

# DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA PARA DRENAJE URBANO

Cabrera Delgadillo Manuel M.<sup>1</sup>, Vargas Ortega Diana C.<sup>1</sup>, Cisneros Azpeitia Gabriel<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>WASSERtechnic®, Proyectistas N. 40, Col El Sifón, Delegación Iztapalapa, C.P. 09400, CDMX, cabrman@gmail.com, karolz\_27@yahoo.com.mx, azpeitia.ga@gmail.com.

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento demográfico y el consecuente desarrollo urbano en México, ha incrementado la demanda de los servicios sanitarios por parte de la población de nuevos asentamientos.

Para cubrir estas necesidades se han elaborado planes de desarrollo que complementen a los sistemas de drenaje existentes, ampliando su infraestructura lo suficiente para tener una capacidad que considere el crecimiento demográfico proyectado en un periodo a futuro.

Al considerar las condiciones actuales de las zonas involucradas por el proyecto y de las que se estima que formarán parte del desarrollo urbano para la proyección a futuro, es importante diseñar el sistema de drenaje en función de dos variables: la topografía del terreno y el volumen de agua que se capte. Estas regirán sobre la geometría del colector, sus dimensiones, (pendientes y diámetros), el tipo de estructuras a diseñar, los materiales adecuados, entre otros; y acorde a los objetivos del proyecto será necesario adecuar el sistema para optimizar su funcionamiento tomando en cuenta que algunas condiciones limitan el proyecto.

Durante el diseño y análisis hidráulico para colectores se debe ajustar su trazo a la topografía del terreno, para que no existan enterramientos excesivos que dificulten su construcción o para evitar exposiciones que puedan comprometer su seguridad. La conducción debe tener pendientes apropiadas para no ocasionar transiciones en el régimen del flujo, remansos o saltos hidráulicos y mantener las velocidades permisibles con los criterios del Manual de Agua Potable y Saneamiento (MAPAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Una solución frecuente para evitar las pendientes pronunciadas es el cambio inmediato del nivel de plantilla del colector forzando una caída libre del agua en pozos de caída libre, pozos de caída adosada o pozos de caída escalonada.

No obstante, la caída de agua no debe provocar daños en la plantilla u otros elementos estructurales del pozo, por lo que es recomendable seguir los criterios que limitan el uso de estas estructuras y/o añadir elementos que mitiguen la fuerza con la que el agua golpeará a la estructura.

Por ello, en el presente documento se exponen estructuras de disipación de energía, cuyo fin es la protección propia de la estructura de conducción, solventar grandes desniveles, provocados por la topografía del sistema de drenaje; en otros casos, controlar el fenómeno del salto hidráulico y mitigar el desgaste de los materiales del colector.

## OBJETIVO

Presentar las características de las estructuras de disipación de energía para colectores de drenaje sanitario o pluvial que se enlistan a continuación: pozo de caída libre (PCL), estructura de caída adosada (ECA), estructura de caída en conducto a presión (ECCP), estructura de caída con dissipador de masas (ECDM) y estructura de tanque amortiguador (ETA).

Proponer estas estructuras especiales como alternativas ideadas para la disipación de energía del flujo, justificar los criterios utilizados para su diseño y sus límites de aplicación dentro de los sistemas de drenaje.

Explicar los beneficios de integrar las estructuras de disipación de energía como elementos complementarios cuyas funciones permiten mejorar el manejo del agua en colectores de drenaje.

## ANTECEDENTES

La Comisión Nacional del Agua, en su *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* editado en el año 2015, establece como estructuras de caída a aquellas cuyo diseño ha sido ideado para efectuar cambios de nivel en las plantillas de las tuberías, permitiendo en su interior la caída del agua.

El diseño de estas estructuras parte originalmente de un pozo común, con algunas modificaciones para recibir la caída de agua sin ocasionar daños a los elementos estructurales.

Dicho manual indica, como estructuras de caída, el uso de pozos comunes para librar caídas de hasta 0.50 m, sin necesidad de incluir algún elemento adicional de disipación; pozos de caída para un desnivel máximo entre plantillas de 1.50 m, pozos con caída adosada que no sobrepase de 2.00 m, y estructuras de caída escalonada con escalones a cada 50 cm de altura sin superar los 2.50 m de caída total.

