

Cálculo de Obras de Drenaje Transversal de Carreteras

Víctor Flórez Casillas

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Director del Departamento de Presas y Obras Hidráulicas de FCC CONSTRUCCIÓN, S.A.

VFlorez@fcc.es

Beatriz Iturriaga Núñez

Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos

Departamento de Presas y Obras Hidráulicas de FCC CONSTRUCCIÓN, S.A.

BIturriagaN@fcc.es

Introducción

En este texto se describe el proceso de selección de la obra de drenaje transversal y el método seguido para el cálculo de las variables hidráulicas que la definen.

Existen bastantes sistemas para dimensionar las obras de drenaje transversal si bien, parten la mayoría de ellos de simplificaciones respecto de la aquí desarrollada, y que consisten en la aplicación de una serie de Nomogramas o cálculos gráficos fijando de antemano un tipo de control (entrada o salida). En la mayor parte de los casos este cálculo es suficiente y es en todo caso un paso previo al dimensionado por el sistema descrito a continuación.

La base del método aquí propuesto parte de las recomendaciones realizadas por el Bureau of Public Roads (U.S.A.). En esta publicación se establecen 8 casos y en base a ellos se determinan las condiciones de funcionamiento.

Criterios de Diseño

Previamente se han establecido una serie de condicionantes, algunos de ellos en función de los materiales a emplear. Estos criterios básicos iniciales son los siguientes:

- Altura mínima del conducto en función de la normativa vigente. En España la Instrucción 5.2-IC de Drenaje Superficial de Carreteras determina la altura mínima del conducto en función de su longitud.
- Conducto de planta lo más recta posible, minimizando las modificaciones en el cauce natural, es decir, intentando mantener la dirección y pendiente naturales del cauce.
- Pendiente única en toda la obra de drenaje
- Velocidad máxima para caudal de diseño | 4.5 m/s en ODT de acero corrugado
6.0 m/s en ODT de hormigón
- Entrada no sumergida. Para ello se suele limitar la cota de energía a la entrada de la ODT al 20% de la altura del conducto por encima de la clave, es decir, $1.2 \cdot D$.
- Cota de lámina inferior en 0.50 m a la rasante de la carretera.

Estos condicionantes anteriores son básicos y orientativos pero pudieran verse alterados en pequeña medida, siendo conscientes de lo que ello lleva aparejado. Es decir, podemos admitir que la velocidad sea algo superior a la máxima si el caudal de diseño es elevado o bien si ello nos lleva a un tamaño comercial muy superior, no se debe de olvidar que el caudal de diseño tiene un período de retorno de 100 años.

De forma similar, podemos admitir que la entrada quede sumergida y el conducto funcione como orificio, si bien sería recomendable en ese caso que, para evitar cavitaciones cerca de la entrada, se dispongan tubos de aireación que permitan el acceso del aire al interior.



Obra de drenaje transversal junto a paso inferior en la Autovía de Castilla durante su construcción

Cálculo de Obras de Drenaje Transversal

Una vez establecidos los condicionantes previos pasamos a la metodología de cálculo propuesto por el US Bureau O,P,R.

Datos básicos

- Caudal de diseño: Q , en general para las obras de drenaje transversal corresponde a un período de retorno de 100 años, según se establece en la Instrucción de Carreteras 5.2-IC. Es evidentemente el dato base de partida de todos los cálculos hidráulicos que se van a realizar con objeto de dimensionar los distintos de la obra de drenaje a proyectar.
- Tipo de obra y dimensiones de la misma: es otro de los datos básicos ya que determinará todos los parámetros hidráulicos dependientes de la geometría de la sección (básicamente se emplean secciones circulares, rectangulares simples o múltiples y arcos). La altura de la sección se denomina D para respetar la nomenclatura del US B.O.P.R.
- Tipología de la entrada: se emplea para definir el coeficiente K_e , de pérdidas de carga en la entrada.
- Cota de entrada: Z_e , Cota de salida: Z_a , Longitud de la obra: L , Pendiente de la obra: So , datos necesarios para comparar la pendiente de la obra con la pendiente crítica y para valorar las pérdidas continuas totales a lo largo del conducto.
- Rugosidad del material: el parámetro utilizado es el coeficiente n de rugosidad de Manning que depende fundamentalmente del material del colector. Es necesario para determinar las pérdidas por fricción en el interior del colector, hf .
- Cota de lámina aguas abajo: TW , esta cota viene forzada por las condiciones aguas abajo de la obra, que puede ser debida a la circulación por el mismo del caudal desaguado o bien a una impuesta por la zona de desagüe.

