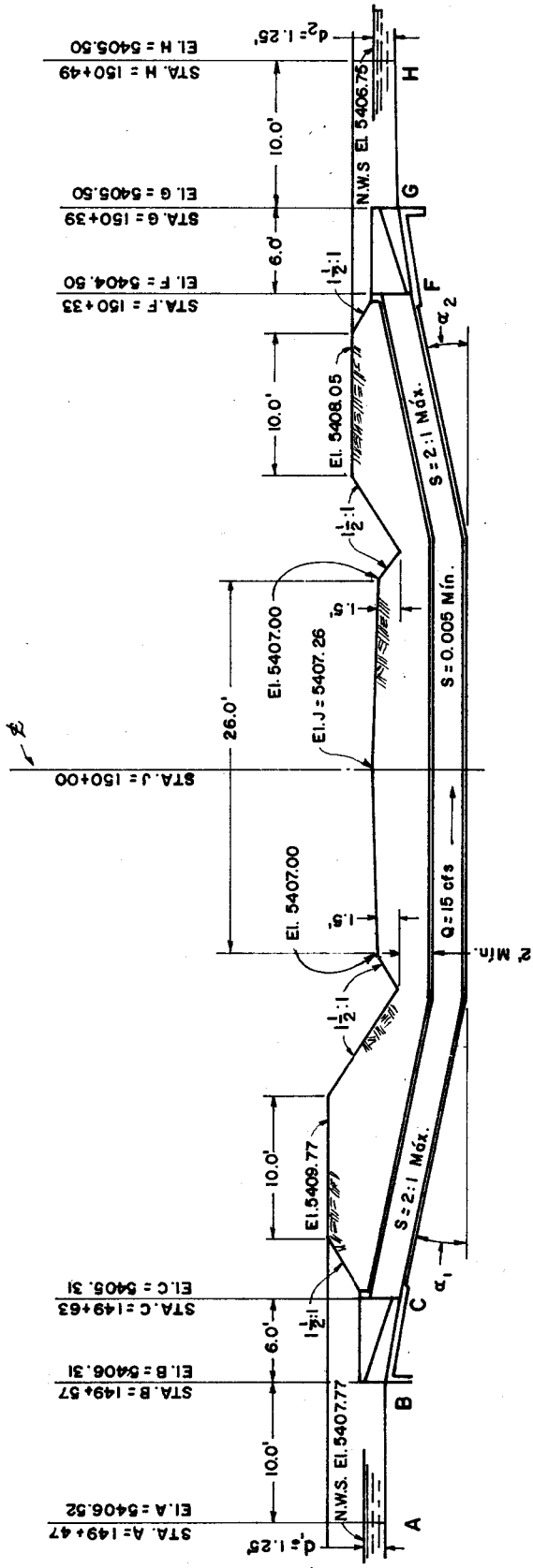
$$L_{DE} = \text{estaca E} - \text{estaca D} = (150 + 16) - (149 + 84) = 32.0'$$

$$L_{EF} = \frac{\text{estaca F} - \text{estaca E}}{\cos \alpha_2} = \frac{15}{\cos 12^\circ 51'} = 15.4'$$

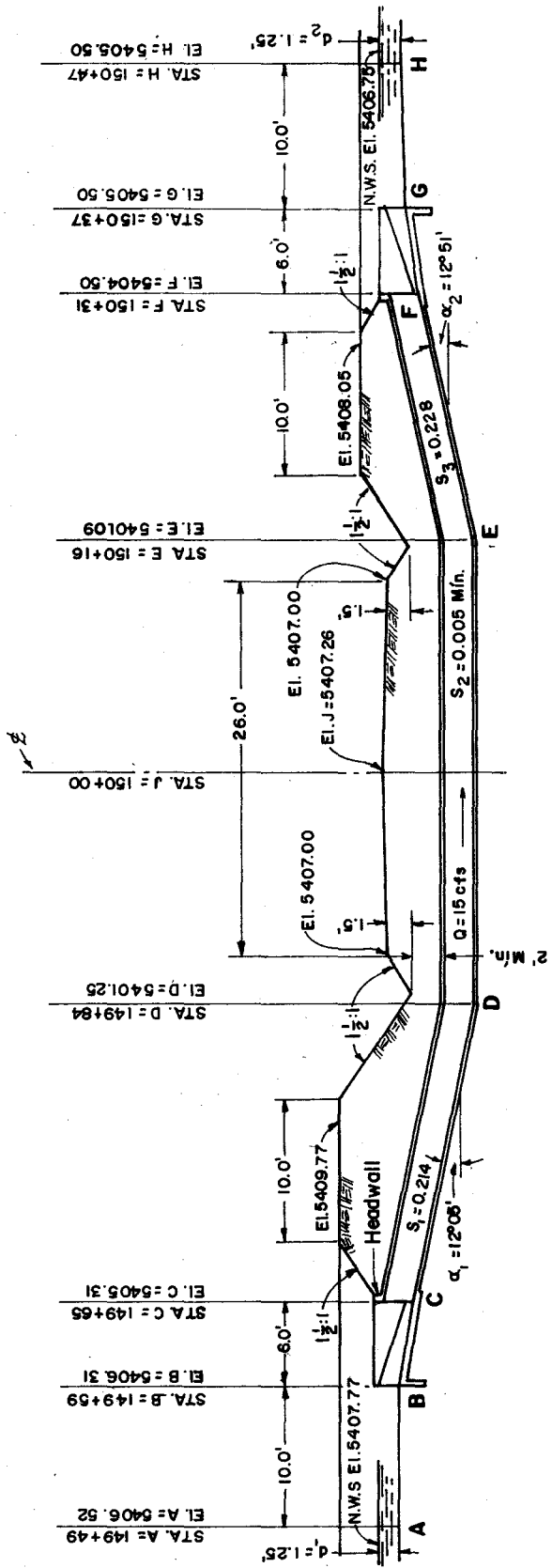
} L = 66.8'

$$H_L = 1.1 | 0.4 (0.35 - 0.07) + 66.8 \times 0.0044 + 0.04 \times 0.35 \times 2 + 0.7 (0.35 - 0.07)|$$

$$H_L = 1.1 | 0.11 + 0.29 + 0.02 + 0.20 | = 0.68'$$



ESQUEMA PRELIMINAR



ESQUEMA FINAL

Desde que la carga disponible (1.02') es mayor que la requerida (0.68') se presentará una velocidad aguas abajo mayor que la velocidad normal. Suponemos en este ejemplo que esta velocidad no provoca erosión y que entonces no se requieren revisar ni el perfil del canal ni el D de la tubería.