Sin embargo el desarrollo urbano, así como los servicios que le complementan pueden abarcar zonas cuya topografía no tenga el espacio o las condiciones adecuadas para la aplicación de estas estructuras, siendo necesaria la creación de diseños que se acoplen a diversos tipos de terreno y necesidades de conducción del agua.

## DESARROLLO

### Características generales

La composición de estas estructuras en general se basa en un cilindro de paredes de tabique rojo recocido de 30 cm de espesor (de alta resistencia a los sulfatos), con un diámetro

adecuado a las dimensiones de la tubería que se le conecte o formadas por una caja con muros de 30 cm de concreto reforzado, una chimenea de tabique rojo recocido colocado a tizón recubierto con un aplanado de mortero-arena, y un brocal con tapa de hierro fundido o polietileno a nivel de la superficie del terreno.

Es importante resaltar que los concretos usados en estas estructuras no son resistentes a los ácidos y es sabido que los sulfatos y compuestos orgánicos sulfurados del desague, como el sulfuro de hidrógeno y sulfuros orgánicos volátiles, atacan al concreto, suprimiendo la adherencia entre la pasta y el agregado, formando sulfato de calcio y sulfoaluminato de calcio (etringita), ante esto y en seguimiento al Reglamento de Construcciones del D.F., y sus Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto, se requiere que los concretos tengan una resistencia mínima de 350 kg/cm<sup>2</sup>, elaborado con cemento RS (Resistente a los Sulfatos) más puzolana, misma exigencia en los morteros usados para juntas de tabiques y aplanados.

Para abreviar el nombre de cada estructura, se identificarán a través de sus siglas:

- Pozo de caída libre (PCL)
- Estructura de caída adosada (ECA)
- Estructura de caída en conducto a presión (ECCP)
- Estructura de caída con dissipador de masas (ECDM)
- Estructura de tanque amortiguador (ETA).

Para la mayoría de las estructuras que se enlistan a continuación se presentan dos versiones según sus dimensiones: tipo 1 y tipo 2. Las primeras permiten empotrar tuberías desde 30 hasta 60 cm. Las del tipo 2, diámetros desde 75 hasta 105 cm. Esto simplifica la selección del tamaño de la estructura.

Si la estructura se presenta como tipo 1 o 2, no se altera la forma en que ésta trabaja sobre la disipación de energía, pero sí pueden variar los rangos de altura de caída que admite.

Dos características importantes de mencionar entre las estructuras del tipo 1 y las del tipo 2 son: el ancho del muro de empotramiento y el diámetro interno del pozo.

Para una estructura tipo 1 el ancho del muro de empotramiento es de 30 cm, para las del tipo 2 es de 50 cm. Estas medidas facilitan el agarre del cementante con las costillas de la tubería. Por otra parte, el diámetro interno del pozo según la estructura en cuestión, depende del ancho de la tubería que conecta, siendo para el tipo 1 de 1.20 m de diámetro interior y de 1.50 m el tipo 2, en los esquemas mostrados puede verificarse este dato para cada una.

Es importante señalar que por refuerzo estructural la base de los pozos y estructuras de caída, son un cilindro de concreto armado de paredes con 30 cm de espesor, apoyado en una cimentación plana circular de mínimo 30 cm de altura, que varía según las características del suelo. El cilindro denominado "caja", se extiende en altura normalmente hasta 30 cm por arriba del lomo de la tubería, donde ocurre la transición de concreto a muros de tabique, continuando con esta geometría hasta la formación del cono de la chimenea de remate de la estructura. El empotramiento de la tubería con los pozos se realiza en la caja de concreto reforzado (excepto en la ECDM

tipo 1), por lo tanto, la altura de los muros también es variable según la altura de caída y de los diámetros de la tubería.

### Pozos de caída (PCL)

Es una modificación del pozo de visita comúnmente utilizado. Su criterio de aplicación se basa en permitir una caída libre que no sea mayor a 0.50 m de altura.

En esta estructura se ha eliminado la media caña, en su lugar se incluyó una depresión de 30 cm como desarenador para permitir la sedimentación de partículas densas o lodos provenientes de las aguas residuales y evitar el azolve en la tubería. Además, el agua acumulada en este espacio amortiguará la caída del agua para reducir el desgaste en la plantilla del pozo.

