

## 6.5 DISEÑO HIDRÁULICO DE ALCANTARILLAS

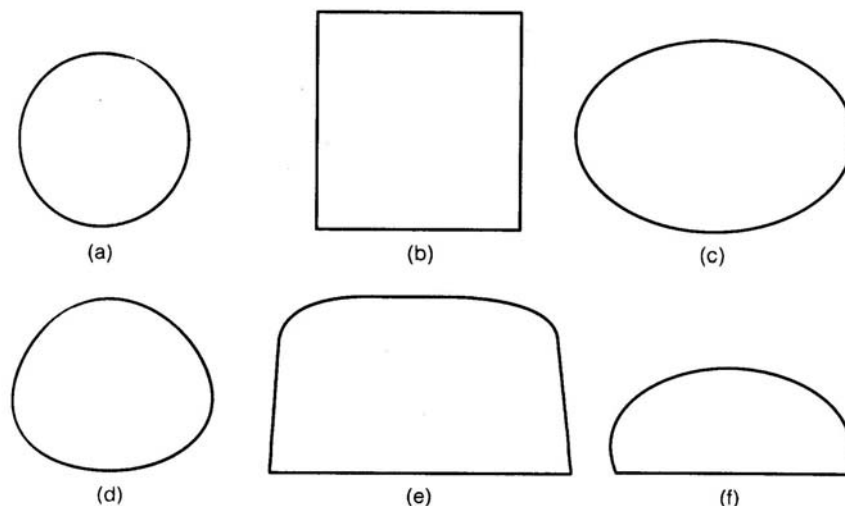
Las alcantarillas son tramos de conducto cortos, que permiten el paso del agua conducida por una cuneta, canal o terreno deprimido, por debajo de una calle, ruta o ferrocarril, sin la superación de éstos.

### 6.5.1 TIPOS DE ALCANTARILLAS

Los *materiales* más comunes son el H<sup>o</sup> A<sup>o</sup> y la chapa de acero corrugado. La selección del material de la alcantarilla depende de la rigidez estructural requerida, rugosidad hidráulica, durabilidad y resistencia a la corrosión y abrasión. Pueden ser revestidos con otros materiales para inhibir la corrosión y abrasión o para reducir la resistencia hidráulica.

Las *secciones transversales* pueden ser de forma: circular (a), rectangular o “tipo cajón” (b), elíptica (c), bóveda caño (d), bóveda cajón (e) y bóveda (f) (Figura N° 6.10). La elección de la forma está basada en los costos de construcción, limitaciones de la elevación de la superficie de agua aguas arriba, tapada mínima (altura de terraplén) y funcionamiento hidráulico.

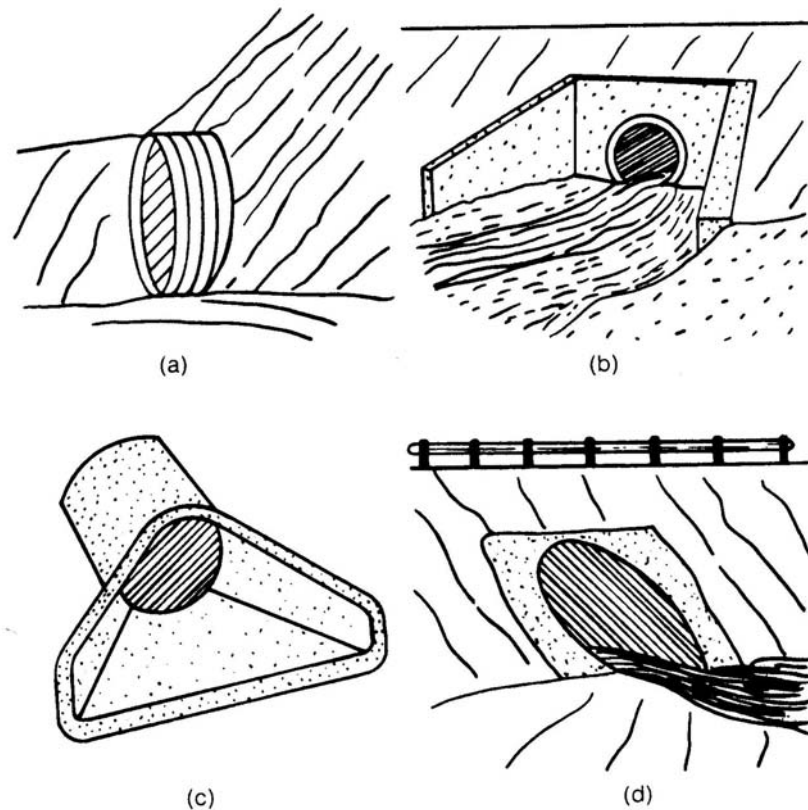
Figura N° 6.10: Secciones transversales de alcantarillas (Fuente: Manual of Practice N° 77, ASCE, 1992).



La capacidad hidráulica de una alcantarilla puede ser mejorada por una apropiada selección de la *embocadura*. Debido a que el canal natural es usualmente más ancho que la alcantarilla, la embocadura es una contracción al flujo y puede ser el control primario del flujo. La provisión de una transición más gradual al flujo reduce la pérdida de energía y crea una condición de entrada más eficiente hidráulicamente.

Las configuraciones de embocadura comunes incluyen: borde saliente o “proyectado” (a), con cabezal y muro de ala de H<sup>o</sup> A<sup>o</sup> “in situ” (b), de sección prefabricada (c) y de borde cortado a bisel siguiendo la pendiente del terraplén (d) (Figura N° 6.11). La selección de la configuración de la embocadura dependerá de factores tales como: la estabilidad estructural, estéticos, control de la erosión y otros.

