

UNIDAD Nº 5: Diseño de conductos

El sistema de conductos es la parte del sistema de drenaje urbano que recibe el escurrimiento superficial a través de bocas de tormenta y lo conduce en forma subterránea hasta una salida.

5.1 HIPÓTESIS DE FLUJO PARA EL DISEÑO

Los procedimientos de diseño asumen como hipótesis que el flujo en los conductos es *permanente y uniforme*.

Bajo las condiciones de tormentas reales, el caudal de entrada en cada boca de tormenta es variable en el tiempo y las condiciones del flujo en el conducto no son permanentes ni uniformes. Sin embargo, como los métodos hidrológicos aplicados al diseño de conductos están basados, en general, en caudales pico calculados en la cabecera de cada tramo de conducto, *es una práctica conservadora adoptar la hipótesis de flujo permanente y uniforme*.

Existen dos filosofías para el diseño de conductos bajo la hipótesis de flujo permanente y uniforme.

a) *Criterio de flujo a gravedad*. Para esto, el segmento se debe dimensionar de tal manera que la superficie de agua dentro del conducto se mantenga abierta a presión atmosférica.

Para el flujo en canal abierto, la energía total del flujo está compuesta por los términos de la altura de velocidad, de presión (igual al tirante) y de elevación. Para que la superficie de agua a través del conducto se mantenga a presión atmosférica, *el tirante del flujo debe ser menor que la altura del conducto*.

b) *Criterio de flujo a presión, es decir, que el flujo en el conducto se desarrolle a una presión mayor que la atmosférica*. Bajo esta condición, no existe superficie de flujo expuesta dentro del conducto.

En un flujo a presión, la energía total del flujo también está compuesta por los términos de la altura de velocidad, de presión y de elevación. La diferencia significativa es que altura de presión está por encima del coronamiento del conducto y no es igual al tirante del flujo en el conducto. En este caso, la altura de presión se eleva hasta un nivel representado por la *línea del gradiente hidráulico (LGH)*.

Bajo la mayoría de las condiciones usuales, *se recomienda dimensionar los conductos con el criterio de flujo a gravedad y a sección llena o próxima a llena*.

El criterio de flujo a gravedad conduce a dimensiones de conductos mayores que las obtenidas con el criterio de flujo a presión. La adopción del criterio de flujo a gravedad proporciona un margen de seguridad que es deseable, debido a que los métodos de estimación de caudales pico no son exactos y, una vez construidos, los conductos son difíciles y caros de reemplazar.

En ciertas circunstancias, el diseño bajo el criterio de flujo a presión puede ser justificado (ej. desagües principales de grandes ciudades, con fuertes limitaciones de espacio físico para aumentar secciones de conductos). Cuando el flujo a presión es permitido, se debe poner especial énfasis en un adecuado diseño de las uniones, tal que permitan soportar el flujo a presión.

5.2 DISEÑO HIDRÁULICO DE CONDUCTOS

El diseño se realiza en dos etapas:

- Diseño hidráulico preliminar:* se definen las principales características del sistema de drenaje: traza, alineación, pendientes, tapadas y ubicación de cámaras, en base a la información básica disponible y a caudales máximos obtenidos con el método racional. Se adopta una geometría y se calculan las dimensiones de las secciones transversales con la ecuación de Chezy-Manning.
- Diseño hidráulico final:* se ajusta el diseño preliminar por aproximación, hasta obtener la LGH deseada a lo largo de la traza de los conductos. En esta etapa se puede aplicar un modelo hidrológico-hidráulico simplificado, que calcule la LGH para la condición del caudal pico (régimen permanente, ej. WinStorm) o un modelo completo, que calcule la LGH para cada intervalo de tiempo (régimen impermanente, ej. SWMM).

5.2.1 DISEÑO HIDRÁULICO PRELIMINAR

Traza de los conductos

Las trazas de los conductos en general son *coincidentes con las calles colectoras* ya que es en estas calles donde se concentra naturalmente el agua pluvial. La cabecera del conducto se ubica en la sección de control que requiere la primera boca de tormenta desde aguas arriba hacia aguas abajo, necesaria para satisfacer el tirante o ancho anegado admisible.

Los conductos se ubican normalmente debajo de la vía pública, alineado en el eje de la calle (recomendado, Figura N° 5.1.a) o por la línea del cordón (Figura N° 5.1.b), o debajo de la vereda, a corta distancia del cordón.

Figura N° 5.1.a

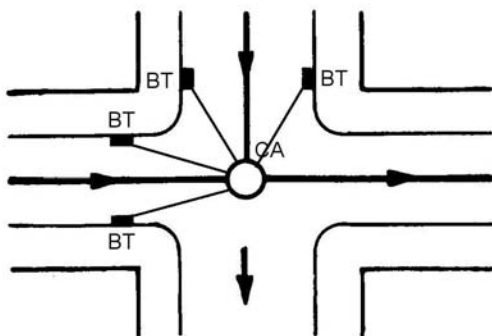
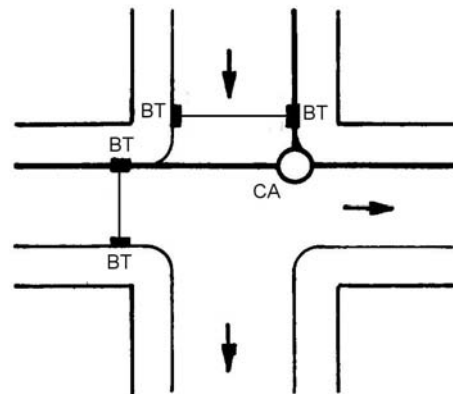


Figura N° 5.1.b



BT: boca de tormenta, CA: cámara de acceso o de registro.

La adopción de la traza se establece en base a un análisis hidráulico y económico, contemplando el ancho de la calle, interferencias con otros servicios y estado del pavimento (si existe).

Aunque es preferible la ubicación de la traza sobre el dominio público, en ocasiones especiales puede ser necesario que atraviesen propiedades privadas. En estos casos, es necesario contar con el correspondiente derecho de paso (restricción al uso del propietario).

Los conductos deben ser rectos entre cámaras de acceso, mientras sea posible (ASCE, 1969). Cuando sea necesario incorporar curvas, el radio de curvatura no debe ser menor de 30 m.

Los cruces de los conductos con otros servicios subterráneos deben ser evitados, siempre que sea posible. En caso de cruces que no se puedan evitar, se deben proyectar obras de transición del conducto para salvarlos. En la etapa de proyecto ejecutivo, se debe poner especial atención para identificar todas las posibles *interferencias con otros servicios*.

Geometría y dimensiones

Las formas más comunes son: circular, rectangular, bóveda caño y elíptica. Los materiales más comunes son hormigón armado, chapa ondulada de acero galvanizado y PVC.

Para las secciones menores, en general se recurre a caños de diámetro comercial (ej. 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1 y 1.2 m). Para secciones mayores, son comunes las secciones rectangulares de H° A° "in situ" o secciones circulares, abovedadas o elípticas de chapa ondulada.

Cuando existen restricciones de baja pendiente, puede recurrirse a secciones rectangulares anchas y de menor altura o al uso de 2 o más hileras de caños en paralelo, lo que posibilita reducir el diámetro.

La capacidad de conducción de un conducto depende de las dimensiones y forma de la sección transversal, pendiente y coeficiente de rugosidad. Si son conocidos estos parámetros geométricos e hidráulicos, el caudal máximo que puede conducir el conducto se calcula con la ecuación de Chezy-Manning:

$$Q = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} A \quad (5.1)$$

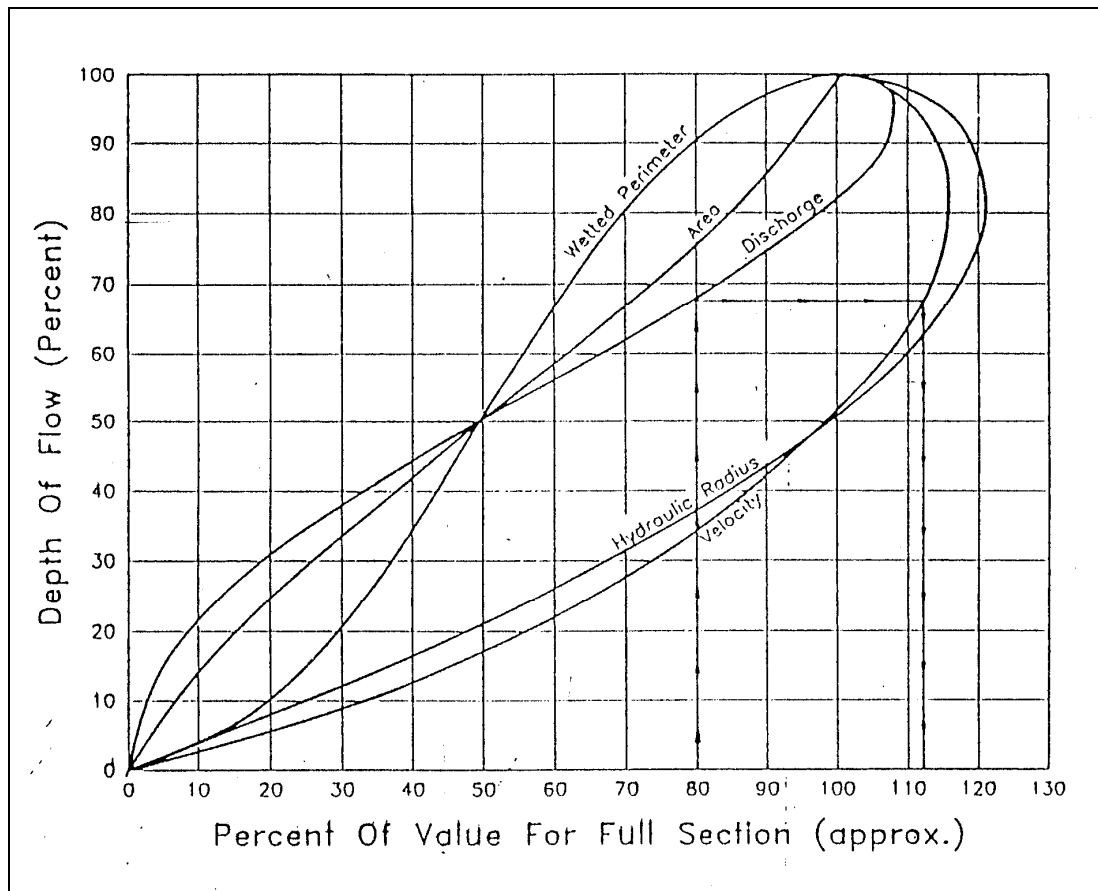
Q: caudal [m³/s], n: coeficiente de rugosidad, S: pendiente de fondo [m/m], R: radio hidráulico de la sección llena, A: área de la sección llena o próxima a llena.

Para una *sección circular*, $R = \frac{D}{4}$ y $A = \frac{\pi D^2}{4}$ (D: diámetro). Reemplazando en (5.1) y despejando el diámetro, se obtiene:

$$D = \left(3.208 \frac{n Q}{S^{1/2}} \right)^{3/8} \quad (5.2)$$

En conductos circulares, la capacidad de conducción máxima ocurre para un tirante igual al 93% de la altura del conducto (Figura N° 5.2).

Figura N° 5.2: Ábaco de parámetros hidráulicos (Fuente: HEC 22, FHWA).