(21) Protección contra la erosión

El tirante en el canal es menor que 2' de modo que no se requiere protección al final del sifón.

(22) Clase de tubería

El relleno equivalente de tierra no excederá de 10' (3' de relleno real + relleno equivalente a una carga H<sub>2</sub>O o sea 9.1' en total).

La carga hidrostática no excede de 25'.

Luego, se designaría la tubería 24 B 25.

#### 7.5.4 Diseño hidráulico de un chute de canal abierto

##### Descripción

Los chutes son similares a las caídas excepto que los chutes son más tendidos. Un chute consta de una entrada, el chute propiamente dicho, un dissipador de energía y una transición de salida.

La entrada debe proveer de un control para prevenir el remanso en el canal y su deterioro. El control puede consistir de un check, una escotadura o un vertedero. La entrada puede requerir collares para disminuir la percolación. La pérdida de carga a la entrada puede despreciarse puesto que es pequeña y no va a afectar el resultado final. Si la pendiente del fondo de la entrada es tendida puede asumirse que el tirante crítico se presenta en la intersección de la entrada con el chute; si la pendiente es tan severa que se presenta flujo supercrítico en la entrada, deben calcularse los valores de la velocidad y el tirante a fin de determinar el gradiente de energía al inicio del chute.

El chute sigue generalmente la superficie original del terreno y se conecta a un dissipador de energía en el extremo inferior.

Se usa como dissipador de energía una cámara dissipadora o una salida con deflector. Aquí sólo tratamos la primera.

La transición de salida es usada cuando se quiere una variación gradual del flujo entre la cámara dissipadora y el canal de aguas abajo. Si se usa transición de salida su fondo debe ser inclinado. La pérdida de carga se desprecia.

##### Consideraciones de diseño

- a) Valor de n.- En el cálculo hidráulico de un chute se consideran valores conservadores de n. En el cálculo de las alturas de la pared se asume  $n = 0.014$  y en el cálculo de los valores de la energía se asume  $n = 0.010$ .

b) Transiciones.- Se disponen a fin de evitar la formación de ondas. Para ello la cotangente del ángulo de deflexión de la superficie de agua no debe ser menor que 3.375 el número de Froude (F). Esta restricción rige para todo cambio en la sección incluso en el chute o en la cámara disipadora. Si esta restricción no controla el ángulo de deflexión el valor máximo en la entrada es de 30°. En la salida el valor máximo es de 25°.

$$\cot \alpha = 3.375 F \quad (7.1)$$

donde: 
$$F = \frac{V}{\sqrt{(1 - K) g d \cos \theta}} \quad (7.2)$$

Se usa el promedio F al inicio y al fin de la transición.

d = tirante de agua normal al piso del chute

$$d = \frac{\text{Area de la sección}}{\text{Ancho superficial}}$$

$$g = 32.2 \text{ pie/seg}^2$$

K = un factor de aceleración determinado así:

Con el piso de la transición en un plano ... K = 0

Con el piso de la transición en una curva circular:

$$K = \frac{V^2}{g R \cos \theta} \quad (7.3)$$

Con el piso de la transición en una curva parabólica:

$$K = \frac{(\text{tg } \theta_L - \text{tg } \theta_o) 2 h_v \cos^2 \theta_o}{L_T} \quad (7.4)$$

El Bureau of Reclamation limita el valor de K en 0.5 como máximo para asegurar presión positiva en el piso.

Nomenclatura:

$h_v$  = altura de velocidad en el origen de la trayectoria

$L_T$  = longitud de la trayectoria

R = radio de curvatura del piso

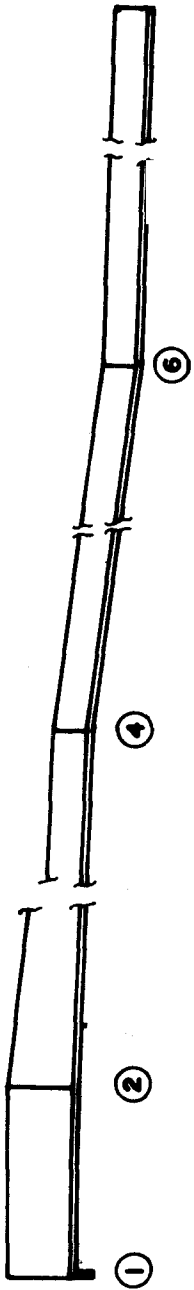
V = velocidad del punto considerado

$\theta_v$  = ángulo de la pendiente del piso en el punto considerado

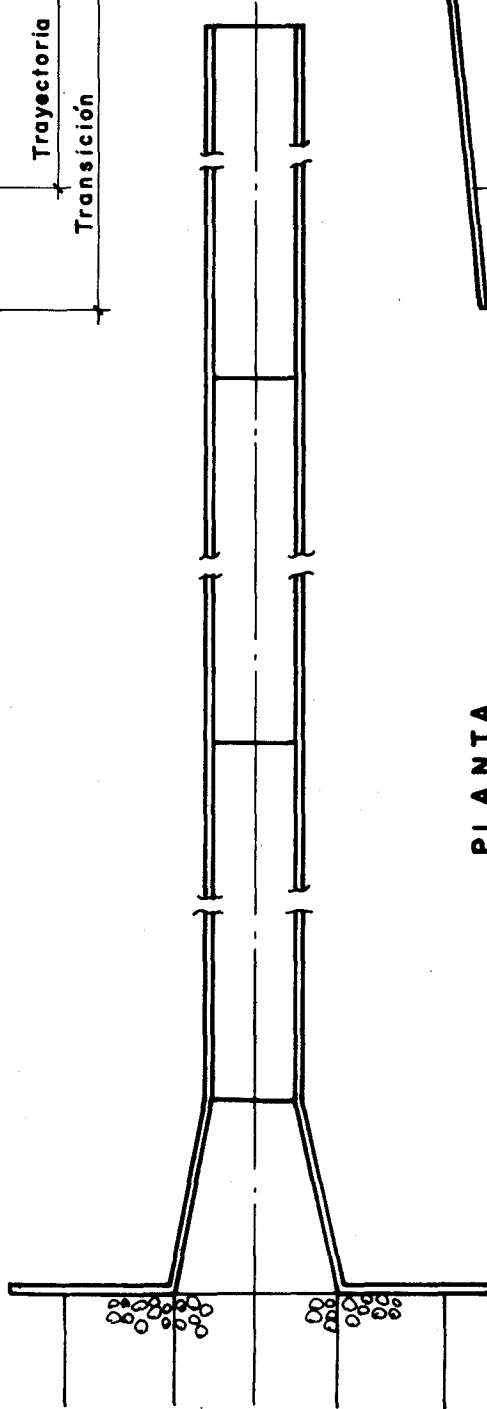
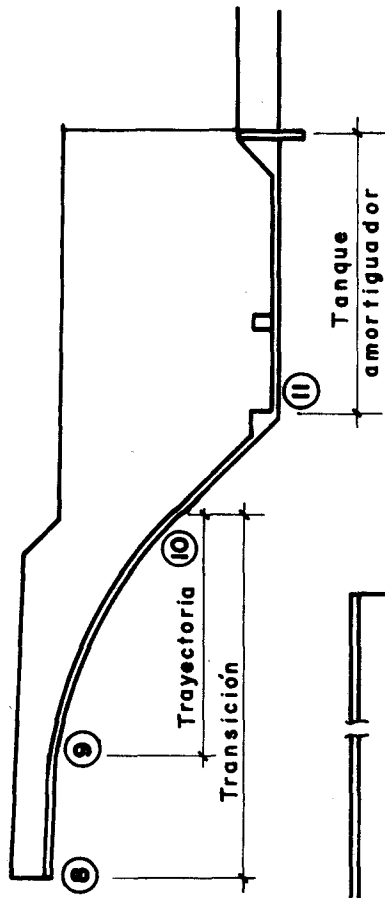
$\theta_o$  = ángulo de la pendiente del piso en el inicio de la trayectoria