Figura N° 6.11: Tipos de embocadura de alcantarillas (Fuente: Manual of Practice N° 77, ASCE, 1992).



### 6.5.2 HIDRÁULICA DE ALCANTARILLAS

El flujo en una alcantarilla puede ocurrir bajo una condición de “*control de entrada*” o bajo una condición de “*control de salida*”, según que la capacidad de descarga esté regida por su entrada o salida, respectivamente (Figura N° 6.12).

#### **Condición de control de entrada**

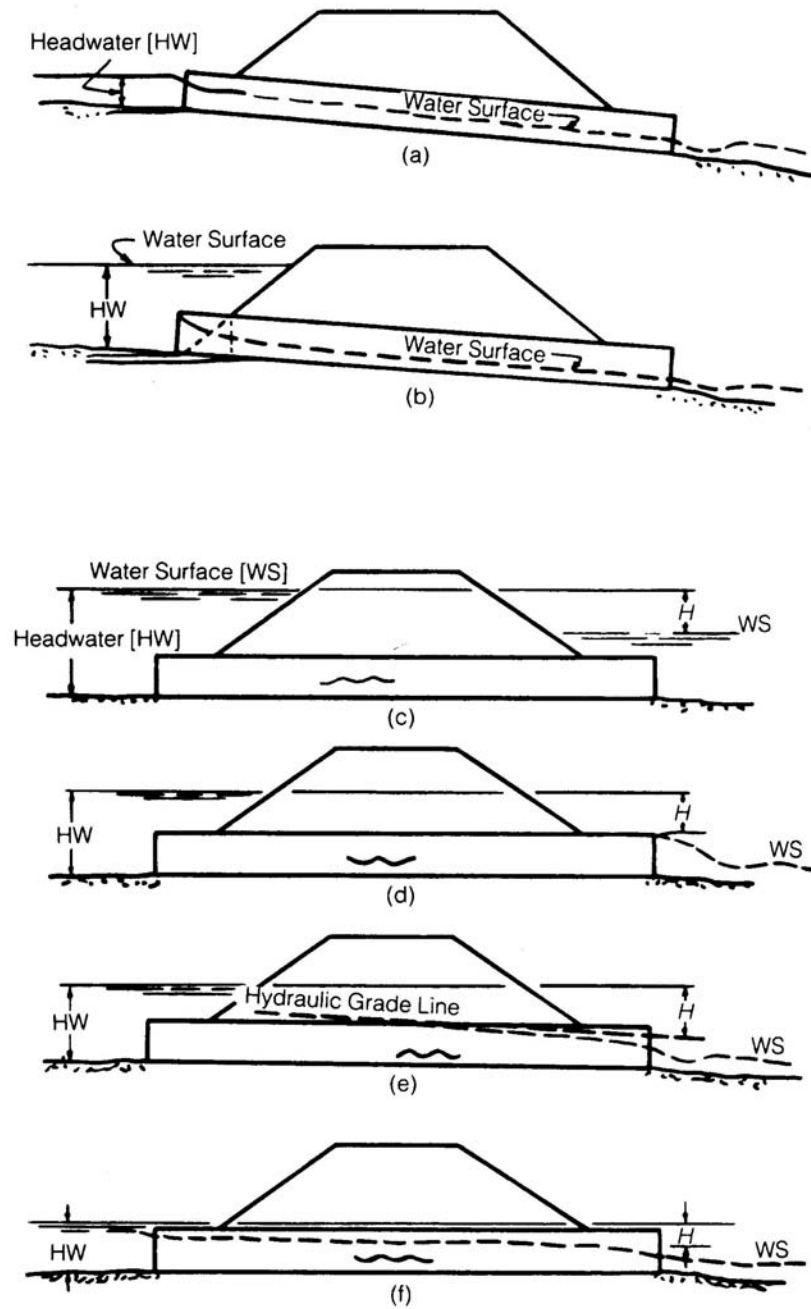
El control de entrada puede ocurrir en dos casos:

- Embocadura saliente no sumergida (Figura N° 6.12.a): la altura de agua a la entrada (HW) no es suficiente para sumergir el coronamiento de la alcantarilla y la pendiente de fondo de ésta es pronunciada (puede generar flujo supercrítico). La embocadura de la alcantarilla actúa efectivamente como un vertedero. La alcantarilla no fluye llena.
- Embocadura saliente o a bisel sumergida (Figura N° 6.12.b): la altura de agua a la entrada sumerge el coronamiento de la alcantarilla pero ésta no fluye llena (la pendiente de fondo es pronunciada). La alcantarilla funciona como un orificio.

En ambos casos, la capacidad de descarga depende de la altura de agua a la entrada, de la embocadura y la sección transversal de la alcantarilla. La profundidad del agua a la salida, la rugosidad y el largo del conducto no influyen en la descarga.

Figura N° 6.12:

Posibles co



En la condición de embocadura sumergida (b), la ecuación que gobierna la capacidad de evacuación de la alcantarilla es la ecuación de orificio:

$$Q = C_d A \sqrt{2 g h} \quad (6.40)$$

Q: caudal,  $C_d$ : coeficiente de descarga del orificio, A: área, g: aceleración de la gravedad, h: altura de agua medida desde el centro de la alcantarilla.

El coeficiente de orificio,  $C_d$ , varía con la altura de agua, el tipo de alcantarilla y la geometría de la entrada.