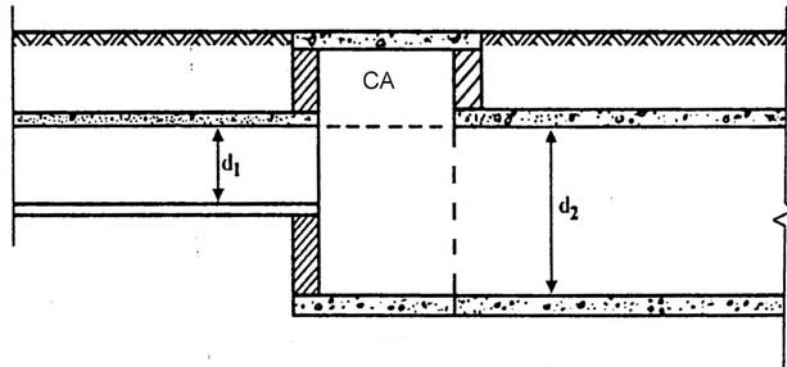
Para una *sección rectangular*, en (5.1) se consideran $R = \frac{B y}{2 y + B}$ y $A = B y$ (B: ancho del conducto, y: tirante del flujo). Debe contemplarse una **revancha mínima de 0.20 m** en la altura: $h = y + 0.20$ m (h: altura del conducto), para evitar el rozamiento con el techo del conducto. Si no se deja revancha, en (5.1) se considera $R = \frac{B y}{2 y + 2 B}$.

Para el diseño preliminar se debe usar un valor del coeficiente de rugosidad n de Manning aumentado en un 25% respecto del correspondiente a tabla, para contemplar en forma global el efecto de las pérdidas de carga locales que se producen en las cámaras de entrada, de acceso y de unión.

Alineación del intradós superior

En las cámaras (de acceso o de unión), los conductos de entrada y salida en general **se deben alinear por el intradós superior**. La Figura N° 5.3 muestra un ejemplo de alineación de conductos en una cámara en caso de cambio de diámetro (tubos) o de altura (conductos rectangulares u otras formas).

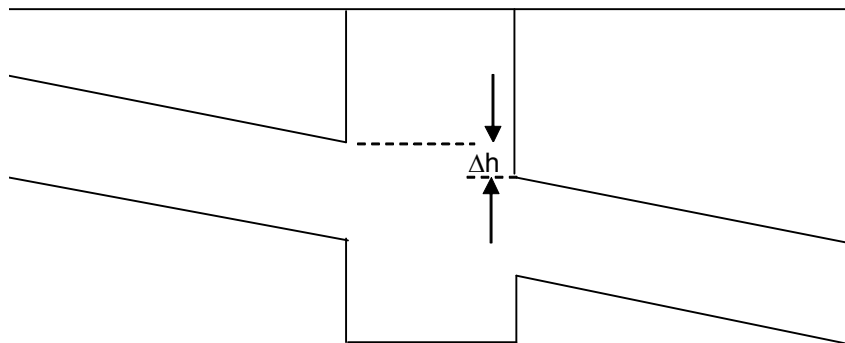
Figura N° 5.3.a: Alineación del intradós superior en cámaras con cambio de altura entre los conductos de entrada y salida.



CA: cámara de acceso, d_1 y d_2 : alturas de los conductos de llegada y de salida.

En conductos de elevada pendiente, donde la pérdida de carga local en una cámara es significativa respecto a la altura del conducto, el coronamiento del conducto de salida se suele “colgar” por debajo del coronamiento del conducto de entrada, con un desnivel igual a la pérdida de carga local en la cámara (Figura N° 5.3.b). Esta práctica se denomina “colgar” el conducto de la LGH (FHWA, 2001).

Figura N° 5.3.b: Alineación del intradós superior cuando existe una pérdida de carga local significativa en la cámara.



Δh : pérdida de carga local en la cámara.

Tapada mínima

Es la profundidad mínima entre la cota del terreno o pavimento y la corona del conducto. Los conductos se deben colocar a una profundidad tal que tengan una carga superior suficiente para prevenir roturas por cargas en la superficie del terreno.

La tapada mínima depende de las dimensiones del conducto, del tráfico vehicular y si existe o no pavimento. Varía entre 0.40 m para tránsito liviano y 0.90 m para tránsito pesado. En ningún caso, la tapada debe ser menor que 0.30 m.

Si existen muy bajas pendientes o inconvenientes para la excavación (ej. suelo de roca) y es necesario adoptar tapadas menores a la mínima indicada, se debe reforzar estructuralmente los conductos (ej. en el caso de secciones rectangulares, la losa superior puede ser utilizada como carpeta de rodamiento).

Se deben considerar cálculos de cargas estructurales específicos para cruces de ferrocarril o rutas, de acuerdo a lo establecido por cada autoridad de aplicación.

Longitud de tramos

La longitud de los tramos de conducto individuales se determina por la ubicación de las cámaras de acceso y de unión. La máxima longitud de separación entre cámaras de acceso se determina por requerimientos de mantenimiento. La Tabla N° 5.1 muestra longitudes máximas recomendadas para varios diámetros de conductos.

Tabla N° 5.1: Separación máxima entre cámaras de acceso.

Diámetro de Conducto [m]	Espaciamiento Máximo [m]
0.3 – 0.6	100
0.7 – 0.9	125
1.0 – 1.4	150
> 1.5	300

Niveles de agua máximos admisibles

Son las elevaciones máximas permitidas de la LGH en secciones de control a lo largo del perfil longitudinal de un conducto. Esas secciones incluyen bocas de tormenta, cámaras de acceso o cualquier lugar donde existe una vinculación entre el conducto y la superficie del terreno.

Para la lluvia de diseño, la máxima altura de agua en cualquier punto *no debe interferir con el funcionamiento proyectado de las bocas de tormenta ni alcanzar las tapas de las cámaras de acceso* (si se utiliza el criterio de diseño de flujo a gravedad, la LGH estará por debajo del intradós superior de los conductos).

Para eventos mayores a la tormenta de diseño (ej. lluvia mayor), al menos una parte de la red de conductos funcionará a presión. Si la LGH supera la superficie del terreno, las bocas no funcionarán y la escorrentía será descargada desde el conducto hacia la superficie de la calzada, a través de las bocas y cámaras. Para estos eventos, el sistema proyectado debe permitir que la LGH permanezca por debajo del nivel del piso de las viviendas vecinas.

Los niveles máximos permitidos deben ser establecidos a lo largo del conducto, previo al diseño hidráulico final.

Salidas del sistema de drenaje

El punto de descarga del sistema de drenaje puede ser un curso de agua (con una dada capacidad de conducción) o una depresión superficial temporal o permanentemente anegada.

La consideración de las condiciones de la descarga es una parte importante en el diseño. Se debe tener en cuenta:

- a) La *cota de fondo del conducto* (intradós inferior, “flowline” o “invert elevation”) debe ser *igual o mayor que la cota de fondo del curso (o conducto) receptor*.
- b) Se debe adoptar el nivel de agua de diseño en el curso receptor, TW (“tailwater elevation”), para una recurrencia dada y se deben evaluar eventuales efectos de remanso sobre el conducto proyectado.

Para adoptar TW se debe considerar la probabilidad de ocurrencia simultánea de crecidas en el conducto que se diseña y en el curso receptor. La independencia relativa de ambos picos puede ser evaluada cualitativamente comparando el cociente entre las áreas de drenaje del curso receptor y del conducto proyectado. A medida que el cociente es mayor, mayor será el tiempo al pico en el curso receptor respecto del tiempo al pico en el conducto y menor la probabilidad de ocurrencia simultánea de picos. La Tabla N° 5.2 puede orientar la adopción de la recurrencia del evento en el curso receptor para calcular el valor TW.

Tabla N° 5.2: Recurrencias a adoptar en el curso receptor para la determinación de TW.

A/a	Diseño 10 años		Diseño 100 años	
	Curso receptor	Conducto	Curso receptor	Conducto
10000	1	10	2	100
1000	2	10	10	100
100	5	10	25	100
10	10	10	50	100
1	10	10	100	100

A y a: superficies de las cuencas del curso receptor y del conducto, respectivamente.

Por ejemplo, si un conducto tiene un área de drenaje de 2 ha y su curso receptor tiene un área de aportes de 200 ha ($A/a = 100$), para un evento de diseño de 10 años se adopta el valor TW que corresponde a una recurrencia de 5 años en el curso receptor. Esto implica asumir que cuando el pico conducido por el conducto (de recurrencia 10 años) alcanza la sección de salida, todavía no llegó el pico del curso principal a la misma sección, por lo que el caudal de este curso es menor al de 10 años de recurrencia.

En algunos casos, un elevado nivel de agua del cuerpo receptor puede originar un remanso dentro del conducto y salir por bocas de tormenta y cámaras, creando condiciones de anegamiento. En estos casos, pueden usarse compuertas basculantes a la salida de los conductos o bien incorporar un reservorio receptor y una estación de bombeo.

c) Se debe evaluar la necesidad de proteger el lecho y márgenes del curso receptor y de disipación de energía a la salida del conducto, para prevenir efectos erosivos. Si son esperables altas velocidades de flujo a la salida del conducto, pueden usarse colchonetas de geotextil, rip-rap o estructuras disipadoras de energía.

d) Orientación (en planta) del conducto de salida. El tramo de salida del conducto debe ser posicionado en el curso receptor tal que esté orientado en la dirección de aguas abajo. Esto reducirá la turbulencia y posibles procesos erosivos. Si el conducto no puede orientarse en la dirección de aguas abajo y se orienta por ejemplo perpendicular a éste, se debe tener cuidado en evitar la erosión de la margen opuesta del curso receptor.

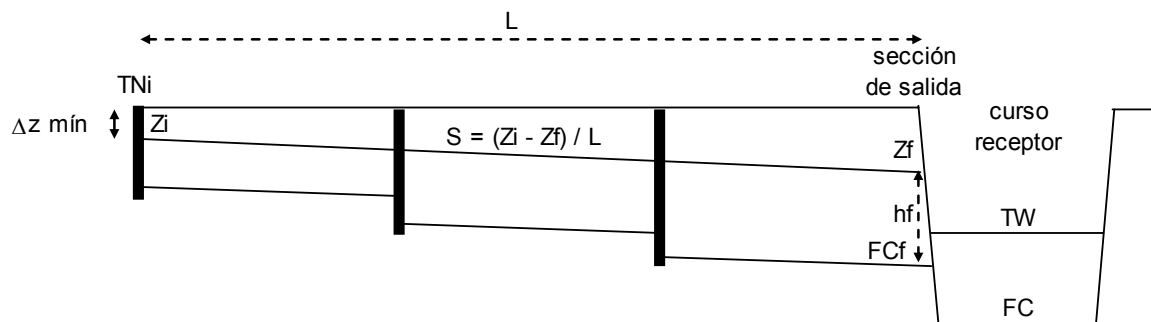
Pendiente y velocidades admisibles

Las pendientes de los conductos se adoptan, en general, similares a las de la superficie del terreno, salvo en terrenos llanos, con el fin de conectarlos con niveles compatibles a los cursos de descarga naturales de aguas abajo.

