

CAPÍTULO 10

BOCAS DE TORMENTA

Curso: HIDROLOGÍA EN MEDIOS ANTROPIZADOS

**Maestría en Recursos Hídricos de Llanura
Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario**

Dr. Ing. Civil GERARDO RICCARDI

ROSARIO, 2004.

ÍNDICE

- 10.1 TIPOS DE BOCAS DE TORMENTA Y SUS CARACTERÍSTICAS**
 - 10.1.1 Bocas de Tormenta Verticales en cordón**
 - 10.1.2 Bocas de Tormenta Horizontales con reja en cuneta**
 - 10.1.3 Bocas de Tormenta Combinadas**
 - 10.1.4 Bocas de Tormenta múltiples**
 - 10.1.5 Bocas de Tormenta ranuradas**
 - 10.1.6 Clasificación según las características de la entrada**
 - 10.1.7 Uso de bocas de tormenta en puntos bajos y puntos intermedios**
 - 10.1.8 Capacidad admisible de las bocas de tormenta**

- 10.2 CRITERIOS DE DISEÑO Y SELECCIÓN DE BOCAS DE TORMENTA**
 - 10.2.1 Ubicación y espaciamiento**
 - 10.2.2 Selección de bocas de tormenta**

- 10.3 PROYECTO GEOMETRICO E HIDRÁULICO DE BOCAS DE TORMENTA**
 - 10.3.1 Bocas de Tormenta Verticales**
 - 10.3.1.1 Elementos Característicos**
 - 10.3.1.2 Bocas de Tormenta Verticales en Puntos Bajos**
 - 10.3.1.3 Bocas de Tormenta Verticales en Puntos Intermedios de pendiente continua**
 - 10.3.2 Bocas de Tormenta Horizontales**
 - 10.3.2.1 Elementos Característicos**
 - 10.3.2.2 Bocas de Tormenta Horizontales en Puntos Bajos**
 - 10.3.2.3 Bocas de Tormenta Horizontales en Puntos Intermedios**
 - 10.3.3 Bocas de Tormenta Combinadas**
 - 10.3.3.1 Bocas Combinadas en Puntos Bajos**
 - 10.3.3.2 Bocas Combinadas en Puntos Intermedios**
 - 10.3.4 Bocas de Tormenta Ranuradas**
 - 10.3.4.1 En Puntos Intermedios**
 - 10.3.4.2 En Puntos Bajos**
 - 10.3.4.3 Capacidad real**

- 10.4 BIBLIOGRAFÍA**

BOCAS DE TORMENTA

Una boca de tormenta es una abertura en un sistema de desagües pluviales cuya función es la intercepción del escurrimiento pluvial superficial. En nuestro país a las bocas de tormentas también se las denomina sumideros. La boca de tormenta forma parte del denominado sistema menor de drenaje pluvial.

10.1 TIPOS DE BOCAS DE TORMENTAS Y SUS CARACTERISTICAS

De acuerdo a las distintas clasificaciones halladas en la bibliografía, las bocas de tormenta se pueden clasificar según el tipo, ubicación relativa, tamaño, y características de entrada.

La clasificación más determinante es según su tipo definiéndose cinco categorías:

- a) Bocas de tormenta verticales en cordón
- b) Bocas de tormenta horizontales con reja en cuneta
- c) Bocas de tormenta combinadas
- d) Bocas de tormenta múltiples
- e) Bocas de tormenta ranuradas

Dentro de cada categoría y de acuerdo a su ubicación las bocas de tormenta pueden clasificarse en :

- f) Bocas de tormenta en puntos intermedios o de pendiente continua y
- g) Bocas de tormenta en puntos bajos

y de acuerdo a la condición de entrada pueden clasificarse en:

- h) Boca de tormenta con depresión local
- i) Boca de tormenta sin depresión local

Una boca de tormenta en un punto intermedio de pendiente continua significa que su localización se encuentra en un punto de la cuneta cuya pendiente se dirige hacia la boca desde la dirección aguas arriba y se aleja en la dirección aguas abajo, en estos casos el flujo ingresa de un solo lado. Es decir, el escurrimiento que no ingresa a la boca continua su drenaje hacia otro punto de captación aguas abajo. Por otro lado las bocas de tormenta que se emplazan en depresiones o puntos bajos reciben el escurrimiento de todas las direcciones y el flujo se almacenará en el lugar hasta poder ser completamente drenado por la boca de tormenta. Un punto bajo, depresión u 'olla' se define y conforma a partir de decisiones del proyecto de pavimento relativas a cambios de pendiente de positiva a negativa o también debido a la pendiente transversal de la calle cuando la boca de tormenta se ubica en una intersección.

Una alternativa para mejorar la captación de una boca de tormenta es construirla con una depresión local que cumplirá un efecto de "llamador de flujo". La depresión local puede realizarse en cualquier tipo de boca, vertical u horizontal y en puntos bajos o en puntos intermedios de pendiente continua.

La capacidad hidráulica de una boca de tormenta depende de su geometría, de su aptitud para no ser afectada por obstrucciones debido a basura esperable en el escurrimiento pluvial y de las características del flujo que circula por la cuneta (función del diseño del sistema de calles).

10.1.1 Bocas de Tormenta Verticales en cordón

La boca de tormenta vertical en cordón (Figura 10.1) es la boca de tormenta más recomendable para utilizarlo en el diseño de sistemas de desagües pluviales urbanos, en particular cuando se dan condiciones alimétricas para establecer puntos bajos en las cunetas (UDFCD, 1984) y no se presentan elevadas pendientes longitudinales de la calle. Debe tenerse presente que una boca de tormenta vertical no es una garantía absoluta contra el taponamiento, pero en lo concerniente a evitar la pérdida de capacidad de captación por obstrucciones es la más confiable de los tipos de bocas.

Las bocas de tormentas verticales tienen varias ventajas sobre los tipos de bocas horizontales y combinadas. Estas bocas no interfieren en los carriles de tránsito vehicular ni de bicicletas, donde existe circulación peatonal, son más seguras que cualquier otro tipo y también son más efectivos cuando es esperable el arrastre de todo tipo de basura por parte del escurrimiento pluvial.

Una boca de tormenta vertical es una abertura en el cordón contenida en un plano vertical, abertura a través de la cual el escurrimiento de la cuneta ingresa. La altura de la abertura no debería exceder los 0.15 m para reducir el riesgo a niños.

La boca de tormenta puede emplazarse en una depresión local o cubeta de la cuneta. En el caso de la Figura 10.1 la boca de tormenta posee una cubeta con depresión local. La capacidad hidráulica de una boca de tormenta vertical se incrementa significativamente con la presencia de una depresión local.

Una variante de la boca de tormenta lo constituyen el agregado de estrías deflectoras en la solera de la cuneta que ayudan a orientar el flujo hacia la abertura del cordón. Además, como sucede con todos los tipos de bocas, la vertical puede estar localizada en un punto intermedio de pendiente continua o en un punto bajo u "olla". La abertura de la boca de tormenta vertical no se obstruye rápidamente, la cual es su mayor ventaja. Las relativamente grandes dimensiones de la abertura vertical, o en el caso en que tenga reja, la luz libre entre barrotes, comparada con la luz libre entre barrotes de rejillas de sumideros horizontales le permite a la basura y desechos atravesar la abertura e ingresar al sistema de desagüe en lugar de ser retenido en la abertura o reja.

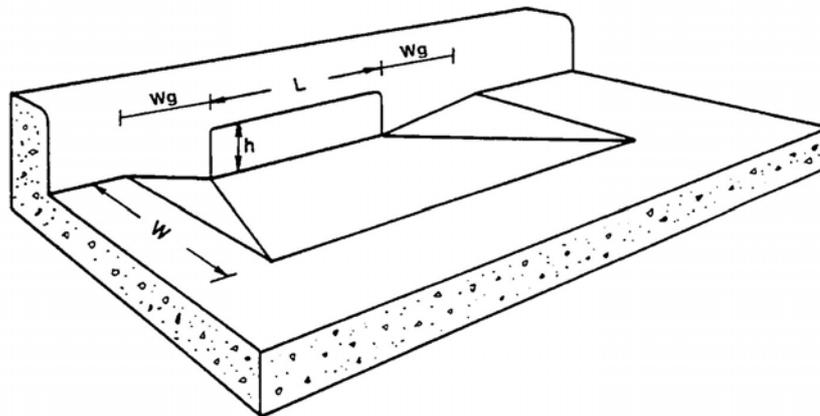


Figura 10.1 Boca de Tormenta Vertical

Una desventaja de los sumideros verticales es su relativa ineficiencia en calles de elevadas pendiente donde el flujo adquiere altas velocidades y tiende a continuar escurriendo en la dirección de la cuneta sin ingresar a la boca. Como otros tipos, las bocas de tormenta verticales pierden capacidad con la disminución de la pendiente transversal de la calle. Para contrarrestar las desventajas puede recurrirse a estrías deflectoras en la solera de la cuneta en las proximidades de la boca de tormenta, aguas arriba del mismo. Las estrías orientan el flujo hacia la abertura de la boca de tormenta.

10.1.2 Bocas de Tormenta Horizontales con reja en cuneta

Las bocas de tormenta horizontales (Figura 10.2) son aberturas en la solera de la cuneta cubiertas por una o más rejillas, a través de la cual el flujo cae hacia el interior del sistema de desagües. Al igual que otros sumideros, la boca de tormenta horizontal puede conformarse con o sin cubeta de depresión y localizarse en puntos intermedios o bajos de las cunetas. En la Figura 10.2 se presenta una boca sin cubeta.

Las bocas horizontales son menos sensibles a cambios en la pendiente longitudinal de las calles que las bocas de tormenta verticales.

Las barras de las rejillas pueden estar alineadas en la dirección del eje de la cuneta (barras longitudinales) o transversal (barras transversales) al eje. Las barras orientadas transversalmente al eje del flujo forman con éste un ángulo que generalmente es de 90°. Estudios citados en UDFCD (1984) indican que las rejillas con barras longitudinales son más eficientes y menos propensas a ser taponadas con basuras que las rejillas con barras transversales. Existe una gran cantidad de diseños de rejillas, las clasificaciones de las mismas en general se basan en la alineación, espaciamiento, espesor y forma de los barrotes.

Cuando la longitud L de la reja es suficiente, la boca captará todo el flujo que escurre en el ancho W de la reja y una porción del flujo que circula mas allá del ancho de la reja.

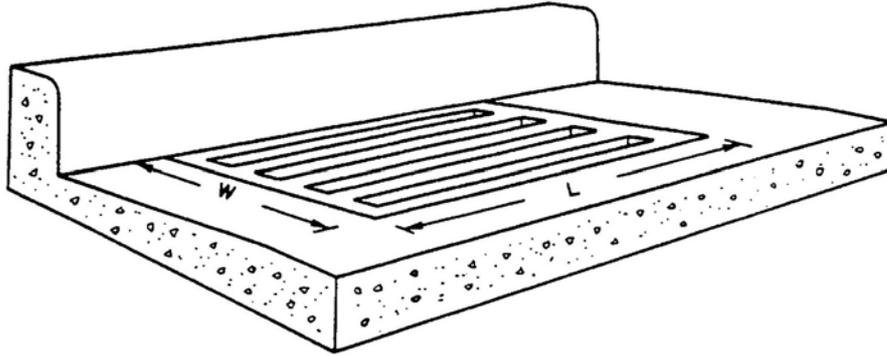


Figura 10.2 Boca de Tormenta Horizontal con reja de barras longitudinales

La mayor desventaja de las bocas horizontales es la tendencia a obstruirse con la basura (Figura 10.3), reduciéndose significativamente la eficiencia respecto a su capacidad de captación teórica, y volviéndose en algunos casos totalmente inoperable. Algunos autores (UDFCD, 1984) señalan que las rejas con barras longitudinales y sobre puntos intermedios de pendientes continuas son razonablemente inmunes al taponamiento. No obstante, la experiencia indica que la obstrucción es posible a pesar de los diseños apropiados de las rejas. Otra desventaja lo constituye la interferencia que ejerce la reja sobre todo tipo de tránsito vehicular y de bicicletas. El uso de bocas horizontales en puntos bajos o con rejas transversales asegura virtualmente que ocurrirá una obstrucción con una significativa disminución de la capacidad de captación de flujo de la boca.

El uso de cubetas de depresión incrementa notablemente su capacidad, pero en contraste, la interferencia sobre el tránsito vehicular que causa la depresión hace su empleo en ocasiones indeseable.

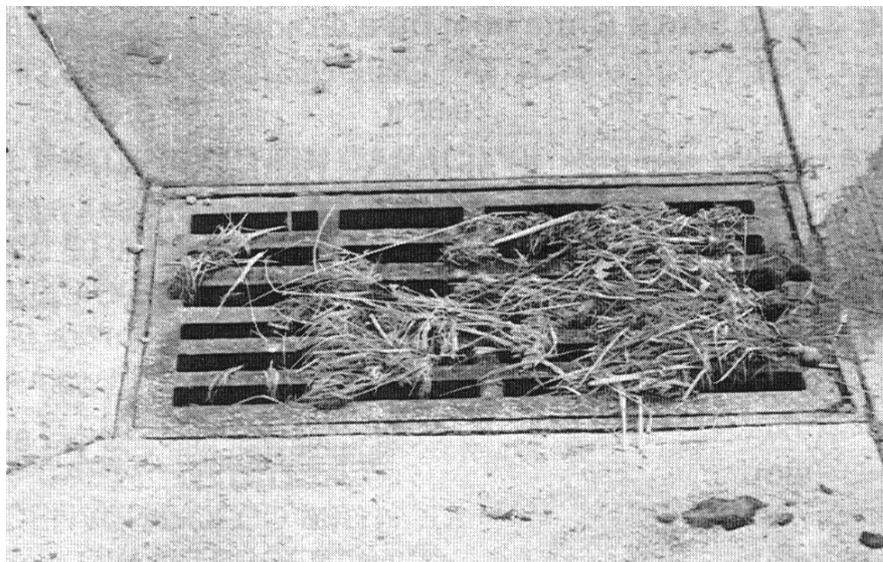


Figura 10.3 Obstrucción parcial de una Boca de Tormenta Horizontal

10.1.3 Bocas de Tormenta Combinadas

Una boca de tormenta combinada es una composición de una boca vertical y una horizontal (Figura 10.4), actuando como una unidad. Generalmente la boca vertical se ubica frente a la boca horizontal, sin embargo resulta útil ubicar primero la boca horizontal en la solera de la cuneta y a continuación la boca vertical en el cordón.

Las bocas combinadas ofrecen las ventajas de ambos tipos de bocas y proveen una mayor capacidad que cualquiera de las bocas individuales.

La boca combinada puede incluir una cubeta deprimida y localizarse en un punto intermedio de pendiente constante o en punto bajo. Ensayos de laboratorio citados en UDFCD (1984) indican que cuando se utilizan bocas combinadas en puntos intermedios, la boca vertical agrega muy poca capacidad al conjunto siempre que la reja horizontal no esté obstruida. Esto se debe a la alta eficiencia de la boca horizontal la que capta la mayor parte del escurrimiento antes que la boca vertical.

En términos prácticos, la boca vertical de una boca combinada en un punto intermedio es una capacidad adicional necesaria para captar el flujo desviado por la basura que obstruye la reja horizontal. Sin embargo, la longitud de la boca vertical en una boca de tormenta combinada típica es generalmente insuficiente para admitir gran cantidad de flujo circulante por la cuneta.

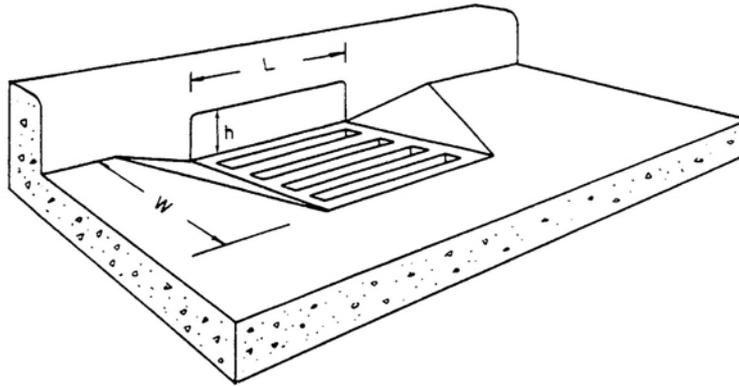


Figura 10.4 Boca de Tormenta Combinada

Cuando se le introduce una cubeta deprimida, la boca de tormenta combinada tiene una alta capacidad teórica de captación, sin embargo, el uso de este dispositivo es cuestionable a causa de la alta probabilidad de obstrucción de la reja horizontal, con lo que queda solamente la boca vertical para captar el escurrimiento.

Bajo determinadas condiciones de diseño, la capacidad de intercepción de flujo de una boca de tormenta combinada puede ser aproximada por la suma de las cantidades de flujo interceptadas por la boca vertical y la horizontal.

10.1.4 Bocas de Tormenta Múltiples

Una boca de tormenta múltiple está constituida por dos o más bocas de los tipos antes mencionados (Figura 10.5), actuando como una unidad. Todos los conceptos aquí citados para unidades individuales son aplicables para múltiples bocas.

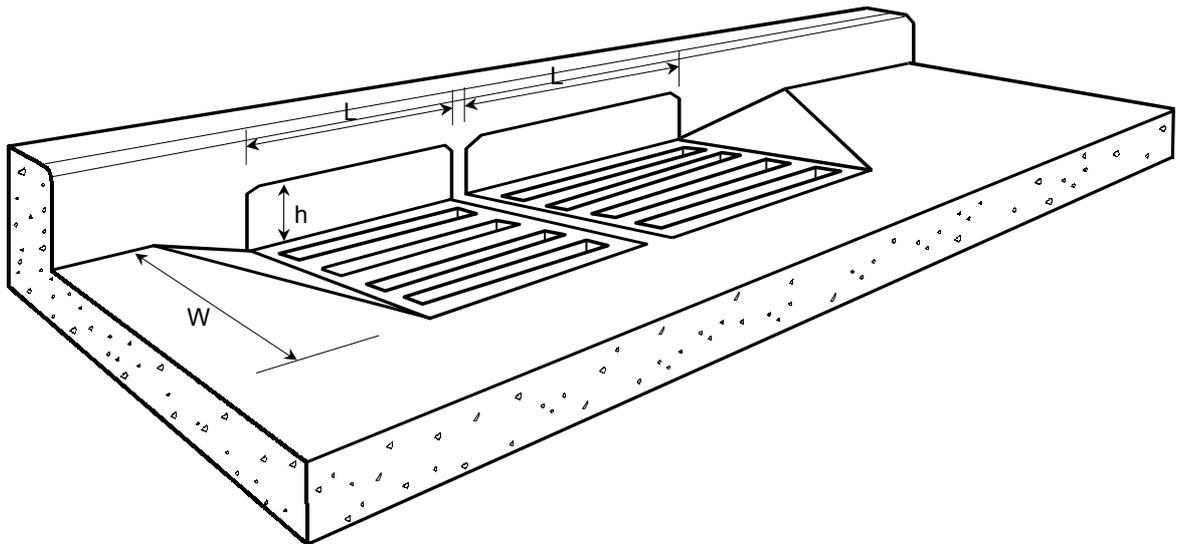


Figura 10.5. Boca de Tormenta Múltiple

10.1.5 Bocas de Tormenta Ranuradas

Las bocas de tormenta ranuradas consisten en conductos o secciones cajón, abiertos longitudinalmente en su parte superior y reforzados con una reja horizontal de hierro con barrotes. Se caracterizan por tener una importante longitud de captación (Figura 10.6) y son efectivas para el drenaje en rampas de carreteras o pendientes continuas hacia zonas de depresiones. Según Guo (1997) las bocas ranuradas operan en forma similar a los sumideros verticales en cordón cuando el ancho ranurado es mayor a 40 mm. La reja de hierro, sufre los mismos inconvenientes de obstrucción y taponamiento que las rejillas horizontales en solera. La capacidad de intercepción de flujo de las bocas de tormenta ranuradas estará siempre sujeta al grado de obstrucción.

