

DISPOSITIVOS Y OBRAS HIDRÁULICAS

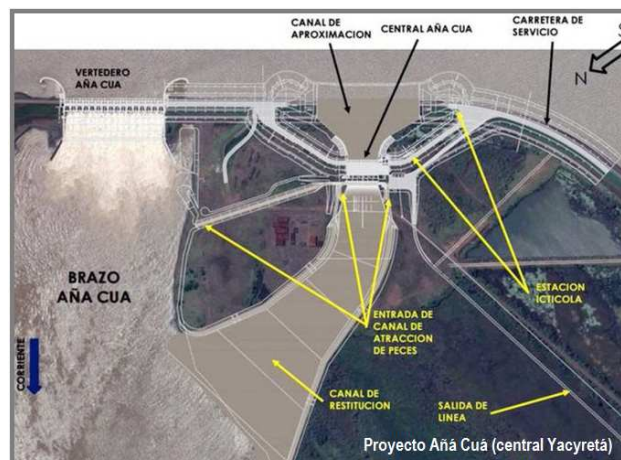


Hidráulica Aplicada

El canal de restitución

En una central hidroeléctrica, es el canal que devuelve el agua al cauce natural luego de su paso por las turbinas.

Dependiendo de la localización de los vertederos, podría ser necesario otro canal de restitución para estos dispositivos.



Los Disipadores de Energía

El agua sale de la central y/o del vertedero con una alta energía cinética, potencialmente erosiva. Para disiparla se diseñan y construyen mecanismos que se denominan, justamente, **disipadores de energía**.

Su principio de funcionamiento es el **resalto hidráulico**, por la turbulencia que genera.

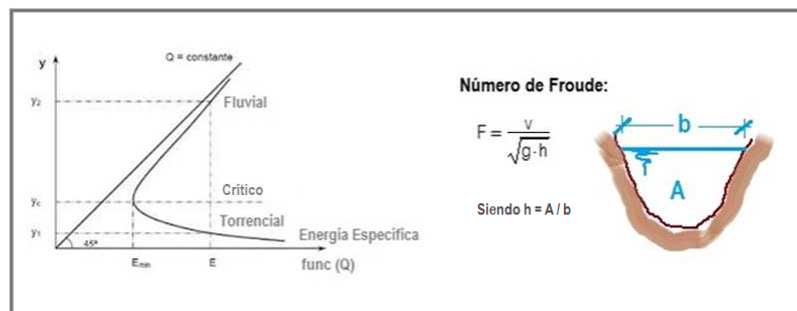
Generalmente, a la salida de las casas de máquinas se colocan "**piletas aquietadoras**", mientras que en los vertederos se suelen utilizar "**dientes**" y "**escalones**" de hormigón y también los "**saltos de esquí**", que al lanzar el agua hacia arriba transforman el chorro en una lluvia que disipa energía por fricción con el aire.



Los Disipadores de Energía

En términos muy generales, será necesario diseñar un disipador de energía cuando el **Número de Froude (F)** sea superior a 2.

Recuerden, el **F** es la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas gravitatorias (en realidad, es la raíz cuadrada de esa relación).



El Sifón

Un sifón es un conducto cerrado, en forma de "U" invertida, que se utiliza para trasvasar líquido de un depósito (reservorio) a otro ubicado a menor altura, cuando entre ambos se interpone un obstáculo que impide conectarlos directamente para que la descarga se realice por gravedad.

Por ejemplo, podría utilizarse para descargar agua de un azud a un canal de riego.



En un sifón hay por lo menos dos preguntas importantes a responder:

- Qué caudal eroga el sifón;
- Qué presión se tiene en el punto **B**.

Para ello recurriremos a la ecuación de Bernoulli (utilizando un plano de comparación que pase por **C**, que es el punto más bajo; además, despreciaremos las pérdidas).