Las versiones tipo 1 y tipo 2 de esta estructura, y sus dimensiones generales se muestran en la figura 1 y figura 2.

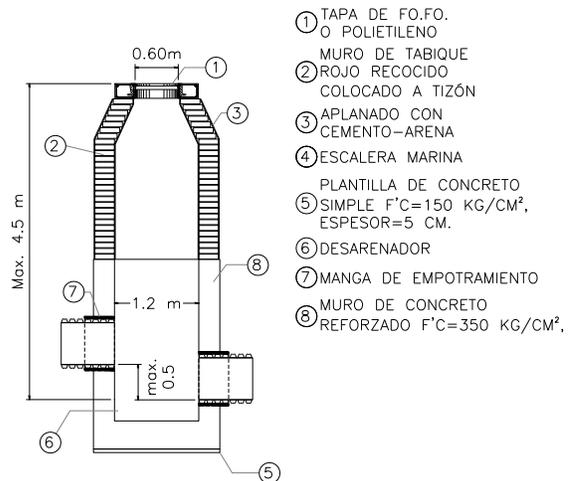


Figura 1. Pozo de caída libre (PCL) Tipo 1

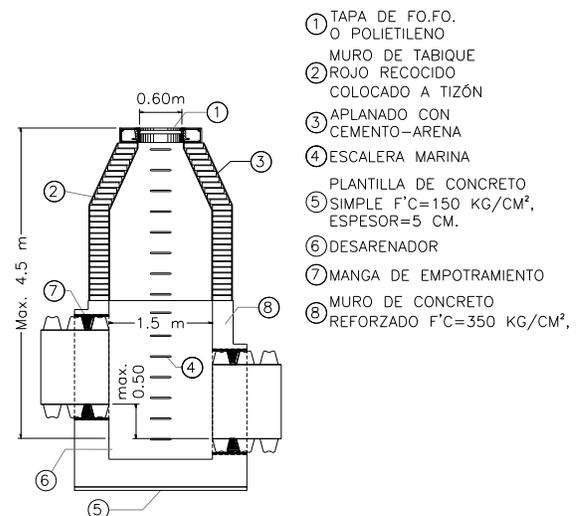


Figura 2. Pozo de caída libre (PCL) Tipo 2

En ambos casos la altura de caída máxima recomendada es la misma (0.50 m), así como la profundidad que pueden alcanzar

desde el brocal hasta la plantilla de tubería de salida (4.50 m).

En distinción a las recomendaciones dadas en el MAPAS, es recomendable empotrar las tuberías en las paredes de concreto y extender la altura del cilindro de concreto 30 cm por arriba del lomo de la tubería más alta, para que el tiro parabólico de la descarga impacte en concreto armado y no en el muro de tabique que no resiste tensiones.

**Pozos de caída adosada (ECA)**

Este pozo está provisto de una caja de concreto reforzado, anexada a la zona de entrada del agua, que aloja a un ducto vertical de PEAD, por donde ocurre la caída de la mayor parte del gasto; su diámetro es el inmediato menor al de la tubería de llegada. La altura máxima de caída recomendada, para ambos tipos de ECA es de 2.00 m.

Para amortiguar la caída del agua, este conducto vertical conduce el agua hasta el nivel de plantilla con codos a 45° (Figura 3 y 4.a) también se le ha agregado un tubo de ventilación de 10 cm de diámetro a la parte superior para la expulsión de gases y permitir el ingreso de presión atmosférica previniendo agitaciones de la descarga de agua por oscilaciones de presión.

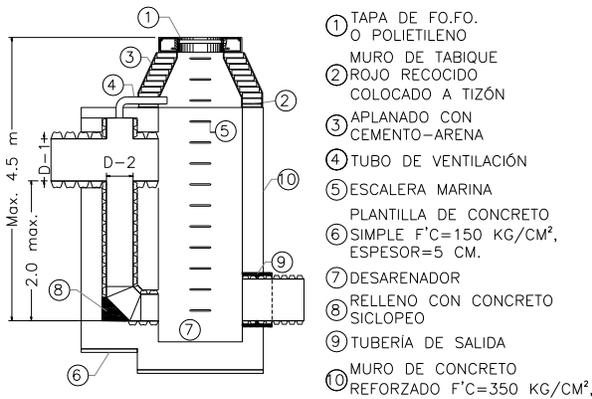


Figura 3. Pozo de caída adosada (ECA) Tipo 1

La descarga del conducto vertical, debe facilitar un nivel de agua en el fondo de la estructura para amortiguar la caída en presencia de gastos extraordinarios y servir de conducto para los gastos mínimos.