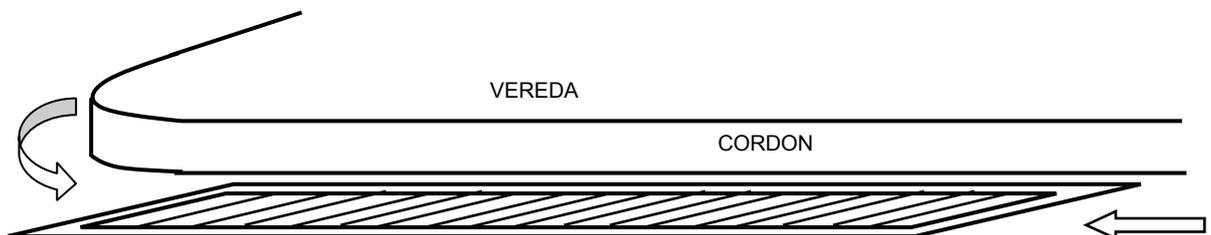


Figura 10.6 Boca de Tormenta Ranurada

10.1.6 Clasificación según las características de la entrada

Cada uno de los tipos de bocas enunciados anteriormente puede presentar variantes en su entrada (Figura 10.7):

- a) Sin depresión
- b) Con depresión
- c) Sin estrías en solera
- d) Con estrías en solera

El uso de la cubeta en depresión es utilizable tanto en bocas de tormentas verticales como horizontales. El parámetro característico para definir la magnitud de la depresión es la diferencia de cotas entre el nivel de la cuneta y el fondo de la cubeta. El uso de estrías orientadoras del flujo se utilizan solamente para bocas de tormenta verticales.

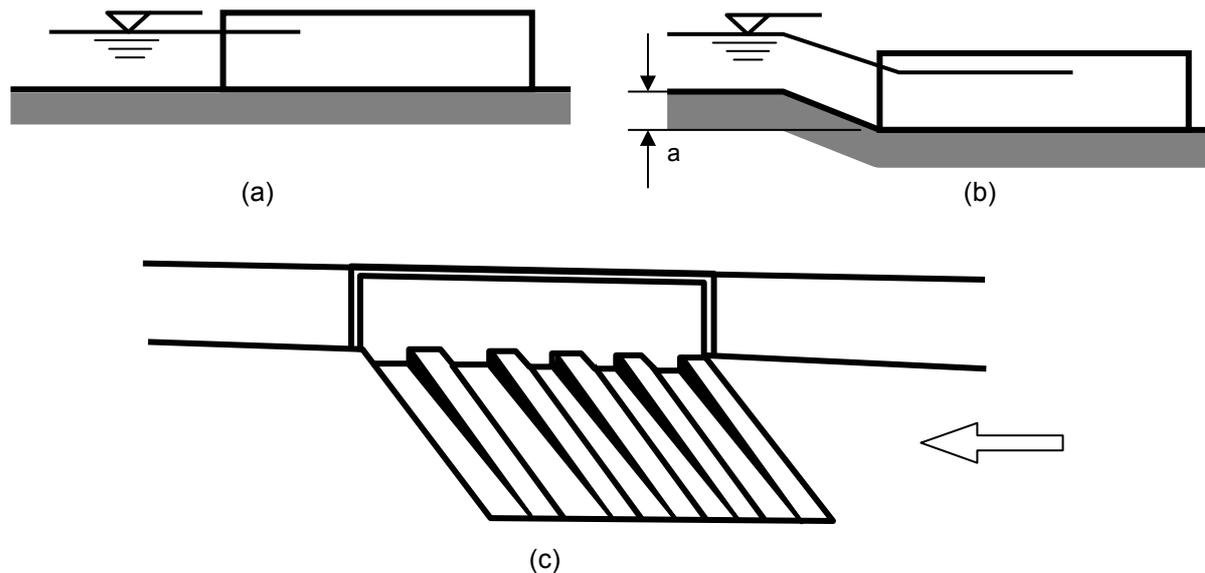


Figura 10.7 Característica de entrada. (a) Sin depresión; (b) Con depresión y (c) Con estrías

10.1.7 Uso de Bocas de Tormenta en Puntos Bajos y Puntos Intermedios

Existen dos condiciones de puntos bajos que puede adquirir una determinada zona dentro del sistema de calles. La más importante es aquella condición de punto bajo adquirida en base a condiciones altimétricas del diseño de calles en el contexto del proyecto de drenaje pluvial. El punto bajo en este caso puede ser una intersección y/o una o varias cuerdas de calles. En esta condición, el perfil hidráulico del flujo en las cercanías de las bocas de tormenta resulta de importancia y el control del tirante es fundamental para mantener la inundación de las calles en valores admisibles. En este caso para lograr el mayor control del perfil hidráulico es recomendado el uso de bocas de tormenta verticales en cordón.

La otra condición de punto bajo lo conforma el perfil transversal de una calle en una intersección. En este caso una pequeña cantidad de flujo puede generar un almacenamiento superficial que al ganar altura puede sobrepasar el coronamiento de la calle y escurrir hacia aguas abajo. En tal situación también es recomendable el uso de sumideros en cordón, aunque también son recomendables las bocas de tormenta combinadas.

Las bocas de tormentas ubicadas en puntos intermedios son generalmente diseñadas para llevar a cabo una interceptación parcial del escurrimiento, previendo que parte del flujo continuará escurriendo hacia aguas abajo. Cuando se debe proyectar la colocación de bocas de tormenta en puntos intermedios de pendiente continua es conveniente tener en cuenta la magnitud de la pendiente longitudinal.

La variación de la capacidad de interceptación para sumideros verticales y horizontales con y sin cubeta en depresión y en función de la pendiente longitudinal de la calle fue estudiada por Johns Hopkins University (1956) cuyos resultados se muestran en la Figura 10.8.

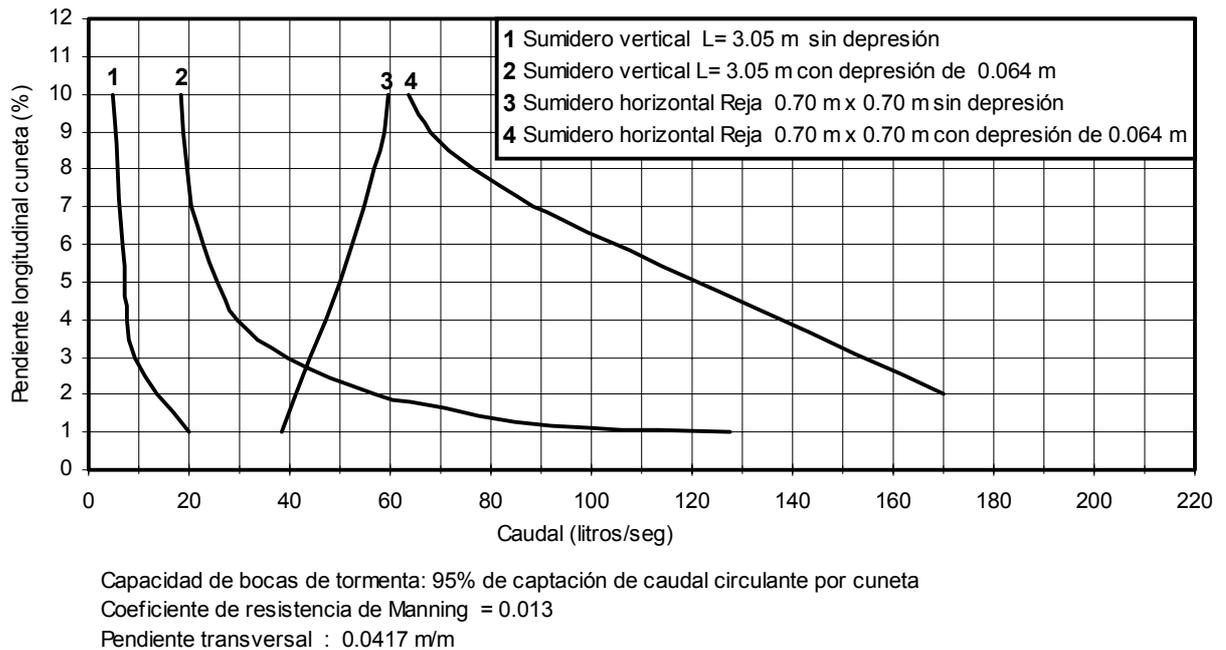


Figura 10.8 Comparación de la Capacidad de las Bocas de Tormentas.
 Fuente: Johns Hopkins University, (1956)

10.1.8 Capacidad Admisible de las Bocas de Tormenta

A los efectos de cuantificar la disminución de la capacidad de intercepción de las bocas de tormenta ante:

- potenciales taponamientos por basura,
- defectos constructivos,
- ejecuciones de sucesivas sobrecapas de pavimento,
- pendientes longitudinales excesivas y
- variación de condiciones de diseño

deben ser utilizados factores de reducción para disminuir la capacidad hidráulica teórica de las bocas de tormenta. En general los factores de reducción se obtienen de recomendaciones elaboradas por los organismos estatales que se ocupan de la gestión del drenaje urbano. En la Tabla 10.1 se presentan los factores de reducción considerados por UDFCD (1984).

Tabla 10.1. Factor de Reducción a aplicar a la Capacidad Teórica de las Bocas de Tormenta.
 Fuente: UDFCD (1984)

Condición	Tipo de boca de tormenta	Porcentaje admisible de capacidad teórica (%)
Punto bajo	Vertical	80
Punto bajo	Horizontal	50
Punto bajo	Combinada	65
Punto Intermedio	Vertical	80
Punto Intermedio	Vertical con estrías deflectoras	75
Punto Intermedio	Horizontal. Reja con barrotes longitudinales	60
Punto Intermedio	Horizontal. Reja con barrotes transversales o reja con barrotes transversales y longitudinales	50
Punto Intermedio	Combinada	110 % de la correspondiente al tipo de boca horizontal considerada.

10.2 CRITERIOS DE DISEÑO Y SELECCION DE BOCAS DE TORMENTA

Por lo general los criterios y recomendaciones para diseño de bocas de tormentas en sistemas de desagües son establecidos por los entes estatales responsables de la gestión del drenaje pluvial, desde organismos de la administración nacional, provincial, departamental y municipal. En algunos países como Estados Unidos se crearon organismos intergubernamentales como los Distritos para Control de Crecidas, los que desarrollan criterios que se aplicarán en aquellos municipios incluidos en el distrito. En nuestro país mayormente las normativas respecto a los desagües pluviales urbanos las fija la autoridad municipal respectiva. Otros organismos que pueden desarrollar criterios son las sociedades técnicas y profesionales

10.2.1 Ubicación y Espaciamiento

La localización de bocas de tormenta verticales en cordón es en general un proceso de prueba y error, ya que tanto la dimensión de la boca como su distanciamiento puede ser ampliamente variable. El objetivo general del diseño es conformar el sistema hidráulicamente más efectivo al mejor costo económico. ASCE WEF (1992) formula las siguientes reglas generales a aplicar en el proyecto de la localización de bocas de tormenta:

- a) Intersecciones. Las bocas de tormenta deben interceptar en las intersecciones el 100% del escurrimiento pluvial. Es necesario prevenir el cruce de calles por parte del flujo como así también su trasvase a la cuenca de otro sumidero, puesto que esto puede producir un riesgo para el tránsito. Las bocas deben ubicarse generalmente en una línea tangente al cordón y próximos a las esquinas.
- b) Sobreelevaciones. En transiciones de calles donde la pendiente transversal comienza a elevarse es conveniente la localización de bocas para minimizar el riesgo para el tránsito debido al flujo atravesando la calle.
- c) Entradas laterales de flujo. En el caso de producirse entradas laterales de flujo desde grandes superficies impermeables, como por ejemplo playas de estacionamiento, que provoquen la saturación de la capacidad de la cuneta, es conveniente la ubicación de bocas aguas abajo del punto de entrada de flujo en la cuneta. Una mejor alternativa es interceptar el flujo antes de que ingrese a la calle.

Como se ha mencionado en el capítulo correspondiente a Calles, se requiere una boca de tormenta en el punto en que, bajo la crecida de diseño, los criterios de capacidad de la cuneta son superados. La localización de la boca de tormenta se establece por un proceso de prueba y error mediante el cual el área de drenaje se ajusta hasta el punto en que se alcanza la máxima capacidad de la cuneta. La boca de tormenta propuesta debe ser dimensionada para interceptar total o parcialmente el flujo. Si bien en la Tabla 10.1 se presenta en forma pormenorizada la eficiencia de cada tipo de boca de tormenta, en cálculos preliminares pueden utilizarse valores entre 70-80% . Las bocas subsiguientes se diseñan en forma similar considerando el flujo no interceptado por la o las bocas aguas arriba y el flujo propio de la cuenca de la nueva boca. No se deben emplazar bocas de tormenta en accesos vehiculares, o en accesos peatonales principales a escuelas, hospitales, comercios, residencias particulares, etc.

Por otro lado el diseño debe asegurar que existe una adecuada cantidad de bocas de tormenta para utilizar completamente la capacidad disponible en el sistema de conductos.

10.2.2 Selección de Bocas de Tormenta

En la etapa de selección de bocas, a menudo deben sacrificarse consideraciones hidráulicas debido a factores como potencialidad relativa de taponamiento, molestias al tránsito, comodidad, seguridad y costos. Según ASCE, WEF (1992) los siguientes factores deben ser considerados antes de la elección del tipo de boca de tormenta:

- a) Probabilidad de taponamiento. Si la probabilidad de obstrucción parcial o total por basura, escombros o sedimentos es mínima, el tipo de bocas más adecuado es la reja horizontal o la boca combinada que proveerá mayor capacidad que una boca en vertical en cordón. En caso contrario, es decir cuando exista la posibilidad de obstrucción la alternativa más favorable es la selección de bocas verticales en cordón. En ambos tipos de bocas, la ejecución de una cubeta en depresión incrementará la capacidad de la boca.

- b) Consideraciones de tránsito. En los casos en que se tiene un tránsito vehicular cercano al cordón y la pendiente de la calle es relativamente elevada, la elección conveniente es una boca vertical en cordón con estrías deflectoras. Si la pendiente de la calle es relativamente plana y existe un potencial taponamiento de las ranuras deflectoras puede seleccionarse una boca combinada con la reja con barrotes solamente longitudinales (esto puede resultar peligrosos para el tránsito de bicicletas).
- c) Consideraciones de seguridad. Este factor incluye el tránsito y seguridad de peatones y ciclistas. En el caso de los peatones deben tenerse en cuenta cuestiones como las salpicaduras desde la cuneta y la factibilidad de cruzar la calle caminando. En el caso de la seguridad del tránsito de bicicletas deben considerarse aspectos como orientación de los barrotes de las rejillas, separación máxima entre barrotes longitudinales y alteraciones del perfil longitudinal de la cuneta en las cercanías de la boca. Debe tenerse en cuenta que toda alternativa de diseño para el mejoramiento de la eficiencia hidráulica de la boca que involucre un aumento de la diferencia de nivel o caída desde la cuneta aguas arriba de la boca y la boca puede resultar en un incremento de la peligrosidad para los ciclistas.

10.3 PROYECTO GEOMETRICO E HIDRAULICO DE BOCAS DE TORMENTA

Una boca de tormenta desde el punto de vista hidráulico puede operar como un vertedero o un orificio, ambos en descarga libre, dependiendo del tirante sobre el fondo de la solera de la cuneta. Si opera como vertedero el caudal interceptado será función del tirante a la potencia 1.5 $Q = f(y^{1.5})$ y en el caso de operar como orificio el caudal será función de la raíz cuadrada del tirante $Q = f(y^{0.50})$. Excepcionalmente en casos de entrada en carga de la red de conductos tanto el funcionamiento como vertedero u orificio puede ser a descarga sumergida. Además, en situaciones donde la altura piezométrica en el conducto supera la cota de agua en la cuneta el flujo puede ser inverso, desde el conducto a la cuneta, operando hidráulicamente con la misma modalidad de vertedero u orificio.

10.3.1 Bocas de Tormentas Verticales

10.3.1.1 Elementos Característicos

En la Figuras 10.9 se representan los elementos geométricos y parámetros hidráulicos del flujo a considerar en el proyecto de las bocas de tormenta verticales.

Siendo en la Figura 10.9 :

a : depresión aguas arriba	b: depresión aguas abajo
h : altura de abertura en cordón	L : longitud de la boca
L_1 : longitud de la depresión aguas arriba	L_2 : longitud de la depresión aguas abajo
S_t : pendiente transversal calle	$S_w = \text{tg } \theta_0$: pendiente transversal de cuneta
θ_0 : ángulo del fondo de cuneta respecto a vertical	θ : ángulo del fondo de la depresión respecto a vertical
W: ancho de la cuneta	S_l : pendiente longitudinal calle
y' : tirante en el punto de unión de pendiente transversal calle y pendiente de cuneta	
Q_0, A_0, y_0, V_0 : variables hidráulicas en cuneta caudal, área mojada, tirante máximo y velocidad	
Q : caudal captado en boca de tormenta	
$q = Q_0 - Q$: caudal remanente en cuneta	

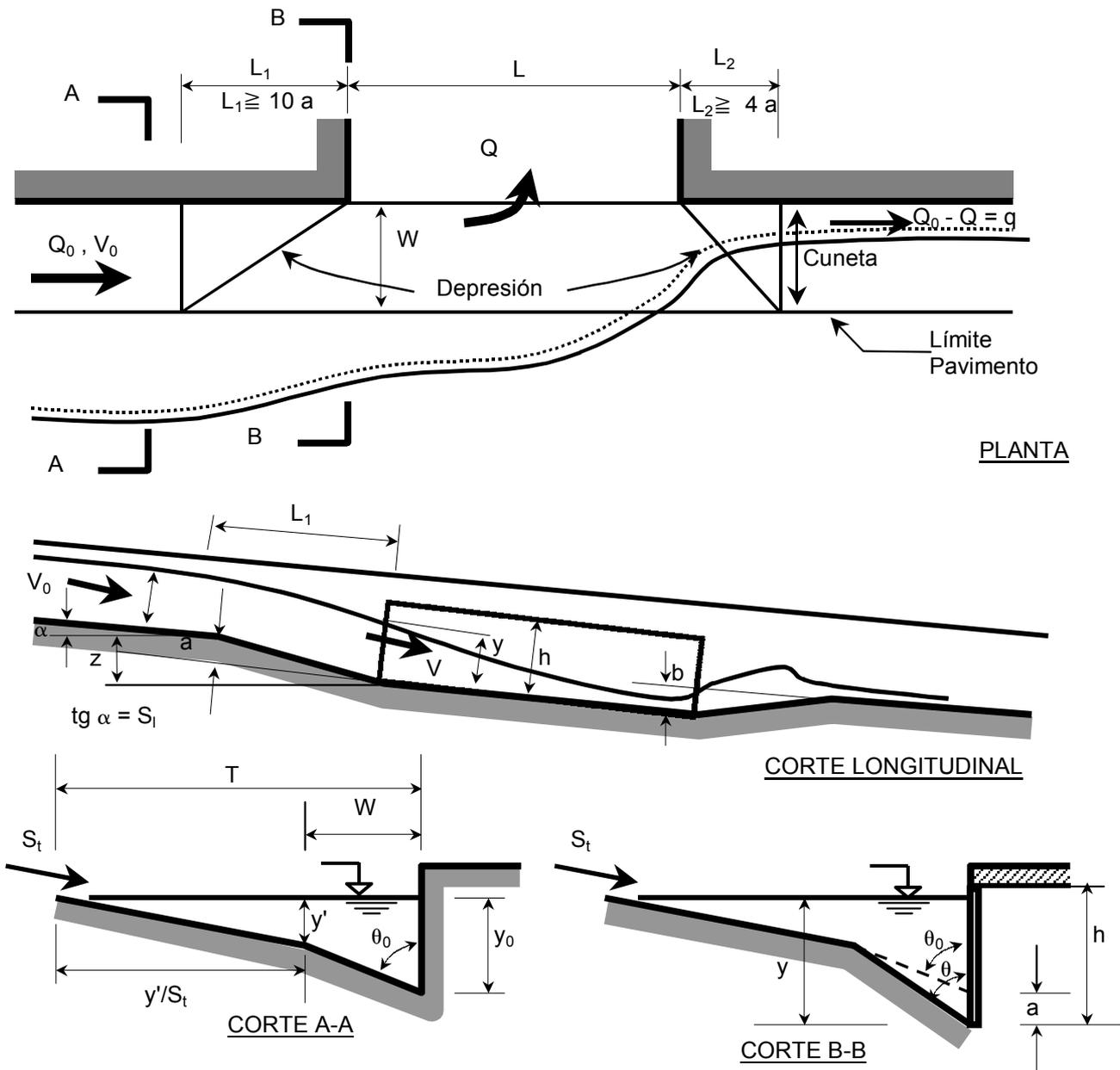


Figura 10.9. Boca de Tormenta Vertical en cordón en Punto Intermedio con depresión local

10.3.1.2 Bocas de Tormentas Verticales en Puntos Bajos

En condición de punto bajo (Figura 10.10) el área de inundación queda restringido a la cercanía de la boca de tormenta, en función de la topografía del lugar. Bajo la condición de flujo libre, la boca de tormenta funciona esencialmente como un vertedero de cresta ancha y el caudal captado se incrementará en forma proporcional a $y^{1.50}$. Una vez que la altura de agua en la boca se incrementó por encima de la altura de la boca h , el flujo comienza a ser inestable comenzando a operar como orificio. Cuando la altura ascendió por encima de 2 veces la altura de la boca el flujo es claramente sumergido y debe evaluarse como un orificio ancho. En esta situación la capacidad de la boca aumentará en proporción de $h^{1/2}$. A pesar de que la boca se diseña para operar a flujo libre para recurrencias de diseño 2-5 años, debe evaluarse también la capacidad de la boca para operar sumergida. Esta última situación puede corresponder a crecidas con recurrencias superiores a las de diseño.