$\theta_L$  = ángulo de la pendiente del piso en el fin de la trayectoria

El ángulo de abocinado y los anchos se calculan y dibujan para varios puntos a lo largo de la transición. Se puede dibujar una cuerda que aproxima la curva teórica a fin de determinar el ángulo de abocinado a usar.



PERFIL



PLANTA

- c) Sección del chute.- Se usa comúnmente la forma rectangular por facilidad de construcción. Cuando se requiere aumentar la resistencia al deslizamiento se usan cutoffs en el chute a fin de afianzar la estructura en la fundación.

En chutes de menos de 30' de largo se puede despreciar la fricción. Se puede entonces usar la ecuación de Bernoulli para calcular las variables del flujo en la base del chute.

$$\text{La ecuación: } d_1 + h_{v1} + z = d_2 + h_{v2} \quad (7.5)$$

se resuelve por tanteos. Aquí  $z$  es el cambio de elevación del piso del chute. Para chutes de más de 30' de largo se incluye la pérdida por fricción y la ecuación a usar es:

$$d_1 + h_{v1} + z = d_2 + h_{v2} + h_f \quad (7.6)$$

Aquí  $h_f$  es la pérdida por fricción en el tramo y es igual a la pendiente promedio de fricción  $S_a$  en el tramo, multiplicada por la longitud del tramo  $L$ . Se asume un valor  $n = 0.010$ . La pendiente de fricción en un punto ( $S_f$ ) se calcula con Manning.

Usando ya sea 7.5 ó 7.6 se asume  $d_2$  y se calculan y comparan los niveles de energía. Se hacen tanteos hasta que se logra el balance de los niveles de energía.

Otra forma de la ecuación en que se considera la fricción es:

$$L = \frac{(d_1 + h_{v1}) - (d_2 + h_{v2})}{S_a - S} \quad (7.7)$$

$S_a$  ... pendiente promedio de fricción

$S$  ... pendiente del piso del canal

La aplicación de 7.7 se realiza tramo a tramo, asumiendo pequeños cambios en la energía y hallando el correspondiente cambio en la longitud.

La altura de las paredes en el chute debe ser igual al tirante máximo hallado más un freeboard, o sino 0.4 veces el tirante crítico en el chute más freeboard, tomándose el mayor. El freeboard mínimo recomendado es 12". El tirante y el freeboard se miden perpendicularmente al piso del chute.

- d) Trayectoria.- Cuando se usa cámara disipadora el tramo final del chute debe ser un tramo corto de fuerte pendiente. La pendiente de este tramo corto debe caer entre 1.5:1 y 3:1, con un valor preferible de 2:1. Se requiere una curva vertical entre el chute y el tramo de fuerte pendiente. Viene a ser la trayectoria.

Generalmente se usa una trayectoria parabólica pues  $K$  resulta constante a lo largo de ella. La trayectoria parabólica viene determinada por:



$$Y = X \operatorname{tg} \theta_0 + \frac{(\operatorname{tg} \theta_L - \operatorname{tg} \theta_0) X^2}{2 L_T} \quad (7.8)$$

donde;

X ... dist. horiz. desde el origen hasta un punto de la trayectoria

Y ... dist. vert. desde el origen hasta el punto de la trayectoria

$L_T$  ... dist. horiz. desde el punto de origen hasta el fin de la trayectoria

$\theta_0$  ... ángulo de inclinación del chute en el origen de la trayectoria

$\theta_L$  ... ángulo de inclinación del chute al final de la trayectoria.

Se puede seleccionar una longitud de trayectoria  $L_T$  tal que sustituida en (7.4) de un valor para K de 0.5 ó menos. Este valor de  $L_T$  se usa entonces en (7.8) para calcular Y.

Una curva ligeramente más tendida que la calculada puede entonces usarse.

Las variables del flujo en la trayectoria y en el tramo corto empinado pueden calcularse de la misma manera que se calcularon en el chute. Se asume una cota para el piso de la cámara disipadora y se calcula el gradiente de energía en la unión del chute y la cámara. Las variables del flujo en esta sección se usan como las variables al inicio del resalto en el diseño de la cámara disipadora.

- e) Cámara disipadora.- Después del tramo corto parado el agua fluye a velocidad mayor que la crítica. El cambio brusco de pendiente fuerza al agua a un resalto hidráulico que disipa la energía en forma de alta turbulencia. La cámara se dimensiona para contener el resalto. Para que la cámara opere apropiadamente  $F_1$  debe caer entre 4.5 y 15. Las cámaras disipadoras requieren de "agua de cola", agua después del resalto, que haga que el resalto se produzca en la cámara misma.