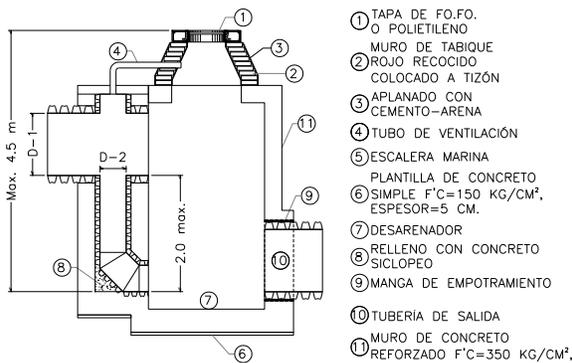


Figura 4.a. Corte transversal de (ECA) Tipo 2

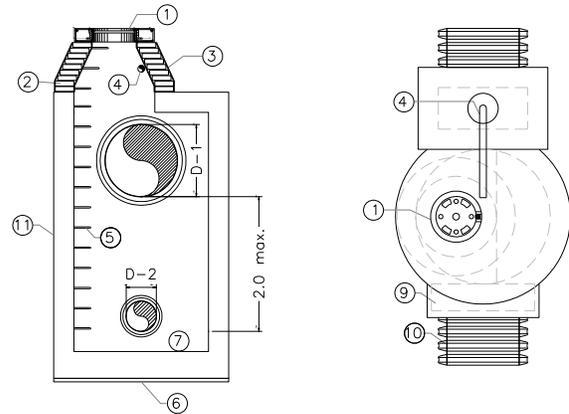


Figura 4.b. Corte frontal y planta de (ECA) Tipo 2

La tabla 1 muestra la relación entre diámetros de tubería de entrada (D-1) y el de la caída (D-2), para el trayecto de tubería de caída adosada.

Tabla 1. Relación de diámetro entre el tubo de entrada y el conducto de caída adosada

(Tipo 1)		(Tipo 2)	
D-1 (cm)	D-2 (cm)	D-1 (cm)	D-2 (cm)
30	25	76	38
38	30	90	45
45	30	107	45
60	38		

Otra modificación es la adaptación del tanque amortiguador y desarenador de 30 cm de profundidad por debajo del conducto de salida, para proteger la plantilla y evitar la obstrucción por azolve.

Se observa en la figura 4.b que el eje de la chimenea en la ECA tipo 2 está desfasado del de las tuberías, esto es para mantener iguales sus dimensiones en ambos tipos de estructura, dado que se requiere mayor diámetro interno para este pozo, además que el tiro de descarga no expone al personal que ingrese a inspeccionar la estructura.

**Estructura con dissipador de masas (ECDM)**

La ECDM es una estructura tipo pozo, que se usa para desniveles superiores a los 2.0 m y a la que se le integra una trabe cilíndrica de concreto reforzado, al centro medio del pozo y con el largo en dirección paralela al flujo de descarga, su función es interrumpir la caída libre del agua y disminuir su energía antes de golpear la plantilla del pozo.

Este cilindro intermedio debe contar con un diámetro de 1.5 veces el de la tubería de entrada; de esta manera se intercepta la mayor cantidad de agua con la superficie del cilindro. En este caso sí se incluye la media caña para dirigir el agua hacia el ducto de salida.

El flujo de vena líquida de la tubería de entrada a la estructura, con líneas de corriente descendente y formando un tubo concurrente, golpea el cilindro con una superficie mayor, disipando el flujo a lo largo del lomo del cilindro y permitiendo

recorrer la redondez del cilindro, lo que diverge el flujo por adherencia, produciendo que el flujo enseguida gotee por la base del cilindro.