El funcionamiento hidráulico de la boca puede clasificarse:

- # si $y \leq h \Rightarrow$ vertedero
- # si $y \geq 2h \Rightarrow$ orificio
- # si $h \leq y \leq 2h \Rightarrow$ flujo inestable/ indefinido

Desde un punto de vista práctico el límite entre ambos funcionamientos puede considerarse en $y = 1.5 h$.

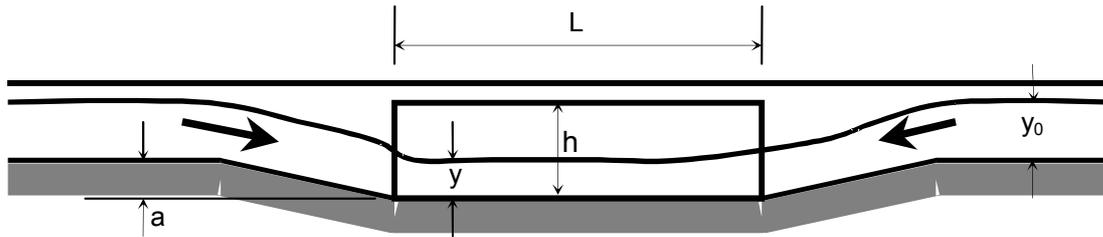


Figura 10.10. Boca de Tormenta en cordón en Punto Bajo

Boca de Tormenta sin depresión ($a = 0$). Bertoni et al., (1995) presenta las siguientes ecuaciones

$$Q = 1.656 L y_0^{1.5} \quad (y_0 \leq 1.5 h) \quad (10.1)$$

$$Q = 0.67 L h [(2g (y_0 - h/2))]^{1/2} \quad (y_0 > 1.5 h) \quad (10.2)$$

considerar que ambas curvas se encuentran en $y_0 = 1.5h$
 Q en (m^3/s); L , h e y_0 en (m)

Boca de Tormenta con depresión ($a > 0$) :

Representando mediante ecuaciones (Riccardi, 2002) el nomograma presentado en UDCFD (1984) por el cual se determina el caudal específico Q/L en función del tirante en la cuneta y_0 y la relación y_0/h , para una profundidad de la depresión $a = 0.0508$ m, es posible llegar a las expresiones de caudales de las ecs. (10.3) a (10.9). Existen cuatro zonas de operación en función de la relación entre el tirante y_0 y la altura de la boca h .

a) $y_0 \leq 1.0 h$. Vertedero flujo libre

$$Q = C_v L y_0^{1.5} \quad (10.3)$$

con C_v como coeficiente de descarga de vertedero y manteniéndose constante en un valor de $C_v = 1.718$.

b) $1.0 h \leq y_0 \leq 1.5 h$. Vertedero con flujo inestable

$$Q = C_v L y_0^{1.5} \quad (10.4)$$

$$C_v = 1.71 (y_0/h)^{-0.50} \quad (10.5)$$

El valor de C_v varía entre 1.718 para $h = y_0$ y 1.40 para $y_0 = 1.5 h$

c) $1.5 h \leq y_0 \leq 2.0 h$. Orificio con flujo inestable

$$Q = 4.428 C_o L h (y_0 - h/2 + a)^{0.5} \quad (10.6)$$

con C_o coeficiente de descarga de orificio

$$C_o = 0.378 (y_0/h)^{0.70} \quad (10.7)$$

El valor de C_o varía entre 0.50 para $y_0 = 1.5 h$ y 0.61 para $y_0 = 2.0 h$

d) $2.0 h \leq y_0$. Orificio con flujo estable

$$Q = 4.428 C_o L h (y_0 - h/2 + a)^{0.5} \quad (10.8)$$

$$C_o = 0.59 (y_0/h)^{0.07} \quad (10.9)$$

El valor de C_o varía entre 0.61 para $y_0 = 2.0 h$ y 0.66 para $y_0 = 5.0 h$

Q en (m^3/s); L , h , a e y_0 en (m)

Para bocas de tormenta en puntos bajos con cubeta deprimida a alturas diferentes a 0.050 m se pueden utilizar las Figuras 10.11 y 10.12 (UDFCD, 1984) que involucran alturas de depresión de 0.025 m y 0.076 m. Estas gráficas son solo aplicables a flujo libre lo que significa un modo de operación solamente como vertedero.

Ejercicio 10.1. Boca de Tormenta Vertical en Punto Bajo

Se desea dimensionar una boca de tormenta vertical en cordón en un punto bajo que recibirá un caudal de $0.060 m^3/s$ desde una cuneta y $0.170 m^3/s$ desde la otra. La altura admisible del flujo en el cordón es de 0.12 m y la altura admisible de la abertura en cordón es de 0.15 m. Puede ser utilizada una depresión de 0.05 m y un ancho de la depresión de 0.60 m.

Calcular:

- Longitud requerida de la boca
- La capacidad de la boca dimensionada si la altura de agua en cuneta se incrementa a $y_0 = 0.30 m$
- La capacidad para el tirante de proyecto $y_0 = 0.12 m$ para depresiones de $a = 0.076 m$ y $a = 0.025 m$

Solución:

a) En primer lugar se define la eficiencia esperable de la boca de tormenta en cordón, en punto bajo y con depresión, de Tabla 1.1 $\rightarrow 80\%$, lo que implica que la relación entre el caudal captado Q y el caudal teórico de la boca $Q_{teórico}$ es $Q/Q_{teórico} = 0.80$. Dado que el caudal a captar es un dato conocido puedo determinar el caudal de diseño de la boca como $Q_{teórico} = 1.25 Q = 1.25 \times (0.170 m^3/s + 0.060 m^3/s) = 0.288 m^3/s$.

Por otro lado la relación y_0/h admisible es $0.12 m/0.15 m = 0.8 < 1 \rightarrow$ flujo libre, opera como vertedero \rightarrow se utiliza la ec. (10.3) y se despeja la longitud $L = Q_{teórico} / (C_v y_0^{1.5})$ con $C_v = 1.718 \rightarrow L = 4.00 m$

b) Para el caso de $y_0 = 0.30 m$ la relación $y_0/h = 2.0$ indica que la boca de tormenta funciona en el límite de un orificio con flujo estable pudiendo utilizarse la ec. (10.8) con $C_o = 0.61$. El caudal teórico de la boca es $Q_{teórico} = 4.4428 \times 0.61 \times 0.15 m \times 4.00 m \times (0.30 - 0.15/2 + 0.05)^{0.5} = 0.850 m^3/s$, en tanto que el caudal captado es $Q = 0.80 Q_{teórico} = 0.80 \times 0.850 m^3/s = 0.680 m^3/s$.

c) Para una depresión de $a = 0.076 m$ se utiliza el gráfico de la Figura 10.12 interpolando linealmente entre las longitudes $L = 3.05 m$ y $4.57 m$. Para $L = 3.05 m$ el caudal es $0.280 m^3/s$ en tanto que para $L = 4.57 m$ el caudal es $0.400 m^3/s$, resultando para una longitud de $L = 4.00 m$ un caudal teórico de $0.360 m^3/s$ y un caudal real de captación de $0.80 \times 0.360 = 0.288 m^3/s$ con lo que puede deducirse que no mejoraría el caudal captado respecto a la depresión $a = 0.05 m$.

En el caso de una depresión de $0.025 m$, desde Figura 10.11, el caudal teórico resulta de $0.250 m^3/s$ y el caudal real de captación $0.200 m^3/s$.

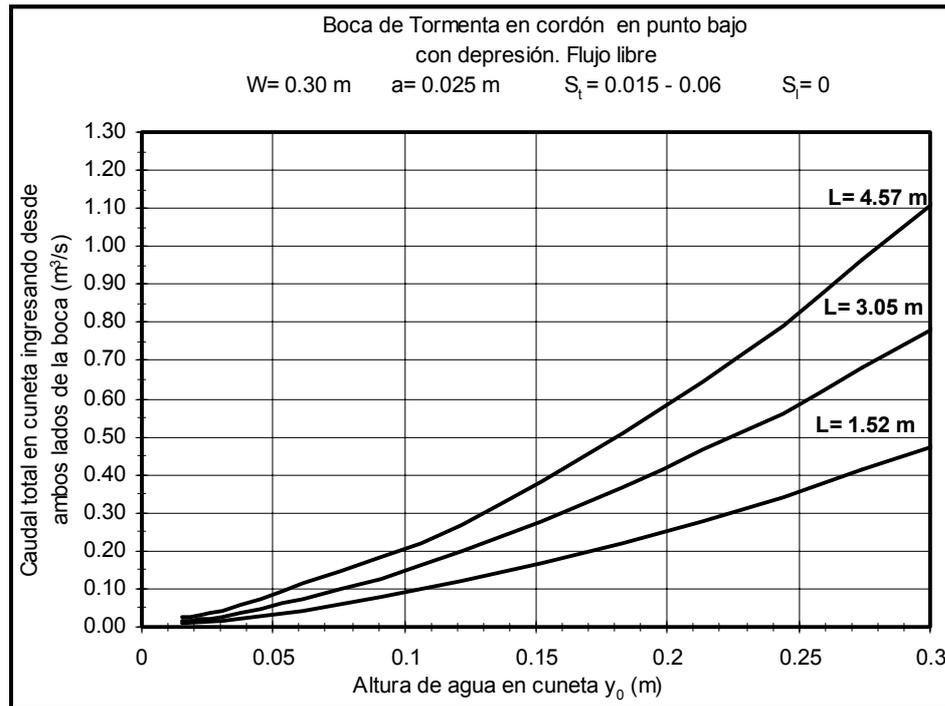


Figura 10.11. Capacidad de una Boca de Tormenta Vertical en Punto Bajo con depresión $a = 0.025$ m , ancho lateral de la depresión $W = 0.30$ m, Pendiente transversal de calle $S_t = 0.015$ a 0.060 y longitudinal de cuneta en zona de la boca $S_b = 0$ y Flujo Libre.
Fuente: UDFCD (1984)

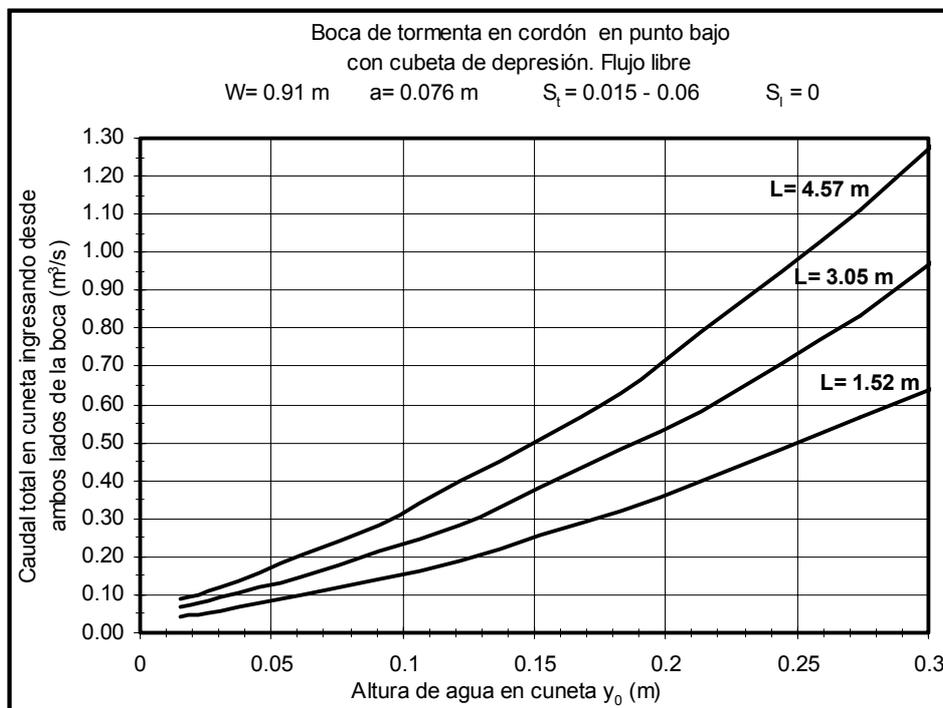


Figura 10.12. Capacidad de una Boca de Tormenta Vertical en Punto Bajo con depresión $a = 0.076$ m , ancho lateral de la depresión $W = 0.91$ m, Pendiente transversal de calle $S_t = 0.015$ a 0.060 y longitudinal de cuneta en zona de la boca $S_b = 0$ y Flujo Libre.
Fuente: UDFCD (1984)

Criterio de Guo (1997) para Bocas de Tormenta en cordón en Puntos Bajos con o sin depresión

Guo (1997) plantea una ecuación única para la determinación de la capacidad teórica de una boca de tormenta con o sin depresión. Mientras la altura de agua no supere el límite superior de la abertura en cordón el funcionamiento hidráulico se evalúa como vertedero, en caso contrario como orificio. La ecuación empírica asociada al funcionamiento como vertedero es:

$$Q = 1.27 (L + 1.8 W_g) (y_0+a)^{1.5} \tag{10.10}$$

donde Q (m³/s) es la capacidad teórica de la boca, L (m) la longitud de la boca, W_g (m) la longitud de la depresión en la dirección del flujo (ver Fig. 10.1); y₀ (m) el tirante en la cuneta y a (m) la depresión en la cercanías de la boca (si es que existe).

Cuando la boca funciona como un orificio el caudal se puede evaluar con la expresión:

$$Q = 0.67 h L \sqrt{2gy_{orificio}} \tag{10.11}$$

donde h(m) es la altura de la abertura en cordón; g (m/s²) es la aceleración de la gravedad e y_{orificio}(m) es la carga sobre el orificio. Guo (1997) plantea una ecuación para determinar y_{orificio} función de la conformación geométrica de la entrada a la boca de tormenta (Figura 10.13) y específicamente de la ubicación del plano de ingreso a la boca.

$$y_{orificio} = (y_0 + a) - \frac{h}{2} \text{sen } \varphi \tag{10.12}$$

donde φ es el ángulo de la garganta de la boca de tormenta. Este ángulo es igual a cero cuando la garganta es vertical y 90° cuando la garganta es horizontal.

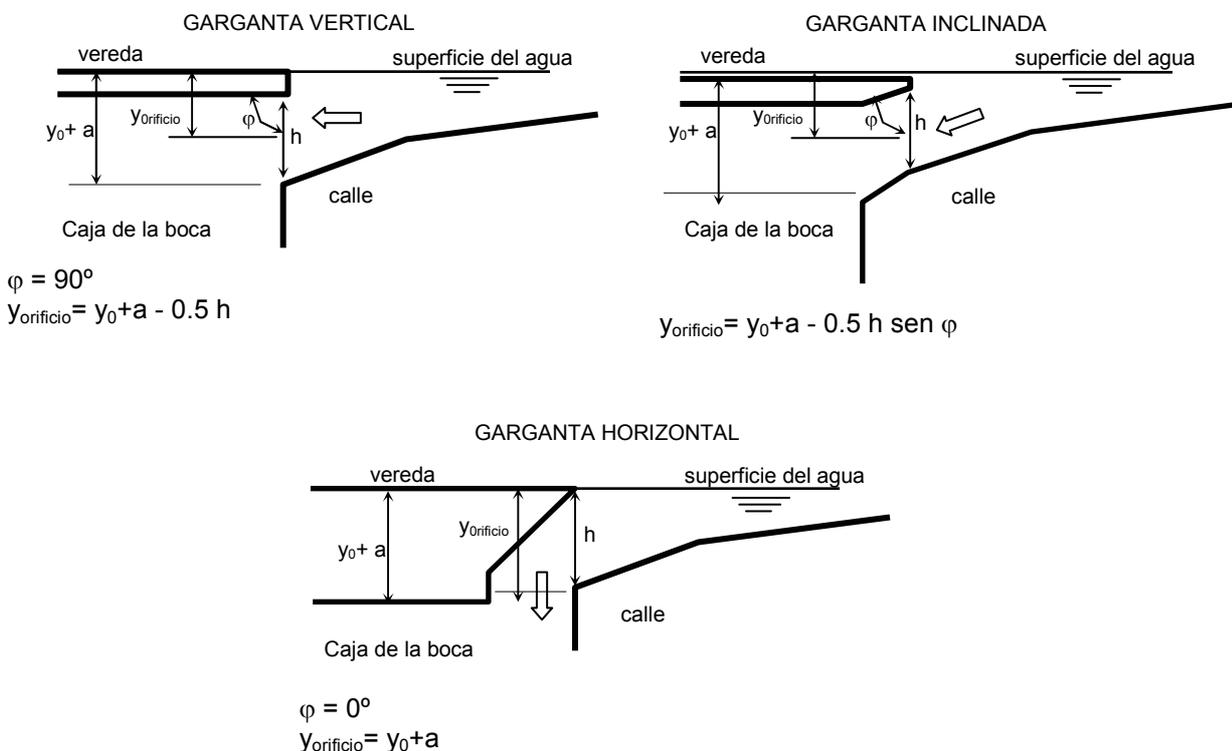


Figura 10.13. Configuración de la garganta de bocas de tormenta en cordón

Debe destacarse que los caudales determinados con ecs. (10.10) y (10.11) son teóricos y para la determinación de la capacidad real de la boca debe afectarse por los coeficiente de reducción presentados en Tabla 10.1.

Ejercicio 10.2. Boca de Tormenta Vertical en Punto Bajo. Criterio de Guo (1997)

Resolver el ejemplo 10.1 aplicando las ecuaciones propuesta por Guo (1997).