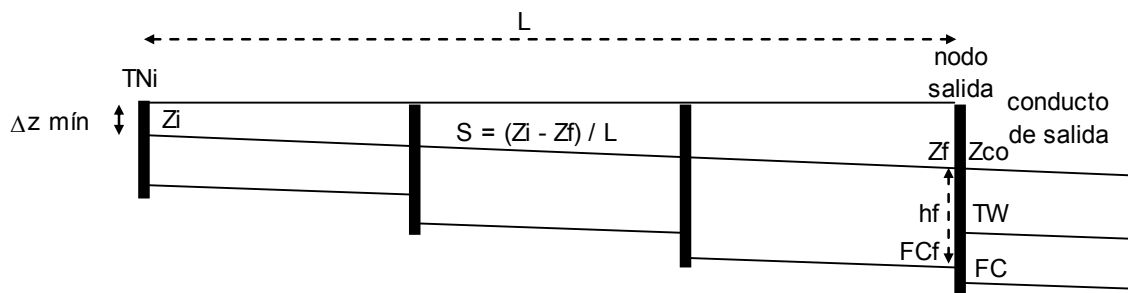
En terrenos llanos, la pendiente está condicionada por la cota de fondo del curso receptor, el nivel de agua de diseño en este curso, la altura del conducto proyectado a la salida, la tapada mínima en la cabecera y la longitud del conducto (Figura N° 5.4.a). En función de FC y TW, se adopta FCf (es deseable que el remanso originado por TW no afecte significativamente los niveles de agua en la mayor parte del conducto). Se calculan $Z_f = FC_f + h_f$, $Z_i = TN_i - \Delta z_{\text{mín}}$ y finalmente $S = (Z_i - Z_f) / L$. Si el conducto a proyectar desagüa en un conducto cerrado existente (Figura N° 5.4.b), Z_f se adopta igual a Z_{co} .

Figura N° 5.4: Estimación preliminar de la pendiente media de un conducto.

a) Conducto descarga en un canal abierto.



a) Conducto descarga en un conducto cerrado existente.



TNi: cota de terreno en la cabecera, FC: cota de fondo del curso o conducto receptor, TW: nivel de agua de diseño en el curso o conducto receptor, hf: altura del conducto proyectado en la sección final (salida), Zi y Zf: cotas de intradós superior del conducto proyectado en las secciones inicial y final, L: longitud del conducto, S: pendiente media, $\Delta z_{\text{mín}}$: tapada mínima en la sección inicial.

Es deseable mantener una *velocidad de autolimpieza* para prevenir la deposición de sedimentos y la consecuente pérdida de capacidad. Para ello, los conductos se deben diseñar para mantener una velocidad de al menos 0.6 a 0.9 m/s para la sección llena.

Para una sección circular, la pendiente necesaria para generar una velocidad de autolimpieza se calcula:

$$S_{VA} = 6.35 \left(\frac{n V}{D^{2/3}} \right)^2 \quad (5.3)$$

S_{VA} : pendiente que verifica la velocidad V [m/m], n: coeficiente de rugosidad, V: velocidad de autolimpieza (0.6 a 0.9) [m/s], D: diámetro del tubo [m].

Para prevenir la socavación y otros efectos indeseables causados por la alta velocidad del flujo, también debe especificarse la velocidad máxima admisible. Para tubos de concreto, la velocidad máxima admisible es de 5.0 m/s.

Para facilitar el mantenimiento, es deseable que exista una pendiente uniforme entre cámaras de acceso.

Diseño Hidráulico Preliminar de Conductos

Para el diseño hidráulico preliminar de conductos se utiliza una planilla de cálculo como se muestra en la Tabla N° 5.3. Este procedimiento asume que cada tramo de conducto será inicialmente diseñado bajo *condiciones de flujo a gravedad a sección llena*.

A diferencia del cálculo para el espaciamiento de bocas de tormenta, en este caso en cada sección de cálculo se considera la *sección completa de la calle*.

1. Adoptar la traza del sistema de conductos en base a la dinámica hídrica y planialtimetría de la cuenca. Sobre el mapa de la cuenca se vuelca la siguiente información:
 - a. Ubicación de los tramos de conductos.
 - b. Dirección del flujo.
 - c. Ubicación de las cámaras de acceso y otras estructuras.
 - d. Número o identificación de todas las estructuras.
 - e. Ubicación de todos los dispositivos de servicios existentes que pueden generar interferencias con la red de conductos proyectada (caños de agua, cloaca y gas, conductos pluviales preexistentes, cables de electricidad y telefonía subterráneos y otros).
2. Determinar los siguientes parámetros hidrológicos para las subcuencas: áreas de drenaje, coeficientes de escorrentía y tiempos de concentración.
3. Usando la información generada en los pasos 1 y 2, completar la siguiente información en la planilla para cada tramo de conducto, comenzando por el tramo en el extremo de aguas arriba:
 - a. “Desde” y “Hasta” secciones, Col. 1 y 2.
 - b. “Longitud” del tramo, Col. 3.
 - c. “Área Inc.”, área de aporte incremental, Col. 4.
 - d. “C”, coeficiente de escorrentía del área incremental, Col. 6.
 - e. “ t_c local”, tiempo de concentración local, Col. 9.
 - f. “ t_c sistema”, tiempo de concentración del sistema. Col. 10.
4. Usando la información del Paso 3, calcular los siguiente:
 - a. “Área total”, Col. 5. Sumar el valor de la Col. 4 al valor de la Col. 5 de la sección anterior.
 - b. “Área Inc.” x “C”, Col. 7.
 - c. “Área total” x “C”, Col. 8. Sumar el valor de la Col. 7 al valor de la Col. 8 de la sección anterior.

- d. “I”, Col. 11. Usando el mayor de los tiempos de concentración en Col. 9 y Col. 10 y la curva IDF de la localidad.
- e. “Q total”, Col. 12. Multiplicar los valores de Col. 8 y Col. 11.
- f. Se dimensiona el conducto para conducir el caudal Q, variando la pendiente y dimensiones si es necesario, Col. 13.
- g. “Pendiente”, Col. 21.
- h. “Q sec. llena”, Col. 14. Se calcula el caudal a sección llena del conducto dimensionado en Col. 13.
- i. “Velocidades”, Col. 15 y Col. 16. Velocidades a sección llena y velocidad del caudal de diseño.
- j. “Tiempo tras”, Col. 17. Tiempo de traslado en el tramo, dividiendo la longitud del tramo (Col. 3) por la velocidad del caudal de diseño (Col. 16).
- k. “Caída cor.”. Col. 20. Calcular una caída por pérdida de energía en la cámara.
- l. “Solera int.”, Col. 18 y Col. 19. Calcular las cotas de fondo en las secciones extremas (aguas arriba y aguas abajo) del tramo de conducto en análisis, incluyendo cualquier cambio en el tamaño del conducto que se haya adoptado.

Para el primer tramo de conducto (cabecera), la cota de solera de la sección aguas arriba es igual a la cota del terreno menos la tapada y menos la altura del conducto. La cota de solera de la sección aguas abajo es igual a la cota de solera de la sección aguas arriba menos el producto de la pendiente por la longitud del tramo.

Para el tramo subsiguiente, la cota de solera de la sección aguas arriba es igual a la cota de coronamiento de la sección aguas abajo del tramo anterior menos la altura del tramo actual (alineación por el coronamiento). Si la pérdida de carga local en la cámara es significativa respecto a la altura del conducto, descontar además dicha pérdida.

5. Repetir los pasos 3 y 4 para todos los tramos de conductos hasta la salida.

STORM DRAIN COMPUTATION SHEET

[illegible]

5.2.2 DISEÑO HIDRÁULICO FINAL

Una vez finalizado el diseño hidráulico preliminar, se debe ajustar el mismo con la ayuda del cálculo de la LGH, hasta alcanzar la LGH deseada para los eventos de diseño y verificación.

Líneas de gradiente de energía y de gradiente hidráulico

La energía total en un punto de una línea de corriente es la suma de energía potencial, energía de presión y energía cinética.

Para flujo en canales abiertos, la energía total se expresa (Figura N° 5.5.a):

$$H = z + d \cos \theta + \frac{v^2}{2g} \quad (5.4)$$

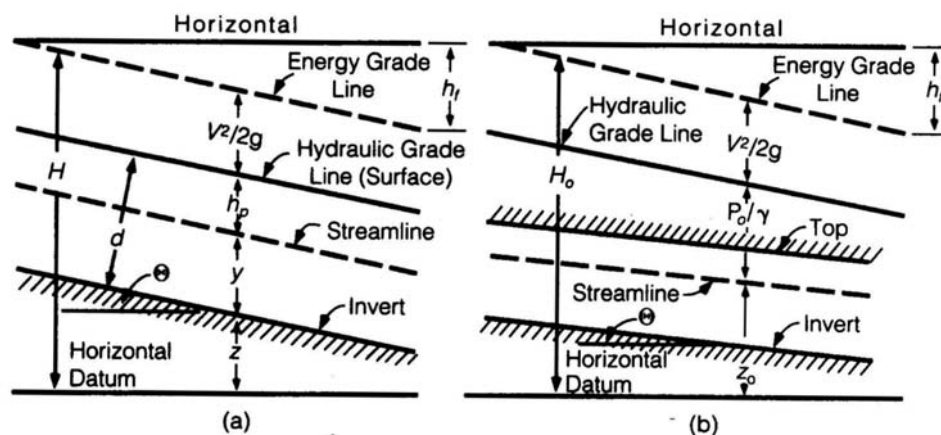
H: energía total, z: elevación del fondo del canal respecto a un plano de referencia arbitrario, d: tirante (medido normal al fondo del canal), θ : ángulo de inclinación del fondo, v: velocidad.

Para flujo en conductos a presión, la energía total se expresa (Figura N° 5.5.b):

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \quad (5.5)$$

z: altura del centroide del conducto sobre un plano de referencia arbitrario, p: presión, γ : peso específico del fluido.

Figura N° 5.5: Definición de términos de la energía total para flujos a gravedad (a) y bajo carga (b) (fuente: Manual N° 77 ASCE, 1992).



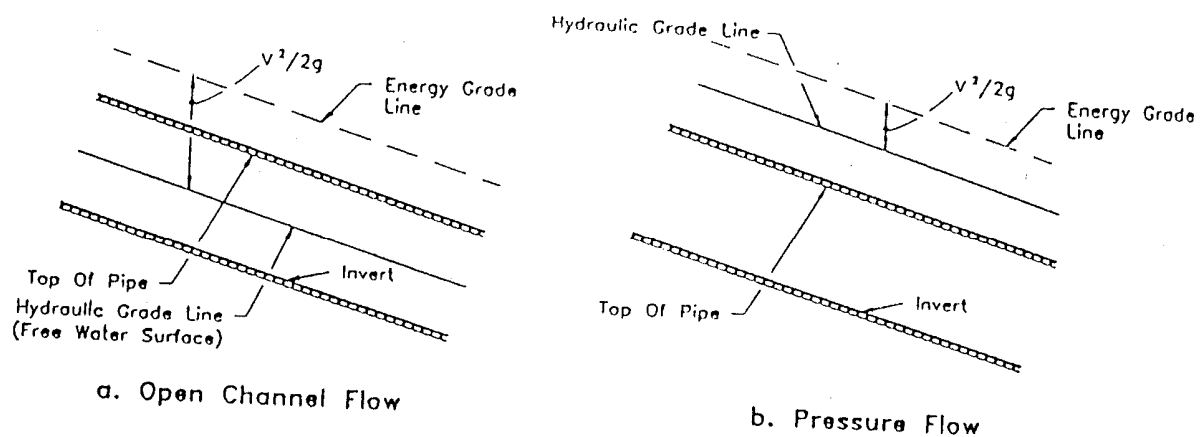
La *línea del gradiente de energía (LGE)* es la línea que muestra la energía total del flujo sobre un plano de referencia arbitrario. La pendiente de la LGE es llamada pendiente de energía o de fricción S_f .

La *línea del gradiente hidráulico (LGH)* es una línea coincidente con el nivel del agua en cualquier punto a lo largo de un canal abierto. En conductos cerrados fluyendo bajo presión, la LGH es el nivel al cual el agua ascendería en un tubo vertical en cualquier punto a lo largo del conducto (nivel piezométrico). La LGH se determina restando la altura de velocidad ($v^2/2g$) a la línea del gradiente de energía (LGE).