Existen ábacos, elaborados por medio de ensayos de laboratorio, que permiten diseñar alcantarillas con control de entrada y determinar su curva de descarga, para distintas secciones, material y configuraciones de embocadura. Se recomienda el uso de estos ábacos, o los programas computacionales basados en ellos (Ej. Hydrocalc Hydraulics, Hec-Ras), más que la ecuación (6.40) debido a que ésta tiene una incertidumbre en la estimación de  $C_d$  y sólo es aplicable cuando la relación entre la altura de agua a la entrada y la altura de la alcantarilla es mayor o igual a 2, mientras que los ábacos son aplicables a un amplio rango de alturas de agua.

### Condición de Control de Salida

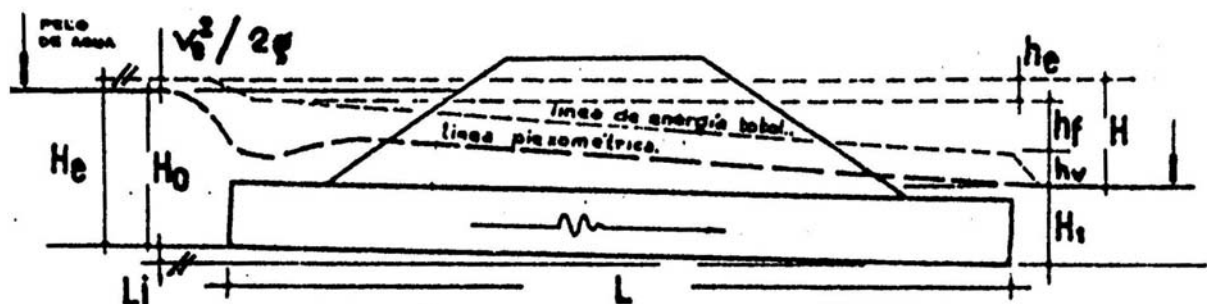
La condición de control de salida se produce cuando la altura de agua a la entrada es suficientemente grande, la pendiente de la alcantarilla es suficientemente baja y la alcantarilla es suficientemente larga. El control de salida puede ocurrir en 3 casos:

- c) La entrada y la salida de la alcantarilla están sumergidas y la alcantarilla funciona llena (Figuras 6.12.c y 6.12.d).
- d) La entrada está sumergida y la salida no (Figura 6.12.e). La alcantarilla funciona llena en un tramo.
- e) La entrada no está sumergida y la altura de agua a la salida es menor que la altura crítica de la alcantarilla (Figura 6.12.f). La alcantarilla funciona parcialmente llena.

La capacidad de evacuación de una alcantarilla con control de salida depende de la altura de carga  $H$ , requerida para hacer circular el agua a través de la misma. Ésta depende de la geometría de la entrada (pérdidas de entrada), del material de la alcantarilla (pérdidas por fricción) y de la condición del flujo a la salida (altura y velocidad).

La capacidad de evacuación de una alcantarilla bajo control de salida se calcula usando la ecuación de Bernoulli, basada en el principio de conservación de energía. Se aplica un balance de energía entre la entrada (sección 0) y la salida (sección 1) de la alcantarilla, que incluye pérdidas en la entrada, pérdidas por fricción a lo largo de la alcantarilla y la altura de velocidad (Figura N° 6.13).

Figura N° 6.13: Términos de la ecuación de energía para flujo en alcantarilla escurriendo llena con salida sumergida.



$H_e$ : distancia vertical entre el umbral de la alcantarilla y la línea de energía total a la entrada,  $H_0$ : altura de agua a la entrada,  $V_0$ : velocidad del agua a la entrada,  $h_e$ : pérdida de carga a la entrada,  $h_f$ : pérdida por fricción a lo largo de la alcantarilla,  $h_v$ : altura de velocidad a la salida,  $H$ : energía requerida para hacer circular el agua a través de la alcantarilla,  $H_1$ : altura de agua a la salida,  $L$ : longitud de la alcantarilla,  $i$ : pendiente de la alcantarilla, línea piezométrica =  $LGH$ , línea de energía total =  $LGE$ .

La energía  $H$ , requerida para hacer circular el agua a través de la alcantarilla, se expresa:

$$H = h_e + h_f + h_v \quad (6.41)$$

La pérdida a la entrada se estima:

$$h_e = K_e \left( \frac{V^2}{2g} \right) \quad (6.42)$$

$h_e$  [m],  $K_e$ : coeficiente de pérdida de entrada (tabulado),  $V$ : velocidad media en la alcantarilla [m/s],  $g$ : aceleración de la gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ).

La pérdida por fricción se expresa:

$$h_f = \frac{2g n^2 L}{R^{4/3}} \left( \frac{V^2}{2g} \right) \quad (6.43)$$

$n$ : coeficiente de rugosidad de Manning,  $L$ : longitud de la alcantarilla [m],  $R$ : radio hidráulico [m].

Combinando las ecuaciones (6.41), (6.42) y (6.43):

$$H = \left( K_e + 1 + \frac{2g n^2 L}{R^{4/3}} \right) \left( \frac{V^2}{2g} \right) \quad (6.44)$$

La ecuación (6.44) se puede aplicar para condiciones de salida sumergida.

De la Figura N° 6.13 se tiene que la energía total a la entrada es:

$$H_e = H + H_1 - L i \quad (6.45)$$

Debido a que en general las velocidades a la entrada son pequeñas, se suele admitir que  $H_o \cong H_e$ .

En la ecuación (6.45) son incógnitas  $H$  y  $H_1$ . Existen ábacos que permiten diseñar alcantarillas con control de salida y determinar su curva de descarga, para distintas secciones, material y configuraciones de embocadura. Estos ábacos también permiten determinar  $H$ .