Solución:

a) Cálculo de la capacidad teórica. $Q_{\text{teórico}} = 1.25 Q = 1.25 \times (0.170 \text{ m}^3/\text{s} + 0.060 \text{ m}^3/\text{s}) = 0.288 \text{ m}^3/\text{s}$.
Despejando la longitud de la ec. (10.10)

$$L = \frac{Q_{\text{teórico}}}{1.27 (y_0 + a)^{1.5}} - 1.8W_g = \frac{0.288}{1.27 \times (0.12 + 0.05)^{1.5}} - 1.8 \times 0.60 = 2.15 \text{ m}$$

es evidente que la formulación de Guo (1997) valora excesivamente el caudal captado, especialmente al introducir como longitud adicional de captación 1.8 veces la longitud de la depresión. En la bibliografía no aparecen demasiados detalles acerca de cómo lograr que la longitud efectiva del vertedero sea la que plantea la ec. (10.10) por lo que no se recomienda su utilización.

b) Cálculo de la capacidad para $y_0 = 0.30 \text{ m}$. Suponiendo que la longitud $L = 4.00 \text{ m}$ determinada en Ejercicio 10.1 sea la correcta de acuerdo a la ec. (10.11) y suponiendo una garganta vertical, la capacidad es:

$$Q_{\text{teórico}} = 0.67 \times 0.15 \times 4.00 \sqrt{2 \times 9.81 \times (0.30 + 0.05 - 0.15/2)} = 0.933 \text{ m}^3/\text{s}$$

en este caso aparece una diferencia respecto a la metodología planteada por UDFCD (1984) que tiene que ver con que Guo (1997) por simplicidad plantea un coeficiente de gasto de orificio (0.67) invariable.

10.3.1.3 Bocas de Tormenta Verticales en cordón en Puntos Intermedios de pendiente continua

La Figura 10.9 muestra todos los elementos característicos tanto geométricos como hidráulicos de una boca de tormenta vertical en cordón emplazada en un punto intermedio de pendiente constante. La capacidad de las bocas de tormentas verticales en puntos intermedios es función de cuán rápidamente el flujo paralelo al cordón puede cambiar su dirección y desviarse hacia la abertura de la boca. El cambio en la dirección del flujo es función predominante de la pendiente transversal de la calle y cuneta, por lo que utilizando cubetas en depresión se incrementa la pendiente transversal efectiva y por ende se incrementa la capacidad de la boca.

A. Criterio de diseño de UDFCD (1984)

Para la evaluación de la capacidad es adecuado el uso de los gráficos presentados en las Figuras 10.14 a 10.22, que son adaptados de UDFCD (1984). Según la fuente bibliográfica se entiende como el método más confiable y útil para la determinación de las capacidades de bocas de tormentas verticales en cordón en puntos intermedios de pendiente continua. Las figuras representan casos generales por lo que pueden existir diseños particulares diferentes que ameriten otro tipo de evaluación.

Las gráficas presentadas corresponden a tres tipos de depresiones estandarizadas:

Altura de la depresión a(m)	Ancho de la depresión W(m)
0.0254 m	0.305 m
0.0508 m	0.610 m
0.0762 m	0.914 m

Las curvas se aplican solamente al caso de flujo libre (operando como vertedero) en la abertura del cordón. Por lo tanto en el proceso de diseño el proyectista debe verificar tal condición de flujo para la crecida de proyecto de modo que la altura elegida para la boca sea mayor o igual al tirante en la cuneta y_0 . Las relaciones graficadas fueron establecidas para tres longitudes de bocas de $L = 1.52 \text{ m}$; $L = 3.05 \text{ m}$ y $L = 4.57 \text{ m}$ e involucra otras variables como pendientes longitudinal y transversal de cuneta, dando como resultado la relación de captación entre el caudal de captado por la boca y el caudal circulante por la cuneta Q/Q_0 .

Una boca de tormenta vertical en puntos intermedios solamente puede captar la totalidad de pequeños escurrimientos. Por encima de un determinado caudal límite de captación total, siempre una parte del flujo seguirá hacia la próxima boca aguas abajo no ingresando en la boca en cuestión. Por esta razón la metodología de cálculo se basa en establecer que relación habrá entre el caudal circulante por cuneta Q_0 y el ingresante a la boca Q .

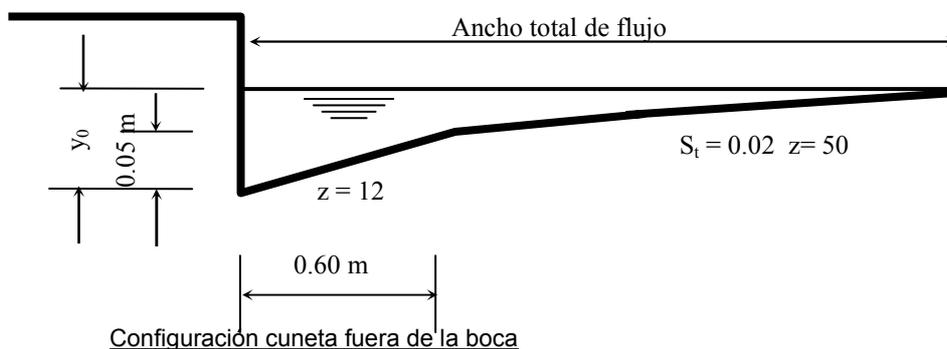
El procedimiento para utilizar las curvas es el siguiente:

1. Se adopta un determinado ancho para el flujo en cuneta W (ver Figura 10.9), de acuerdo con las características geométricas e hidráulicas de la calle y el caudal de diseño Q_0 .
2. Se escoge la figura correcta de acuerdo con el ancho W, la depresión a y la longitud L considerados.
3. Ingresando en la parte izquierda de la figura se sigue una vertical hasta interceptar la curva correspondiente a la pendiente longitudinal de la calle. A partir del punto de cruce se sigue una horizontal hacia la zona derecha de la figura hasta interceptar la curva asociada a la pendiente transversal de la calle. Una vez hallado el punto de intercepción se traza una vertical ascendente hacia la escala de la relación de captación Q/Q_0 . Mediante la multiplicación de la relación de captación por el caudal circulante en cuneta Q_0 se halla el caudal que ingresará a la abertura del cordón.

Para un correcto proyecto en un problema determinado, se deberán evaluar las diferentes alternativas de geometría de la depresión y longitudes de la abertura para la adopción del diseño final. Debe tenerse presente que la altura de la abertura en cordón de la boca de tormenta debe ser siempre mayor o igual que el tirante en la cuneta y_0 de modo de asegurar el cumplimiento de la hipótesis de flujo libre para la crecida de proyecto.

Ejercicio 10.3. Boca de Tormenta Vertical en Punto Intermedio

Dado un caudal de proyecto escurriendo por cuenta $Q_0= 0.113 \text{ m}^3/\text{s}$, una pendiente transversal de la calle $S_t= 0.02$ y una pendiente longitudinal $S_l= 0.03$, una cuneta triangular de 0.60 m de ancho y 0.05 m de profundidad y una boca de tormenta con una cubeta en depresión de profundidad $a= 0.05 \text{ m}$ y ancho $W= 0.60 \text{ m}$ y una abertura en cordón de 0.18 m de altura, calcular la longitud necesaria de la boca de tormenta para asegurar un 80% de intercepción.

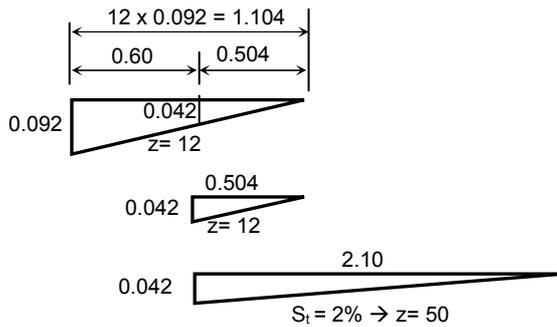


Solución:

1. En primer lugar se debe determinar el tirante y_0 en la cuneta asociado al caudal especificado. Para ello se utiliza la metodología presentada en el Capítulo 9_Calles, mediante la cual se subdivide la superficie transversal mojada en tres sectores. Debido a que la incógnita es el tirante, se proponen tirantes y se verifican caudales. Se adopta un coeficiente de resistencia de Manning $\eta= 0.016$. El tirante resultante tras el proceso de prueba y error es $y_0= 0.092 \text{ m}$. El cálculo del caudal en cada sector triangular se lleva a cabo mediante la ecuación:

$$Q = 0.375 \frac{1}{\eta} z y_0^{8/3} S_l^{1/2} \tag{10.13}$$

donde $Q(\text{m}^3/\text{s})$ es el caudal conducido, $z= 1/S_t$; $S_t(\text{m}/\text{m})$ es la pendiente transversal de la cuneta; $y_0(\text{m})$ es la altura máxima de la sección mojada.



Aplicando la ec. (3.13) en cada uno de los sectores, la capacidad resulta :

$$Q = \frac{0.375 \cdot 0.03^{1/2}}{0.016} \left[12 \cdot 0.092^{8/3} - 12 \cdot 0.042^{8/3} + 50 \cdot 0.042^{8/3} \right] = 0.115 \text{ m}^3 / \text{s}$$

2. Conocido el tirante $y_0 = 0.092$ m debe determinarse el ancho total de flujo: $0.60 + 2.10 = 2.70$ m.
3. Se evalúa la relación de intercepción suponiendo una longitud de $L = 3.05$ m. Ingresando a la Figura 10.18 con el ancho mojado $W = 2.70$ m y considerando las pendientes $S_i = 0.03$ y $S_t = 0.02$ se llega a una relación de intercepción teórica de 0.62. Asumiendo desde Tabla 10.1 un factor de reducción de la capacidad teórica de la boca de tormenta vertical en punto intermedio de 0.80, la tasa de intercepción disponible es $= 0.62 \times 0.80 = 0.50$, valor bastante menor que el requerido.
 Se analiza una longitud de boca de tormenta $L = 4.57$ m. Ingresando a la Figura 10.19 se determina una tasa de intercepción teórica de 0.76, multiplicando por el factor de reducción, se tiene una tasa de intercepción disponible $0.76 \times 0.80 = 0.61$, también menor a lo requerido.
4. El proyectita tiene las siguientes opciones:
 - a. Utilizar una depresión con mayor profundidad
 - b. Adoptar una longitud de boca de $L = 4.57$ m y permitir una derivación hacia una boca aguas abajo del 39% del caudal que llega a la boca en estudio.
 - c. Desplazar la ubicación de la boca de tormenta hacia aguas arriba de modo de disminuir el caudal en cuneta Q_0 .

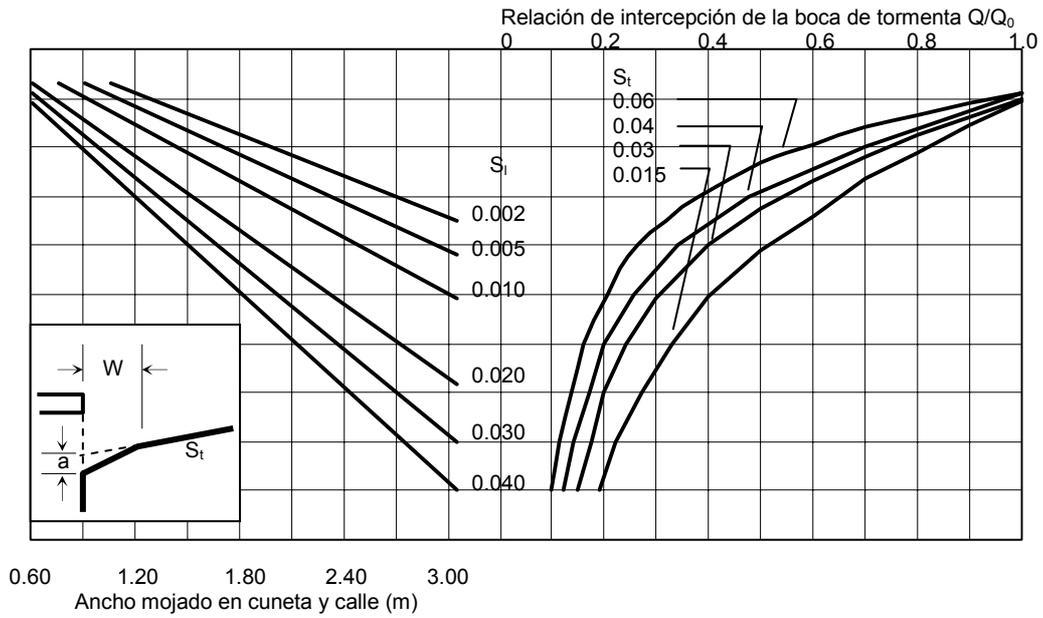


Figura 10.14 Capacidad de una Boca de Tormenta Vertical en cordón en Puntos Intermedios.
 $W = 0.30$ m; $a \geq 0.025$ m; $L = 1.52$ m; $y_0 \leq h$. Fuente: UDFCD (1984)

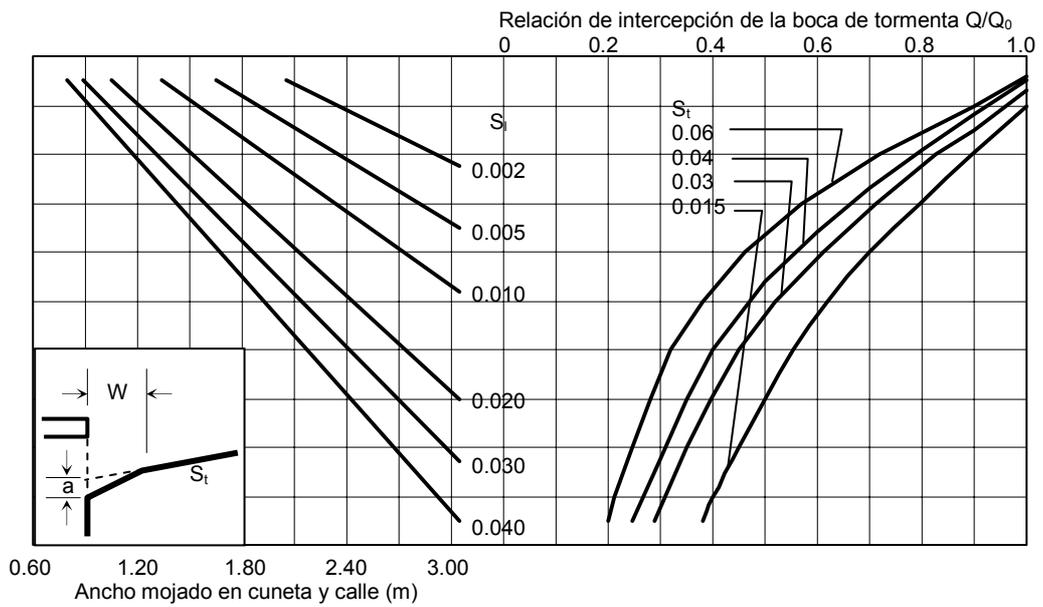


Figura 10.15. Capacidad de una Boca de Tormenta Vertical en cordón en Puntos Intermedios.
 $W = 0.30$ m; $a \geq 0.025$ m; $L = 3.04$ m; $y_0 \leq h$. UDFCD (1984)

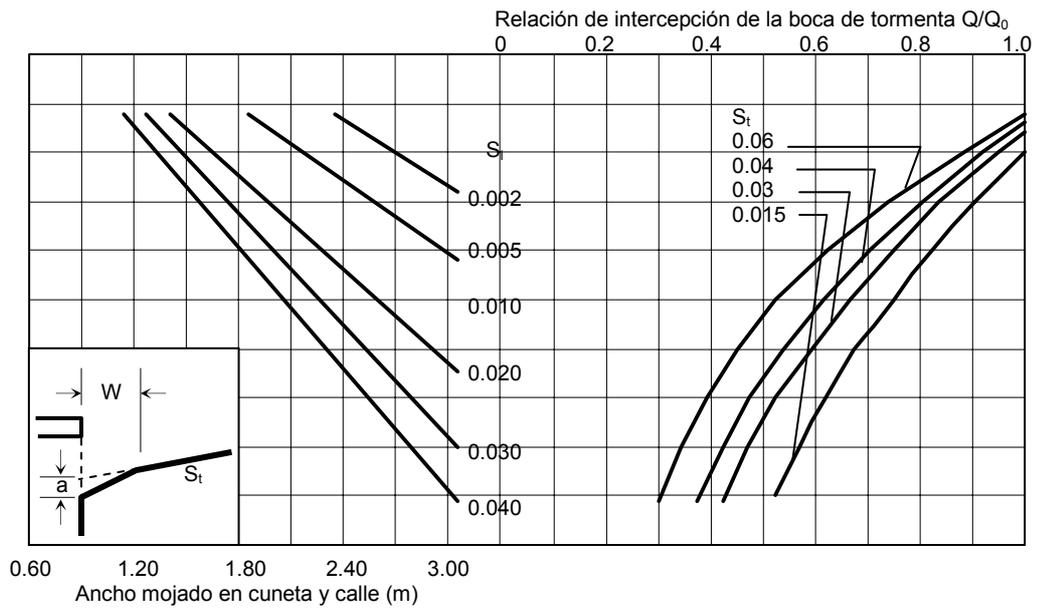


Figura 10.16. Capacidad de una Boca de Tormenta Vertical en cordón en Puntos Intermedios.
 $W = 0.30 \text{ m}$; $a \geq 0.025 \text{ m}$; $L = 4.57 \text{ m}$; $y_0 \leq h$. UDFCD (1984)

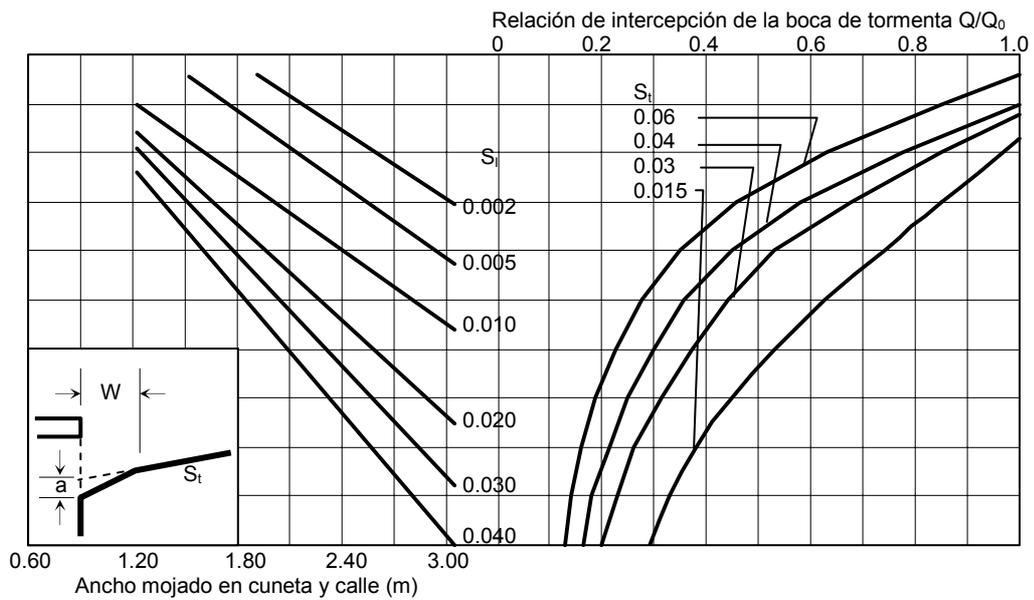


Figura 10.17. Capacidad de una Boca de Tormenta Vertical en cordón en Puntos Intermedios.
 $W = 0.60 \text{ m}$; $a \geq 0.050 \text{ m}$; $L = 1.52 \text{ m}$; $y_0 \leq h$. UDFCD (1984)

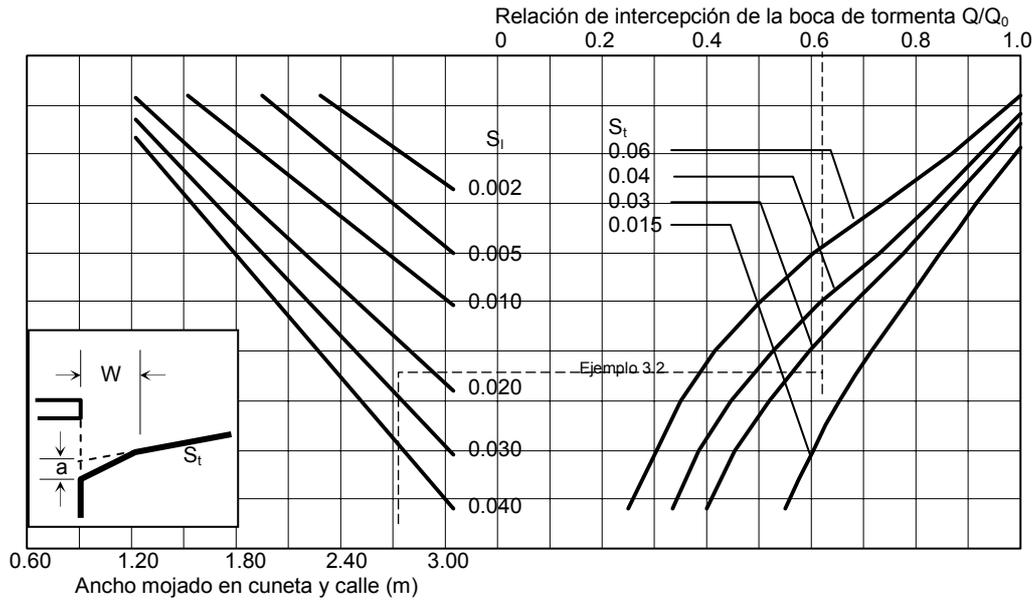


Figura 10.18. Capacidad de una Boca de Tormenta Vertical en cordón en Puntos Intermedios.
 $W = 0.60$ m; $a \geq 0.050$ m; $L = 3.04$ m; $y_0 \leq h$.