Las cámaras disipadoras tienen sección rectangular, paredes paralelas y piso horizontal. El ancho se determina con:

$$b = \frac{360 \sqrt{Q}}{350 + Q} \quad b \text{ en pies, } Q \text{ en pie}^3/\text{seg}$$

El tirante después del resalto se calcula con:

$$d_2 = -\frac{d_1}{2} + \sqrt{\frac{d_1}{4} + \frac{2 V_1^2 d_1}{g}} \quad (7.9)$$

La cota del gradiente hidráulico después del resalto debe balancear con el gradiente hidráulico en el canal de aguas abajo. Si no hay balance se asume una nueva cota para el piso de la cámara o un nuevo ancho de la cámara y se calculan los niveles de energía. Se repiten los tanteos hasta que se obtiene balance.

Las cotas seleccionadas deben revisarse para asegurar que la cámara disipadora operará satisfactoriamente a flujo parcial. Los diseños

son normalmente chequeados para un tercio del caudal de diseño. Si la revisión lo indica necesario se baja el piso o se asume un ancho diferente y se repite el procedimiento.

La longitud mínima para estas cámaras disipadoras es normalmente 4 veces  $d_2$ .

El freeboard es medido por encima del gradiente de energía máximo de aguas abajo.

En el canal de aguas abajo el tirante debe calcularse con un  $n$  disminuido en un 20% y este tirante así determinado es el que se usa para calcular el gradiente de energía.

A fin de estabilizar el resalto se usan bloques en el chute y en el piso. La ubicación, espaciamiento y detalles de los bloques se muestran en la figura.

Si no se usa transición de salida se requiere un umbral corrido al final de la cámara, de cara vertical aguas abajo y cara inclinada 2:1 aguas arriba. La altura del umbral debe fijarse de modo de proveer agua de cola para el resalto.

#### Procedimiento de diseño

- (1) Seleccionar y diseñar el tipo de entrada a ser usado.
- (2) Determinar el gradiente de energía al comienzo del chute.
- (3) Calcular las variables del flujo al final del chute.
- (4) Diseñar la trayectoria y el tramo corto empinado.
- (5) Asumir una cota para el piso de la cámara disipadora y calcular las características del flujo aguas arriba del resalto. Determinar  $d_2$  y el gradiente de energía después del resalto.
- (6) Determinar el gradiente de energía en el canal de aguas abajo y compararlo con el gradiente de energía después del resalto.
- (7) Puede ser necesario asumir una nueva cota para el fondo de la cámara y calcular los valores de arriba varias veces antes de obtener una coincidencia en los gradientes de energía.
- (8) Revisar que la operación sea apropiada a flujo parcial.
- (9) Determinar la longitud de la cámara y la altura de sus paredes.
- (10) Diseñar los bloques del chute y del piso y el umbral terminal o la transición de salida según se requiera.
- (11) Chequear la posibilidad de que se desarrollen ondas en la estructura.
- (12) Proveer de protección en el canal de aguas abajo si se requiere.

### Ejemplo de diseño

La entrada es diseñada para proveer de un control para el canal de aguas arriba.

Las propiedades del canal en el punto (1) son:

$$Q = 35 \text{ pie}^3/\text{seg}$$

$$b = 6.0'$$

$$d = 2.40'$$

$$n = 0.025$$

$$S = 0.00035$$

$$t = 1 \frac{1}{2} : 1$$

La cota del gradiente de energía en (1) se calcula como sigue:

$$A_1 = 23.04 \text{ pie}^2$$

$$V_1 = 1.52 \text{ pie}/\text{seg}$$

$$h_{v1} = 0.04'$$

$$E_1 = d_1 + h_{v1} = 2.44'$$

$$\text{Cota grad. (1)} = \text{cota fondo (1)} + E_1 = 3,703.18 + 2.44 = 3,705.62'$$

Asumir que el tirante crítico ocurre en (2). Con un  $Q = 35 \text{ pie}^3/\text{seg}$  un chute de ancho  $b = 3'$  es una elección razonable. La cota del fondo en (2) es:

$$d_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} = 1.62'$$

$$A_c = 4.86 \text{ pie}^2$$

$$V_c = 7.20 \text{ pie}/\text{seg}$$

$$h_{vc} = 0.80'$$

$$R_c = 0.78'$$

Para  $n = 0.010$  se halla  $S_c = 0.0033$

$$E_c = d_c + h_{vc} = 2.42'$$

Las pérdidas en la transición de entrada son:

\* una pérdida de convergencia que se asume igual a  $0.2 \Delta h_v$ , siendo  $\Delta h_v$  el cambio de la altura de velocidad entre el comienzo y el fin de la transición.

\* una pérdida por fricción, igual a la pendiente promedio de fricción en la entrada multiplicada por la longitud de la entrada.

$$\text{Por convergencia} = 0.2 (0.80 - 0.04) = 0.15'$$

Por fricción, para una transición de 10' de longitud :

$$\frac{0.00035 + 0.0033}{2} \times 10 = 0.02'$$

Para balancear la energía en el canal de aguas arriba, el fondo de la entrada en (2) debe igualar a:

$$3,705.62 - \text{pérdidas en la transición} - E_c$$

$$\text{o sea } 3,705.62 - 0.15 - 0.02 - 2.42 = 3,703.03'$$

Una cota de 3,703.00' en (2) proveerá de un control para el flujo hacia el chute.

Determinar el máximo ángulo de deflexión en las paredes de la entrada:

De la ecuación (7.1):  $\cot \alpha = 3.375 F$

$$F = \frac{V}{\sqrt{1 - K} \cdot g \cdot d \cdot \cos \theta}$$

$$K = 0$$

$$\cos \theta = 0.99984$$

$$F_1 = \frac{1.52}{\sqrt{32.2 \times 2.40 \times 0.99984}} = 0.17$$

$$F_2 = \frac{7.2}{\sqrt{32.2 \times 1.62 \times 0.99984}} = 1.00$$

$$F = 0.585$$

$$\alpha = 27^\circ$$

Con una transición de longitud 10' el ángulo de deflexión será de unos 8.5° lo cual indica que no se iniciarán ondas en la entrada.