El criterio de caída es considerar que la distancia máxima entre la plantilla de la tubería de entrada y la parte superior del cilindro de disipación debe ser de 1.5 m; así como entre la parte más baja de éste y el nivel de plantilla de salida. Figura 5.a y figura 6.a

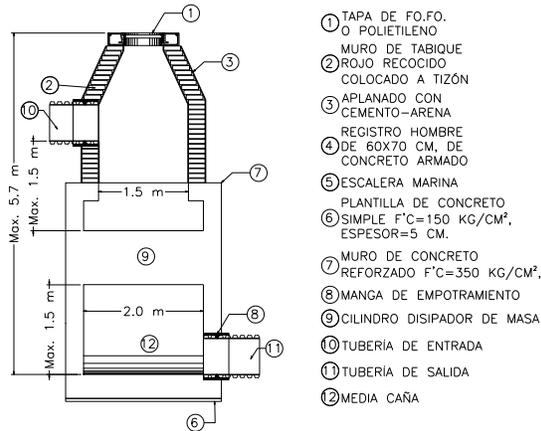


Figura 5.a. Corte transversal de (ETA) tipo 1

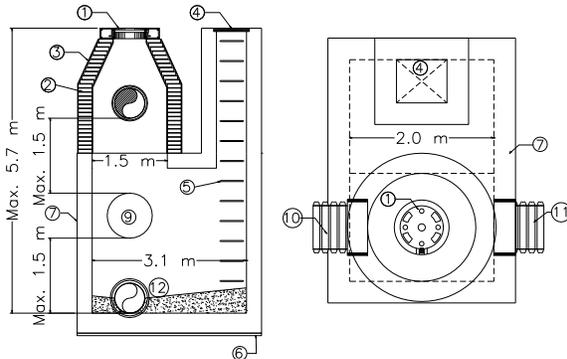


Figura 5.b. Corte frontal y planta de (ETA) Tipo 1

Para el diseño estructural de la trabe de disipación se determinó la fuerza del chorro al impactar sobre éste, calculando la componente normal, a través de la ecuación 1:

$$F = F_x = \frac{\rho}{g} Q_1 V_1 = \gamma A_1 V_1^2 \quad (1)$$

Donde  $F$  es la fuerza normal,  $\rho$  es la densidad del agua en  $\text{kg/m}^3$ ,  $g$  la gravedad en  $\text{m/s}^2$ ,  $Q_1$  es el gasto en  $\text{m}^3/\text{s}$  y  $V_1$  es la velocidad del flujo en  $\text{m/s}$  y está determinada por las ecuaciones 2 y 3; siendo  $y$  la altura de caída del agua.

$$y = -\frac{g}{2} \left( \frac{x^2}{V_0^2} \right) \quad (2)$$

$$V_1 = \sqrt{V_0^2 + \left( \frac{gx^2}{V_0} \right)} \quad (3)$$

$V_1$  es la velocidad del chorro y  $V_0$  es la velocidad de salida del colector en  $\text{m/s}$ .