Para el cálculo de  $H_1$ :

- Si  $H_s \geq D$ :  $H_1 = H_s \quad (6.46)$

- Si  $H_s < D$ :  $H_1 = \frac{h_c + D}{2} \quad \text{ó} \quad H_1 = H_s \quad (\text{se adopta el mayor}). \quad (6.47)$

$H_s$ : altura de agua en el canal de salida, calculado con el método del tirante normal para el caudal de diseño o de verificación.

### 6.5.3 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE ALCANTARILLAS

Datos de entrada:

- Caudales de diseño y verificación,  $Q_d$  y  $Q_v$  [ $m^3/s$ ].
- Longitud de la alcantarilla,  $L$  [ $m$ ].
- Pendiente de la alcantarilla,  $i$  [ $m/m$ ].
- Tirante admisible en la entrada [ $m$ ].
- Datos geométricos e hidráulicos del canal donde se ubicará la alcantarilla.
- Velocidades medias y máximas del flujo en el canal [ $m/s$ ].

Para el diseño hidráulico de alcantarillas, se siguen los siguientes pasos:

- i. Se calcula la altura del flujo en el canal de salida,  $H_s$ , por el método del tirante normal, en función de las características del canal y del caudal de diseño.
- ii. Se adopta el tipo de alcantarilla (sección transversal, material, tipo de embocadura) y una dimensión inicial (ej. altura o diámetro  $D$ ) de la sección.

Para adoptar un  $D$  inicial se puede utilizar el ábaco de control de entrada para la alcantarilla elegida (ej. para caños de  $H^0 A^0$  usar la Figura N° 6.14). Se adopta  $H_e/D = 1$  en la escala  $H_e/D$  correspondiente a la embocadura elegida (1, 2 ó 3), se proyecta horizontalmente hacia la izquierda hasta la escala (1) y desde ésta se traza hacia la izquierda una recta que pase por  $Q_d$  en la escala  $Q$  (caudales), obteniendo la dimensión inicial de la alcantarilla en la escala  $D$  (diámetros).

- iii. Se calcula  $H_e$  con control de entrada, para el  $Q_d$  y la alcantarilla propuesta, con el ábaco correspondiente (ej. para caños de  $H^0 A^0$  usar la Figura N° 6.14). Se traza una recta entre el  $D$  adoptado y  $Q_d$  y se la proyecta hacia la derecha hasta la escala  $H_e/D$  (1), luego horizontalmente hasta la escala correspondiente a la embocadura adoptada y se obtiene  $H_e/D$ . Luego  $H_e = H_e/D \cdot D$ .
- iv. Se calcula  $H_e$  con control de salida (6.45), para el  $Q_d$  y la alcantarilla propuesta.

Cálculo de  $H_1$ : (6.46) o (6.47).

Se obtiene  $h_c$  con el ábaco correspondiente a la alcantarilla propuesta (para caños de  $H^0 A^0$  usar la Figura N° 6.16), entrando con  $D$  y  $Q_d$  se obtiene  $h_c$ .

Cálculo de  $H$  con el ábaco correspondiente a la alcantarilla propuesta (ej. para caños de  $H^0 A^0$  usar la Figura N° 6.15):

- Se adopta el coeficiente de pérdida de carga a la entrada  $K_e$ , en función del tipo de estructura y características de la embocadura.
- Se establece el punto de arranque en la escala  $L$  (longitudes), para la longitud de la alcantarilla  $L$  y el  $K_e$  adoptado.
- Se une el punto de arranque con  $D$  (en escala de  $D$ ) y se intercepta la recta de paso (intermedia entre las escalas de  $L$  y  $D$ ).
- Se une la intersección en la recta de paso con  $Q_d$  (en escala de  $Q$ ) y se proyecta la recta hacia la derecha hasta la escala de  $H$ , obteniendo  $H$ .

- v. Se adopta como  $H_e$  el mayor de los valores  $H_e$  obtenidos en los pasos iii y iv. El valor adoptado indica el tipo de control que rige el flujo en la alcantarilla, para la sección y material elegidos.
- vi. Si el  $H_e$  obtenido es mayor que la altura de agua admisible a la entrada, se aumenta la sección de paso de la alcantarilla y repetir los cálculos.
- vii. Se calcula la velocidad de salida del flujo para el  $Q_d$  y se determina si se requiere protección contra la erosión en el canal aguas abajo.
- Si existe control de salida, se calcula:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (6.48)$$

A: área de la sección transversal del flujo en el conducto, a la salida.

Si  $H_s < D$ , aplicar el A que corresponde al tirante  $h_c$  o  $H_s$ , según cual sea el mayor. Para secciones circulares, usar la Figura N° 5.2. Se ingresa con  $h_c/D$  ó  $H_s/D$  hasta la función de Área y se baja al eje de abscisas, obteniendo el % del área para la sección llena.

- Si existe control de entrada, la velocidad se calcula con Manning, para el  $Q_d$  y el tamaño, forma y rugosidad de la alcantarilla.

$$V = \frac{R^{2/3} i^{1/2}}{n} \quad (6.49)$$

- viii. Se repiten los pasos iii a vi para el  $Q_v$  hasta verificar la altura admisible a la entrada.

Figura N° 6.14: Ábaco para diseño de alcantarillas de caños de  $H^0 A^0$  con control de entrada.