Determinar el flujo en el chute

El flujo en (2) es flujo crítico. El tirante normal para una pendiente de 0.08163 es de 0.50' y es alcanzado en (3) a una distancia L que se determina por los métodos del flujo gradualmente variado o sino por tanteos buscando que balancear las energías según la ecuación de Bernoulli (7.6). Supongamos  $L = 170'$

Energía en (2) con respecto a (3):

$$E_2 = z + d_2 + h_{v2}$$

$$z = S \cdot L = 0.08163 \times 170 = 13.88'$$

$$E_2 = 13.88 + 1.62 + 0.80 = 16.30'$$

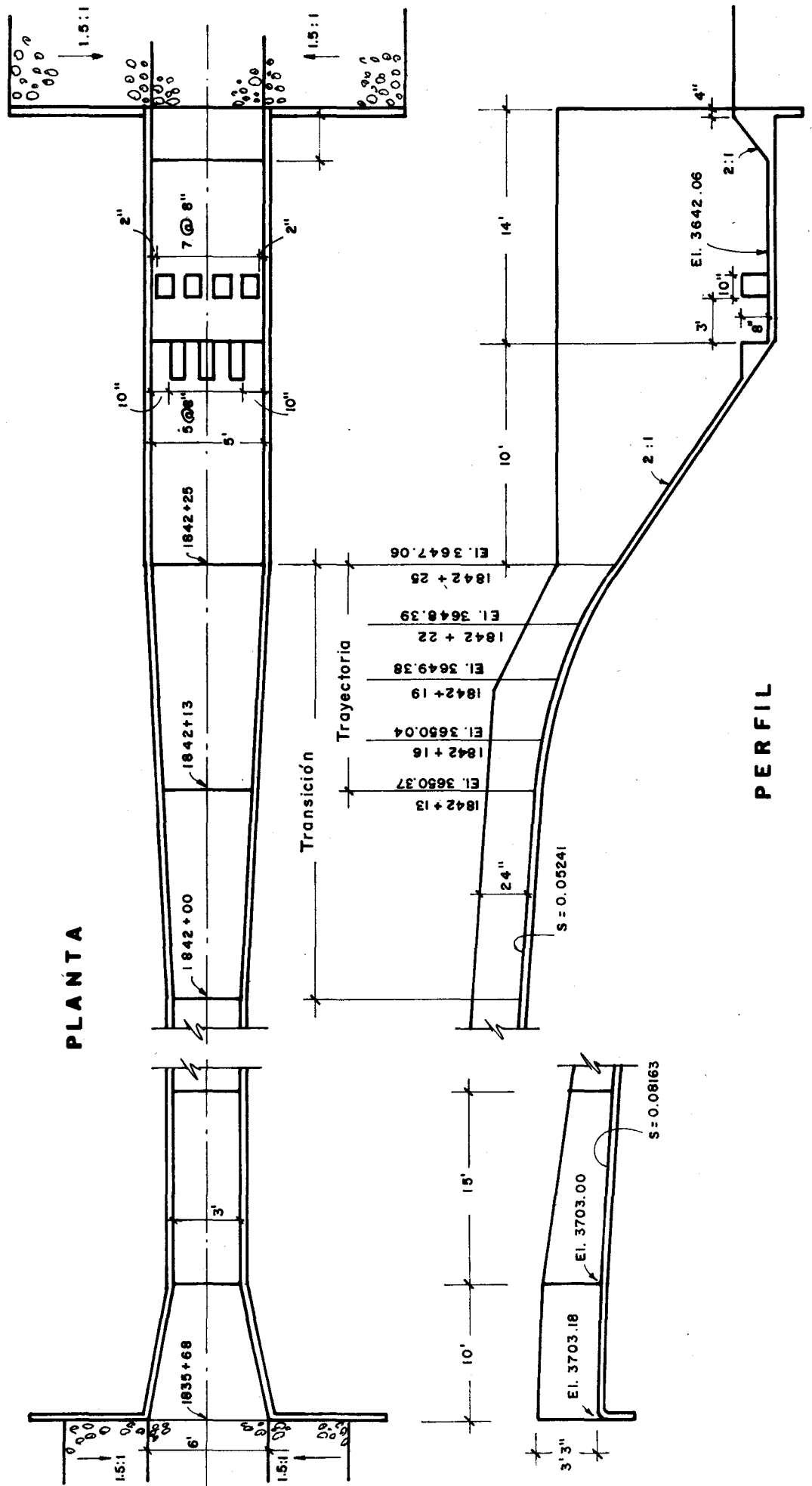
Energía en (3):

$$E_3 = d_3 + h_{v3} + h_f$$

$$h_f = \text{pendiente de fricción promedio} \times L = S_a \times L$$

$$d_3 = 0.50'$$

$$A_3 = 1.50 \text{ pie}^2$$



$$\begin{aligned}
 V_3 &= 23.33 \text{ pie/seg} \\
 h_{v3} &= 8.45' \\
 S_3 &= 0.08163 \\
 S_a &= \frac{0.0033 + 0.08163}{2} = 0.0425 \\
 h_f &= 0.0425 \times 170 = 7.23' \\
 E_3 &= 0.50 + 8.45 + 7.23 = 16.18'
 \end{aligned}$$

Suficiente aproximación para fines prácticos. Luego entre (2) y (3) el flujo es gradualmente variado y entre (3) y (4) el flujo es uniforme con un tirante normal de 0.50'.

Para el flujo entre (4) y (6):

El tirante normal en la pendiente de 0.10510 es 0.48'. Este tirante es alcanzado en (5) y los niveles de energía entre (4) y (5) balancean. Entre (5) y (6) el flujo es uniforme con un tirante de 0.48'.

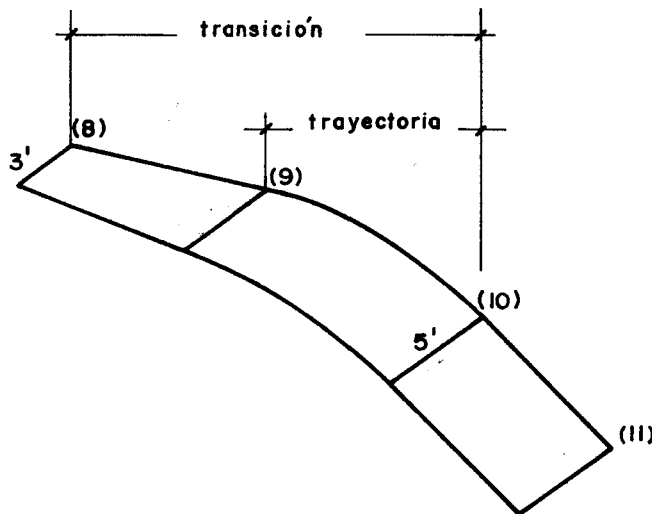
Para el flujo entre (6) y (8):

El tirante normal en una pendiente de 0.052416 es 0.60'. Este tirante es alcanzado en (7) y los niveles de energía entre (6) y (7) balancean. Entre (7) y (8) el flujo es uniforme con un tirante de 0.60'.