El Sifón



Para responder la cuestión **a)** plantearemos Bernoulli entre **A** y **C**:

(recordar que no consideraremos las pérdidas)

$$h_A + \frac{p_A}{\gamma} + \frac{v_A^2}{2 \cdot g} = h_C + \frac{p_C}{\gamma} + \frac{v_C^2}{2 \cdot g}$$

En esa ecuación:

$$\frac{p_A}{\gamma} = \frac{p_C}{\gamma} = \frac{p_{atm}}{\gamma} \quad v_A \cong 0 \quad h_C = 0$$

Entonces:

$$h_A = \frac{v_C^2}{2 \cdot g} \Rightarrow v_C = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_A}$$

Luego, esta velocidad, multiplicada por la sección del sifón, nos dará el **caudal** erogado por el mecanismo

El Sifón



Vayamos a la cuestión **b)**, referida a la presión en **B**.

Para ello, plantearemos Bernoulli entre **A** y **B**:

(nuevamente, no consideraremos las pérdidas)

En este caso:

$$\frac{p_A}{\gamma} = \frac{p_{atm}}{\gamma} \quad v_A \cong 0 \quad v_B = v_C \text{ (por continuidad)}$$

Entonces:

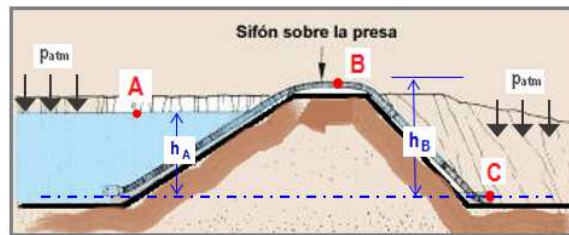
$$h_A + \frac{p_{atm}}{\gamma} = h_B + \frac{p_B}{\gamma} + \frac{[\sqrt{2 \cdot g \cdot h_A}]^2}{2 \cdot g}$$

$$h_A + \frac{p_{atm}}{\gamma} = h_B + \frac{p_B}{\gamma} + \frac{2 \cdot g \cdot h_A}{2 \cdot g}$$

$$\frac{p_B}{\gamma} = \frac{p_{atm}}{\gamma} - (h_B - h_A) - h_A \Rightarrow p_B = p_{atm} - \gamma \cdot h_B$$

p_B debe ser superior a la presión de vapor de ese líquido, a esa temperatura, para que no haya **cavitación**.

El Sifón



Previamente a la puesta en funcionamiento de un sifón es necesario **cebarlo**. El **cebado** consiste en llenarlo completamente de agua, porque si no, no funcionará.

Para ello, se colocan válvulas en los extremos y una tercera válvula en el punto más alto del sifón (punto **B**) por donde se realiza el llenado.

Dependiendo de las dimensiones, el cebado podrá hacerse a mano, o bien utilizando equipo de bombeo.

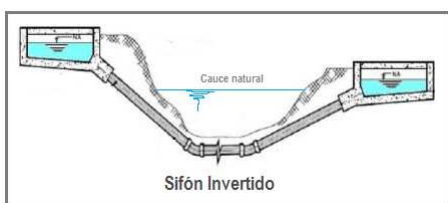
Además, teniendo en cuenta que en el punto **B** la presión es inferior a la atmosférica (o sea, presión relativa negativa, lo que dependerá de la longitud de la cañería descendente), podría ser necesario un **cálculo estructural especial del conducto**.

El Sifón Invertido y los Puentes Canal

Un **sifón invertido** también es un conducto cerrado, que se utiliza en situaciones como las siguientes:

- Cuando es necesario atravesar un cauce natural con un canal, que podría ser de riego o de drenaje (al mismo o a diferente nivel);
- Cuando un canal de riego debe atravesar el terraplén de una ruta importante y el techo del sifón podría interferir con la rasante (casos como éste se pueden ver sobre Ruta Nac. N°12, a la altura de Itá Ibaté, con los canales de riego para arroz).

Cuando el entrecruzamiento será al mismo nivel podría ser necesario utilizar un **punto canal** para el escurrimiento del curso de agua natural, o también cuando se trata del cruce de dos canales a diferente nivel.