La LGH es esencial para el diseño de conductos y canales abiertos. Ayuda al proyectista a ajustar el diseño preliminar de un sistema de conductos, en base al conocimiento de los niveles del agua máximos a lo largo de los conductos, para los eventos de diseño y verificación.

La Figura 5.6 muestra las LGH y LGE para conductos funcionando como canal abierto o a presión.

Figura N° 5.6: Flujos en conductos a gravedad (a) y bajo carga (b) (fuente: Manual HEC N°22, FHWA, 1996).



Si la LGH está por debajo del coronamiento interno del conducto, existen condiciones de flujo a gravedad (a). Inversamente, si la LGH está por encima del coronamiento interior del conducto, existen condiciones de flujo a presión (b).

Cuando el flujo en el conducto alcanza justo el punto donde el conducto está fluyendo lleno, está bajo flujo gravitacional y el flujo es influenciado por la resistencia del perímetro total del conducto.

El flujo en canales abiertos puede ser clasificado como uniforme o no uniforme.

El flujo uniforme está caracterizado por el tirante normal calculado con la ecuación de Manning.

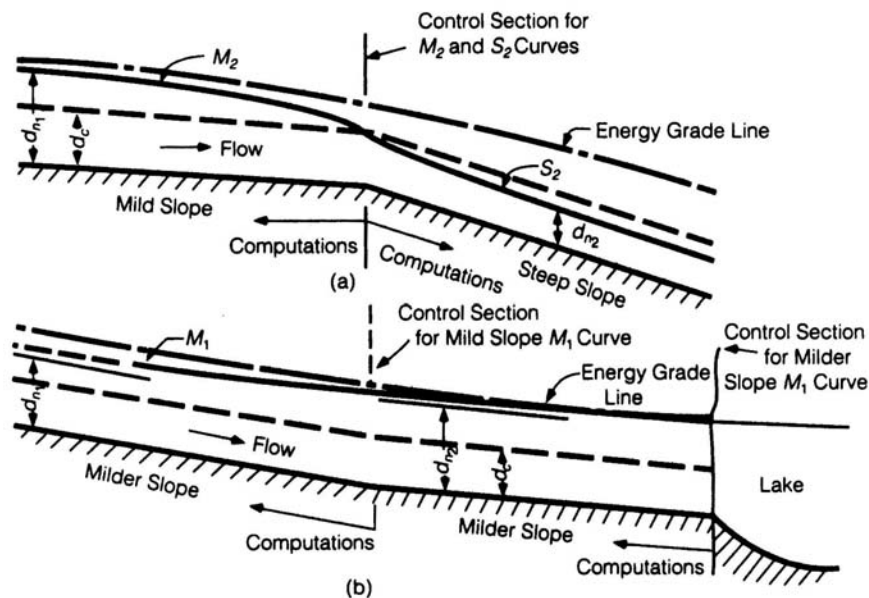
El flujo no uniforme, puede ser gradualmente o rápidamente variado. Este último ocurre en transiciones abruptas tales como flujo sobre vertederos, flujo bajo compuertas y a través de uniones. El resalto hidráulico es el mejor ejemplo de flujo rápidamente variado, de interés en diseño de sistemas de drenaje urbano.

El perfil de la superficie de agua puede calcularse por los métodos de paso directo (calcula la posición de tirantes elegidos) o de paso estándar (calcula los tirantes de secciones elegidas).

El cálculo de la LGH debe comenzar en una *sección de control*. Una sección de control es cualquier sección de un canal donde el tirante del flujo es conocido, tal como un tirante crítico, tirante aguas abajo de una alcantarilla o conducto (TW), tirante del flujo sobre un vertedero o presa o tirante del flujo bajo una compuerta.

Si el flujo aguas arriba de la sección de control es subcrítico, el cálculo de la LGH procede desde dicha sección hacia aguas arriba. Si el flujo aguas abajo de la sección de control es supercrítico, el cálculo procede desde el control hacia aguas abajo (Figura N° 5.7).

Figura N° 5.7: Perfiles longitudinales del pelo de agua para flujo gradualmente variado: a) cambio de pendiente suave a fuerte, b) cambio de pendiente suave a más suave (fuente: Manual N° 77 ASCE, 1992).



La identificación de un perfil particular del pelo de agua en régimen permanente gradualmente variado es determinada por las magnitudes relativas del tirante del flujo (d), el tirante normal (d_n), el tirante crítico (d_c) y la ubicación de las secciones de control.

Los perfiles de la superficie de agua se caracterizan por alguno de los siguientes tipos que describe la pendiente del canal:

Tipo	Pendiente	Relación de tirantes
M	suave	$d_n > d_c$
C	crítica	$d_n = d_c$
S	fuerte	$d_n < d_c$
H	horizontal	d_n no existe
A	adversa	d_n no existe

Los perfiles de la superficie de agua también se caracterizan por la relación del tirante del flujo con los tirantes normal y crítico, de acuerdo a las siguientes zonas:

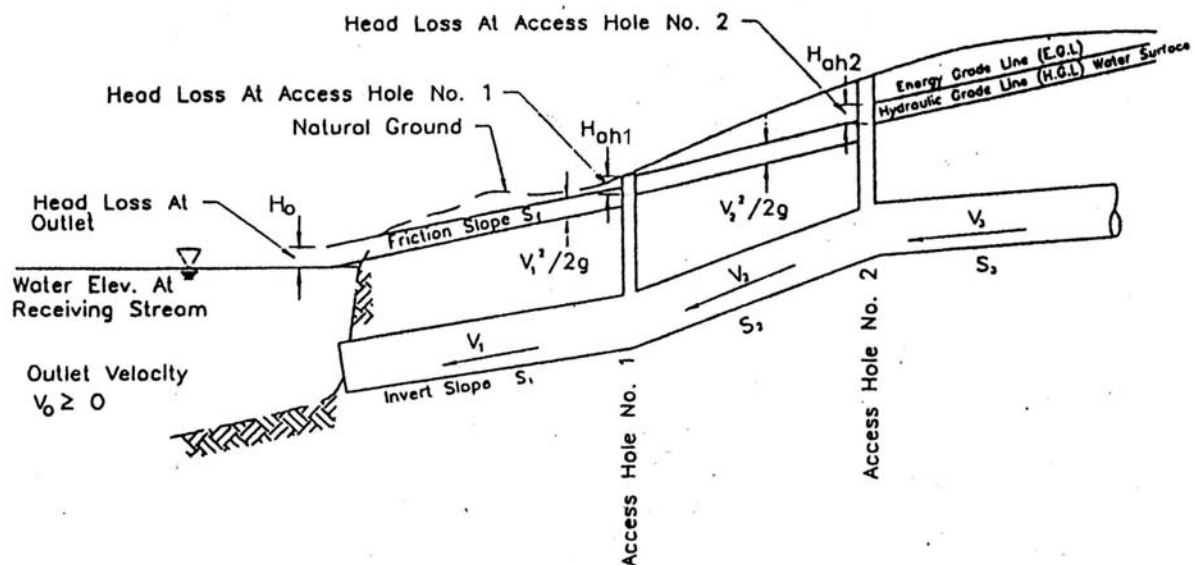
Zona	Pendiente
1	d mayor que d_n y d_c
2	d entre d_n y d_c
3	d menor que d_n y d_c

Determinación de la LGH

La mayoría de los sistemas de drenaje se diseñan para funcionar en régimen subcrítico. La Figura N° 5.8 muestra un caso de un conducto subterráneo con flujo a presión que descarga en un cuerpo de agua receptor. Para ejemplificar el procedimiento de cálculo de la LGH se consideran dos cámaras de acceso próximas a la salida (secciones 1 y 2)

La sección de salida del sistema (sección 0) usualmente es una sección de control.

Figura N° 5.8: Líneas de gradiente de energía y de gradiente hidráulico.



V_1 , V_2 y V_3 : velocidades del flujo en los tramos 1, 2 y 3, S_1 , S_2 y S_3 : pendientes del conducto en los tramos 1, 2 y 3, H_0 : pérdida de carga a la salida (es nula si la orientación de la descarga es aproximadamente igual a la dirección del canal), H_{ah1} y H_{ah2} : pérdida de carga en las cámaras de acceso 1 y 2, respectivamente.

Si la sección de salida está *sumergida*, como ocurre cuando TW está por encima del coronamiento del conducto, para el inicio de los cálculos se adopta:

$$LGH_0 = TW \quad (5.6)$$

Si esto no ocurre, se pueden presentar 2 casos:

a) si $TW > \frac{d_c + D}{2} + z_0$, se adopta (5.6).

b) si $TW < \frac{d_c + D}{2} + z_0$, se adopta:

$$LGH_0 = \frac{d_c + D}{2} + z_0 \quad (5.7)$$

LGH_0 : valor de la línea del gradiente hidráulico en la sección de salida, d_c : tirante crítico, D : diámetro o altura del conducto, z_0 : cota de fondo del conducto en la sección de salida.

Se calcula el valor de LGE en la sección de salida:

$$LGE_0 = LGH_0 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (5.8)$$

g: aceleración de la gravedad.

Se calculan el tirante del flujo (d) y el tirante crítico (d_c) a partir de ábacos y se comparan para determinar el régimen de flujo en el tramo de conducto. Si $d > d_c$, el flujo es subcrítico. En este caso, se calcula el valor de LGE a la salida de la primer cámara de acceso con la ecuación:

$$LGE_{1s} = LGE_0 + H_{01} \quad (5.9)$$

LGE_{1s} : valor de la línea del gradiente de energía en la sección de salida de la primer cámara de acceso, H_{01} : pérdida de carga total en el tramo de conducto 0 - 1 (debidas a fricción, eventuales curvas, transiciones, uniones y pérdida de salida).

Se calcula el tirante a la salida de la primer cámara de acceso:

$$d_{1s} = LGE_{1s} - \frac{V_1^2}{2g} - z_{1s} \quad (5.10)$$

d_{1s} : tirante a la salida de la primer cámara de acceso, z_{1s} : cota de fondo del conducto a la salida de la cámara 1.

Se calcula el valor de LGE en la cámara 1, contemplando la pérdida en dicha cámara:

$$LGE_1 = LGE_{1s} + K \frac{V_1^2}{2g} \quad (5.11)$$

Se calcula el valor de LGH en la cámara 1:

$$LGH_1 = LGE_1 - \frac{V_1^2}{2g} \quad (5.12)$$

A partir de esta sección, se repiten los pasos vistos para el próximo tramo de conducto hacia aguas arriba.

Si ocurre flujo supercrítico, las pérdidas de conducción y locales no se trasladan hacia aguas arriba. Cuando el flujo en una sección es identificado como supercrítico, se debe avanzar hasta la próxima sección aguas arriba para determinar su régimen de flujo. Este proceso continúa hasta que el sistema de drenaje retorna a un régimen de flujo subcrítico. En el tramo del sistema con flujo supercrítico, se calcula la LGH de manera similar, pero progresando desde aguas arriba hacia aguas abajo.

Estos cálculos se realizan con programas desarrollados al efecto (ej. WinStorm).

Pérdidas de carga por fricción

La principal pérdida en un canal o conducto es por fricción contra los bordes de la conducción. La expresión general para calcular esta pérdida es:

$$H_f = L \bar{S}_f \quad (5.13)$$

H_f : pérdida de carga debida a la fricción, L : longitud del canal o conducto, \bar{S}_f : pendiente de fricción media en la longitud L , puede estimarse como $\bar{S}_f = (S_{f1} + S_{f2})/2$, donde los subíndices 1 y 2 se refieren a los extremos del tramo.