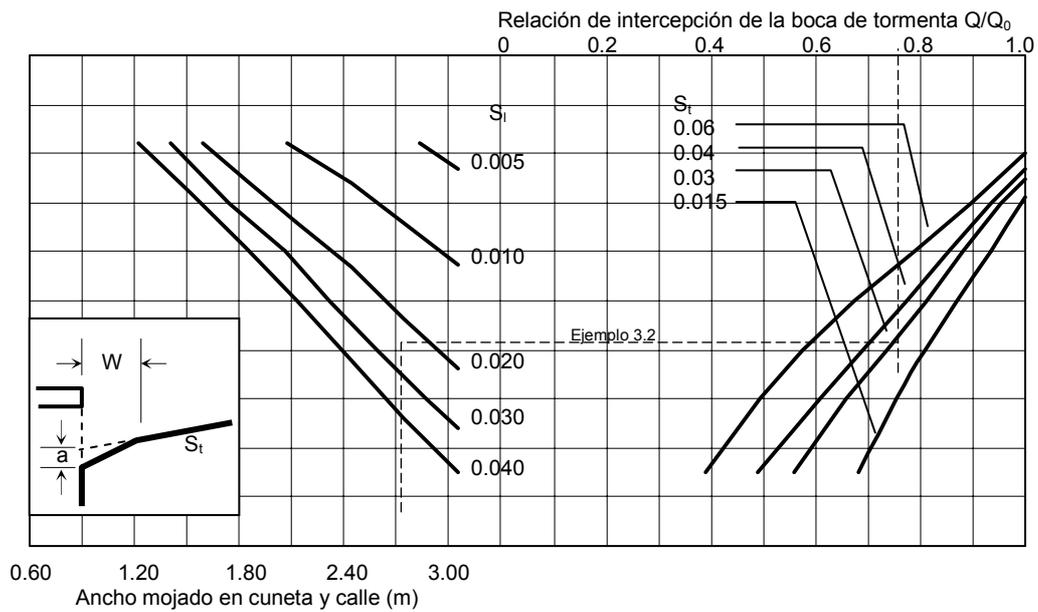


Figura 10.19. Capacidad de una Boca de Tormenta Vertical en cordón en Puntos Intermedios.
 $W = 0.60$ m; $a \geq 0.050$ m; $L = 4.57$ m; $y_0 \leq h$. UDFCD (1984)

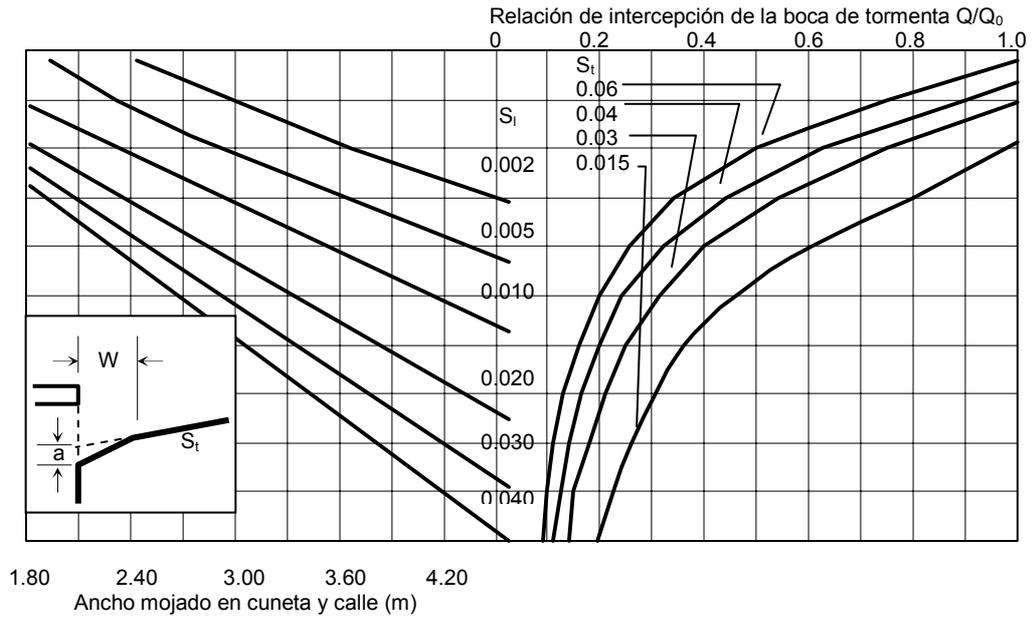


Figura 10.20. Capacidad de una Boca de Tormenta Vertical en cordón en Puntos Intermedios.
 $W = 0.91$ m; $a \geq 0.076$ m; $L = 1.52$ m; $y_0 \leq h$. UDFCD (1984)

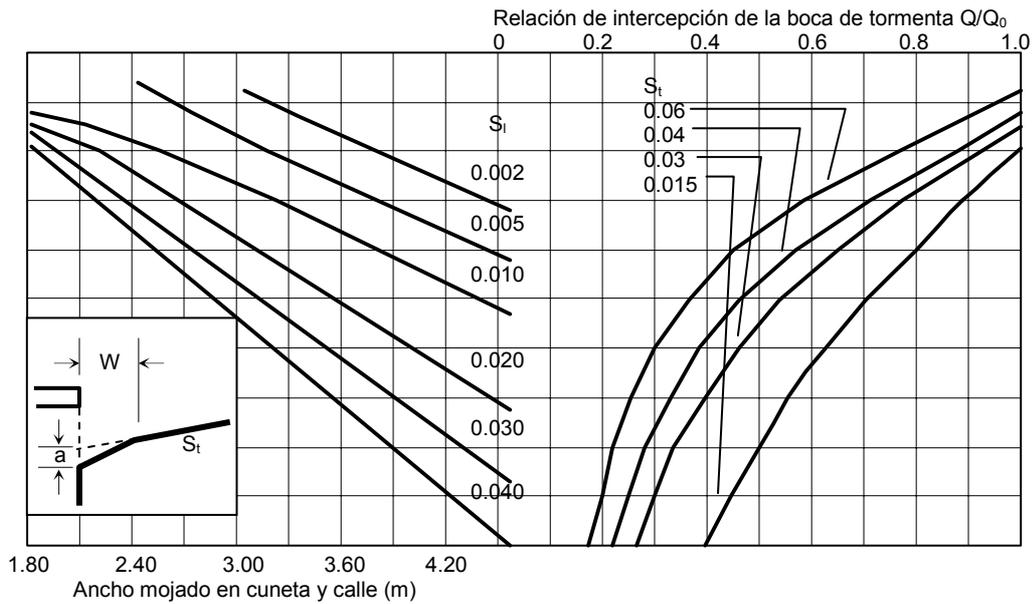


Figura 10.21. Capacidad de una Boca de Tormenta Vertical en cordón en Puntos Intermedios.
 $W = 0.91$ m; $a \geq 0.076$ m; $L = 3.04$ m; $y_0 \leq h$. UDFCD (1984)

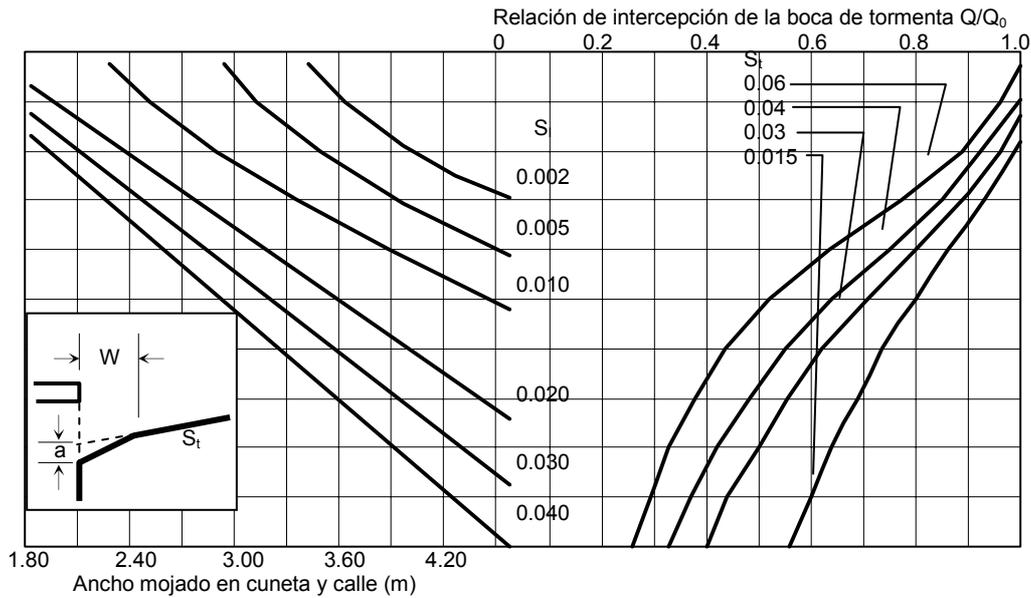


Figura 10.22. Capacidad de una Boca de Tormenta Vertical en cordón en Puntos Intermedios.
 $W = 0.91 \text{ m}$; $a \geq 0.076 \text{ m}$; $L = 4.57 \text{ m}$; $y_0 \leq h$. UDFCD (1984)

B. Criterio de diseño basado en formulación empírica de Guo (1997)

Guo (1997) plantea el problema en términos de longitud requerida L_t para una intercepción completa de un caudal dado circulando por la cuneta. La formulación empírica propuesta es:

$$L_t = 0.817 Q_0^{0.42} S_l^{0.30} \left(\frac{1}{\eta S_e} \right)^{0.6} \tag{10.14}$$

donde L_t (m) es la longitud teórica requerida, Q_0 (m^3/s) el caudal circulando por la cuneta y a interceptar en su totalidad, S_l (m/m) la pendiente longitudinal de la calle, η coeficiente de resistencia de Manning y S_e (m/m) una pendiente transversal ponderada en la cuneta en la boca, que se puede determinar como:

$$S_e = S_t + S_w E_0 \tag{10.15}$$

Con S_t (m/m) pendiente transversal de la calle y S_w (m/m) pendiente transversal de la cuneta (ver Figura 10.23) y $E_0 = Q_x / Q_0$ es la relación entre la porción de caudal circulante por la calle que escurre por encima de la cuneta Q_w y el caudal total que escurre por la calle Q_0 . En la Figura 10.23 se muestra la sección mojada de calle y cuneta y el caudal Q_w es el que escurre por el área abcd. Guo (1997) denomina a este flujo como flujo frontal conducido por la cuneta de ancho W .

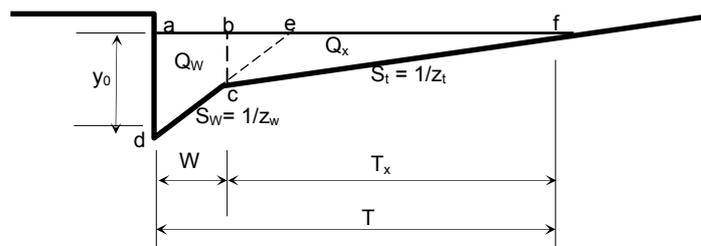


Figura 10.23. División de caudales en sección transversal calle-cuneta

Aplicando la ec.(10.13) en términos de pendientes el caudal total Q_0 por la sección de la calle se puede evaluar como:

$$Q_0 = 0.375 \frac{1}{\eta} S_i^{0.50} \left[\frac{y_0^{2.67}}{S_w} - \left(\frac{y_0}{S_w} - W \right)^{2.67} S_w^{1.67} + \frac{S_w^{2.67}}{S_t} \left(\frac{y_0}{S_w} - W \right)^{2.67} \right] \quad (10.16)$$

La ec. (10.16) es equivalente a determinar el caudal escurriendo por la sección por el método de la subdivisión de área presentado en el capítulo Calles y aplicado en Ejercicio 10.2

El flujo frontal Q_x que escurre por la cuneta en el ancho W lo determinan los dos primeros términos del corchete de la ec. (10.16), que significa al caudal circulante por la sección abecd restarle el caudal circulante por bec, con lo que queda una expresión como:

$$Q_0 = 0.375 \frac{1}{\eta} S_i^{0.50} \left[\frac{y_0^{2.67}}{S_w} - \left(\frac{y_0}{S_w} - W \right)^{2.67} S_w^{1.67} \right] \quad (10.17)$$

La expresión de E_0 se obtiene dividiendo las ecs. (10.17) y (10.16), llegando a:

$$E_0 = \frac{\left[\frac{y_0^{2.67}}{S_w} - \left(\frac{y_0}{S_w} - W \right)^{2.67} S_w^{1.67} \right]}{\left[\frac{y_0^{2.67}}{S_w} - \left(\frac{y_0}{S_w} - W \right)^{2.67} S_w^{1.67} + \frac{S_w^{2.67}}{S_t} \left(\frac{y_0}{S_w} - W \right)^{2.67} \right]} \quad (10.18)$$

Por otro lado la capacidad teórica Q_i de una boca vertical en cordón con una longitud L_i menor que la longitud L_t puede ser aproximada por:

$$Q_i = Q_0 \left[1 - \left(\frac{L_c}{L_t} \right)^{1.8} \right] \quad (10.19)$$

donde Q_i (m^3/s) es el caudal teórico a interceptar y L_c (m) la longitud propuesta de la abertura en cordón. Para la evaluación del caudal real, Guo (1997) recomienda afectar a la longitud propuesta L_c por el coeficiente de reducción (Tabla 1.1) dando lugar a la longitud requerida efectiva L_{ce} :

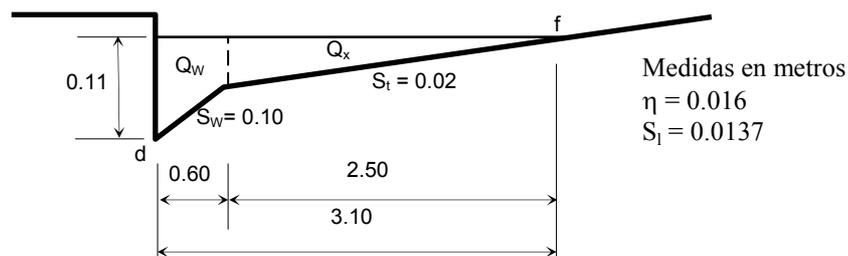
$$L_{ce} = L_c \times \text{factor de reducción} \quad (10.20)$$

y aplicar la fórmula de la ec. (10.19) introduciendo la longitud requerida efectiva.

Ejercicio 10.4. Boca de Tormenta Vertical en Punto Intermedio. Metodología de Guo (1997)

a) Determinar la longitud requerida para interceptar un caudal que circula por una cuneta con las siguientes características geométricas e hidráulicas.

b) Si se cuenta con una boca de tormenta de una longitud de 3.00 m, determinar el caudal a interceptar.



Solución:

1. Determinación del caudal circulante por la cuneta y calle. Se utiliza la expresión de ec.(10.16):

$$Q_0 = 0.375 \frac{1}{0.016} 0.0137^{0.50} \left[\frac{0.11^{2.67}}{0.10} - \left(\frac{0.11}{0.10} - 0.60 \right)^{2.67} 0.10^{1.67} + \frac{0.10^{2.67}}{0.02} \left(\frac{0.11}{0.10} - 0.60 \right)^{2.67} \right]$$

$$Q_0 = 0.113 \text{ m}^3/\text{s}$$

2. Determinación de la relación de caudales Q_w / Q_0 mediante la ec. (10.18)

$$E_0 = \frac{\left[\frac{0.11^{2.67}}{0.10} - \left(\frac{0.11}{0.10} - 0.60 \right)^{2.67} 0.10^{1.67} \right]}{\left[\frac{0.11^{2.67}}{0.10} - \left(\frac{0.11}{0.10} - 0.60 \right)^{2.67} 0.10^{1.67} + \frac{0.10^{2.67}}{0.02} \left(\frac{0.11}{0.10} - 0.60 \right)^{2.67} \right]} = 0.588$$

3. Determinación de la longitud requerida desde ecs. (10.14) y (10.15)

$$S_e = S_t + S_w E_0 = 0.02 + 0.10 \times 0.588 = 0.0788$$

$$L_t = 0.817 \times 0.113^{0.42} 0.0137^{0.30} \left(\frac{1}{0.016 \times 0.0788} \right)^{0.6} = 4.95 \text{ m}$$

4. Si se cuenta con una boca de $L_c = 3.00 \text{ m}$, definiendo el factor de reducción desde Tabla 10.1, la longitud efectiva resulta $L_{ce} = 0.80 \times 3.00 \text{ m} = 2.40 \text{ m}$. El caudal realmente captado será:

$$Q_i = 0.113 \left[1 - \left(\frac{2.40}{4.95} \right)^{1.8} \right] = 0.082 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Por lo que $(0.113 \text{ m}^3/\text{s} - 0.082 \text{ m}^3/\text{s}) = 0.031 \text{ m}^3/\text{s}$ continuarán hacia otra boca en la dirección aguas abajo.

C. Formulación de ecuaciones de energía y de John Hopkins University (1956a)

En la Figura 10.9 se ha mostrado una boca de tormenta vertical típica con depresión, emplazada en punto intermedio. Considerando el perfil longitudinal de la figura y asumiendo que el gradiente de energía en la transición es prácticamente el mismo que la pendiente de la calle (flujo uniforme en cuneta), la pérdida de energía en la transición de longitud L_1 es $S_l L_1$. Aplicando la ecuación de conservación de energía se tiene:

$$\frac{V_0^2}{2g} + y_0 + z = \frac{V^2}{2g} + y + S_l L_1 \quad (10.21)$$

donde $z = S_l L_1 + a$; $V_0 = Q_0/A_0$ y $V = Q_0/A$, la ec. (10.21) puede ser transformada en:

$$\frac{Q_0^2}{A_0^2 2g} + y_0 + S_l L_1 + a = \frac{Q^2}{A^2 2g} + y + S_l L_1 \quad (10.22)$$

En la ec. (10.22) las incógnitas son el tirante (y) en la reja y el área mojada transversal $A = f(y)$ asociada. Asumiendo que la superficie libre del agua en el extremo aguas arriba de la reja es horizontal en la dirección perpendicular al eje de la calle (ver Corte B-B Fig. 10.9), el área mojada A puede ser definida en función del tirante (y) $A = f(y)$ para un determinado perfil transversal de calle y cuneta. La ec. (10.22) puede ser resuelta mediante un proceso iterativo. Para el caso de bocas sin depresión $a = 0$ $y = y_0$ y por lo tanto no corresponde plantear la ec. (10.21).