El Sifón Invertido y los Puentes Canal

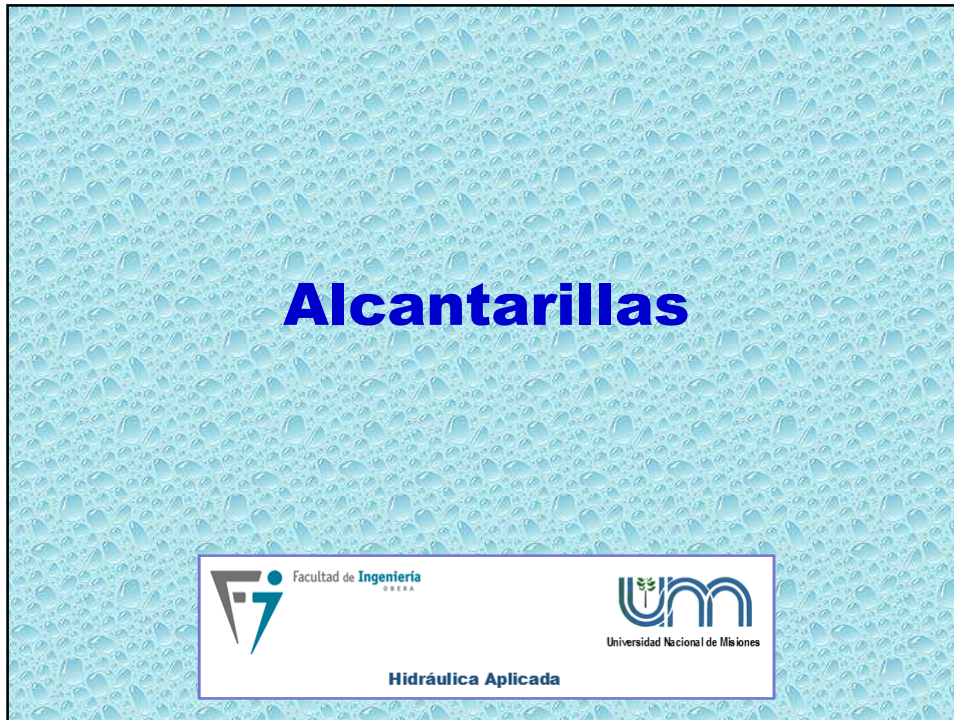


En los **sifones invertidos** es necesario construir interceptores de sólidos "gruesos" a la entrada, dispositivos que reciben el nombre de **desarenadores**, para evitar sedimentaciones dentro del conducto y que son difíciles de extraer.

Por el mismo motivo, es conveniente hacerlos funcionar con velocidades no inferiores a los 2 m/s.

Su cálculo hidráulico es muy similar al de las alcantarillas, pero utilizando coeficientes de pérdidas específicos.

Los **puentes canal** son, desde el punto de vista hidráulico, canales revestidos.



Alcantarillas

- Un gran limitante de la capacidad de escurrimiento de una alcantarilla es el caudal que admite la entrada.
- Por el contrario, no existen evidencias de que las características geométricas de la desembocadura afecten mayormente la capacidad de la alcantarilla

Pérdidas a la entrada:

$$H_e = k_e \cdot \frac{v^2}{2g} \quad \text{que tiene un "costo" de...} \quad Q = C \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_e}$$

donde:

- k_e** coeficiente de pérdidas a la entrada
 C coeficiente de descarga

Pérdidas a la salida:

f (diferencia de energía cinética en el conducto y en el canal de descarga)

Pérdidas por fricción:

En conductos trabajando a sección llena:

$$H_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (\text{donde "f" es un coeficiente de fricción})$$

Hidráulica de las alcantarillas

- En la sección de aproximación el régimen es uniforme y las líneas de cargas totales y la piezométrica son prácticamente coincidentes (porque la velocidad de aproximación suele ser muy baja).
- El escurrimiento, al alcanzar la alcantarilla, sufre una contracción brusca, seguida de una expansión, lo que produce una importante *pérdida de energía*.
- *En alcantarillas cortas las pérdidas de carga a la entrada pueden llegar a ser tan importantes como las pérdidas por fricción en el conducto.*
- A la salida se produce una pérdida adicional por expansión (turbulencia).

Sección de control:

- En una sección de control la energía específica es mínima para un dado caudal (o sea que el $F = 1$).

Tipos de control:

- a) **Control en la entrada:** Para un dado caudal, la capacidad del conducto de la alcantarilla es superior a la capacidad de admisión de la misma.
- b) **Control en la salida:** Ocurre cuando la capacidad del conducto de la alcantarilla es inferior a la capacidad de admisión de la misma.