La pendiente de fricción puede estimarse con la ecuación de Manning:

$$S_f = \left(\frac{Q n}{A R^{2/3}} \right)^2 \quad (5.14)$$

En adición a la pérdida por fricción a lo largo del canal o conducto, existen usualmente pérdidas de energía locales asociadas con transiciones, uniones, curvas, entradas, salidas, obstrucciones y dispositivos de control (orificios y compuertas).

Estas pérdidas ocurren sobre una distancia relativamente corta y son representadas por tramos de pendiente fuerte o caídas bruscas en la LGE.

En conductos largos ($L/D \gg 1000$), estas pérdidas locales son usualmente muy pequeñas en comparación con la pérdida por fricción y pueden ser despreciadas. Si embargo, si el canal o conducto es relativamente corto y/o existe un número de cámaras, cambios de dirección, uniones o cambios en las dimensiones, la suma de estas pérdidas puede exceder la pérdida por fricción.

Las pérdidas locales se expresan tanto como K veces el potencial de velocidad o como K veces la diferencia de potenciales de velocidad, según el tipo de pérdida involucrada:

$$H_L = K_c \frac{v^2}{2g} \quad (5.15)$$

H_L : pérdida de carga local o menor, K_c : coeficiente de pérdida.

El coeficiente de pérdida y la forma de la ecuación son diferentes dependiendo del tipo de pérdida, si el flujo es a gravedad o a presión y a veces, si el flujo es subcrítico o supercrítico.

Pérdidas en transiciones

Una transición es una sección o tramo donde un conducto o canal cambia de dimensiones. El cambio en el área de la sección transversal origina un cambio en la velocidad y una pérdida de carga.

Las pérdidas de energía en contracciones o expansiones en flujo a gravedad se expresan:

Contracción:

$$H_c = K_c \left(\frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} \right) \quad \text{para } v_2 > v_1 \quad (5.16)$$

Expansión:

$$H_e = K_e \left(\frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \right) \quad \text{para } v_1 > v_2 \quad (5.17)$$

Los coeficientes K_c y K_e están tabulados en función de la geometría de la transición.

Para contracciones bruscas en conductos funcionando bajo carga, se aplica la ecuación:

$$H_c = K_c \frac{v_2^2}{2g} \quad (5.18)$$

Para expansiones en conductos funcionando bajo carga, se aplica la ecuación:

$$H_e = K_e \frac{v_1^2}{2g} \quad (5.19)$$

Pérdidas en entrada

Las pérdidas de entrada a alcantarillas prismáticas y conductos de varios materiales se estiman con la ecuación (5.15). Los coeficientes de pérdida de entrada están tabulados en función del tipo de estructura, material y diseño de la entrada.

Pérdidas en uniones y cámaras de acceso

Las pérdidas en cámaras de acceso pueden representar típicamente entre el 20-30% de la pérdida de carga total, aunque en casos extremos pueden representar un porcentaje mucho mayor.

Las pérdidas se estiman con la ecuación (5.15) y el coeficiente está tabulado en función del tipo de estructura y el ángulo de deflexión entre el conducto de entrada y el de salida. Otra alternativa más detallada para calcular el coeficiente es con la expresión:

$$K = K_0 C_D D_d C_Q C_p C_B \quad (5.20)$$

K : coeficiente de pérdida ajustado, K_0 : coeficiente de pérdida de carga inicial, C_D : factor de corrección por diámetro de conductos (sólo para flujos a presión), C_d : factor de corrección por tirante de flujo, C_Q : factor de corrección por caudal relativo, C_p : factor de corrección por efecto de zambullido del conducto de entrada en la cámara de acceso, C_B : factor de corrección por canal en la solera de la cámara.

A medida que disminuye la velocidad del flujo, la pérdida de energía en una cámara es menos significativa. Considerando $K = 0.5$ (cámara de acceso tramo recto), para una velocidad de 3.0 m/s, $H = 0.23$ m, mientras que para una velocidad de 1.0 m/s, $H = 0.03$ m.

5.3 ESTRUCTURAS AUXILIARES

Las estructuras auxiliares incluyen estructuras de entrada, cámaras de acceso, cámaras de unión y otras estructuras especiales, como transiciones, partidores de flujo, sifones y compuertas basculantes.

5.3.1. Cámaras de Entrada

Son las cámaras asociadas a las bocas de tormenta, de forma prismática con aberturas en la parte superior y laterales para recibir el agua superficial. A través de un conducto auxiliar, la escorrentía captada es derivada hacia un conducto subterráneo. La Figura N° 5.9 muestra estructuras de entrada típicas, para distintos tipos de sumideros: reja en solera (con y sin cuenco de atrape), abertura en cordón y combinadas.

El cuenco de atrape tiene por objeto retener los sedimentos y residuos transportados por el agua antes de que ingresen al sistema de conductos. Requiere de una limpieza periódica para que sea efectiva.

Figura N° 5.9: Cámaras de entrada (fuente: Urban Drainage Design Manual. HEC N°22).

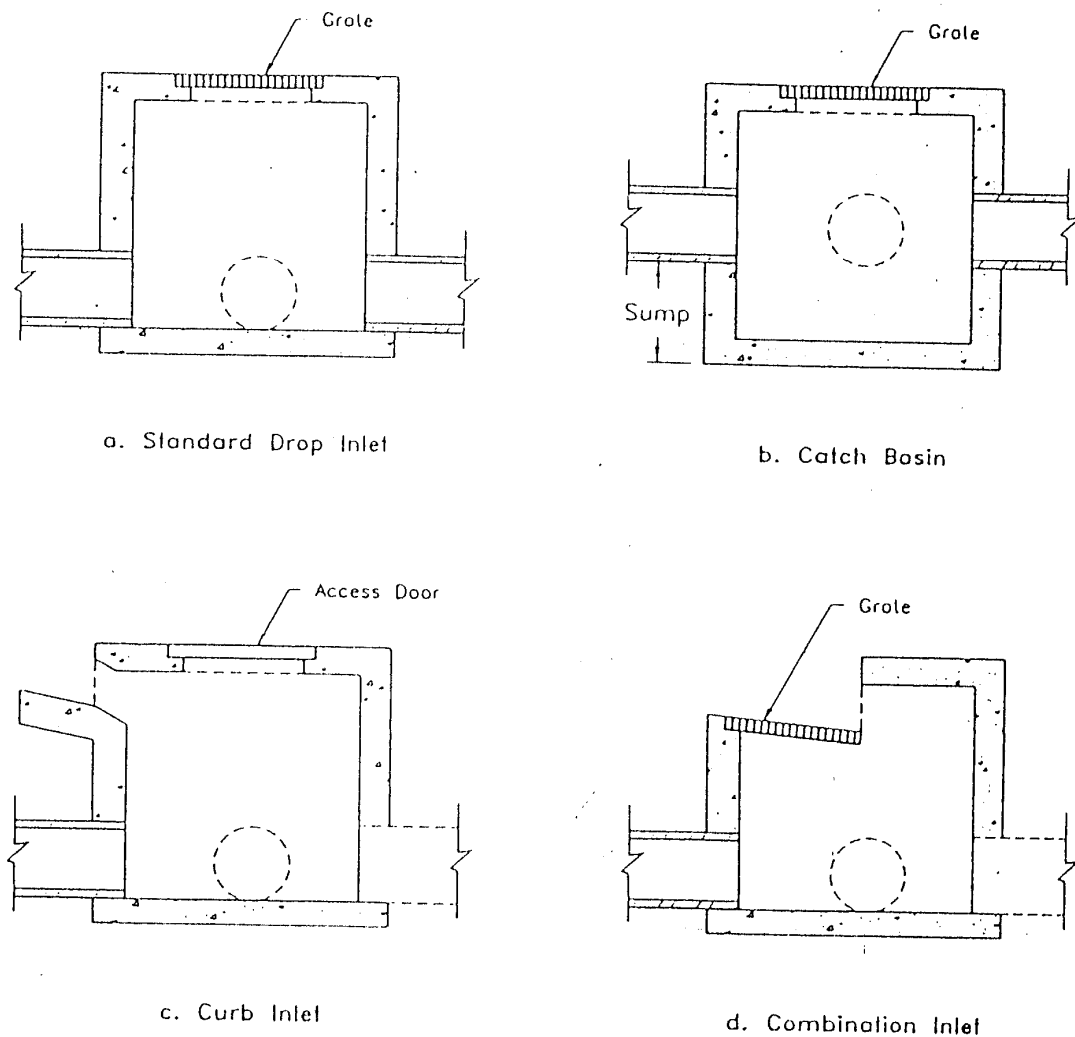


Figura N° 5.10: Cámara de entrada bajo vereda (fuente: Municipalidad de Santa Fe).