Proceso de cálculo

El proceso seguido consiste en determinar cual de los 8 casos que figuran en la publicación del US Bureau (ver figura en la página siguiente) es el que determina el funcionamiento de la obra.

Para validar cada caso es necesario que se cumplan una serie de condiciones. En algunos casos existe un solo tipo de los 8 que cumple todas las condiciones y ésta será la solución. En caso de existir más de un tipo se adoptará como solución a aquel que sea más conservador. En caso de que la obra en estudio no tenga un funcionamiento recogido por ninguno de los 8 casos se modificarán las condiciones iniciales y se tanteará una nueva obra con diferentes características, tipología, pendiente, cotas de entrada-salida, etc. hasta encontrar una solución.

El proceso seguido para determinar los parámetros básicos de cada posible caso, está ampliamente descrito en la bibliografía y sin más se transcribe aquí de la forma siguiente:

1º. Se determinan las condiciones naturales del cauce para el caudal de diseño. Es decir, a partir de la geometría, pendiente y rugosidad del cauce se estima una cota de agua y el calado crítico. Para ello necesitamos conocer:

- Cotas alta y baja, y longitud de un tramo representativo de la pendiente de dicho cauce.
- Geometría de una sección representativa de dicho cauce, dada por puntos y obtenida, al igual que las cotas, con la cartografía disponible.

De esta forma, se calculan el régimen uniforme y el crítico en dicha sección y se estima, a raíz de los mismos, el TW a la salida de la obra de drenaje con los siguientes criterios: si el régimen es rápido (calado uniforme inferior al crítico), se asumirá como TW el crítico de la ODT, ya que en un cauce de salida natural nunca se alcanza el régimen rápido debido a las turbulencias y a la sucesión de resaltos que se originan. Por el contrario, si el régimen es lento, se asumirá el uniforme de la ODT, ya que se irá remansando hacia él. En cualquiera de los dos casos, se asume el TW mayor, quedando así del lado de la seguridad.



Obra de drenaje con un arco de acero corrugado y protección de escollera con geotextil aguas abajo.

2º. Con estos datos previos, se proceden a calcular las siguientes condiciones de funcionamiento en el interior de la obra de drenaje:

- *Régimen uniforme*, que nos da el calado uniforme y_n dentro de la obra, deduciéndolo según la expresión de las pérdidas por la fórmula de Manning:

$$I = \frac{n^2 v^2}{R_H^{4/3}}, \text{ siendo}$$

I So pendiente del desagüe

n coeficiente de rugosidad de Manning

v velocidad en régimen uniforme con Q, el caudal de diseño y S, la superficie mojada para el calado uniforme yn:

$$v = v_n = Q/S$$

R_H radio hidráulico con S, vista al definir V y P, perímetro mojado para el calado uniforme yn

$$R_H = S/P$$

- *Régimen crítico*: que nos da el calado crítico y_c , y la pendiente crítica Sc , para la sección de desagüe estudiada deduciéndolos según las siguientes expresiones:

$$a) F = \frac{V}{\sqrt{g S/T}}, \text{ siendo}$$

F número de Froude, que es igual a la unidad en régimen crítico: $F=1$

v vista al definir el régimen uniforme pero para el calado crítico y_c : $v=v_c$

S idem que V

T tirante de la lámina de agua en el desagüe para el calado crítico y_c

$$b) I = \frac{n^2 V^2}{\frac{4}{R_H^3}}$$

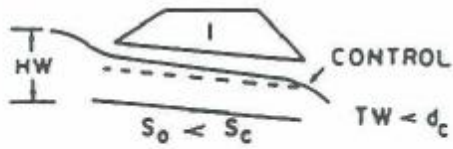
con todas las variables iguales que la del régimen uniforme y siendo en este caso para el crítico, con lo que se obtiene: $Sc = 1$.