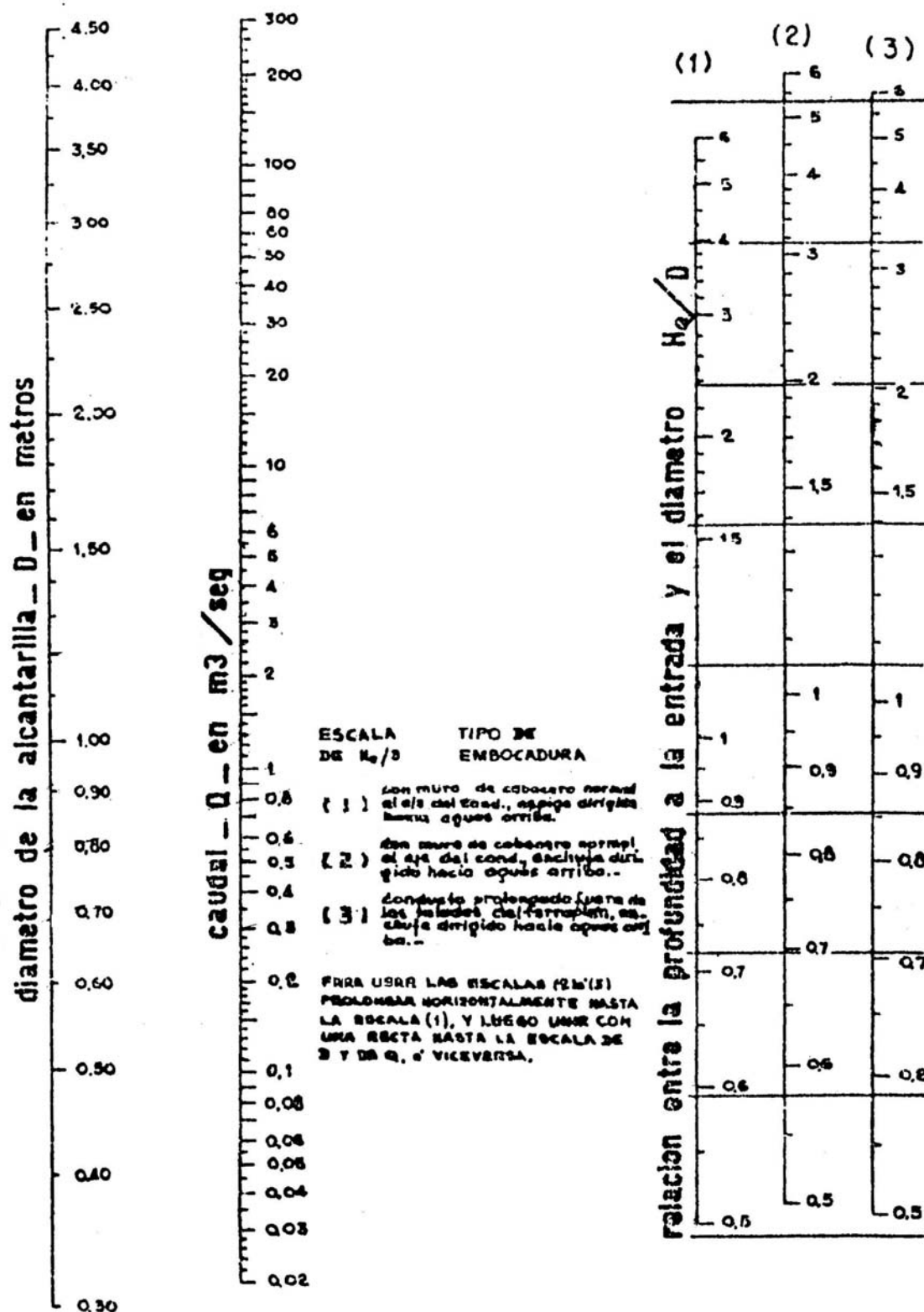




Figura N° 6.15: Ábaco para diseño de alcantarillas de caños de  $H^0 A^0$  escurriendo llena con salida sumergida ( $n = 0.012$ ).