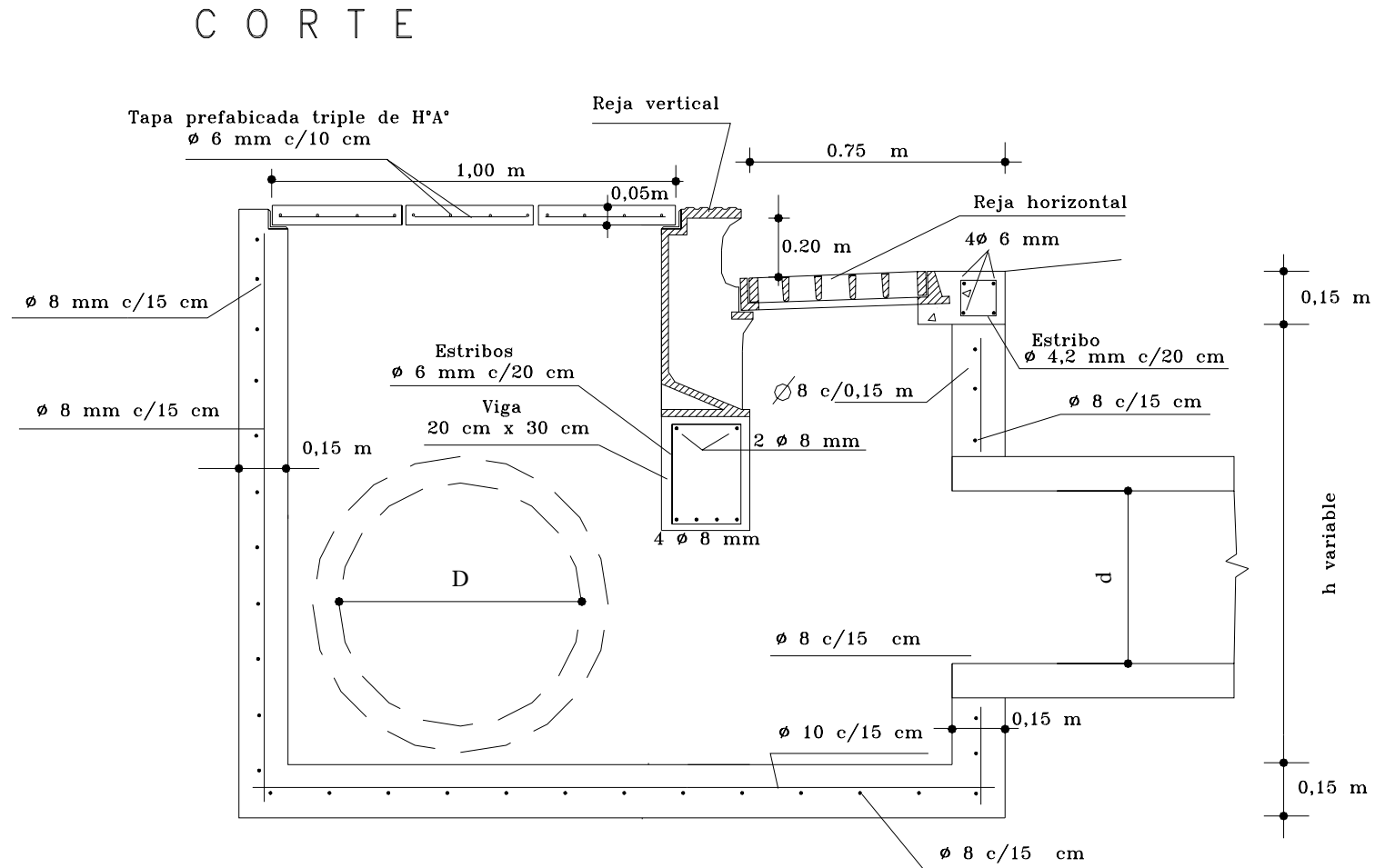
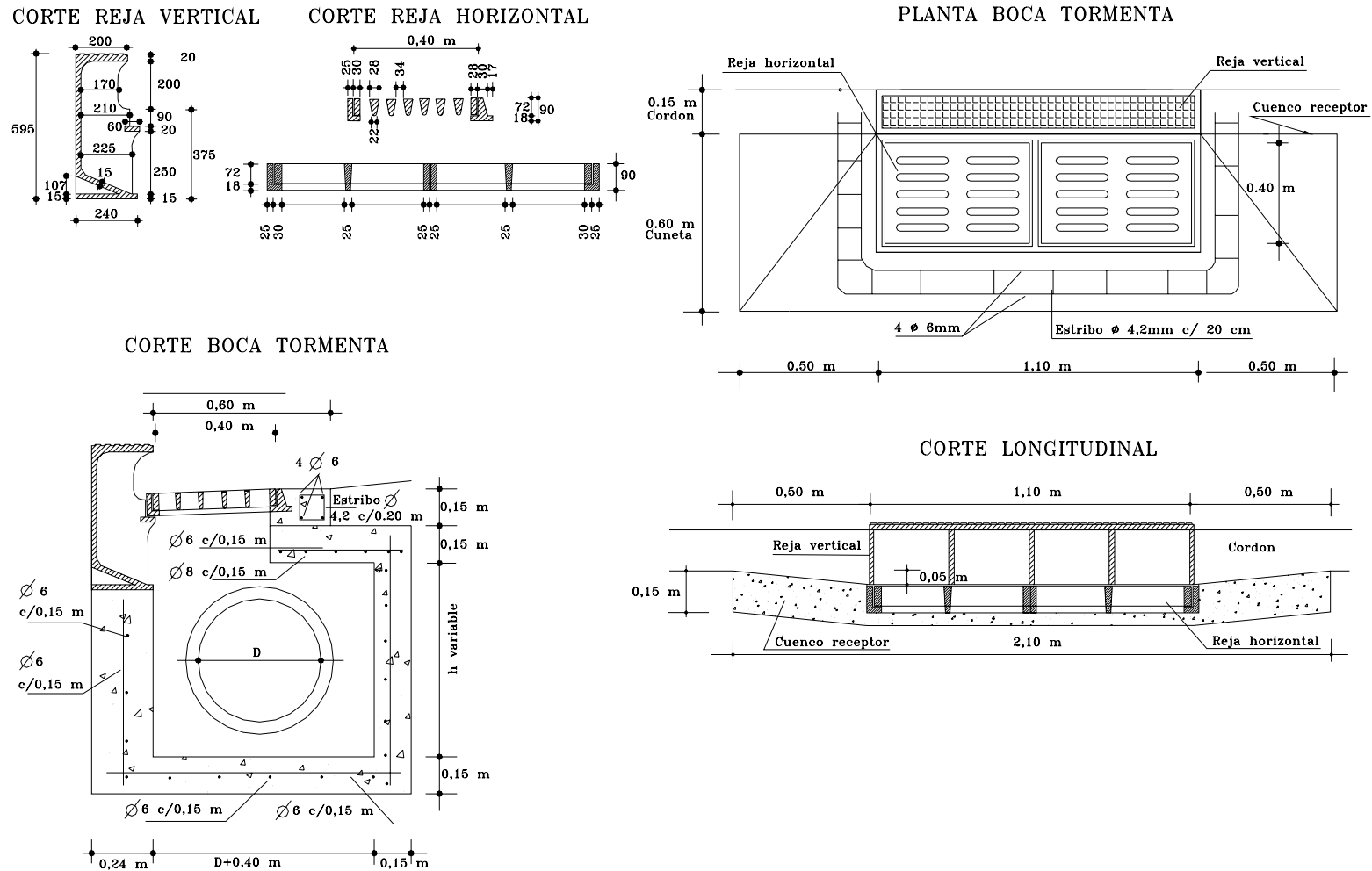


Figura N° 5.11: Cámara de entrada bajo pavimento (fuente: Municipalidad de Santa Fe).



5.3.2 Cámaras de acceso ó de registro

La función principal de esta estructura es facilitar el acceso al sistema de drenaje para inspección y mantenimiento. Como funciones secundarias, pueden servir para uniones de conductos y pueden proveer de ventilación y alivio de presión para el sistema de conductos.

La Figura 5.12 muestra configuraciones típicas de cámaras de acceso para conductos pequeños. Cuando el conducto es mucho mayor que el diámetro de la cámara, ésta se construye aparte del conducto y se hace un acceso para entrar en él.

Figura N° 5.12: Configuraciones típicas de cámaras de acceso (fuente: HEC N°22).

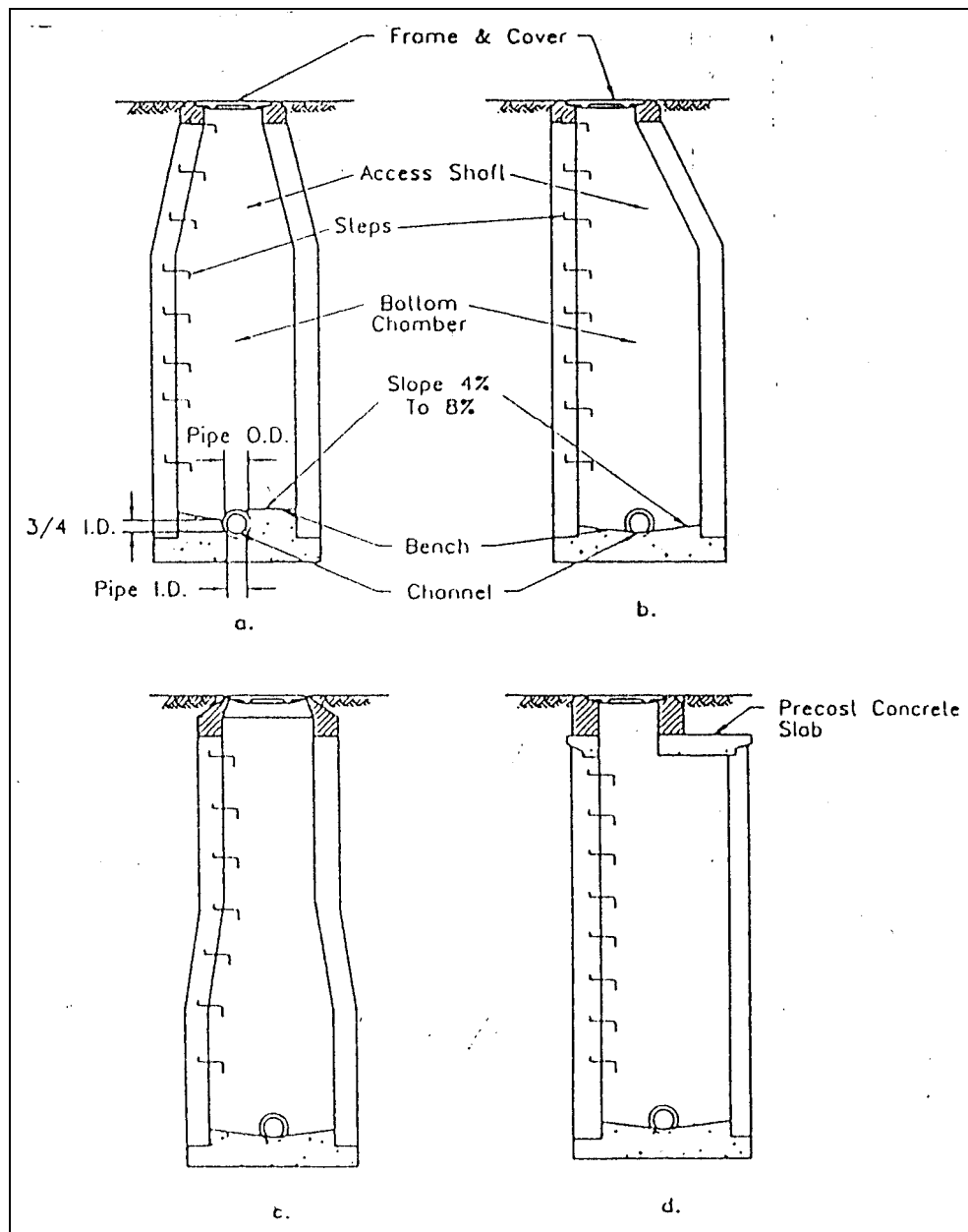


Figura N° 5.13: Cámara de registro tipo A (fuente: Municipalidad de Santa Fe).