Alcantarillas con control de entrada

Este tipo de funcionamiento se da bajo dos condiciones:

- i) El nivel de aguas arriba *no alcanza a ahogar* el dintel de la alcantarilla *y* la pendiente de fondo es *supercrítica*.
- ii) El nivel de aguas arriba *ahoga* la entrada de la alcantarilla, *pero* el conducto de la misma *no trabaja a sección llena*.

Con control en la entrada  Conducto **HIDRÁULICAMENTE CORTO**

Alcantarillas con control de salida

El control en la salida ocurre, en general, cuando el nivel de aguas arriba es elevado, la pendiente de fondo baja y la longitud del conducto considerable.

$$Q = f(\text{pérdidas a la entrada; nivel de aguas arriba; rugosidad; } L, D, \text{ pend.; nivel a la salida})$$

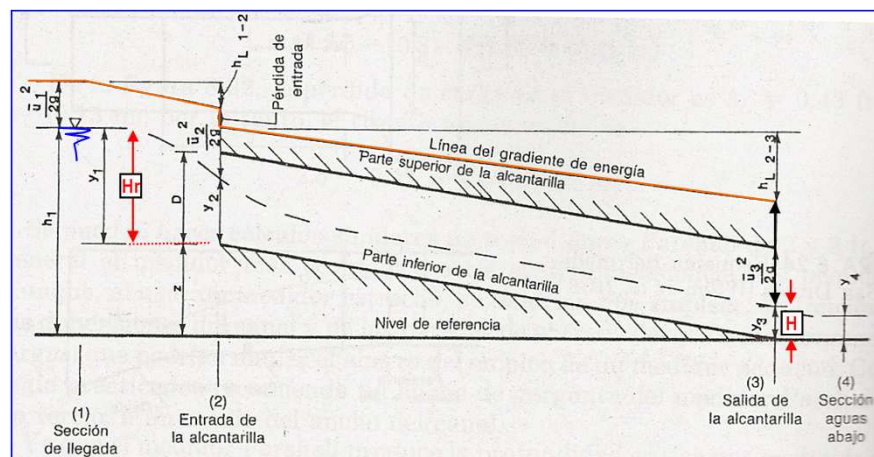
- i) El nivel de aguas arriba **no alcanza a ahogar** el dintel de la alcantarilla **y** la pendiente de fondo es **subcrítica**.
- ii) Cuando el conducto trabaja a **sección llena**.

Con control en la salida



Conducto **HIDRÁULICAMENTE LARGO**

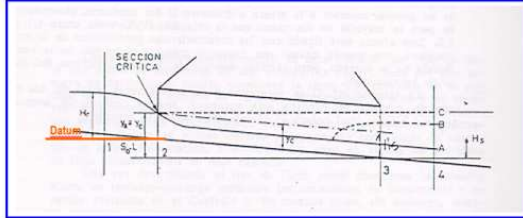
Alcantarillas: Variables hidráulicas



Flujo Tipo 1 (profundidad crítica a la entrada)

- Similar a un vertedero con descarga libre.
- Altura crítica en el borde de entrada.
- Condiciones necesarias:

- 1) $H_r < H^*$ ($H^* = 1,5 \times D$)
- 2) $So > Sc$
- 3) $H_s < y_c + So \cdot L$



- Deducción de la ecuación de descarga:

$$z_1 + y_1 + \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} = y_2 + \alpha_2 \cdot \frac{V_2^2}{2g} + H_{f_{1-2}} + H_e$$

Si $H_e = k_e \cdot \frac{vc^2}{2g}$ y $V_2 = vc \Rightarrow H_r + \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} = y_c + \frac{vc^2}{2g} \cdot (\alpha_2 + k_e) + H_{f_{1-2}}$

$$\Rightarrow vc = \sqrt{\frac{2g \left(H_r + \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} - y_c - H_{f_{1-2}} \right)}{\alpha_2 + k_e}}$$