Al final del texto se adjuntan unos gráficos sacados de “Hydraulic Design of Highways Culverts” de la FHWA, donde se pueden obtener de forma rápida

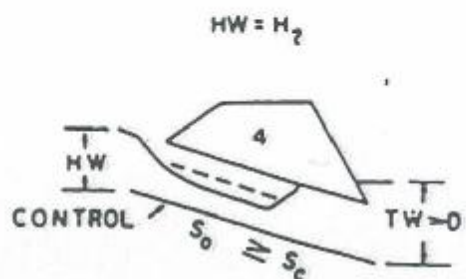
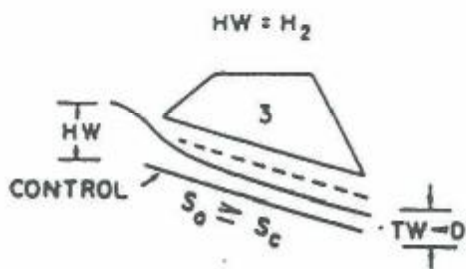
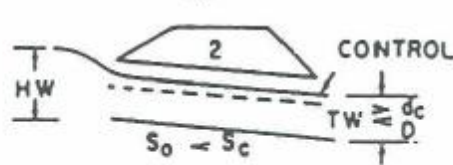
- *Régimen marcado por un calado TW en el desagüe*. Se calcula como el uniforme para este calado que en caso de ser superior a la altura del desagüe se calculará para un calado igual a dicha altura, es decir, a sección llena.
- *Régimen marcado por un calado 1.1· y_c* . Se calcula igual para este calado o a sección llena en caso de superar la altura de la obra.
- *Régimen marcado por un calado de 2/3 de la altura*. Se calcula igual que las anteriores para este calado.

CLASE I
SUPERFICIE DE AGUA LIBRE
 HW ≈ 1.20

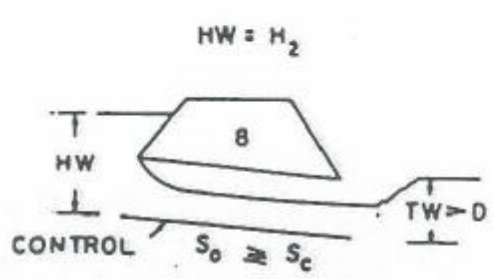
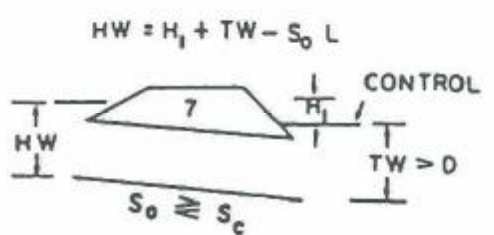
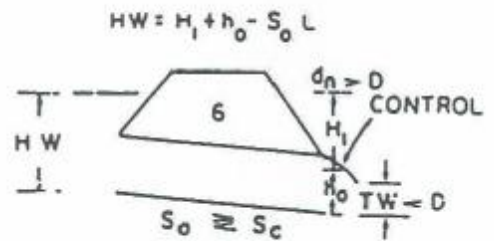
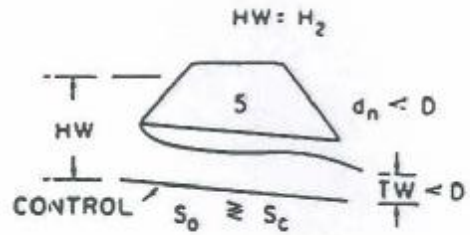
$$HW = d_c + \frac{V_c^2}{2g} + h_e + h_f - S_n L$$



$$HW = TW + \frac{V_{TW}^2}{2g} + h_e + h_f - S_0 L$$



CLASE II
ENTRADA SUMERGIDA
 HW ≈ 1.20



- 3°. Una vez realizados estos cálculos, se determinan las pérdidas continuas en el interior de la obra de desagüe estudiada, h_f , tomándose estas como las dadas por la fórmula de Manning:

$$h_f = \left(\frac{n^2 v^2}{R_H^{4/3}} \right) L$$

en la que todos los términos que aparecen ya han sido descritos. Estas pérdidas se determinan para todos los regímenes que se han estudiado (con calados, y_n , y_c , I.1 y_c y D) y se adoptan para el cálculo las siguientes:

- si $S_o < S_c$ (pendiente suave), se adoptan las dadas por el calado menor entre y_n , y $1.1 \cdot y_c$
- si $S_o = S_c$ (pendiente crítica), se adoptan las dadas por el calado crítico y_c
- si $S_o > S_c$ (pendiente fuerte), se adoptan las dadas por el calado uniforme y_c

En ningún caso se toma esta pérdida menor a la dada por el calado correspondiente a la sección llena, D, ya que ésta será el mayor que se pueda presentar en el desagüe.