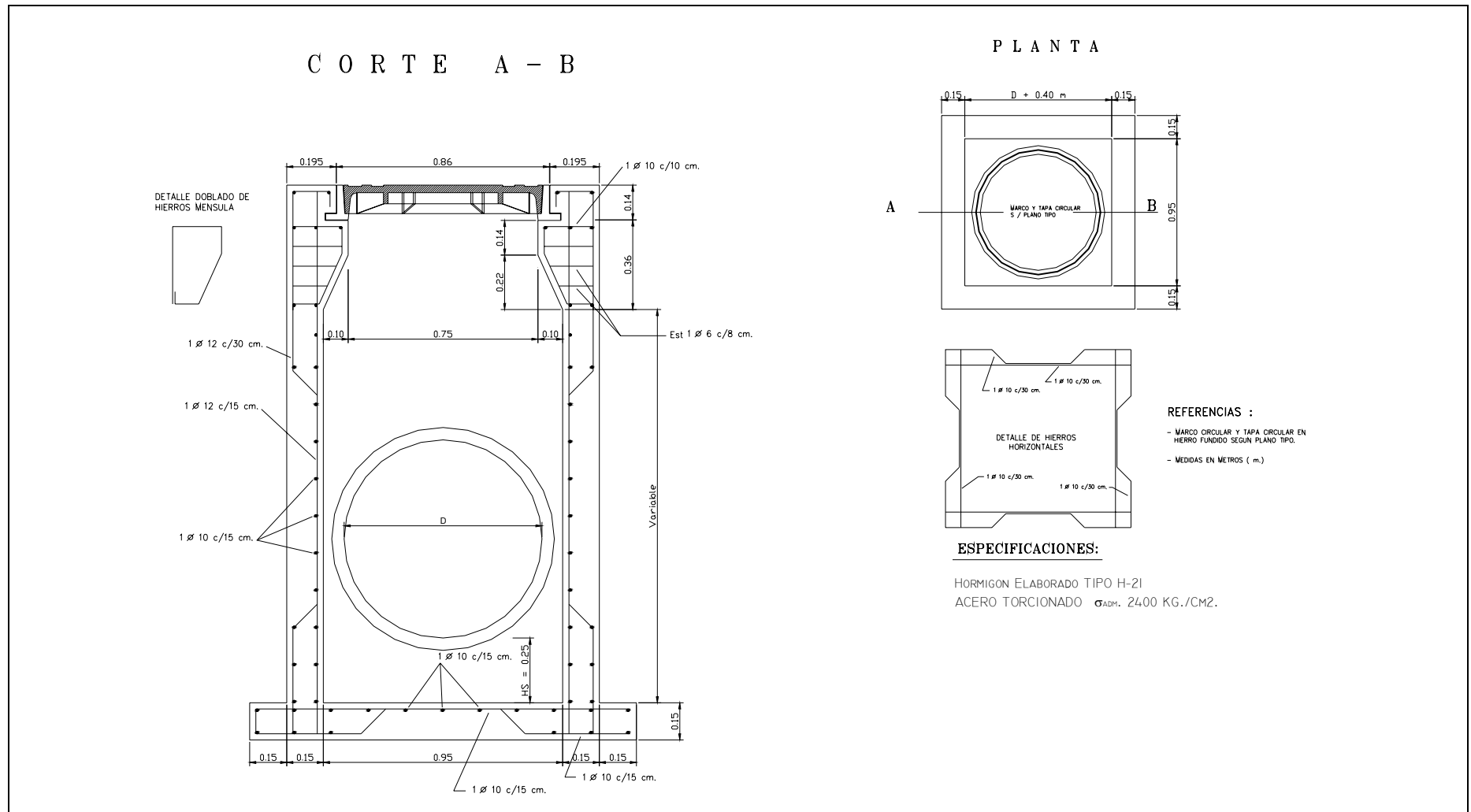
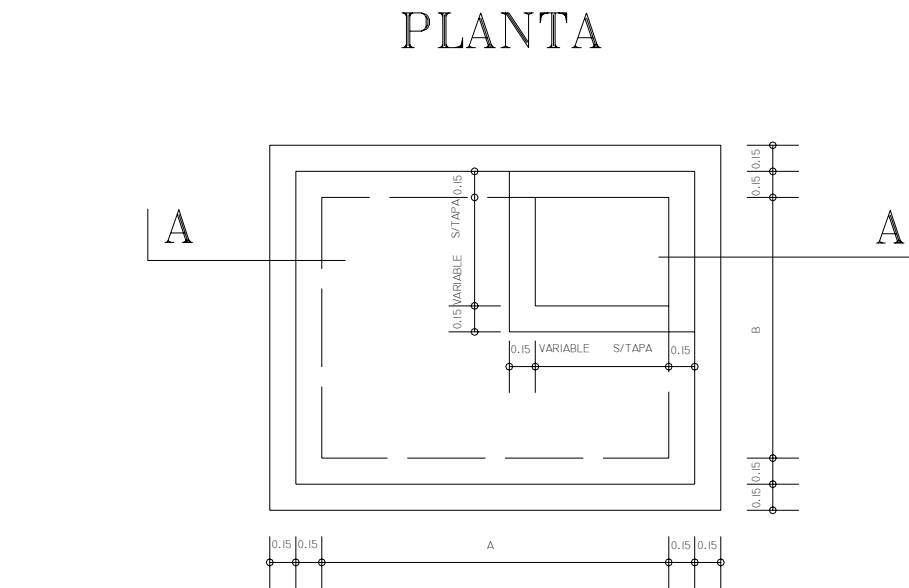
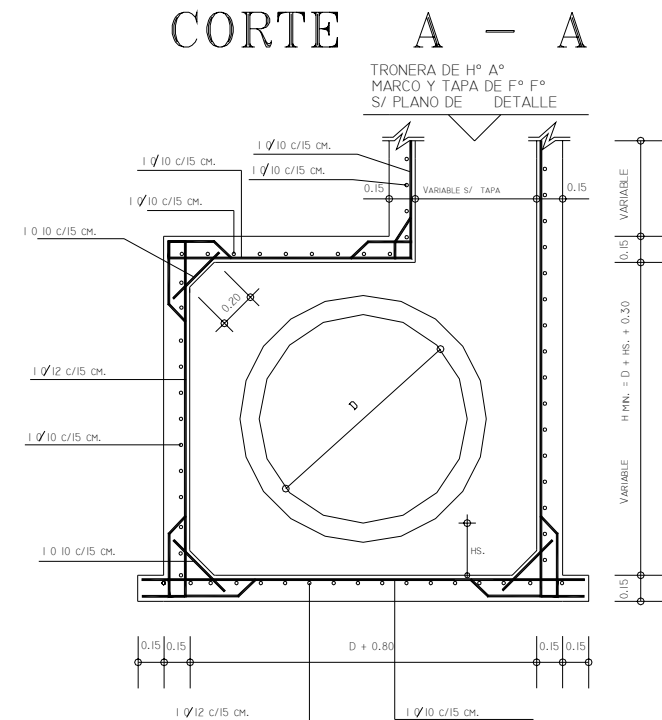


Figura N° 5.14: Cámara de registro tipo B (fuente: Municipalidad de Santa Fe).



MEDIDAS:

B	d=1.00m–1.20m.	A=1.80m.	B=1.20m	Tapa Cuadrada	hs.= 0.25
B1	d=1.00–1.20m.	A=1.80m.	B=1.20m	Tapa Circular	hs.= 0.25
B3	d=1.50m.	A=2.60m.	B=1.20m	Tapa Circular	hs.= 0.25



ESPECIFICACIONES:

Hormigon Elaborado TIPO H-21
 Acero Torsionado adm. 2400 KG./Cm2.

Las cámaras de acceso suelen ser forma cilíndrica o prismática, con una dimensión interna de la cámara inferior suficiente para operaciones de inspección y limpieza. Pueden ser construidas de mampostería o de H° A° (elaborado “in situ” o con anillos prefabricados). En cualquier caso, es necesario que la cámara conserve condiciones de estanqueidad.

El marco y tapa de la cámara de acceso suelen ser de hierro fundido. Son diseñadas para proveer una adecuada resistencia para soportar cargas, proveer un buen ajuste entre marco y tapa y prever que la tapa no sea destapada por gente no autorizada (principalmente niños). Si la línea del gradiente hidráulico puede ascender por encima del nivel del terreno, la tapa debe mantenerse en su lugar durante períodos de crecidas, evitando que la misma sea levantada por el agua. Para ello puede utilizarse un cerrojo o un mecanismo de fijación.

El canal de flujo en la solera de la cámara de acceso tiene por objeto proveer un conducto continuo y suave para el flujo (aumenta la eficiencia hidráulica de la cámara de acceso), principalmente para sistemas combinados. De esta forma, se elimina turbulencia innecesaria en la cámara de acceso y se reduce la pérdida de carga.

La profundidad requerida para una cámara de acceso dependerá del perfil longitudinal del conducto y del nivel del terreno. Un rango común de profundidades varía entre 1.5 a 4.0 m.

Si la profundidad de la solera es sólo de 0.6 m a 0.9 m, las operaciones de mantenimiento pueden ser realizadas desde la superficie. En estos casos es recomendado que el ancho de la cámara de acceso sea del mismo tamaño que para cámaras profundas y que la tapa sea de mayores dimensiones (0.7 a 0.9 m) para facilitar las tareas de mantenimiento desde la superficie.

Las cámaras profundas deben ser cuidadosamente diseñadas para soportar las cargas del suelo. Si la cámara se extiende muy por debajo del nivel freático el diseño debe contemplar la presión hidrostática asociada.

Los criterios de ubicación y espaciamiento de las cámaras de acceso se han desarrollado en respuesta a los requerimientos de mantenimiento del sistema de conductos. Los criterios de espaciamiento contemplan que, como mínimo, las cámaras se ubiquen en los siguientes puntos donde:

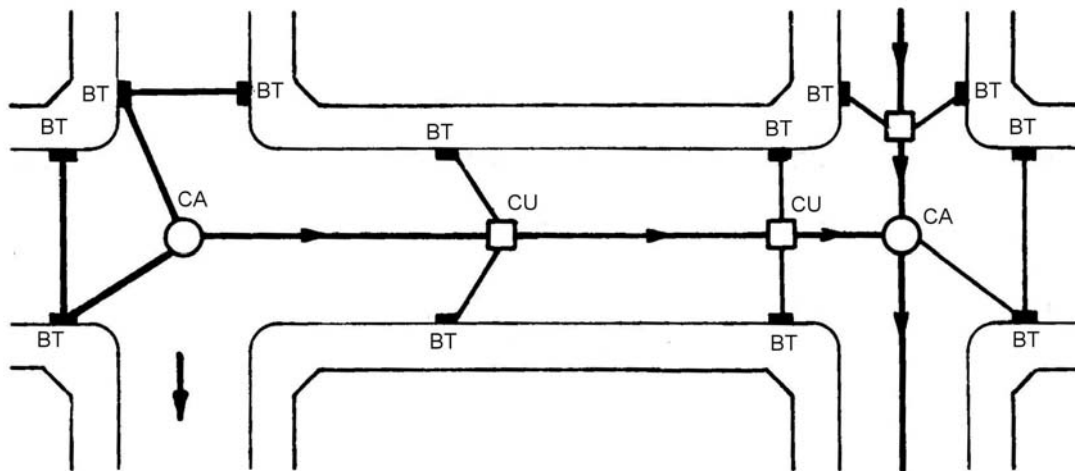
- a) convergen 2 o más conductos (máx. 4),
- b) cambia el tamaño de los conductos,
- c) cambia el alineamiento de la traza del conducto y
- d) cambia la pendiente del conducto.

Los cambios de tamaño o forma de la sección transversal del conducto en la cámara de acceso producen perturbaciones en el flujo con la consiguiente pérdida de carga. Los cambios de sección realizados con transiciones graduales ayudan a reducir estas pérdidas. No existe una práctica común a este respecto.

5.3.3 Cámaras de unión

Son cámaras subterráneas de usadas para unir 2 o más conductos. Se utilizan cuando es necesaria una ubicación de bocas de tormenta intermedias o para evitar la llegada a un mismo pozo de registro de más de 4 conductos (Figura N° 5.15).

Figura N° 5.15: Ubicación de cámaras de unión.