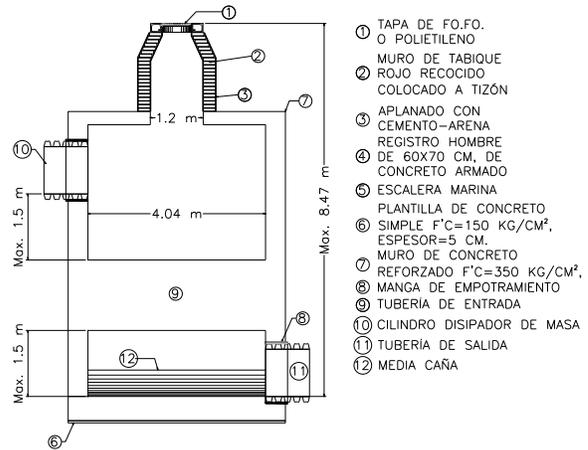


Figura 6.a. Corte transversal de (ETA) tipo 2

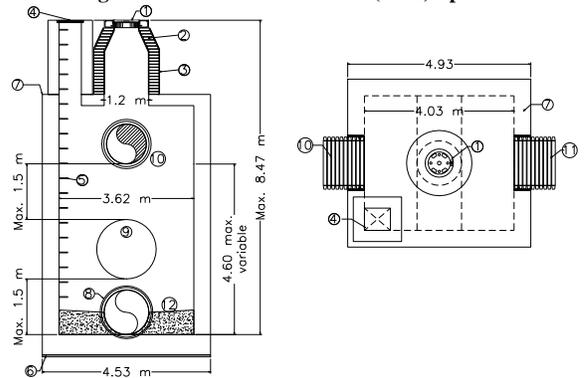


Figura 6.b. Corte frontal y planta de (ETA) Tipo 2

En ambas estructuras se ha incrementado el ancho de caja respecto al diseño original, pasando de una geometría circular de 1.20 de diámetro a una caja rectangular de ancho interno de 3.1 metros (Tipo 1) a 4 metros (Tipo 2).

Adicionalmente se le ha agregado un registro lateral de concreto armado para poder brindarle mantenimiento; su colocación se muestra en la figura 5.b y figura 6.b

**Estructura de conducción en conducto a presión (ECCP)**

La ECCP es un sistema de conducción que permite conectar a dos pozos separados por un terreno de pendiente pronunciada cuyo desnivel entre plantillas supera la altura máxima de caída recomendada para las estructuras de disipación de energía mencionadas anteriormente.

Si la distancia que separa a ambos pozos permite la colocación de varios pozos de caída hasta alcanzar el nivel de conducción deseado, ésta sería una solución posible, aunque poco práctica; la ECCP es una alternativa que resulta más económica y sencilla de construir.

La conexión entre ambos pozos se realiza a través de una tubería de acero que trabajará a presión y cuyo diámetro está reducido para generar pérdidas de energía por fricción en el flujo antes de su llegada al pozo receptor. De ésta forma se tiene un flujo controlado, en opción al uso de varias caídas. Se

estructura la tubería de descenso en acero o en hierro para la solución de la resistencia a la presión del conducto, donde el espesor también debe calcularse para el eventual desgaste por corrosión, ver Figura 7.

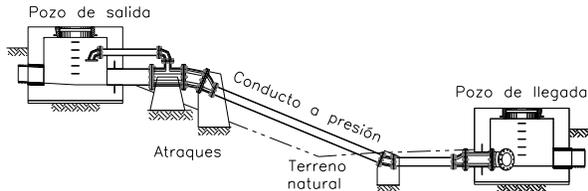


Figura 7. Estructura de conducción en conducto a presión

Para ajustar la pendiente de la conducción es posible utilizar codos u otras conexiones de fierro fundido o acero según sean requeridas. Es recomendable acoplar un respiradero que permita la expulsión de aire antes de entrar a la tubería, lo que también permitirá el acceso de presión atmosférica evitando la presencia de presiones vacuométricas, como se muestra en la figura 8.a.

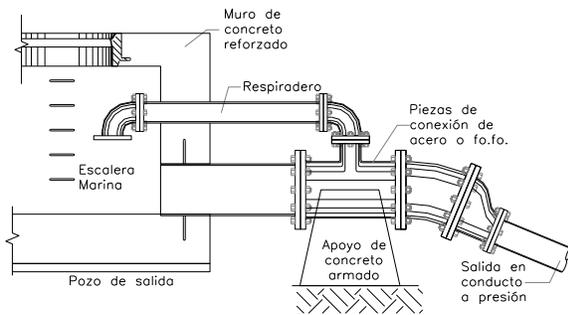


Figura 8.a. Arreglo de conexiones salida para ECCP

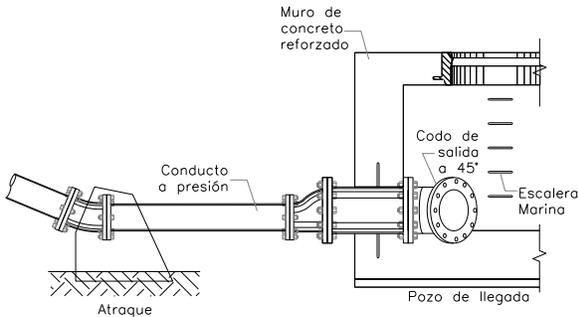


Figura 8.b. Arreglo de conexiones de entrada para ECCP

En el pozo receptor se obliga a que el agua entre con un ángulo de 45 grados con respecto al eje de la tubería para que forme un vórtice que amortigüe su llegada y disipe su energía antes de continuar su trayecto a flujo establecido. Figura 9.