Ecuación de John Hopkins University (1956a)

Partiendo de conocer el tirante (y) en la abertura en cordón (con o sin depresión) Johns Hopkins University (1956a) planteó para la determinación de la capacidad teórica por unidad de longitud una ecuación del tipo:

$$\frac{Q}{L} = (K + C) 4.428 y^{1.5} \quad (10.23)$$

donde $Q(m^3/s)$ es el caudal teórico a captar, $L(m)$ la longitud de la boca, $y(m)$ el tirante en la abertura en cordón y K y C son coeficientes empíricos adimensionales que dependen mayormente de características geométricas e hidráulicas.

a) Bocas sin depresión $a = 0$

En este caso $C = 0$; $y = y_0$; $\tan \theta = \tan \theta_0$ y el valor de K asume valores de

$\tan \theta_0 = z$	K
12	0.23
24	0.20
48	0.20

Tabla 10.2. Valores de coeficiente empírico K para bocas sin depresión

b) Bocas con depresión $a > 0$

Se realizaron ensayos para una conformación geométrica de la depresión (ver Figura 10.9) en la que $L_1 = 10a$; $L_2 = 4a$; $W = 8a$ y $a = b$.

El valor de K resultó $K = 0.23$ y el coeficiente C se estableció como:

$$C = \frac{0.45}{1.12^{x F_r^2}} \quad (10.24)$$

donde F_r es el número de Froude del flujo, pudiéndose establecer como:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gA/T}} \quad (10.25)$$

en tanto que x se estableció como la relación geométrica:

$$x = \frac{L}{a \tan \theta} \quad (10.26)$$

En la ecs.(10.25) y (10.26) $V(m/s)$ es la velocidad del flujo frente a la boca, $A (m^2)$ el área mojada transversal en la depresión, $T(m)$ el ancho superficial mojado en la depresión, $g (m/s^2)$ la aceleración de la gravedad, $L(m)$ la longitud de la abertura, $a(m)$ la profundidad de la depresión y θ el ángulo respecto a la vertical del fondo de la depresión.

En el caso en que $L_2 \neq 4a$ y $a \neq b$ el parámetro x puede ser descrito por:

$$x = \frac{L}{a_1 \tan \theta} \quad (10.27)$$

siendo a_1 :

$$a_1 = \frac{b - S_1 L_2}{1 - 4 S_1} \quad (10.28)$$

donde b (m) es la profundidad de la depresión aguas abajo, S_1 (m/m) la pendiente longitudinal de la cuneta y L_2 (m) la longitud de la transición de la depresión a la cuneta del lado aguas abajo.

C. Bocas de Tormenta Deflectoras

Las bocas de tormentas deflectoras son bocas de tormentas verticales en cordón, en puntos intermedios de pendiente continua, con ranuras diagonales orientadoras del flujo hacia la abertura del cordón (ver Figura 10.24). Las salientes entre ranuras son denominadas deflectores de flujo, lo que le da nombre a este tipo de boca. Los deflectores incrementan la capacidad de la boca de tormenta vertical creando mediante la generación de una onda el desvío de la corriente hacia el interior de la boca. El valor del ángulo entre el eje del cordón y los deflectores que ha mostrado ser más eficiente es $\alpha = 45^\circ$.

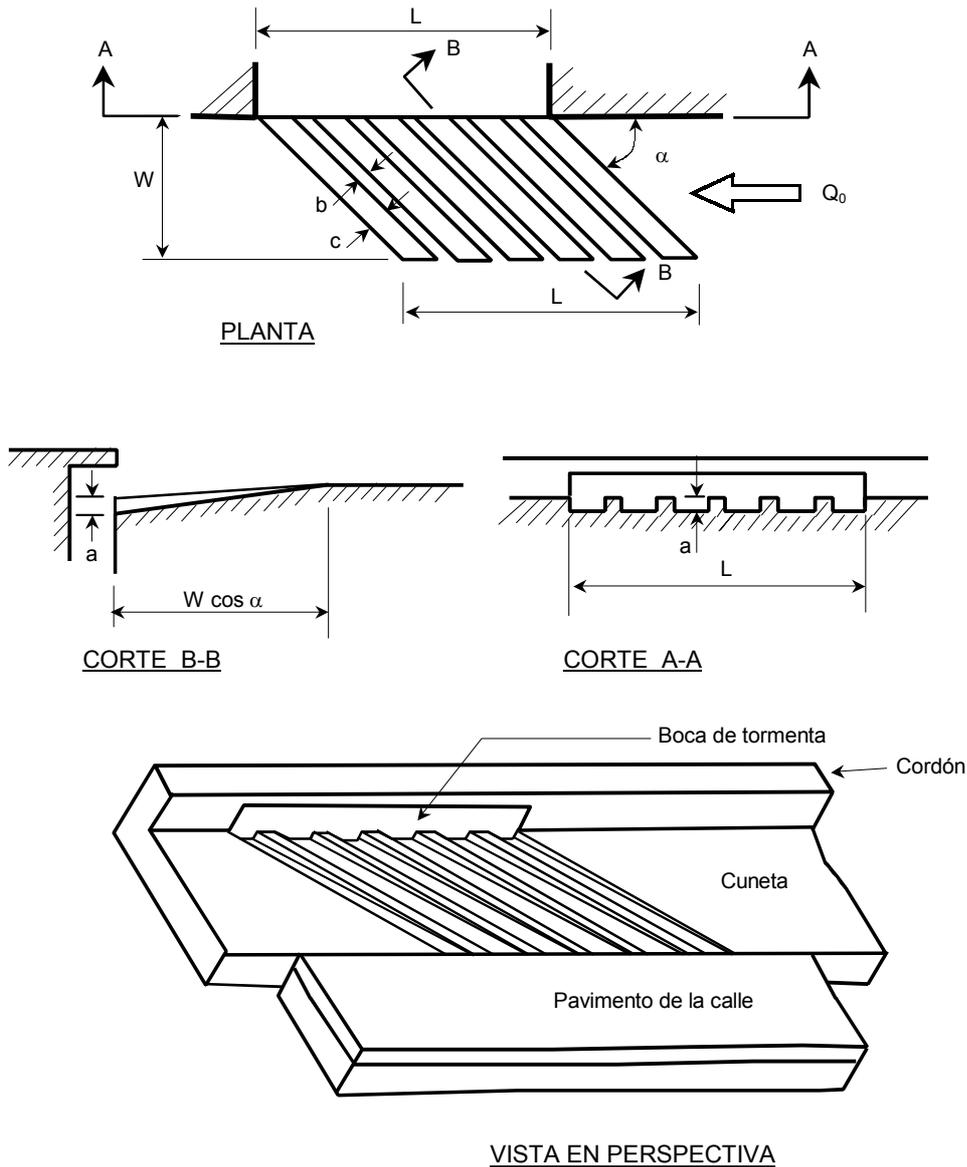


Figura 10.24. Boca de Tormenta Deflectora

El procedimiento de diseño que se presenta es el citado en UDFCD (1984) que a su vez fue tomado de John Hopkins University (1956b). La capacidad teórica de intercepción está dada por la siguiente formulación:

$$Q = 0.058 \frac{1}{\eta} \left(\frac{c}{b} \right)^{0.05} [S_1 g L W]^{0.50} y_0^{1.50} \tag{10.29}$$

donde Q (m^3/s) es el caudal teórico a interceptar, η el coeficiente de resistencia de Manning, $c(m)$ es el ancho de la ranura, b (m) es el ancho del borde saliente, S_l (m/m) la pendiente longitudinal de la cuneta, g (m^2/s) la aceleración de la gravedad, $L(m)$ la longitud de la abertura en cordón, W (m) el ancho de los deflectores (proyección en un plano perpendicular al cordón).

Resulta interesante notar la no aparición de la pendiente transversal en la ec. (10.29). Solamente está involucrada en la determinación de y_0 .

Es importante destacar los rangos de variación de los parámetros utilizados en laboratorio para determinar la ec. (10.29), lo que establece el rango de validez de tal formulación. Los ensayos fueron ejecutados con:

#	W/L	variando de 1/3 a 1/1
#	a/L	variando de 1/25 a 1/50
#	S_l/η	variando de 12 a 22
#	Q/Q_0	variando de 0.70 a 1.00.
#	S_l	variando de 0.02 a 0.10
#	Q	variando de 0.042 m^3/s a 0.100 m^3/s

Una limitación en el uso de la ec.(10.29) para el diseño de bocas deflectoras es el acotado rango de caudales de diseño en el cual fueron llevados a cabo los trabajos originales de laboratorio. Además el ancho de inundación en los ensayos no excedió las 2.5 veces el ancho W de los deflectores. Por lo que para considerar válidos los resultados de la ec.(10.29) debe garantizarse tal relación, lo que para anchos de inundación elevados puede llevar a diseño de deflectores demasiados extensos. Para anchos de inundación superiores a 2.5 veces W el procedimiento aquí expuesto no ha sido verificado.

Cuando son necesarias configuraciones de los deflectores diferentes a los aquí presentados el criterio hidráulico de diseño es generar una rugosidad en la boca semejante a la generadas en los ensayos. En el caso de utilización de deflectores no rectangulares el criterio para el cálculo de la capacidad de captación es considerar para el cálculo una boca con ranuras y bordes rectangulares con igual rugosidad a la propuesta y considerar sus capacidades equivalentes.

El efecto sobre el tránsito de los deflectores fue analizado en modelos a escala real. Se variaron diferentes anchos de ranuras, comprobándose que anchos entre 0.05 a 0.10 m no transmiten vibraciones importantes a los ocupantes de los automóviles. Por otro lado cuando se utilizaron anchos de ranuras de 0.18 m fueron determinadas vibraciones considerables cuando los automóviles atravesaban las estrías.

10.3.2 Bocas de Tormenta Horizontales

10.3.2.1 Elementos Característicos

En la Figura 10.17 se presentan los elementos característicos de una boca de tormenta horizontal en solera con reja.

Los principales parámetros geométricos e hidráulicos representados en la Figura 10.25 de las bocas de tormentas horizontales y la cuneta transportadora del flujo son:

a : depresión aguas arriba (contra cordón)	b: depresión aguas abajo
h : altura de abertura en cordón	L : longitud de la boca
L_1 : longitud depresión aguas arriba	L_2 : longitud de depresión aguas abajo
S_t : pendiente transversal calle	$S_w = \tan \theta_0$: pendiente transversal de cuneta
θ_0 : ángulo del fondo de cuneta respecto a vertical	
θ : ángulo del fondo de la depresión respecto a vertical	
W: ancho de la cuneta	S_l : pendiente longitudinal calle
y' : tirante en el punto de unión de pendiente transversal calle y pendiente de cuneta	
Q_0, A_0, y_0, V_0 : variables hidráulicas en cuneta caudal, área mojada, tirante máximo y velocidad	
Q : caudal captado en boca de tormenta	$q = Q_0 - Q$: caudal remanente en cuneta
A_u : área útil reja	e: espaciamiento entre barras longitudinales
L : longitud de la BT y de la reja	
L_0 : longitud necesaria para captar el 100% del agua que escurre sobre la cuneta propiamente dicha	
p: perímetro de la reja	t: espesor de las barras longitudinales

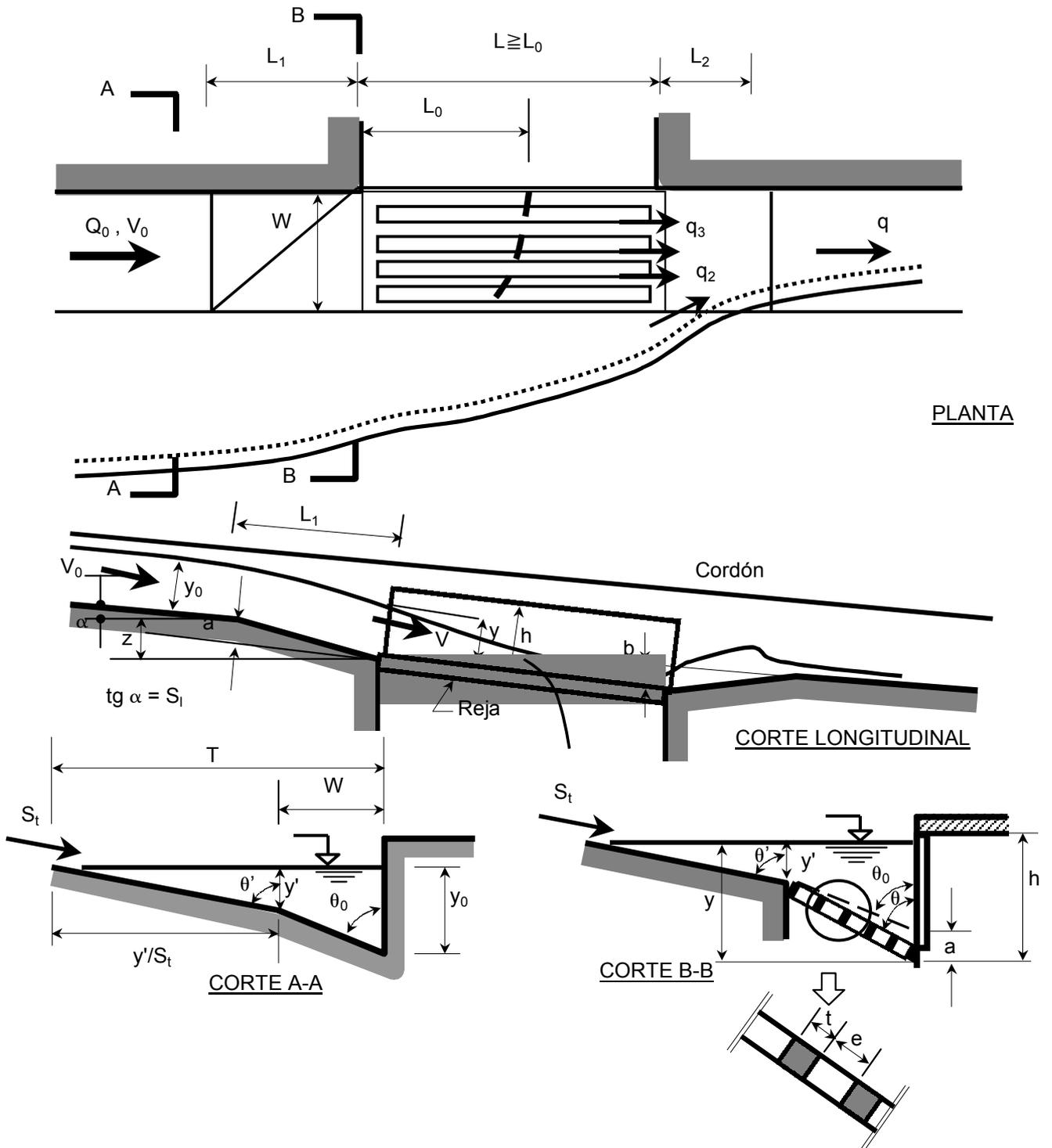


Figura 10.25. Boca de Tormenta Horizontal en solera en Punto Intermedio y con depresión

10.3.2.2 Bocas de Tormenta Horizontales en Puntos Bajos

Una boca de tormenta horizontal en un punto bajo actúa dependiendo del tirante como un vertedero con una longitud de vertido igual al perímetro de las aberturas y como una serie de orificios cuando la altura de agua es importante.

A. Evaluación con formulaciones de vertedero y orificio

Tanto Bertoni et al. (1995) como Guo (1997) presentan las mismas ecuaciones con algún matiz diferenciado en el rango de utilización. Bertoni et al. (1995) sugiere para tirantes inferiores a 0.12 m la utilización de una ecuación de vertedero y para tirantes superiores a 0.42 m una ecuación de orificio, para el rango intermedio se define una zona de flujo inestable. Guo (1997) establece como límite para la consideración como orificio un valor de tirante sobre la reja $y > 1.792 (A_u/P_R)$, donde A_u es el área útil de la reja y $P_R(m)$ es el perímetro vertedor (ver Figura 10.26)

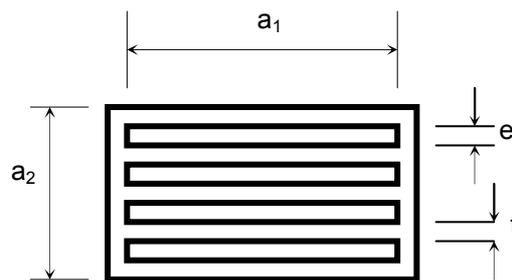


Figura 10.26. Dimensiones características de una reja horizontal

El perímetro vertedor de la reja $P_R(m)$ puede ser estimado como:

$$P_R = 2 [a_1 + a_2 - t(n - 1)] \quad (10.30)$$

donde $a_1(m)$ y $a_2(m)$ son las dimensiones internas de la reja, n es el número de aberturas y $t(m)$ es el espesor de los barrotes

Asimismo, el área útil $A_u(m^2)$ de la abertura horizontal se define como:

$$A_u = n a_1 e \quad (10.31)$$

donde $e(m)$ es el espesor de la abertura entre barrotes.

$$\text{Caso } y \leq 1.792 (A_u/P_R) \rightarrow \text{Vertedero} \quad \frac{Q}{P_R} = 1.656 y^{1.5} \quad (10.32)$$

donde Q (m^3/s) captado por la reja horizontal e $y(m)$ el tirante de agua sobre la reja.

$$\text{Caso } y > 1.792 (A_u/P_R) \rightarrow \text{Orificio} \quad \frac{Q}{A_u} = 2.91 y^{0.50} \quad (10.33)$$

B. Criterio de John Hopkins University (1956a) y UDFCD (1984)

Según resultados de ensayos llevados a cabo por John Hopkins University (1956a), han indicado que la aplicación de la fórmula de orificio a una abertura desobstruida en solera de cuneta, constituye una cuantificación satisfactoria de la capacidad de la boca de tormenta.

En UDFCD (1984) se presenta una gráfica mostrando los resultados de los ensayos de John Hopkins University (1956a), expresados en términos de caudal por unidad de área de la abertura en función del

tirante de agua sobre la abertura. Los resultados presentados (Figura 10.27) corresponden a tirantes variando desde 0.075 m hasta 0.25 m y caudales desde $0.60 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$ hasta $1.20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$.

Comparando con la ec. (10.33) el coeficiente multiplicador asociado a la curva de la Figura 10.19 varía desde 2.21 a 2.73.

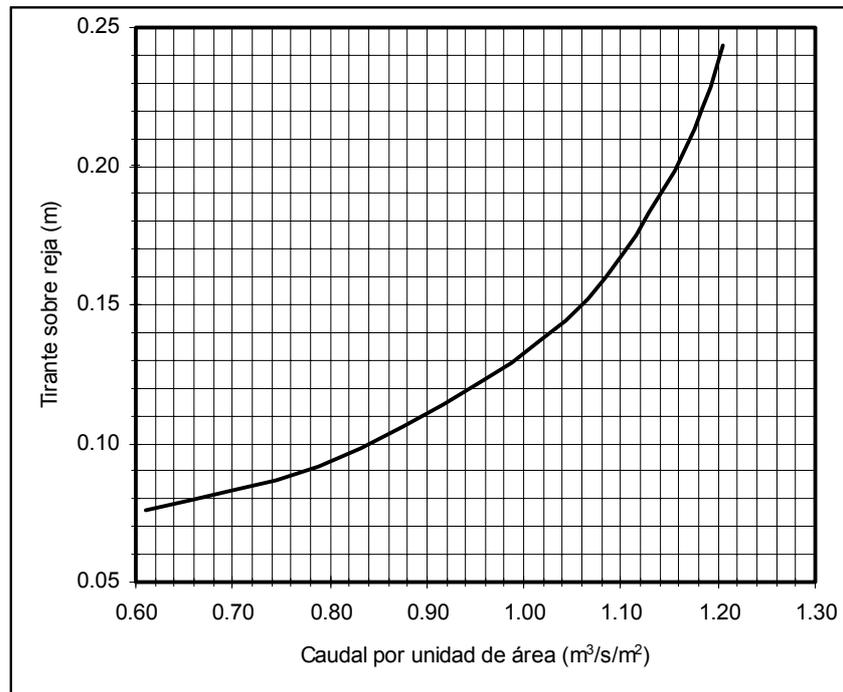


Figura 10.27 Capacidad específica de una boca de tormenta horizontal. Adaptación de UDFCD(1984)

Puede observarse que la relación establecida por la Figura 10.27 no hace distinción en lo referente a la dirección de los barrotes de la reja, puesto que se trata de la capacidad teórica la que debe ser afectada por el coeficiente de reducción establecido en la Tabla 10.1.