La altura de las paredes puede ser 24" considerando un freeboard de 12".

### Diseño de la trayectoria

Las características del flujo en la trayectoria y en el canal corto empinado se calculan siguiendo el mismo procedimiento que en el chute. Supongamos una transición entre (8) y (10) de longitud 25' para pasar el fondo de 3' a 5'. La trayectoria es entre (9) y (10) y luego viene el canal empinado entre (10) y (11).



En (8):

$$\begin{aligned}d_8 &= 0.60 \\A_8 &= 1.80 \\V_8 &= 19.44 \\h_{v8} &= 5.86 \\R_8 &= 0.43 \\S_8 &= 0.05241\end{aligned}$$

En (9):

$$\begin{aligned}d_9 &= 0.44 \\A_9 &= 1.78 \\V_9 &= 19.66 \\h_{v9} &= 6.0 \\R_9 &= 0.36 \\S_9 &= 0.0683\end{aligned}$$

El valor de K para calcular la trayectoria se limita a 0.5. La longitud mínima de trayectoria que proporcione este valor es, según (7.4):

$$L_T = \frac{(0.5 - 0.0524) \times 2 \times 6 \times 0.99863}{0.5} = 10.72' \quad \dots \text{USAR} = 12.0'$$

Los puntos de la trayectoria se determinan con (8):

x	y
3'	0.33'
6'	0.99'
9'	1.98'
12'	3.31'

En (10) :

$$\begin{aligned}d_{10} &= 0.30' \\A_{10} &= 1.50 \text{ pie}^2 \\V_{10} &= 23.33 \text{ pie/seg} \\R_{10} &= 0.27' \\S_{10} &= 0.14107\end{aligned}$$

Chequeo del ángulo de deflexión. El usado es:

$$\text{tg } \alpha = \frac{1}{25} = 0.04 \quad \dots \quad \alpha = 2^\circ 15'$$

El máximo permisible es, según (7.1):

$$\text{cotg } \alpha = 3.375 F$$

$$F \text{ en (8)} = \frac{19.44}{\sqrt{32.2 \times 0.60 \times 0.99863}} = 4.43$$

para K = 0

$$F \text{ en (10)} = \frac{23.33}{\sqrt{|(1 - 0.45) \times 32.2| \times 0.30 \times 0.8944}} = 10.70$$

$$\text{para K según (4)} = \frac{(0.50 - 0.052) \times 2 \times 6 \times 0.999^2}{12} = 0.45$$

$$\text{Luego } F = \frac{F_8 + F_{10}}{2} = \frac{4.43 + 10.70}{2} = 7.56$$

$$\text{y ... } \cotg \alpha = 3.375 \times 7.56 = 25.52$$

$$\alpha = 2^\circ 15'$$

Con lo que resulta que el ángulo usado en la transición es satisfactorio.

### Diseño de la cámara disipadora

Debe asumirse una cota para el fondo de la cámara antes de que las propiedades del flujo en el canal corto empinado puedan ser calculadas.

Asumir que esta cota es 3642.06'. Balanceando las energías entre el fin de la trayectoria (10) y el pie del canal corto (11) se obtiene:

$$d_{11} = 0.26'$$

$$A_{11} = 1.30 \text{ pie}^2$$

$$V_{11} = 26.92 \text{ pie/seg}$$

$$H_{v11} = 11.25'$$

El número de Froude en este punto es  $F = 9.30$ , valor que está dentro del rango de buen funcionamiento.

Tirante después del resalto, con (9):

$$d_2 = 3.29'$$

Características del flujo después del resalto:

$$A_2 = 16.45 \text{ pie}^2$$

$$V_2 = 2.13 \text{ pie/seg}$$

$$h_{v2} = 0.07$$

$$E_2 = d_2 + h_{v2} = 3.36'$$

La elevación del gradiente de energía después del resalto es  $3642.06 + 3.36 = 3645.42'$ . Esta energía debe ser balanceada por la energía en el canal calculada con el  $n$  reducido en un 20%.

$$Q = 35 \text{ pie}^3/\text{seg}$$

$$n = 0.025 \times 0.8 = 0.020$$

$$b = 6'$$

$$d = 2.16'$$

$$A = 19.96 \text{ pie}^2$$

$$V = 1.75 \text{ pie/seg}$$

$$h_v = 0.05'$$

$$E = d + h_v = 2.21'$$

La cota mínima del fondo del canal requerida para balancear la energía después del resalto es:



$$3645.42 - 2.21 = 3643.21'$$

La cota mostrada en la figura es 3643.73'. Las energías balancean por lo que la cota asumida para el piso de la cámara es satisfactoria. En general se requieren varios tanteos, con diferentes valores de la cota de fondo asumida o con diferentes anchos de la cámara, antes de que balanceen las energías.

La longitud de la cámara disipadora debe ser de unos

$$4 d_2 = 4 \times 3.29 = 13.16 \quad \dots \quad \text{USAR} = 14'$$

Para el freeboard se sugiere un valor de 2'. Este freeboard debe estar encima del nivel máximo de energía aguas abajo. Usar paredes de 6' de alto.

Los bloques son dimensionados y ubicados como indica la figura.

### Diseño de la transición de salida

Cuando se requiere se usa una transición de salida de concreto entre la cámara disipadora y el canal de aguas abajo. En este ejemplo no se requiere. Un umbral corrido se usa al final de la cámara y su altura se fija de modo de asegurar agua de cola para el resalto.

Energía crítica al final de la cámara:

$$d_c = 1.23'$$

$$h_{vc} = 0.50'$$

$$E_c = 1.73'$$

La altura mínima del umbral, requerida para proveer un control para el flujo de aguas abajo es igual a la energía después del resalto  $E_2$  menos la energía cinética  $E_c$ , o sea:  $3.36 - 1.73 = 1.63'$  USAR = 1.67'

### Formación de olas

La formación de olas en un chute es indeseable porque ellas pueden sobrepasar las paredes del chute y también llegar al tanque amortiguador. Con un flujo así los tanques amortiguadores no son buenos disipadores de energía.

Los chutes son susceptibles a la formación de olas longitudinales, resultando un flujo pulsante e inestable (slug flow). Los más susceptibles son los chutes largos y tendidos (más de 70 m de longitud y menos de 20° de inclinación).