- 4°. En este momento de los cálculos, se determina la altura de agua en la entrada de la obra para cada caso según las siguientes ecuaciones:

Tipo 1

$$HW(I.1) = y_c + \frac{v_c^2}{2g} + k_e \frac{v_e^2}{2g} + h_f - S_o L$$

siendo h_f y v_c los correspondientes al menor calado entre y_n y $1.1 \cdot y_c$.

Tipo 2

$$HW(I.2) = TW + \frac{v_{TW}^2}{2g} + k_e \frac{v_e^2}{2g} + h_f - S_o L$$

siendo V_{TW} la correspondiente al menor calado entre D y TW y h_f y v_c los correspondientes al menor calado entre y_n y $1.1 \cdot y_c$.

Tipo 3

$$HW(I.3) = y_c + \frac{v_c^2}{2g} (1 + k_e)$$

Tipo 4

$$HW(I.4) = y_c + \frac{v_c^2}{2g} (1 + k_e)$$

Tipo 5

$$HW(II.5) = D + \frac{v_c^2}{2g} (1 + k_e)$$

Tipo 6

$$HW(II.6) = h_o + \frac{v_c^2}{2g} \cdot (1 + k_e) + h_f - S_o L$$

siendo h_o el mayor calado entre TW y $0.5 \cdot (y_c + D)$ y sin superar el valor de D, y h_f las correspondientes a sección llena (calado D).

Tipo 7

$$HW(II.7) = TW + \frac{v_D^2}{2g} + (1 + k_e) + h_f - S_o L$$

siendo h_f las correspondientes a sección llena (calado D).

Tipo 8

$$HW(II.8) = D + \frac{V_D^2}{2g} + (1 + k_e)$$

5°. Una vez obtenidos los resultados de la cota de energía en cada uno de los casos, se pueden determinar, supuesto cada uno de los 8 casos tipificados en la figura mostrada al principio de este apartado, las condiciones que determinan si es o no el modo de funcionamiento de nuestra obra de drenaje en estudio, y que son, para cada tipo, las que se recogen en el siguiente cuadro:

CONDICIONES	CLASE – TIPO DE FUNCIONAMIENTO							
	I.1	I.2	I.3	I.4	II.5	II.6	II.7	II.8
$HW \leq 1.2 D$	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO
$S_o < S_c$	SI	SI	NO	NO	-	-	-	-
$TW < D$	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO
$TW < y_c$	SI	NO	-	-	-	-	-	-
$y_n < D$	-	-	-	-	SI	NO	-	-
$(TW + h_f) < (S_o L + D)$	-	-	-	SI	-	-	NO	-
SECCIÓN DE CONTROL	S ⁽¹⁾	S ⁽¹⁾	E ⁽²⁾	E ⁽²⁾	E ⁽²⁾	S ⁽¹⁾	S ⁽¹⁾	E ⁽²⁾

(S⁽¹⁾ = SALIDA; E⁽²⁾ = ENTRADA)

El procedimiento seguido es comprobar si las condiciones establecidas para cada tipo se cumplen de acuerdo con dicho cuadro para un desagüe en estudio. En caso de cumplirse únicamente las de un tipo, ese será el modo de funcionamiento del desagüe. En caso de que cumpla con las condiciones establecidas para varios tipos, se supone el más desfavorable a efectos de inundación de la autovía, es decir, la de mayor lámina en la entrada HW.