Para una condición de punto bajo, el uso de barras longitudinales no reduce significativamente la tendencia de la reja a obstruirse. La sugerencia posible es adoptar la separación entre barrotes de modo tal de permitir el paso de basura. Esta alternativa tiene como gran desventaja el peligro que representa para el tránsito de bicicletas, carritos de bebés y peatones. Debe tenerse en cuenta que el redondeo de los barrotes puede reducir la tendencia al taponamiento.

10.3.2.3 Bocas de Tormentas Horizontales en Puntos Intermedios

A. Planteo del Método de John Hopkins University (1956a)

El análisis del método de John Hopkins University (1956a) puede ser aplicado a todas las configuraciones habituales de bocas de tormentas, a calles con perfiles transversales no habituales, calles con diferentes coeficientes de resistencia de Manning y otras configuraciones de rejillas.

En la Figura 10.25 se muestra una típica boca de tormenta horizontal en solera con depresión, acompañada por una abertura en el cordón, emplazada en punto intermedio. Al igual que en el caso de bocas de tormentas verticales en puntos intermedio, si se considera el perfil longitudinal y se asume que el gradiente de energía en la transición es prácticamente el mismo que la pendiente de la calle (flujo uniforme en cuneta), la pérdida de energía en la transición de longitud L_1 es $S_1 L_1$. Bajo estas hipótesis es válida la conservación de energía planteada en las ecs. (10.21) y (10.22)

Las incógnitas en la ec. (10.22) son el tirante (y) en la reja y el área mojada transversal $A = f(y)$ asociada. Asumiendo que la superficie libre del agua en el extremo aguas arriba de la reja es horizontal en la dirección perpendicular al eje de la calle (ver Corte B-B Fig. 10.25), el área mojada A puede ser definida en función del tirante (y) $\rightarrow A = f(y)$ para un determinado perfil transversal de calle y cuneta. La

ec. (10.22) puede ser resuelta mediante un proceso iterativo. Para el caso de bocas sin depresión $a = 0$ $y = y_0$ y por lo tanto no corresponde plantear la ec. (10.22).

Con la hipótesis de superficie lateral horizontal y perfil transversal conocido, el tirante (y') (Corte C-C Fig. 10.25) en el punto de unión de calle y cuneta y además punto de cambio de pendiente transversal, puede ser determinado en función del tirante (y) de la manera:

$$\text{Boca con depresión } a \neq 0 \quad y' = y - W \operatorname{tg} \theta \quad (10.34a)$$

$$\text{Boca sin depresión } a = 0 \quad y' = y_0 - W \operatorname{tg} \theta_0 \quad (10.34b)$$

donde W (m) es el ancho de la cuneta y θ es el ángulo respecto a la vertical del fondo de la reja cuando existe depresión y θ_0 es el ángulo cuando no existe depresión .

El tirante y' es el factor más importante para el método planteado. La hipótesis asumida para la captación de la reja es que toda el agua que circula en la cuneta por la franja que ocupa la reja en el ancho (W) es captado por la reja. El flujo fuera de tal franja de ancho W , puede ingresar lateralmente a la reja como si fuera una abertura en cordón. Existirá una longitud L' para la cual todo el flujo no ingresante por el ancho W , puede ser captado lateralmente por la boca, en este caso habrá caudal sobrante que escurrirá hacia otra boca aguas abajo (ver Figura 10.28). En el caso en que la longitud $L < L'$, existirá un excedente de flujo (q) que drenará hacia aguas abajo. Tal excedente puede estar constituido por un caudal no ingresante lateralmente (q_2) y un caudal que circula por sobre los barrotes (q_3) y no ingresa a la boca.

El caudal q_3 , escurriendo sobre la reja existirá si la longitud (L) de la reja es menor que un umbral mínimo de longitud L_0 . El valor de L_0 puede ser obtenido empíricamente por la formulación:

$$\text{Boca con depresión} \quad L_0 = mV \sqrt{\frac{y}{g}} \quad (10.35a)$$

$$\text{Boca sin depresión} \quad L_0 = mV_0 \sqrt{\frac{y_0}{g}} \quad (10.35b)$$

donde L_0 (m) es la longitud necesaria para captar todo el ancho escurriendo por el ancho W , V (m/s) es la velocidad del flujo sobre la reja, y (m) es el tirante sobre la reja, V_0 (m/s) es la velocidad en la cuneta, y_0 (m) es el tirante en la cuneta, g (m/s²) es la aceleración de la gravedad y m es una constante empírica que depende de la configuración de la reja. Los valores propuestos para m se presentan en la Tabla 10.3.

Para una captación del 100% es necesaria una longitud teórica L' , la que empíricamente se define como:

$$L' = 1.20 V \tan \theta' \sqrt{\frac{y'}{g}} \quad \text{Boca con depresión} \quad (10.36a)$$

$$L' = 1.20 V_0 \tan \theta' \sqrt{\frac{y'}{g}} \quad \text{Boca sin depresión} \quad (10.36b)$$

donde L' (m) es la longitud teórica, V (m/s) la velocidad del flujo sobre la reja, V_0 (m/s) es la velocidad en la cuneta, θ' es el ángulo respecto a la vertical del plano transversal de la calle, g (m/s²) es la aceleración de la gravedad e y' (m) es el tirante de agua considerado sobre el punto de unión entre el perfil transversal de la calle y la cuneta.

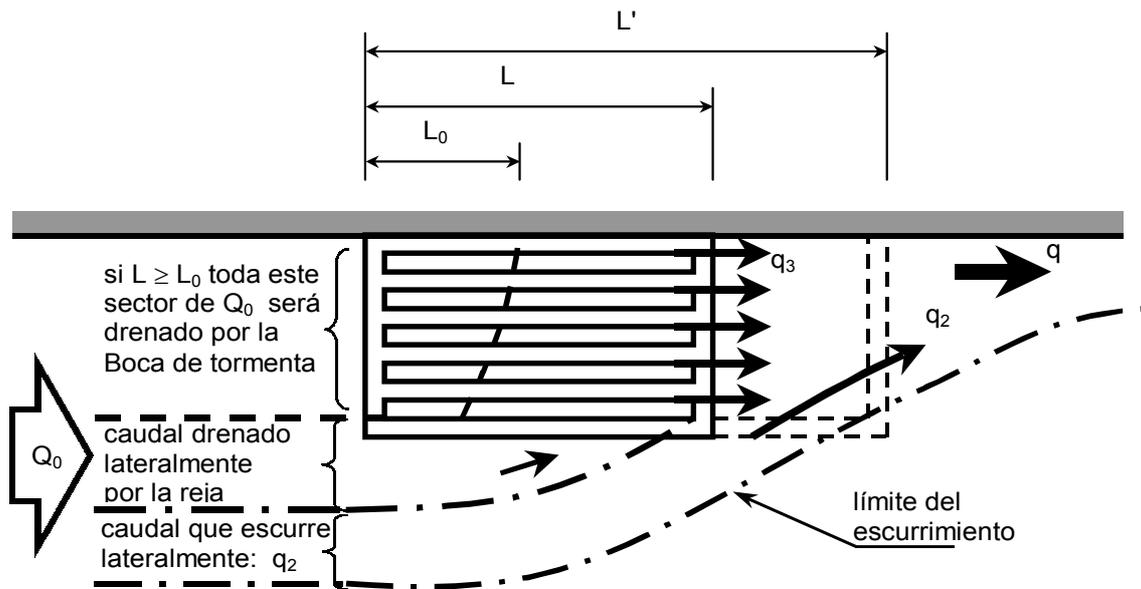


Figura 10.28. Límites de escurrimiento asociados a una reja horizontal

Tabla 10.3. Coeficiente empírico m para determinación de longitud \$L_0\$

Descripción de la boca	m
Boca de tormenta horizontal con ancho de barrote menor o igual a la separación \$t \le e\$ y con pocas barras transversales	4.0
Boca de tormenta horizontal con ancho de barrote menor o igual a la separación \$t \le e\$ y con muchas barras transversales	8.0
Boca de tormenta combinada (horizontal y vertical) con ancho de barrote menor o igual a la separación \$t \le e\$ y con pocas barras transversales	3.3
Boca de tormenta combinada (horizontal y vertical) con ancho de barrote menor o igual a la separación \$t \le e\$ y con muchas barras transversales	6.6

En el caso en que la longitud \$L\$ de la reja sea menor que \$L'\$ el caudal que no ingresa a la boca y escurre lateralmente \$q_2\$ (Figura 10.28) puede evaluarse mediante:

$$q_2 = 0.25(L'-L)y^{1.5} \sqrt{\frac{1}{g}} \tag{10.37}$$

donde \$q_2\$ (m³/s) es el caudal que escurre lateralmente, \$L'\$(m) la longitud teórica para 100% de captación e \$y\$ (m) el tirante sobre la reja.

Debido a la conformación geométrica de la depresión es posible que la dirección del flujo \$q_2\$ contenga una componente transversal (hacia el cordón) que motive el movimiento de una porción de \$q_2\$ hacia el borde más bajo de la reja, siendo captado por ella. La determinación de este aporte a la boca es sumamente complicado de evaluar y según UDFCD (1984) representa una pequeña porción del total interceptado por la boca, por lo cual es posible despreciarlo.

Bajo condiciones medias, la reja debe ser diseñada de modo tal que la longitud \$L\$ sea mayor que \$L_0\$, la necesaria para interceptar todo el caudal escurriendo por el ancho \$W\$. Si ello resultase impracticable, la cantidad de flujo que escurrirá directamente sobre la reja sin ser captado puede ser aproximado por la ecuación:

$$q_3 = Q_0 \left(1 - \frac{L^2}{L_0^2} \right)^2 \tag{10.38}$$

En este caso el total de flujo que no ingresa a la boca y que escurre hacia aguas abajo es $q = q_2 + q_3$

En la Figura 10.29 se muestra que varias configuraciones de rejas pueden ser utilizadas para captar el mismo flujo escurriendo por cuneta. Estructuralmente, una reja corta y ancha es más deseable. No obstante, una reja larga y angosta es más eficiente que una corta y ancha cuando existe alta probabilidad de taponamiento.

Los experimentos de laboratorio han mostrado que si una boca de tormenta vertical en cordón, con una longitud igual a la reja, es colocada contigua la boca horizontal, el efecto es reducir la longitud L_0 .

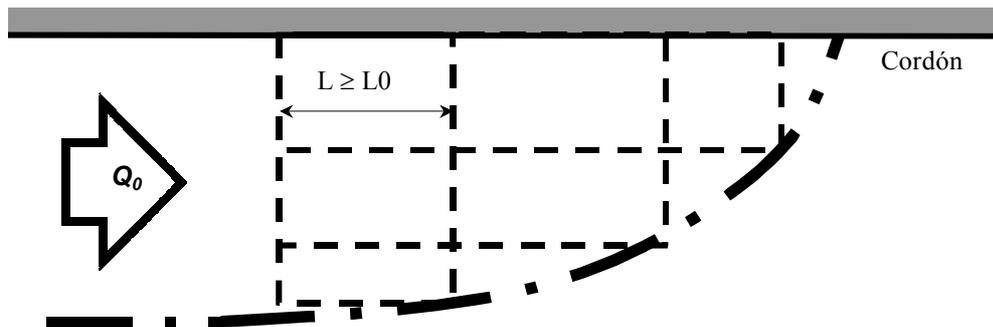


Figura 10.29. Variedad de rejas que logran captar el 100% de flujo

B. Ecuación de Neenah (1977)

La ecuación de Neenah (1977) presentada por Bertoni et al.(1995) plantea el caudal a interceptar de la siguiente manera:

$$Q = 0.205 K y^{5/3} \tag{10.39}$$

donde Q (m^3/s) es el caudal captado, y (m) el tirante sobre la reja y K un coeficiente empírico que depende de la pendiente longitudinal S_l , la pendiente transversal S_t y del tipo de reja. El autor presenta para una reja de 0.90 m de largo x 0.45 m de ancho, mediante un gráfico (Figura 10.30) , la variación de K para pendientes longitudinales variando entre $1\% \leq S_l \leq 6\%$ y pendientes transversales variando entre $0\% \leq S_t \leq 6\%$.

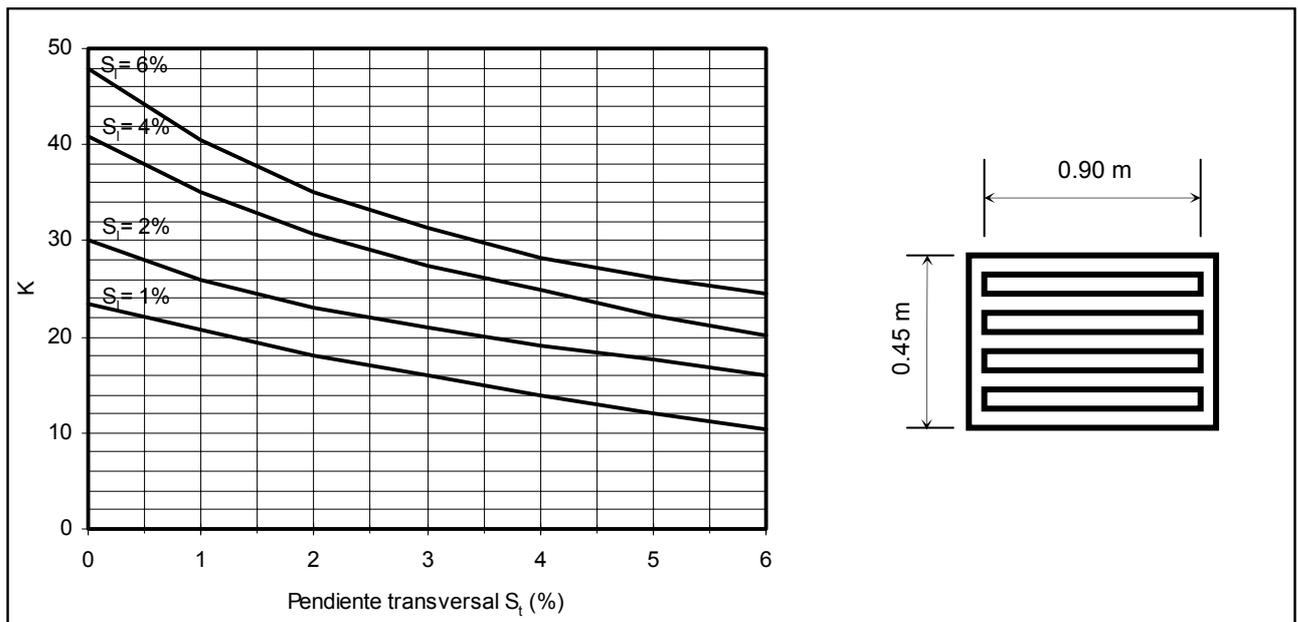


Figura 10.30 Coeficiente empírico de la ecuación de Neenah (1977). Fuente: Bertoni et al. (1995)

10.3.3 Bocas de Tormenta Combinadas

Como ya se mencionara una boca de tormenta combinada está compuesta de una boca vertical en cordón y una boca horizontal en solera. Según Guo (1997) las fórmulas empíricas existentes desarrolladas para diferentes tipos de bocas fueron alcanzadas considerándolas independientemente y no hay demasiado conocimiento aún respecto a la interferencia de la reja horizontal sobre la captación de la boca vertical.

10.3.3.1 En Puntos Bajos

Para bocas combinadas en puntos bajos a los efectos de determinar el caudal a captar pueden considerarse las respectivas ecuaciones para cada tipo y sumar los respectivos caudales determinados.

Ejercicio 10.5. Boca de Tormenta Combinada

Dada una boca combinada con una depresión de 0.05 m, una longitud de boca vertical de 0.90 m, una abertura en cordón de 0.15 m, un área neta de la reja horizontal de 0.28 m² y un caudal proveniente de ambas direcciones de las cunetas de 0.200 m³/s determinar si la capacidad de la boca es adecuada para interceptar dicho caudal considerando un tirante máximo en la cuneta de 0.10 m.

Solución:

1. Altura sobre la reja: tirante máximo + depresión = 0.10 m + 0.05 m = 0.15 m
2. Capacidad de la reja para 0.28 m²: de Figura 10.27 para $y = 0.15 \text{ m} \rightarrow Q/A = 1.06 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$. Para el área neta total de la reja el caudal teórico a captar es : $0.28 \times 1.06 = 0.300 \text{ m}^3/\text{s}$.
3. Capacidad de boca vertical de longitud 0.90 m y tirante en cuneta 0.10 m: de ec. (10.3) $Q = 1.718 \times 0.90 \times 0.10^{1.5} = 0.050 \text{ m}^3/\text{s}$.
4. Capacidad teórica total: $0.300 + 0.050 = 0.350 \text{ m}^3/\text{s}$
5. Capacidad real: de Tabla 10.1 el factor de reducción para boca combinada en punto bajo es 0.65, por lo que la capacidad real de la boca combinada es: $0.350 \times 0.65 = 0.228 \text{ m}^3/\text{s}$

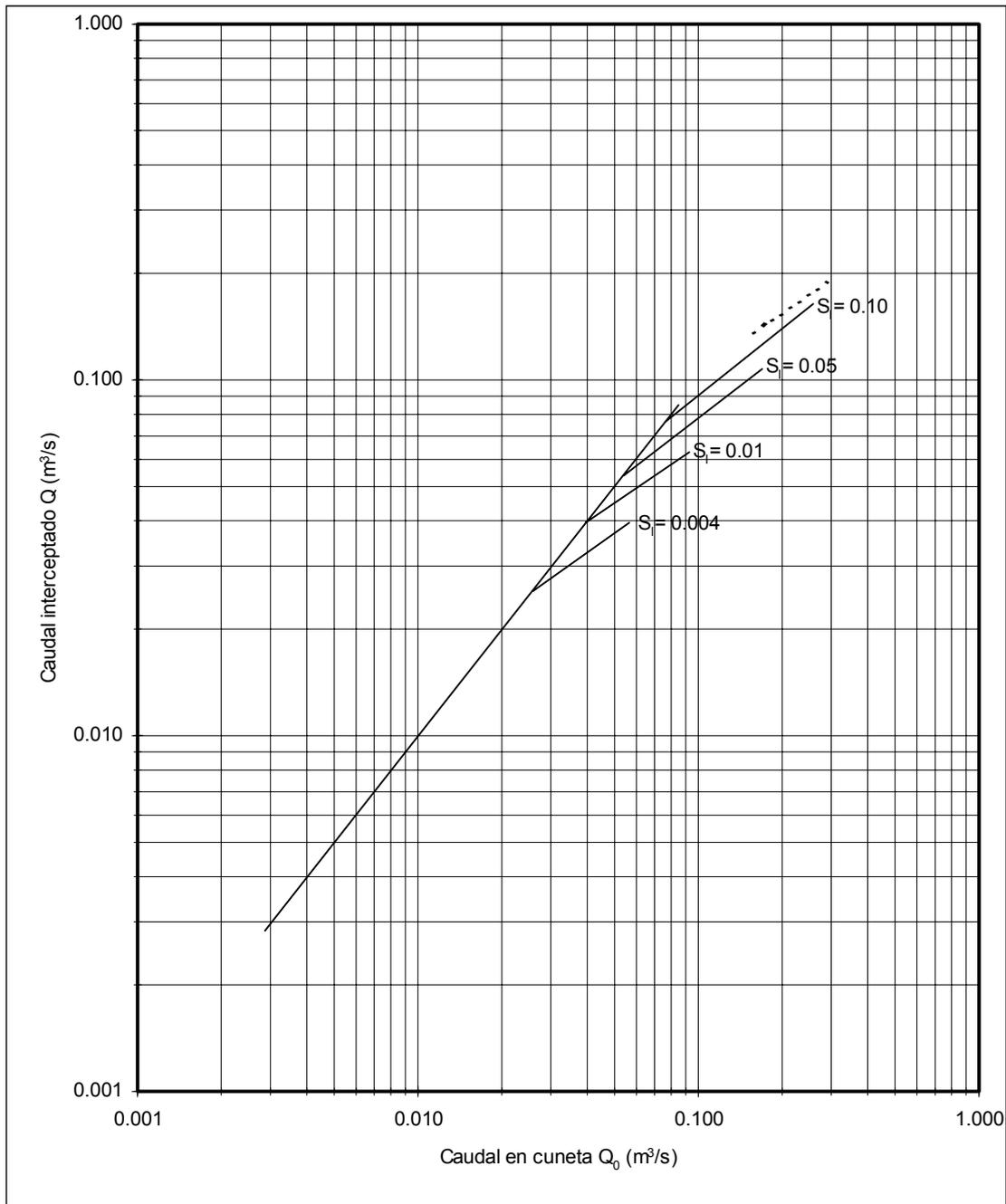
La boca tiene una capacidad de captación suficiente para captar el caudal proveniente de la cuneta con la condición de inundación máxima establecida.