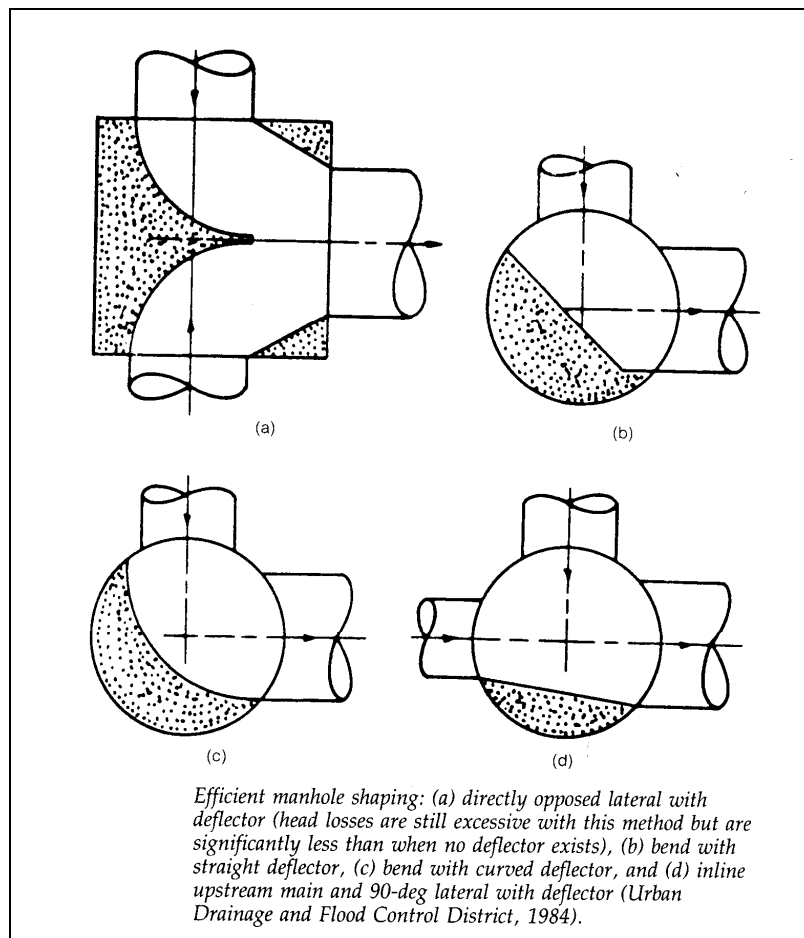
Las cámaras de unión no necesitan extenderse hasta la superficie del suelo y pueden ser completamente enterrados. Sin embargo, es recomendado usar estructuras verticales para proveer un acceso superficial y/o para interceptar escorrentía superficial.

Son construidas comúnmente en H° A° "in situ". En casos de conductos de acero corrugado, en ocasiones las uniones pueden construirse del mismo material.

Para minimizar la turbulencia del flujo en las cámaras de unión, se construyen canales de flujo en la solera de las cámaras, principalmente para sistemas combinados. La Figura N°5.16 muestra geometrías de canales eficientes.

Las estructuras de entrada, conductos, cámaras de acceso y de unión son las estructuras más comunes del sistema de drenaje. Existen otras estructuras complementarias como: transiciones, partidores de flujo, sifones y compuertas basculantes.

Figura N° 5.16: Formas eficientes de cámaras de acceso o de unión (fuente: Manual 77 ASCE, 1992).



Transiciones

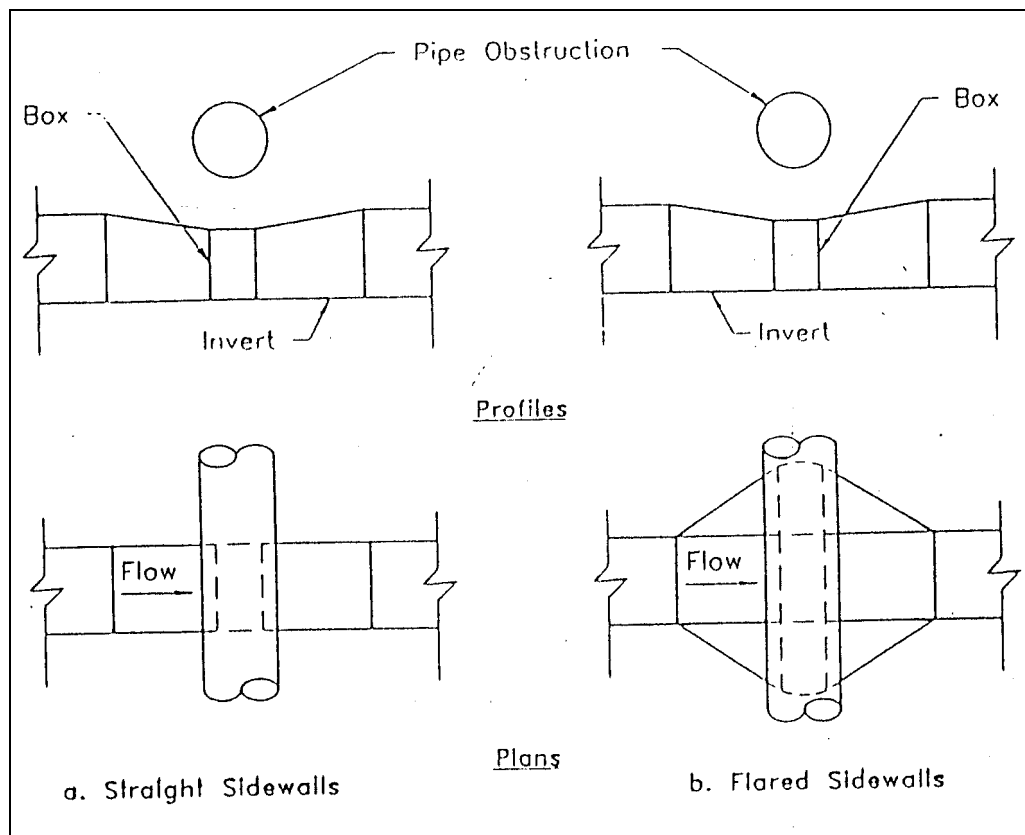
En los sistemas de drenaje, las transiciones de un tamaño de conducto a otro se realizan, típicamente, con cámaras de acceso o cámaras de unión. Sin embargo, existen ocasiones donde las transiciones pueden ser requeridas en otras ubicaciones dentro del sistema de drenaje. Un ejemplo típico se muestra en la Figura N° 5.17, donde un conducto rectangular es usado para evitar una obstrucción.

La consideración más significativa en el diseño de transiciones es proveer una transición gradual y suave para minimizar las pérdidas de carga. La Tabla N° 5.4 provee criterios de diseño para secciones de transición:

Tabla N° 5.4: Criterios de diseño de transiciones

TIPO	CONDICIÓN DEL FLUJO	
	$V < 6 \text{ m/s}$	$V \geq 6 \text{ m/s}$
Expansión	Paredes rectas Relación 5:1 a 10:1	Paredes rectas Relación 10:1 a 20:1
Contracción	Paredes rectas Relación 5:1 a 10:1	Paredes rectas Relación 10:1 a 20:1

Figura N° 5.17: Transiciones para evitar obstrucciones Formas eficientes de cámaras de unión (Fuente: Urban Drainage Design Manual. HEC N°22).



Partidores de Flujo

Son estructuras especiales diseñadas para dividir un flujo único y derivar las partes dentro de 2 o más canales aguas abajo. Los partidores de flujo se construyen de una manera similar a las cámaras de unión, excepto que los caudales desde un conducto grande único son partidos en varios conductos más pequeños.

El diseño de partidores debe considerar minimizar las pérdidas de carga y potenciales problemas de obstrucción por residuos. Las pérdidas de carga pueden ser reducidas por la inclusión de deflectores de flujo apropiados en el diseño de la estructura.

Sifones

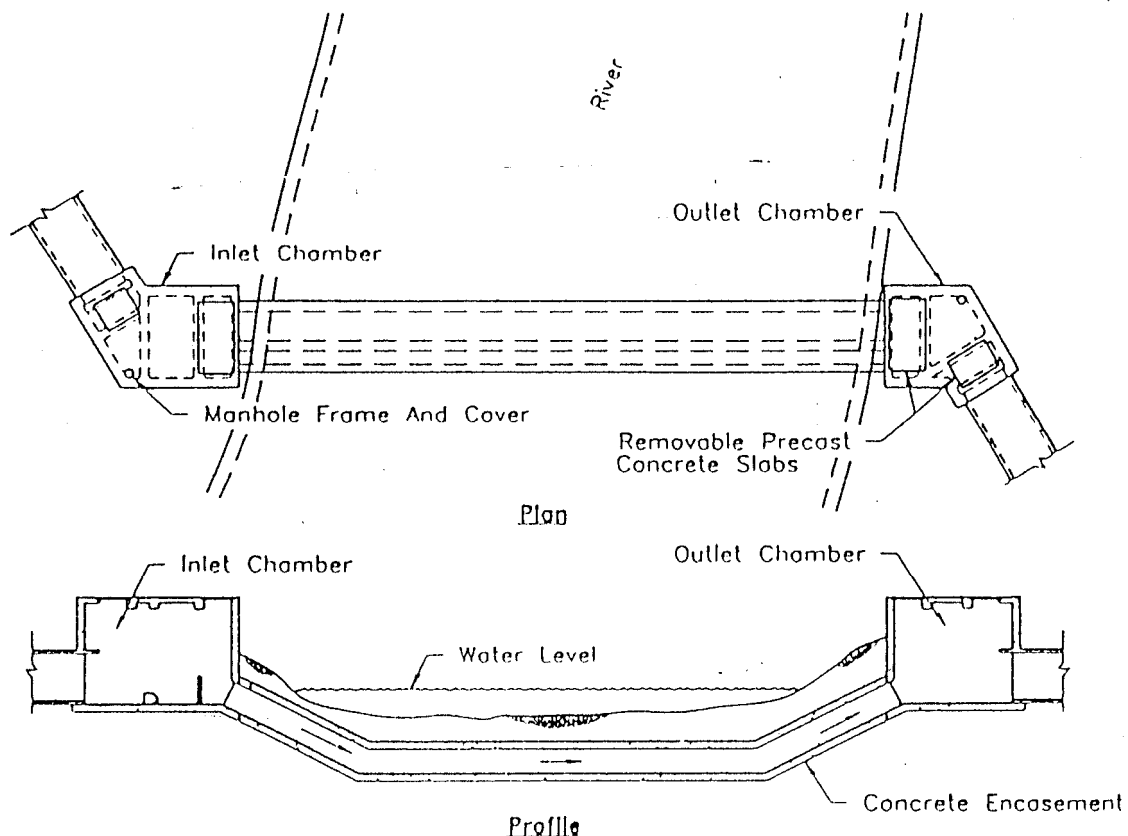
En la práctica, el término sifón refiere a un sifón invertido o conducto deprimido que se mantiene lleno, aún sin ningún caudal. Su propósito es conducir el flujo por debajo de una obstrucción, tal como un cauce o calzada deprimida y recuperar tanta elevación como sea posible después que el obstáculo ha sido pasado. La Figura N° 5.18 muestra un sifón con sus cámaras de entrada y salida.

Para el diseño eficiente de sifones, debe considerarse:

- se debe proveer velocidades de autolimpieza para un amplio rango de caudales.
- Las pérdidas hidráulicas deben ser minimizadas.
- Se debe prever una limpieza periódica.

- d) Se deben evitar las curvas cerradas.
- e) La porción ascendente del sifón no debe ser demasiado empinada (la pendiente ascendente debe ser menor al 15%).
- f) No debería cambiar el diámetro del conducto a lo largo de la longitud del sifón.

Figura N° 5.18: Sifón en cruce de río (Fuente: HEC N° 22, FHWA, 1996).



Compuestas basculantes

Las compuertas basculantes se instalan a la salida de los conductos o cerca de ella, con el propósito de evitar el ingreso de agua al sistema de conductos cuando el nivel de agua del cuerpo receptor es mayor que el nivel de agua en el conducto. Una pequeña diferencia de presión sobre la cara interior o trasera de la compuerta la abrirá, permitiendo la descarga en la dirección deseada. Cuando el nivel de agua en la cara exterior de la compuerta se ubica por encima del nivel de agua en el conducto, la compuerta se cierra y evita el ingreso de agua al conducto. Las compuertas son construidas de hierro fundido, acero o madera.

Se debe contemplar una inspección regular y una remoción frecuente del sedimento y residuos acumulados, principalmente en aquellos sistemas de drenaje que acarrean sedimentos suspendidos o residuos flotantes. Esto es debido a que la compuerta puede actuar como desnatadora ("skimmer"). Además, la reducción de velocidad del flujo detrás de la compuerta puede causar la deposición de sedimentos en el conducto cerca de la salida.