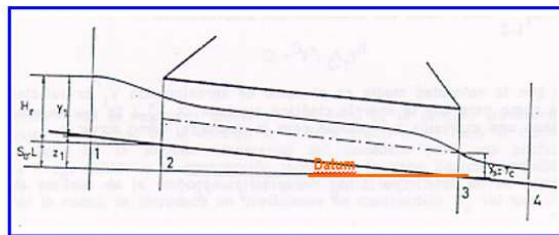
Si, $V_1 \approx 0$ - $H_{f_{1-2}} \approx 0$ - $C_v = \frac{1}{\sqrt{\alpha_2 + k_e}} \Rightarrow vc = C_v \cdot \sqrt{2g \cdot (H_r - y_c)}$

Entonces, si $A_2 = C_c \cdot A_c \Rightarrow Q = C_c \cdot C_v \cdot A_c \cdot \sqrt{2g \cdot (H_r - y_c)}$

Flujo Tipo 2 (prof. crítica en el borde de salida)

- Altura crítica en el borde de salida.
- Condiciones necesarias:

- 1) $H_r < H^*$
- 2) $So < Sc$
- 3) $H_s < y_c$



- Deducción de la ecuación de descarga:

$$z_1 + y_1 + \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} = y_3 + \alpha_3 \cdot \frac{V_3^2}{2g} + H_{f_{1-3}} + H_e$$

Si: $y_3 = y_c$ - $v_3 = vc$ - $H_e = k_e \cdot \frac{vc^2}{2g} \Rightarrow$

$$\Rightarrow z_1 + y_1 + \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} = y_c + \frac{vc^2}{2g} \cdot (\alpha_3 + k_e) + H_{f_{1-3}} = H_r + So \cdot L + \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g}$$

$$\Rightarrow vc = \sqrt{\frac{2g \left(H_r + So \cdot L + \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} - y_c - H_{f_{1-3}} \right)}{\alpha_3 + k_e}}$$

Si, $V_1 \approx 0$ - $H_{f_{1-2}} \approx 0$ - $C = \frac{1}{\sqrt{\alpha_3 + k_e}} \Rightarrow vc = C \cdot \sqrt{2g \cdot (H_r + So \cdot L - y_c - H_{f_{1-3}})}$

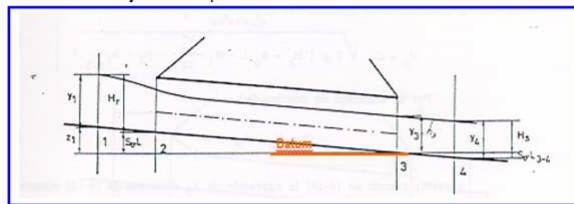
Flujo Tipo 2 (prof. crítica en el borde de salida)

Entonces, si $A_3 = A_c \Rightarrow Q = C \cdot A_c \cdot \sqrt{2g \cdot (Hr + So \cdot L - yc - Hf_{2-3})}$

OBSERVACIÓN: Mientras que en Flujo Tipo 1 Q es función sólo de las características de la embocadura (Cv.Cc), el tirante aguas arriba (Hr) y las características de la sección transversal (Ac e yc), en el Flujo Tipo 2, Q depende, además, de la rugosidad y la longitud del conducto (Hf₂₋₃) y de la pendiente (So).

Flujo Tipo 3 (flujo a superficie libre)

- Condiciones necesarias:
 - $Hr < H^*$
 - Si $So < Sc$, la alcantarilla debe ser hidráulicamente larga ($Hs > yc$); si $So > Sc$ o la alcantarilla es hidráulicamente corta, no debe haber posibilidad de sección crítica a la entrada ($Hs > yc + So \cdot L$)
- En este caso el flujo es siempre subcrítico.



$$z_1 + y_1 + \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} = y_3 + \alpha_3 \cdot \frac{V_3^2}{2g} + Hf_{1-3} + H_e$$

$$\text{Si: } H_e = k_e \cdot \frac{V_3^2}{2g} \Rightarrow z_1 + y_1 + \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} = y_3 + \frac{V_3^2}{2g} \cdot (\alpha_3 + k_e) + Hf_{1-3} = Hr + So \cdot L + \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g}$$

$$\Rightarrow V_3 = \sqrt{\frac{2g \left(Hr + So \cdot L + \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} - y_3 - Hf_{1-3} \right)}{\alpha_3 + k_e}}$$