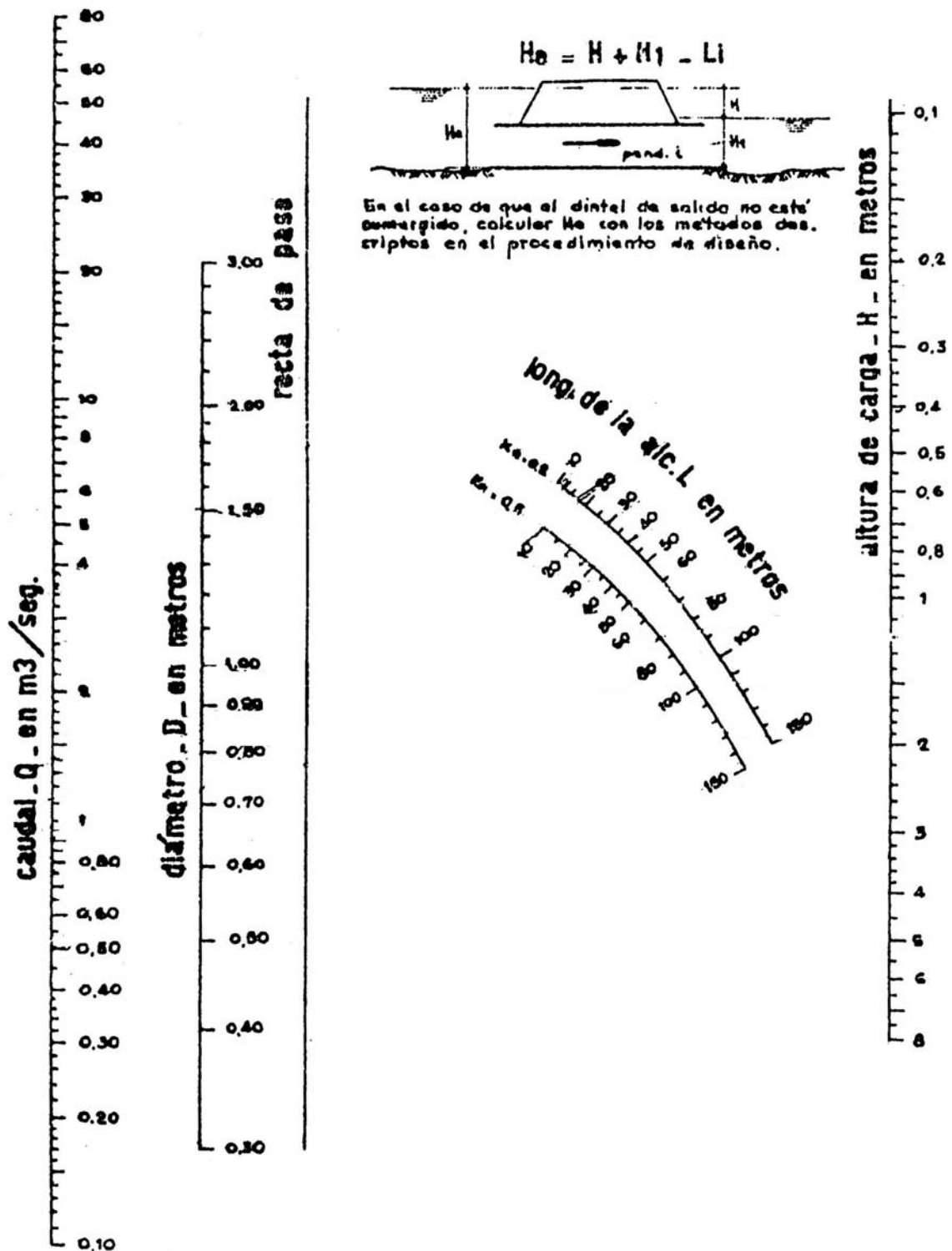
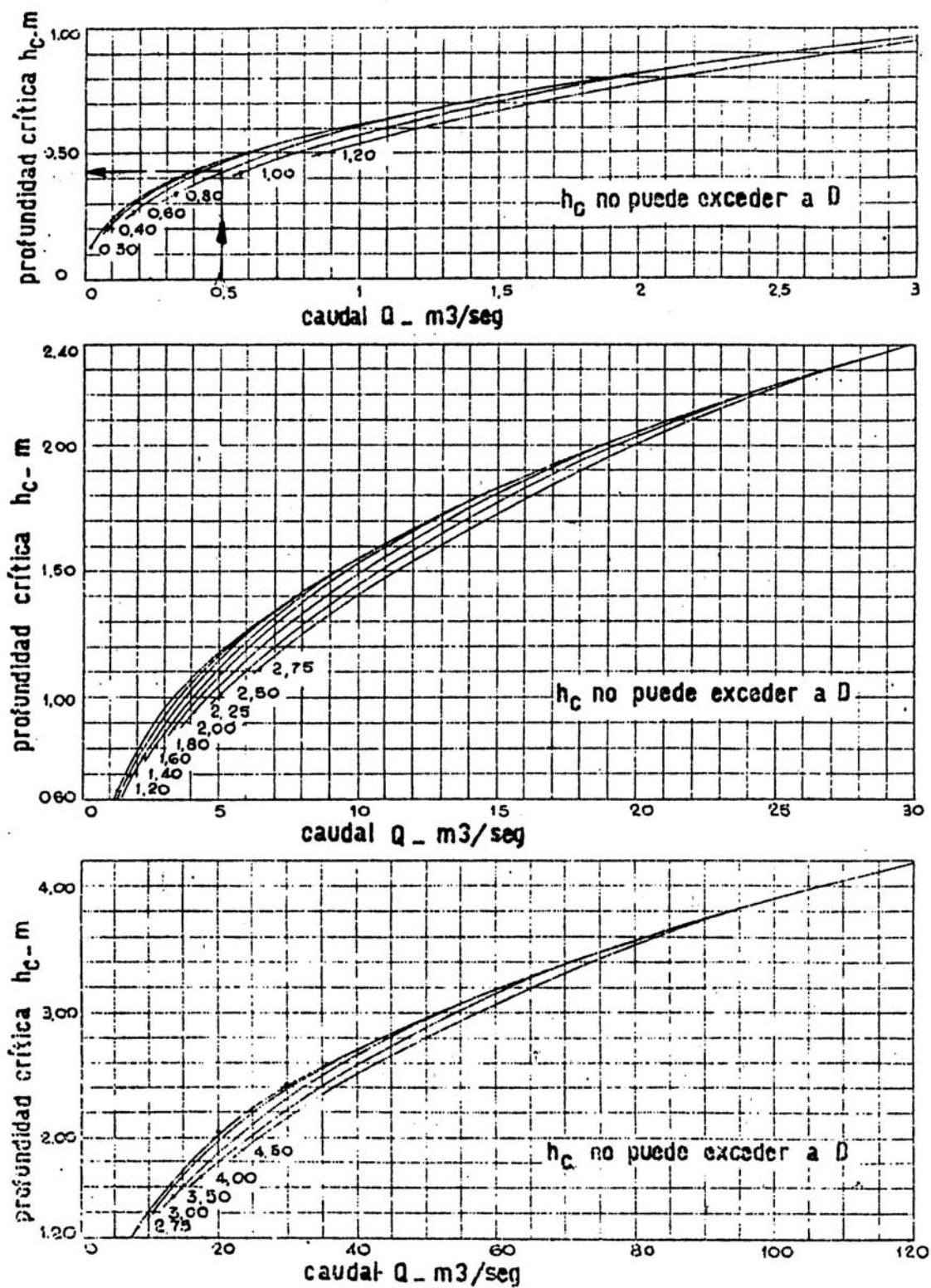


Figura N° 6.16: Profundidad crítica de caños circulares.