También se pueden formar en los chutes ondas transversales. Si esto ocurre se debe generalmente a que las transiciones son abruptas, la estructura no es simétrica o la estructura no tiene un alineamiento completamente recto.

Si se siguen las indicaciones que se han dado no deberían formarse olas transversales. Y en cuanto a las olas longitudinales existe un método para minimizar su efecto, el mismo que es descrito en la referencia 9.

## Alternativa

La alternativa a chute sería una serie de caídas. La decisión se basa en consideraciones hidráulicas y de economía. La separación entre caídas debe ser tal que permita que se desarrolle flujo uniforme y garantizar de este modo el trabajo correcto de la estructura. De disponerse muy juntas las caídas podría presentarse flujo disparado. En una primera aproximación el espaciamiento entre caídas debe ser del orden de los 65 metros.

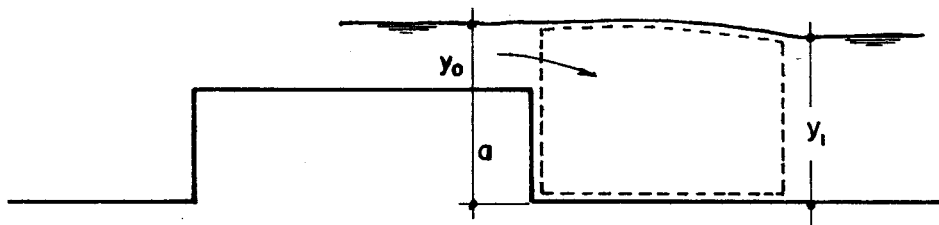
En cuanto a la economía, la serie de caídas tiene un costo inicial relativamente bajo pero su costo de mantenimiento es alto. En el chute es al revés, su costo inicial es relativamente alto pero su costo de mantenimiento es bajo. Como la función que cumplen es la misma por lo general se prefiere hacer un esfuerzo en la inversión inicial y optar por el chute.

### 7.5.5 Diseño hidráulico de un partididor

Los partididores son dispositivos que se instalan en los canales de riego con flujo uniforme subcrítico con el fin de dividir el caudal en porcentajes fijos.

La idea primaria consiste en provocar el escurrimiento crítico y esto se hace elevando el fondo, disminuyendo el ancho o ambas cosas. En cualquiera de los tres casos lo importante es acelerar el flujo, provocar el FC y aislar la sección de partición de variaciones de aguas abajo.

La explicación se hará para un partididor del tipo de barrera (elevación del fondo). La barrera está conformada por una especie de vertedero de pared gruesa o lo que es lo mismo por una grada de subida y otra de bajada de igual altura. Como primera cuestión se va a estudiar la altura que debe tener la grada a fin de aislar la corriente de llegada de la corriente que sigue.



Ecuación de la cantidad de movimiento en el volumen de control indicado:

$$\rho Q V_0 + F_0 - F_1 = \rho Q V_1$$

$$\rho Q V_0 + \gamma \bar{Y}_0 A_0 - \gamma \bar{Y}_1 A_1 = \rho Q V_1$$

$$\rho Q V_0 + \gamma \cdot \frac{a + Y_0}{2} \cdot A_0 - \gamma \cdot \frac{Y_1}{2} \cdot A_1 = \rho Q V_1$$

dividiendo entre  $\gamma$  :

$$\frac{Q V_0}{g} + \frac{a + Y_0}{2} \cdot A_0 - \frac{Y_1}{2} \cdot A_1 = \frac{Q V_1}{g}$$

dividiendo entre el ancho b:

$$\frac{q V_0}{g} + \frac{a + Y_0}{2} \cdot (a + Y_0) - \frac{Y_1}{2} \cdot Y_1 = \frac{q V_1}{g}$$

$$\frac{q^2}{g Y_0} + \frac{(a + Y_0)^2}{2} - \frac{Y_1^2}{2} = \frac{q^2}{g Y_1}$$

pero  $Y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \rightarrow \frac{q^2}{g} = Y_c^3$

reemplazando,

$$\frac{Y_c^3}{Y_0} + \frac{(a + Y_0)^2}{2} - \frac{Y_1^2}{2} = \frac{Y_c^3}{Y_1}$$

dividiendo entre  $Y_c^2$ ,

$$\frac{Y_c}{Y_0} + \frac{(a + Y_0)^2}{2} \frac{1}{Y_c^2} - \frac{Y_1^2}{2 Y_c^2} = \frac{Y_c}{Y_1}$$

llamando

$$\left\{ \begin{array}{l} X_0 = \frac{Y_0}{Y_c} \\ X_1 = \frac{Y_1}{Y_c} \\ K = \frac{a}{Y_c} \end{array} \right.$$

$$\frac{1}{X_0} + \frac{(K + X_0)^2}{2} - \frac{X_1^2}{2} = \frac{1}{X_1}$$

Para que la corriente de llegada no se vea influenciada por la corriente que sigue debe producirse flujo crítico sobre la grada:

$$Y_0 = Y_c \rightarrow X_0 = \frac{Y_0}{Y_c} = 1$$

la última expresión queda:

$$1 + \frac{K^2}{2} + \frac{1}{2} + K - \frac{X_1^2}{2} = \frac{1}{X_1}$$

$$2 + K^2 + 1 + 2K - X_1^2 = \frac{2}{X_1}$$

ordenando con respecto a K:

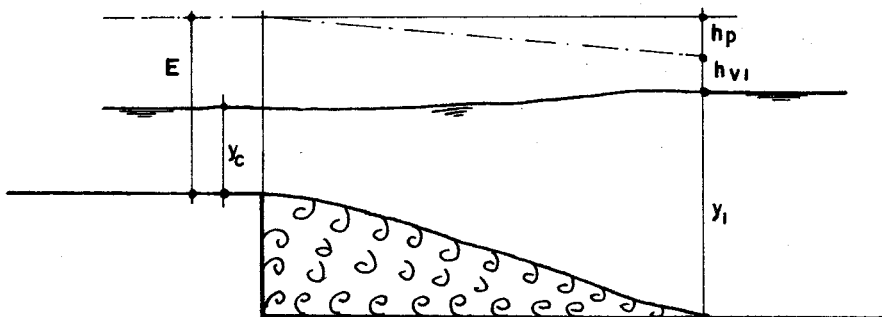
$$K^2 + 2K - X_1^2 - \frac{2}{X_1} + 3 = 0$$

ecuación de segundo grado cuya raíz útil es:

$$K = -1 + \sqrt{X_1^2 + \frac{2}{X_1} - 2} \quad (7.10)$$

que permite, para un caudal dado en el canal, determinar la altura de la barrera del partidor.