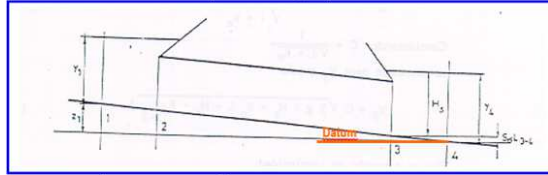
$$\text{Entonces, si: } C = \frac{1}{\sqrt{\alpha_3 + k_e}} \quad - \quad Q = A_3 \cdot V_3 \quad - \quad \frac{V_1^2}{2g} \approx 0 \quad - \quad Hf_{1-2} \approx 0$$

$$Q = C \cdot A_3 \cdot \sqrt{2g \cdot (Hr + So \cdot L - y_3 - Hf_{2-3})}$$

Obs: Para la aplicación práctica puede considerarse
 $y_3 \cong y_4 = H_s + So \cdot L_{3-4}$

Flujo Tipo 4 (flujo lleno con salida sumergida)

- Similar al escurrimiento en una cañería
- Condiciones necesarias: 1) $H_r > H'$ y 2) $H_s > D$



$$z_1 + y_1 + \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} = y_4 + \alpha_4 \cdot \frac{V_4^2}{2g} + H_{f_{1-4}} + H_e + H_d$$

considerando que:

$$\frac{V_1^2}{2g} \approx 0 \quad - \quad H_e = k_e \cdot \frac{V_3^2}{2g} \quad - \quad H_{f_{1-2}} = H_{f_{3-4}} \approx 0 \quad - \quad H_d = \frac{V_3^2}{2g} - \frac{V_4^2}{2g} \quad - \quad \alpha_4 \approx 1$$

$$z_1 + y_1 = y_4 + \frac{V_3^2}{2g} + k_e \cdot \frac{V_3^2}{2g} + H_{f_{2-3}} + \frac{V_3^2}{2g} - \frac{V_4^2}{2g}$$

$$z_1 + y_1 = y_4 + \frac{V_3^2}{2g} \cdot (k_e + 1) + H_{f_{2-3}}$$

Además, $z_1 + y_1 - y_4 \cong H_r + S_o \cdot L - H_s$

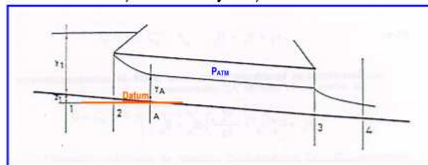
$$\Rightarrow V_3 = \sqrt{\frac{2g(H_r + S_o \cdot L - H_s - H_{f_{2-3}})}{1 + k_e}} \quad \text{Sección transversal del conducto}$$

Llamando "C" a: $\frac{1}{\sqrt{1 + k_e}}$ y siendo $Q = A_o \cdot V_3$

$$Q = C \cdot A_o \cdot \sqrt{2g \cdot (H_r + S_o \cdot L - H_s - H_{f_{2-3}})}$$

Flujo Tipo 5 (flujo con ctrl. tipo comp. a la entrada)

- Se comporta como el flujo a través de compuertas planas en canales
- Condiciones necesarias: 1) $H_r > H'$ y 2) $H_s < D$



- Deducción de la ecuación de descarga:

$$z_1 + y_1 + \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} = y_A + \alpha_A \cdot \frac{V_A^2}{2g} + H_{f_{1-A}} + H_e$$

considerando que:

$$\frac{V_1^2}{2g} \approx 0 \quad - \quad H_e = k_e \cdot \frac{V_A^2}{2g} \quad - \quad H_{f_{1-A}} \approx 0$$

$$\Rightarrow z_1 + y_1 = y_A + \frac{V_A^2}{2g} \cdot (\alpha_A + k_e)$$

Si además, $z_1 + y_1 \cong H_r$ (despreciando el desnivel entre 2 y A)

$$\Rightarrow H_r = y_A + \frac{V_A^2}{2g} \cdot (\alpha_A + k_e)$$

$$\Rightarrow V_A = \sqrt{\frac{2g \cdot (H_r - y_A)}{\alpha_A + k_e}}$$

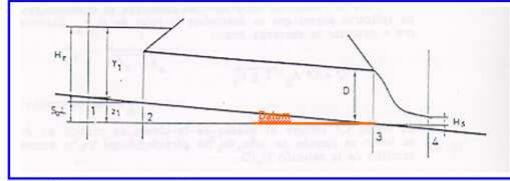
Si: $C_v = \frac{1}{\sqrt{\alpha_A + k_e}}$ y $Q = vel \cdot A_{Efectiva} = vel \cdot [C_c \cdot A_o]$

$$Q = C \cdot A_o \cdot \sqrt{2g \cdot (H_r - y_A)} \quad \Rightarrow \quad Q = C' \cdot A_o \cdot \sqrt{2g \cdot H_r}$$