Ejemplo N° 6.5: Dados los siguientes datos, elaborar el diseño hidráulico de una alcantarilla de cruce de calle.

Datos de la cuneta:

Sección: trapecial.

Ancho de fondo = 0.5 m

Pendiente = 0.005 m/m.

Coefficiente de rugosidad = 0.030

Taludes (Z = H:V) = 1:2

Cota de fondo en la sección de entrada de la alcantarilla = 16.00 m IGM.

Cota de calzada = 17.50 m IGM.

Altura de agua admisible a la entrada para el evento de verificación = 17.20 m IGM.

Datos de la alcantarilla:

Sección y material adoptados: caños de H° A°.

Longitud = 12 m.

Pendiente = 0.005 m/m.

Cabezal: recto.

Caudal de diseño = 0.5 m<sup>3</sup>/s

Caudal de verificación = 0.9 m<sup>3</sup>/s.

#### A. Solución del problema paso a paso usando ábacos.

Diseño:

- i. Cálculo de los tirantes normales del flujo en el canal de salida, Hs, para los caudales de diseño y verificación:

Q [m <sup>3</sup> /s]	0.5	0.9
yn [m]	0.63	0.86

- ii. Adopción del D inicial.

Figura N° 6.14: desde escala He/D (2) (alcantarilla con cabezal recto y enchufe dirigido hacia aguas arriba), para He/D = 1 → proyección horizontal a escala 1 → recta a la izquierda pasando por Qd = 0.5 m<sup>3</sup>/s hasta la escala D → D = 0.68 m. Se adopta el diámetro comercial superior más próximo: D = 0.8 m.

- iii. Se calcula He con control de entrada.

Figura N° 6.14: desde escala D, para D = 0.8 m → recta a la derecha pasando por Qd = 0.5 m<sup>3</sup>/s hasta la escala He/D (1) → proyección horizontal hasta la escala (2) → He/D = 0.77. Luego He = 0.77 · 0.80 = **0.62 m**

- iv. Se calcula He con control de salida:

Cálculo de H1:

$$H_s = 0.63 \text{ m} < D = 0.80 \text{ m} \rightarrow (6.47)$$

Cálculo de hc: Figura N° 6.16, para Qd = 0.5 m<sup>3</sup>/s y D = 0.80 m → hc = 0.42 m.

$$H_1 = \frac{0.42 + 0.80}{2} = 0.61 \text{ m}$$

$$H_1 = H_s = 0.63 \text{ m}$$

Se adopta el mayor:  $H_1 = 0.63 \text{ m}$

Cálculo de H:

Figura N° 6.15 (se asume alcantarilla sumergida a la salida, por simplicidad): desde escala L, para  $K_e = 0.2$  (caño de H° A° con muro de cabecera, con enchufe dirigido hacia aguas arriba) y  $L = 12 \text{ m}$  → recta a la izquierda hasta unir  $D = 0.80 \text{ m}$  y determinación de punto de intersección en la recta de paso. Desde escala Q, para  $Q_d = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , pasando por punto de intersección hasta la escala H →  $H = 0.08 \text{ m}$ .

Cálculo de  $H_e$ :

$$H_e = H + H_1 - L i = 0.08 + 0.63 + 12 \cdot 0.005 = \mathbf{0.65 \text{ m.}}$$

- v. Se adopta como  $H_e$  el mayor de los valores:

$$0.65 \text{ m} > 0.61 \text{ m} \rightarrow H_e = 0.65 \text{ m (Control de salida)} < 0.80 \text{ m (D)} \rightarrow \text{flujo a gravedad.}$$

- vi. Se calcula en nivel de agua a la entrada:

$$\text{El nivel de agua a la entrada es: } 16.00 + 0.65 = 16.65 \text{ m IGM}$$

- vii. Se calcula la velocidad de salida del flujo.

$$\text{Para control de salida: } V = \frac{Q}{A}$$

$H_s = 0.63 \text{ m} < D = 0.80 \text{ m}$  y  $H_s > h_c (= 0.42 \text{ m}) \rightarrow$  se calcula A para un tirante  $h = 0.63 \text{ m}$ .

Figura N° 5.2: para  $h/D [\%] = 0.63 / 0.80 \cdot 100 = 79\% \rightarrow \text{Área} / A_{\text{full}} = 84 \%$ .

$$A_{\text{full}} = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi 0.8^2}{4} = 0.503 \text{ m}^2$$

$$\text{Area} = 0.503 \cdot 0.84 = 0.42 \text{ m}^2.$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.5}{0.42} = 1.2 \text{ m/s}$$

Verificación:

- iii. Se calcula  $H_e$  con control de entrada.