10.3.3.2 En Puntos Intermedios

Para el caso de bocas combinadas en puntos intermedios puede utilizarse el método de John Hopkins University (1956a), considerando como hipótesis que todo el caudal que circula por la franja de ancho W es captado por la reja y que el resto puede ser captado lateralmente por la misma como si fuera una abertura en cordón.

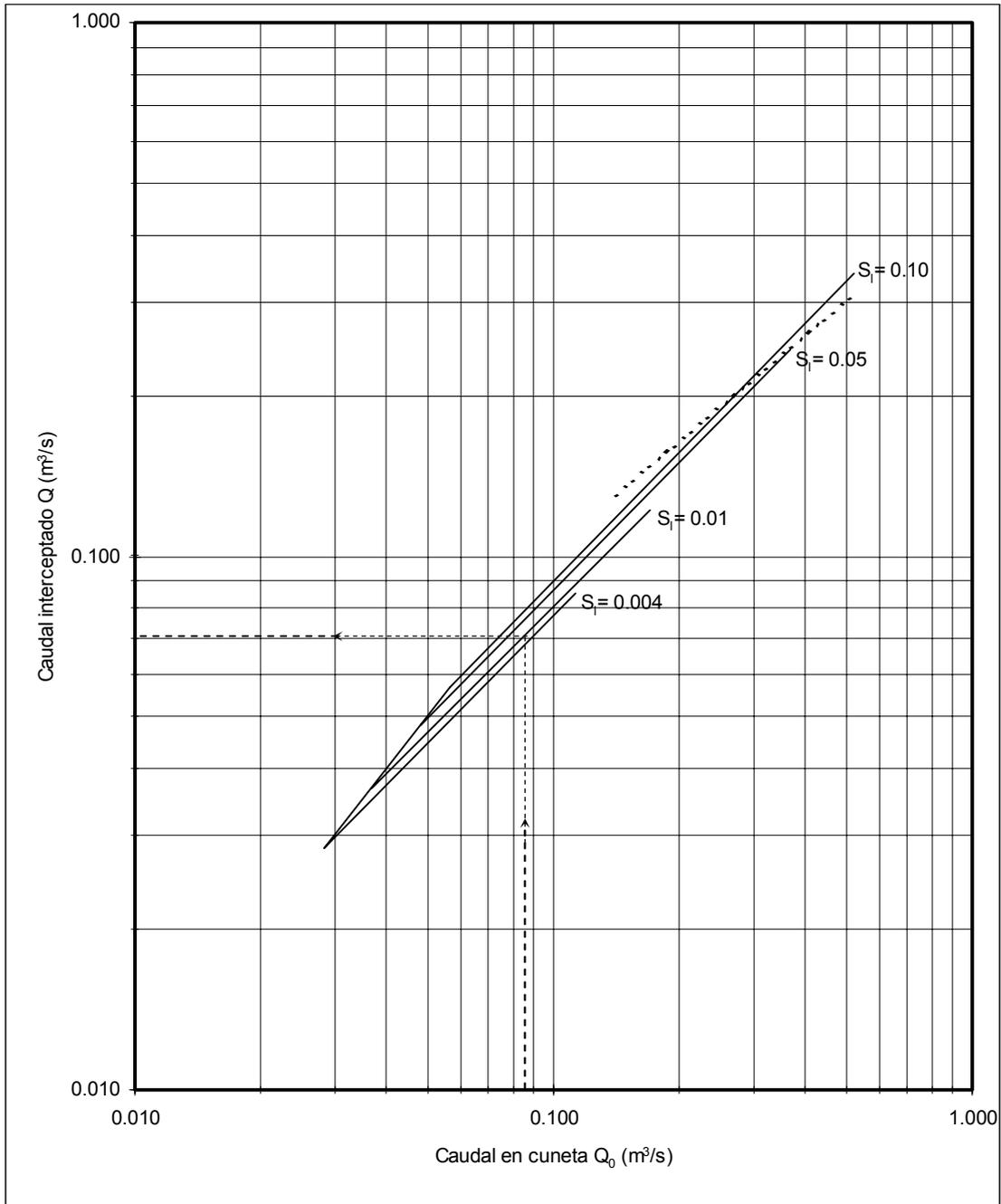
Guo (1997) plantea como hipótesis de cálculo de la capacidad para el caso de bocas combinadas en puntos intermedios, que la boca en cordón se halla inmediatamente aguas abajo que la reja, por lo que ambas bocas funcionan independientemente. En otras palabras, la boca vertical operará sobre el flujo no interceptado por la reja. Es claro que si la longitud de la reja es aquella que permita la captación del 100% del flujo circulante por cuneta (ec. (10.36)) la boca vertical no recibirá flujo alguno. Para poder asumir que ambas bocas pueden ser consideradas funcionando independientemente debe existir una altura de agua considerable sobre la reja. Guo (1997) fija la altura por sobre la cual pueden considerarse en forma independiente en 0.15 m de tirante de agua. En los casos en que altura de agua sea inferior a 0.15 m Guo (1997) considera como capacidad de la boca combinada a la mayor de ambas consideradas independientemente.

En la Figuras 10.31 a 10.33 se presentan gráficos para diseño, derivados por UDFCD (1984) para situaciones comunes encontradas en la Región de Denver (EEUU). Las configuraciones de calles, cunetas y bocas de tormentas con que se dedujeron las gráficas se presentan en la Figura 10.34. La resistencia considerada en el escurrimiento por las cunetas fue $\eta = 0.016$. La aplicación de los gráficos se limita a los casos de calles, cunetas y configuraciones de bocas coincidentes con los mostrados.



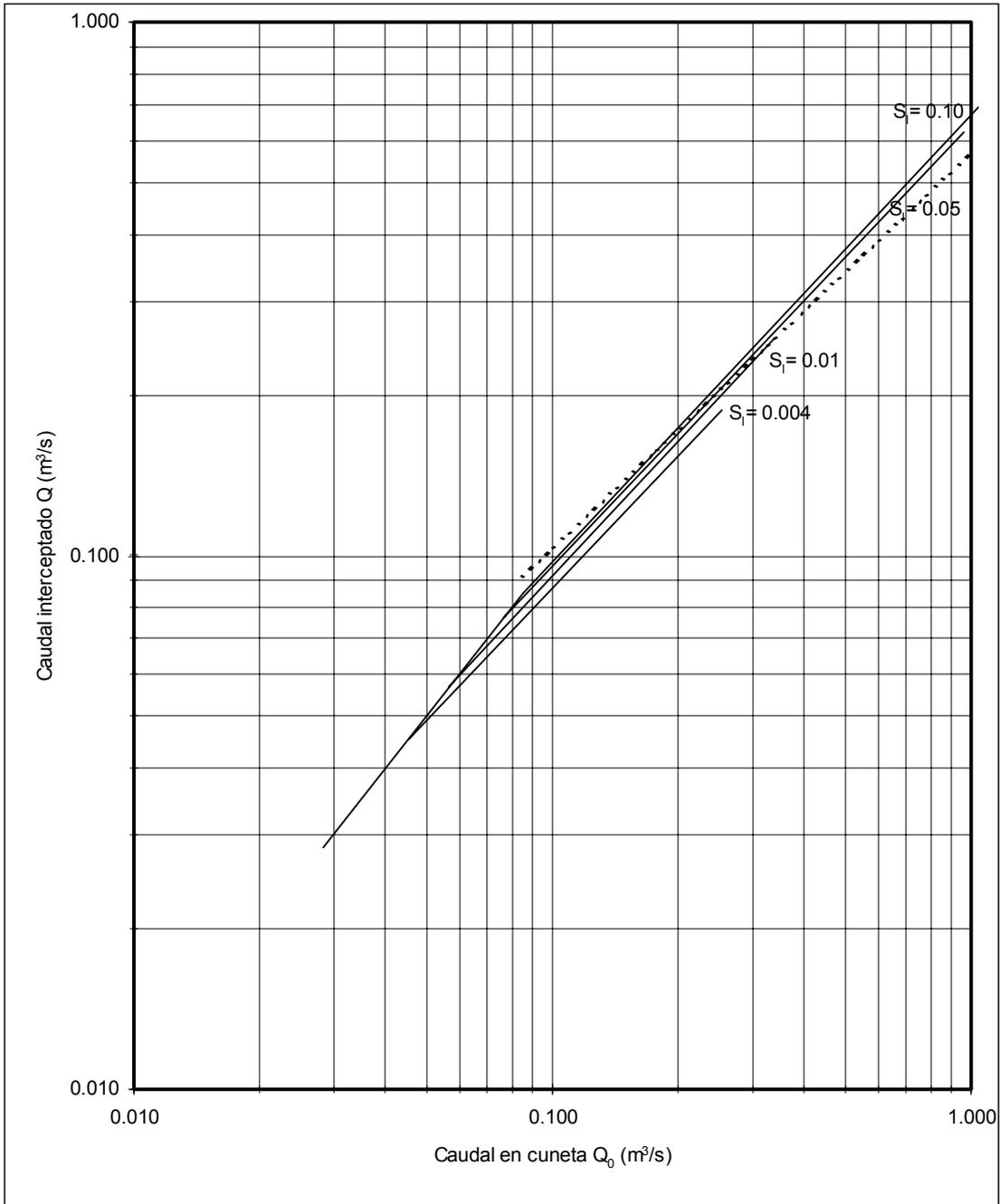
Nota: Para caudales por encima de la línea punteada existirá caudal por la superficie de la reja.

Figura 10.31. Capacidad de Boca de Tormenta Combinada. Barrotes longitudinales.
 $L = 0.90$ m; $W = 0.60$ m; $a = 0.05$ m; $S_t = 0.01$. Fuente: UDFCD (1984)



Nota: Para caudales por encima de la línea punteada existirá caudal por la superficie de la reja.

Figura 10.32. Capacidad de Boca de Tormenta Combinada. Barrotes longitudinales.
 $L = 0.90 \text{ m}$; $W = 0.60 \text{ m}$; $a = 0.05 \text{ m}$; $S_i = 0.02$. Fuente: UDFCD (1984)



Nota: Para caudales por encima de la línea punteada existirá caudal por la superficie de la reja.

Figura 10.33. Capacidad de Boca de Tormenta Combinada. Barrotes longitudinales. $L = 0.90$ m; $W = 0.60$ m; $a = 0.05$ m; $S_i = 0.04$. Fuente: UDFCD (1984)

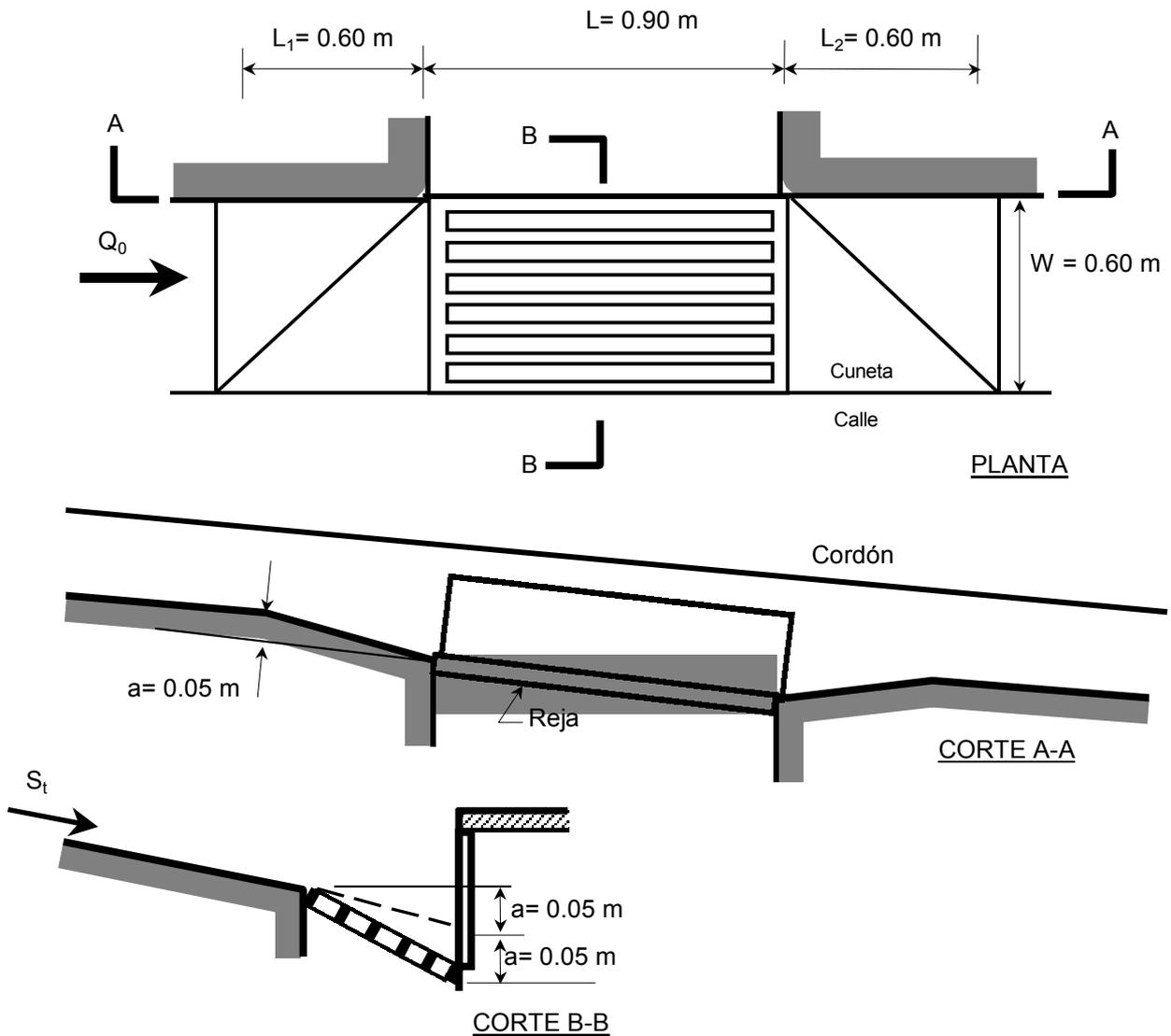


Figura 10.34. Configuración de calle, cuneta y Boca de Tormenta Combinada para el diseño por medio de las Figuras 10.31, 10.32 y 10.33. Fuente: UDFCD (1984)

Ejercicio 10.6. Boca de Tormenta de Tormenta Combinada

Dado un caudal por cuneta $Q_0 = 0.085\text{ m}^3/\text{s}$, una pendiente transversal de la calle $S_t = 2\%$, una pendiente longitudinal de la calle $S_l = 1\%$, una reja de longitud $L = 0.90\text{ m}$ y ancho $W = 0.60\text{ m}$, emplazada con una depresión de 0.05 m , determinar el flujo captado por la boca de tormenta combinada.

Solución:

a) Caudal teórico captado: ingresando a la Figura 10.32 ($S_t = 2\%$) con $Q_0 = 0.085\text{ m}^3/\text{s}$ y alcanzando la curva asociada a la pendiente longitudinal $S_l = 1\%$ se obtiene en el eje de caudal interceptado un valor de $0.071\text{ m}^3/\text{s}$, que representa el caudal teórico captado.

b) Caudal real captado: considerando los valores de la Tabla 10.1 para una boca combinada con reja horizontal con barrotes longitudinales \rightarrow 110% del coeficiente de reja horizontal asociado (60%) \rightarrow coeficiente de reducción de la boca combinada 66%, lo que implica un caudal real captado de $Q = 0.66 \times 0.071\text{ m}^3/\text{s} = \mathbf{0.047\text{ m}^3/\text{s}}$

10.3.4 Bocas de Tormenta Ranuradas

10.3.4.1 En Puntos Intermedios

Como fuera mencionado anteriormente una boca de tormenta o dren ranurado opera como una boca vertical en cordón si su ancho es superior a 0.04 m, cumplida esta condición, todas las formulaciones aplicadas para bocas verticales tiene validez para bocas ranuradas (Guo, 1997).

10.3.4.2 En Puntos Bajos

Cuando una boca o dren ranurado está en un punto bajo según Guo (1997) la boca funcionará claramente como un vertedero si la altura de agua sobre la ranura es menor que 0.06 m y como orificio si la altura es mayor que 0.12 m. El límite puede considerarse en 0.09 m.

$$\text{Caso } (y_0+a) \leq 0.09 \text{ m. Vertedero} \quad Q = 1.27 L_s (y_0 + a)^{1.5} \quad (10.40)$$

donde $Q(\text{m}^3/\text{s})$ es el caudal teórico interceptado, L_s (m) es la longitud neta del dren, y_0 (m) es el tirante en la cuneta aguas arriba de la depresión y a (m) la depresión en las proximidades de la boca.

$$\text{Caso } (y_0+a) > 0.09 \text{ m. Orificio} \quad Q = 0.80 L_s W_s \sqrt{2g(y_0 + a)} \quad (10.41)$$

donde $Q(\text{m}^3/\text{s})$ es el caudal teórico interceptado, L_s (m) es la longitud neta del dren, W_s (m) es el ancho del dren, y_0 (m) es el tirante en la cuneta aguas arriba de la depresión y a (m) la depresión en las proximidades de la boca y $g(\text{m}/\text{s}^2)$ es la aceleración de la gravedad.

10.3.4.3 Capacidad real

Las bocas ranuradas tienen los mismos inconvenientes respecto a la obstrucción y taponamiento que las rejas horizontales en solera, por lo cual a los efectos del cálculo de su capacidad teórica debe considerarse los mismos factores de reducción de la capacidad teórica correspondientes a rejas horizontales.

10.4 BIBLIOGRAFÍA

- ASCE-WEF (American Society of Civil Engineers y Water Environment Federation) (1992), Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems, ASCE Manuals and Reports of Engineering Practice No. 77, WEF Manual of Practice FD-20; American Society of Civil Engineers, New York.
- Bertoni J., Pedraza R. Collins J., Macor J., Pusineri G., Ocampo C. Maza J. y Secchi A. (1995), Apuntes de Curso Sistemas de Drenaje Urbano, Fac. de Ingeniería, Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe. 300 p.
- Guo, J. C. Y. 1997, Street Hydraulics and Inlet Sizing, Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado, USA.
- Johns Hopkins University, 1956a, The design of stormwater inlets. Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD, USA.
- Johns Hopkins University, 1956b, Flow into Deflector Inlets, by W. H. Li, B.C. Goodell and J. C. Geyer, Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD, USA.
- Riccardi G., 2002, Material de Curso Desagües Pluviales, Centro de Ingeniería Sanitaria, FCEIA, UNR, Rosario, Argentina. 200 p.
- UDFCD (1967 a 1994), Drainage Criteria Manual, Vol. 1, 2 y 3, Urban Drainage and Flood Control District, Denver, Colorado, EU, (750 p.)