Como segunda cuestión se va a estudiar cuál de los canales derivados se utiliza en los cálculos del partidor.



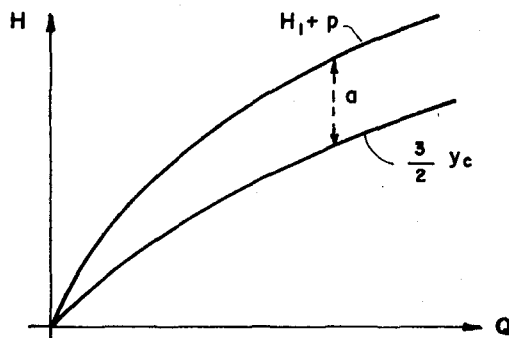
La sección sobre la grada es la sección de partición y la sección (1) se toma en el canal derivado que decide el cálculo.

Aplicación del Bernoulli:

$$y_1 + h_{v1} + h_p = a + E = a + \frac{3}{2} y_c$$

$$a = (H_1 + h_p) - \frac{3}{2} y_c$$

graficando las curvas  $(H_1 + h_p)$  versus Q y  $\frac{3}{2} y_c$  versus Q se obtiene (los detalles pueden verse en la referencia 8):



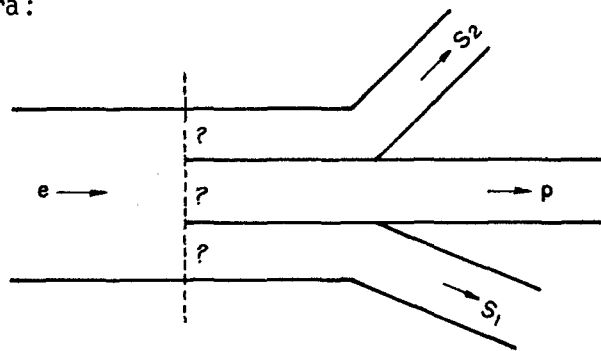
Se observa que la altura de grada (a) resulta ser creciente con los gastos. En consecuencia el cálculo de su valor debe hacerse para el mayor gasto esperado en el canal. Por otro lado  $\frac{3}{2} y_c$  es independiente de los gastos que se derivan de modo que habrá que utilizar el canal derivado que dé el mayor valor de  $H_1 + h_p$ . En la práctica se utiliza el canal derivado que dé el mayor tirante  $p$  (o lo que es lo mismo el menor valor  $\frac{S^{1/2}}{n}$  como se muestra a continuación).

$$Q = A V = A \frac{S^{1/2} R^{2/3}}{n} = \frac{S^{1/2}}{n} \frac{A^{5/3}}{p^{2/3}}$$

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

Enseguida corresponde ver qué ancho debe tener cada canal derivado en el partidor, cosa que se describirá mediante un ejemplo.

Nomenclatura:



canal principal	e ... canal entrante
	p ... canal pasante
canales derivados	$S_1$ ... canal saliente 1
	$S_2$ ... canal saliente 2

Ejemplo.- Por un canal trapezoidal de 4 m de ancho en la base circulan 4,000 lps. Se desea diseñar un partidor de barrera, de 4 m de ancho, para dividir dicho caudal en la forma  $p = 2,500$  lps,  $S_1 = 1,000$  lps,  $S_2 = 500$  lps. Los canales derivados son todos trapezoidales de talud 0.5 y anchos de base de 2.50 m, 1.00 m y 0.50 m, respectivamente.

Los valores respectivos de  $S^{1/2}/n$  son 1.00, 0.78 y 1.70 m.

Tabulando:

Canal	Caudal (lps)	b (m)	t	$\frac{S^{1/2}}{n}$	$Y_1$ (m)
e	4,000				
p	2,500	2.50	0.5	1.00	1.085
$S_1$	1,000	1.00	0.5	0.78	1.220
$S_2$	500	0.50	0.5	1.70	0.750

En las dos últimas columnas se aprecia que debe usarse como canal derivado para el cálculo el  $S_1$ .

Dentro del partidor se conserva prácticamente el Bernoulli que cada canal derivado tiene en su sección trapezoidal de aguas abajo. En efecto, para el  $S_1$  por ejemplo:

$$\text{aguas abajo} \quad \dots B = y + h_v = 1.22 + 0.013 = 1.233$$

$$\text{en el partidor} \quad \dots B_1 = y_1 + h_{v1} = 1.20 + 0.035 = 1.235$$

el cálculo se hace entonces con  $Y_1 = 1.20$  m.

$$q = \frac{Q}{b} = \frac{4}{4} = 1 \text{ m}^3/\text{seg por m.}$$

$$Y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} = 0.47 \text{ m}$$

de la ecuación 7.10, con  $X_1 = \frac{Y_1}{Y_c} = \frac{1.20}{0.47} = 2.55,$

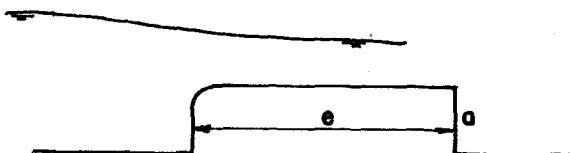
$$K = -1 + \sqrt{6.50 + 0.78 - 2} = 1.30$$

$$K = \frac{a}{Y_c} = 1.30 \rightarrow a = 1.30 Y_c = 0.61$$

$$\text{USAR } a = 0.65 \text{ m}$$

### Espesor de la barrera

La barrera debe actuar como un vertedero de pared gruesa para garantizar la formación del flujo crítico. Si la arista es redondeada:



$$e = 3.5 Y_c = 1.65 \text{ m}$$

### Anchos de los canales derivados en el partidor

Son proporcionales a los gastos derivados:

p	.....	2.50 m
S <sub>1</sub>	.....	1.00 m
S <sub>2</sub>	.....	0.50 m

Por consideraciones que no son presentadas aquí pero que se encuentran en la referencia 8 de la Bibliografía, se reajustan estas cifras a los valores 2.45, 1.02 y 0.53, respectivamente.

### Ubicación de las puntas partidoras

Se recomienda internarlas aguas arriba de la arista de la barrera un valor  $\approx 1.5 Y_C$ .

### Esquema final

Dentro del partidor se conservan las secciones rectangulares y los anchos que los canales derivados tienen sobre la barrera.