Figura N° 6.14: desde escala D, para  $D = 0.8 \text{ m}$  → recta a la derecha pasando por  $Q_v = 0.9 \text{ m}^3/\text{s}$  hasta la escala  $H_e/D$  (1) → proyección horizontal hasta la escala (2) →  $H_e/D = 1.12$ . Luego  $H_e = 1.12 \cdot 0.80 = \mathbf{0.90 \text{ m}}$

- iv. Se calcula  $H_e$  con control de salida:

Cálculo de  $H_1$ :

$$H_s = 0.86 \text{ m} > D = 0.80 \text{ m} \rightarrow (6.46) \quad H_1 = H_s = 0.86 \text{ m}.$$

Cálculo de  $H$ :

Figura N° 6.15: desde escala L, para  $K_e = 0.2$  (caño de  $H^\circ A^\circ$  con muro de cabecera, con enchufe dirigido hacia aguas arriba) y  $L = 12 \text{ m}$  → recta a la izquierda hasta unir  $D = 0.80 \text{ m}$  y determinación de intersección en la recta de paso. Desde escala Q, para  $Q_v = 0.9 \text{ m}^3/\text{s}$ , pasando por intersección hasta la escala H →  $H = 0.24 \text{ m}$ .

Cálculo de  $H_e$  (6.45):

$$H_e = H + H_1 - L i = 0.24 + 0.86 + 12 \cdot 0.005 = \mathbf{1.04 \text{ m}}.$$

- v. Se adopta como  $H_e$  el mayor de los valores:

$$1.04 \text{ m} > 0.90 \text{ m} \rightarrow H_e = 1.04 \text{ m (Control de salida)} > 0.80 \text{ m (D)} \rightarrow \text{flujo a presión}.$$

- vi. Se calcula en nivel de agua a la entrada:

El nivel de agua a la entrada es:  $16.00 + 1.04 = 17.04 \text{ m IGM} < 17.30 \text{ m}$  (se satisface el nivel máximo admisible)

- vii. Se calcula la velocidad de salida del flujo.

$$\text{Para control de salida: } V = \frac{Q}{A}$$

$$H_s = 0.86 \text{ m} > D = 0.80 \text{ m} \rightarrow A = A_{\text{full}} = 0.503 \text{ m}^2.$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.9}{0.503} = 1.8 \text{ m/s}.$$

### **B. Solución del problema aplicando el programa Hydrocalc Hydraulics:**

- i. Cálculo de  $H_s$ : con el programa, se obtiene:

Structures → Trapezoidal Channel - Normal Depth

Q [m <sup>3</sup> /s]	0.5	0.9
y <sub>n</sub> [m]	0.63	0.86
V [m/s]	0.98	1.13
Fr	0.47	0.47
A[m <sup>2</sup> ]	0.51	0.80
B [m]	1.13	1.36

Q: caudal en la cuneta, y<sub>n</sub>: tirante normal ( $H_s$ ), V: velocidad del flujo, Fr: número de Fraude, A: área mojada, B: ancho superficial.

ii. Cálculo de  $H_e$ :

Structures → Pipe culvert y se ingresan los siguientes datos :

- Culver Diameter : 0.40 m (variable).
- Chart Number : 1 (alcantarilla circular de concreto, concrete pipe culvert).
- Scale Number: 1 (entrada de borde recto con muro de cabecera, square edge entrance with headwall).
- n Manning: tipo de estructura: conducto cerrado fluyendo parcialmente lleno; composición de la estructura: concreto; descripción de la estructura: alcantarilla con curvaturas, conexiones y algunas basuras (máx):  $n = 0.014$ .
- Coeficiente de pérdida a la entrada: tubo de concreto con cabezal recto: 0.20.
- Longitud de la alcantarilla: 12 m
- Cota de fondo alcantarilla aguas abajo (invert aguas abajo) 15.94 (16.00 - 0.005\*12.00).
- Cota de fondo alcantarilla aguas arriba: 16.00 m.
- Caudal inicial: 0.5 m<sup>3</sup>/s
- Incremento de caudal: 0.0
- Numero de incrementos: 0.0
- Tirante inicial en el canal de salida ( $H_s$ ): 0.63 m (yn para Qd)
- Incremento de tirante: 0.0

Para Qd = 0.5 m<sup>3</sup>/s y  $H_s$  = 0.63 m, se obtiene:

$\phi$ [m]	HWce [m]	HWcs [m]	yn [m]	yc [m]	ys [m]	Vs m/s]	OBS.
0.4	2.33	2.34	0.40	0.40	0.40	3.98	CS
0.6	0.81	0.85	0.60	0.46	0.60	1.77	CS
<b>0.8</b>	0.63	<b>0.68</b>	0.44	0.43	0.63	<b>1.18</b>	CS

Para Qv = 0.9 m<sup>3</sup>/s y  $H_s$  = 0.86 m, se obtiene:

$\phi$ [m]	HWce [m]	HWcs [m]	yn [m]	yc [m]	ys [m]	Vs [m/s]	OBS.
<b>0.8</b>	0.97	<b>1.06</b>	0.69	0.58	0.80	<b>1.79</b>	CS

HWce y HWcs: niveles de agua a la entrada de la alcantarilla ( $H_e$ ) calculados con control de entrada y con control de salida, respectivamente; yn: tirante normal; yc: tirante crítico; ys: tirante a la salida, Vs: velocidad a la salida; CE: control de entrada; CS: control de salida.

A partir de los resultados obtenidos se tiene:

- Para el caudal de diseño, con  $\phi = 0.8$  m la alcantarilla funciona a gravedad.
- Para el caudal de verificación, con  $\phi = 0.8$  m, el nivel de agua a la entrada de la alcantarilla es: 16.00 + 1.06 = 17.06 m IGM, por lo que se satisface el nivel de agua máximo admisible a la entrada.

Teniendo en cuenta a) y b), se adopta  $\phi = 0.8$  m. En base a Vs, se debe evaluar la necesidad de proteger el canal a la salida de la alcantarilla, contra efectos erosivos.