Sección transversal del conducto para y_A

Flujo Tipo 6 (flujo lleno con salida libre)

- Se comporta como el flujo a través de conductos a presión (pero con descarga libre)
- Condiciones necesarias: 1) $H_r > H^*$; 2) $H_s < D$ y 3) Alcantarilla hidráulicamente larga



$$z_1 + y_1 + \alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_3}{\gamma} + \alpha_3 \cdot \frac{v_3^2}{2g} + H_{f_{1-3}} + H_e$$

considerando que:

$$\frac{v_1^2}{2g} \approx 0 \quad - \quad H_e = k_e \cdot \frac{v_3^2}{2g} \quad - \quad H_{f_{1-2}} \approx 0$$

$$H_r + S_o \cdot L = \frac{p_3}{\gamma} + \frac{v_3^2}{2g} \cdot (\alpha_3 + k_e) + H_{f_{2-3}}$$

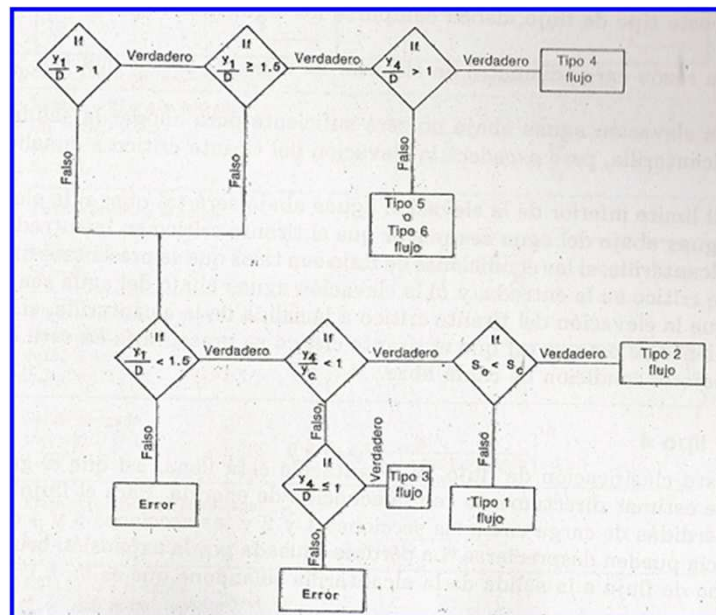
$$\Rightarrow v_3 = \sqrt{\frac{2g \cdot \left(H_r + S_o \cdot L - \frac{p_3}{\gamma} - H_{f_{2-3}} \right)}{\alpha_3 + k_e}}$$

Si: $C = \frac{1}{\sqrt{\alpha_3 + k_e}}$ y $Q = A_o \cdot v_3$

$$\Rightarrow Q = C \cdot A_o \cdot \sqrt{2g \cdot \left(H_r + S_o \cdot L - \frac{p_3}{\gamma} - H_{f_{2-3}} \right)}$$

Obs: El problema es estimar $\frac{p_3}{\gamma}$

Flujograma para el cálculo de alcantarillas



Alcantarillas: observación

8.5 STRUCTURES FOR FLOW MEASUREMENT: CULVERTS

The placement of fill in a natural channel with a culvert through the resulting embankment to pass the flow yields a situation which can be used to gage the flow in the channel if other means are not available. With reference to Fig. 8.25, the following physical features of a culvert should be noted. The approach channel section is usually defined at one culvert opening width upstream of the culvert entrance. **The loss of energy in the vicinity of the culvert entrance is related to the rapid contraction of the flow entering the culvert and the subsequent rapid expansion of the flow within the culvert barrel.** The geometry of the culvert entrance can have a significant effect on this entrance loss. Within