Nótese que este sistema puede adaptarse de distintas formas y puede tener distintos diseños dependiendo de las conexiones que se planten y de los diámetros requeridos. Por lo que no se presenta una estructura tipo sino una modalidad de solución para casos similares. Figura 8.a y figura 8.b.

Se recomienda incluir una caja de rejillas o algún otro dispositivo para evitar la entrada de residuos que puedan obstruir el sistema por azolve, principalmente en la tubería a presión, que deberá ser mayor de 150 mm de diámetro interior.

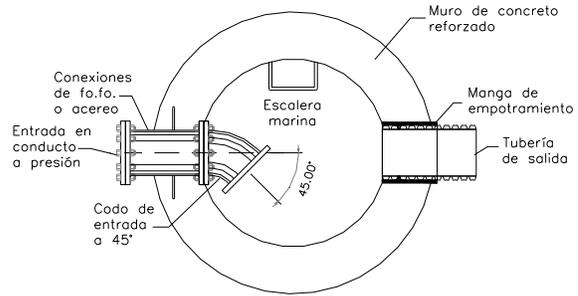


Figura 9. Detalle en planta de entrada a 45° para ECCP

Para el diseño de este sistema se aplica la ecuación de la energía entre ambos pozos (ec. 4) y se consideran las pérdidas por fricción (ec. 5).

$$H = \gamma_s + h_f + \frac{V^2}{2g} \tag{4}$$

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \tag{5}$$

La determinación del diámetro óptimo de conducción se realiza con base en las pérdidas por fricción que se requiera generar.

Una ventaja adicional de la ECCP es que, al ser un conducto de acero, puede mantenerse expuesto a la superficie, soportado por atraques de concreto armado, tal como se observa en la figura 7. Además, se ha eliminado la chimenea de tabique recocido para reducir la altura del pozo.

**Estructura de tanque amortiguador (ETA)**

La estructura de tanque amortiguador se propone para permitir un salto hidráulico en su interior y disminuir la energía del flujo cuando sea necesario aceptar un cambio de régimen; evitando daños en los materiales del colector, por sobrepresiones generadas en estructuras y tuberías.

Consta de una tubería de PEAD reforzada con una capa de 30 cm de concreto armado, ubicada entre dos estructuras tipo pozo para brindarle el soporte necesario al tanque. Su diámetro debe ser lo suficiente mayor al de entrada para reducir la velocidad del flujo y permitir el salto hidráulico. Figuras 10 y 11.

La diferencia de los pozos utilizados para esta estructura y el pozo común de visita, es el uso de una media caña con muros laterales de altura por encima del lomo de las tuberías de entrada y de salida; esto con el fin de simular un canal semicircular de geometría constante en el interior de los pozos.

Para el diseño del tanque se analizó la ocurrencia del salto hidráulico considerando un canal horizontal recto de sección circular, con un flujo en régimen supercrítico; a través de las ecuaciones 6 a 14:

Para el tirante crítico:

$$y_c = \frac{\sqrt{Q}}{(gD)^{0.25}} \tag{6}$$

Ecuación de momentum:

$$M = \frac{Q^2}{g(\theta - \text{sen}\theta\text{cos}\theta) D^2/4} + \tag{7}$$

$$\frac{D^2}{24}(3\text{sen}\theta - \text{sen}^3\theta - 3\theta\text{cos}\theta)$$

Consideración de régimen supercrítico:

$$F = \left(\frac{y_c}{y_1}\right)^{1.93} \quad (8)$$

Donde sí:

$F < 1.7$  el conjugado mayor es:

$$y_2 = \frac{y_c^2}{y_1} \quad (9)$$

$F > 1.7$  el conjugado mayor es:

$$y_2 = 1.0867 \frac{y_c^{1.8}}{y_1^{0.73}} \quad (10)$$

La longitud del salto hidráulico  $y$ , por ende, la del tanque amortiguador, se determinó evaluando los diferentes criterios comúnmente utilizados:

Silvester:

$$L_j/y_1 = 9.75(F_1 - 1)^{1.01} \quad (11)$$

Smetana y Tyson:

$$L_j/y_1 = 3 \left( \sqrt{1 + 8F_1^2} - 3 \right) \quad (12)$$

Safranz (si  $1.72 < F < 19.1$ )

$$L_r/y_1 = 6F_1 \quad (13)$$

Chertousov:

$$L_j/y_1 = 10.3(\sqrt{F_1} - 1)^{0.81} \quad (14)$$

Por otra parte, el diámetro de la tubería dentro del tanque debe ser tener un tamaño tal que la relación de llenado sea del 80% como máximo  $y/D = 0.8$ , para evitar generar presión en la tubería. Por lo que el conjugado mayor del salto debe ocupar el 80% de llenado de la tubería usada como tanque, ubicada entre los dos pozos del conjunto estructural.

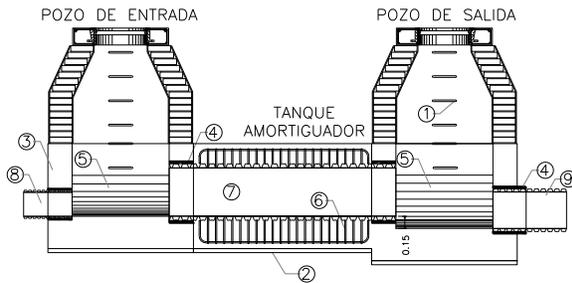


Figura 10. Tanque amortiguador ETA (Tipo 1)

Solventada la presencia del salto, es importante propiciar un barrido del mismo, para facilitar el recorrido del flujo aguas abajo, lográndose mediante un escalón en descenso, ubicado en el pozo de salida.

De esta forma se permite un salto hidráulico en un flujo a gravedad en un conducto cerrado, utilizando los materiales y estructuras hidráulicas comunes que componen el resto del colector y su fabricación no es compleja.

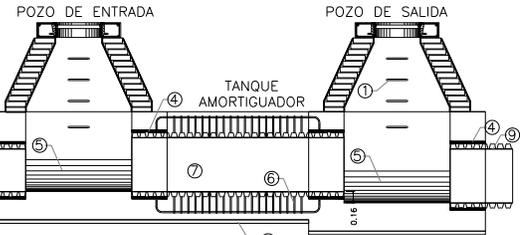
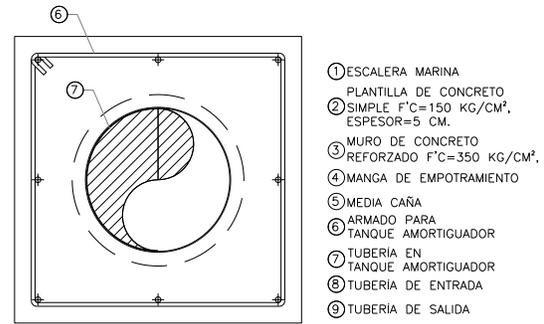


Figura 11. Tanque amortiguador ETA (Tipo 2)

## CONCLUSIONES

El aporte del presente trabajo es el diseño para la implementación de estructuras de disipación de energía y se demuestra que las estructuras comúnmente usadas con este fin, pueden modificarse de acuerdo a las necesidades del sistema de drenaje, cuando se presentan casos para disminuir la energía del salto hidráulico o caídas de agua, para evitar el azolve de las estructuras y prolongar la vida de las estructuras que lo componen.

Elegir estas alternativas también permiten reducir costos en la construcción, reduciendo volúmenes de excavación y la cantidad de estructuras que se prevé en el pre-diseño del colector.

## REFERENCIAS

- Shames, I. (1995); *Mecánica de fluidos*. Ed. McGraw-Hill, Santafé Bogotá, Colombia.
- Sotelo, A. G. (2009); *Hidráulica de canales*. UNAM, Facultad de Ingeniería, México.
- Sotelo, A. G. (1987); *Hidráulica general*. Vol. I, Ed. Limusa, México.
- SEMARNAT, CONAGUA. (2015); *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento (MAPAS), Sistemas alternativos de alcantarillado sanitario*. Libro 21, México.
- GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL. (2004); *Reglamento De Construcciones Para El Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias (RCDF, NTC)*, México.