6° Las velocidades que corresponden a cada tipo de funcionamiento, tanto en la entrada como en la salida de la obra de drenaje, se rigen por el siguiente esquema:

Tipo 1	Ventrada	la máxima para los calados y_n y $1.1.y_c$
	Vsalida	la dada por y_c
Tipo 2	Ventrada	la máxima para los calados y_n , $1.1.y_c$ y TW
	Vsalida	la dada por TW
Tipo 3	Ventrada	la dada por y_c
	Vsalida	la dada por y_n
Tipo 4	Ventrada	la dada por y_c
	Vsalida	la dada por D a sección llena.
Tipo 5	Ventrada	la dada por D a sección llena.
	Vsalida	la máxima para los calados y_n y $2/3 D$.
Tipo 6	Ventrada	la dada por D a sección llena.
	Vsalida	la dada por D a sección llena.
Tipo 7	Ventrada	la dada por D a sección llena.
	Vsalida	la dada por D a sección llena.
Tipo 8	Ventrada	la dada por D a sección llena.
	Vsalida	la máxima para los calados y_n y $2/3 D$.

Una vez determinados todos los parámetros principales de funcionamiento, los resultados de cada una de las obras estudiadas se acompañan en una tabla de cálculo de resultados.

Generalmente se diseña para que la entrada de la ODT no se encuentre sumergida, por lo que nos encontraremos en la clase I.

Además es muy habitual que la pendiente sea mayor que la pendiente crítica del conducto por lo que tenemos control a la entrada de la obra, por lo que nos encontraríamos con el caso I.3 ó en el I.4, que emplean la misma expresión.

Por este motivo al final del texto se han incluido unos gráficos extraídos del “Hydraulic Design of Highways Culverts” de la FHWA, donde se pueden obtener la cota de energía a la entrada de la ODT (HW) de forma rápida.

Coefficientes de pérdidas a la entrada y salida de las ODT

Para poder aplicar las ecuaciones anteriores, y como referencia de los valores de los coeficientes de pérdidas a la entrada de las obras de drenaje, k_e , a continuación se muestran los valores recomendados por L.M. Suárez Villar en “Ingeniería de Presas: obras de toma, descarga y desviación”:

Entrada abocinada	0.05
Con aletas en ángulo redondeado	0.20
Con aletas en ángulo brusco	0.50
En recto, con aristas sin redondear	0.60
Espiga saliente	0.65

Las obras de drenaje transversal normalmente se diseñan con aletas, por lo que es habitual encontrarse valores de $k_e=0.5$.

En la Instrucción 5.2-IC de Carreteras, los valores de k_e recogidos en la tabla 5-2 son algo menores.

A la salida de la obra de drenaje, debido al ensanchamiento brusco de la sección, se podría tomar un coeficiente de pérdidas mayor, de $k_f=1.0$, siendo muy conservadores, o bien este valor se podría disminuir hasta 0.5-0.6. Por otra parte, como según se ha comentado en el apartado anterior, habitualmente se tiene control a la entrada de la ODT, este coeficiente h_f no interviene en los resultados.



Salida con aletas



Salida en espiga saliente

Protección a contra la erosión

En este caso únicamente se tendrán en cuenta las erosiones locales producidas por la inclusión de la obra de drenaje sobre el cauce, y se supondrá que éste se encuentra en equilibrio y que, por lo tanto, no se producirán erosiones evolutivas, que requerirían un estudio más amplio del cauce.

La erosión local puede producirse por la presencia de la obra de drenaje por la concentración del flujo y energía de la corriente.

Alcance de la Protección de Escollera a la Entrada de la ODT

La amplitud de la protección a cada lado de la obra de drenaje transversal viene justificada basándose en las velocidades transversales de aproximación que se producen en el flujo en dos direcciones (formación de vórtices) a la entrada de la ODT.

Existen distintas publicaciones que exponen sus resultados empíricos como unas reglas de máximos, es decir, aunque teóricamente puede calcularse la zona que queda expuesta y el tamaño del material que es capaz de resistir la tensión cortante o de arrastre que se produce, para evitar el cálculo en cada uno de los casos, los Organismos (oficiales) que editan estas publicaciones han decidido que para su aplicación práctica el sistema más adecuado sea el de un valor estimado, teniendo en cuenta el calado de agua a la entrada del conducto o bien el tamaño de la ODT.

El valor de la distancia paralela al eje del terraplén en la que debe extenderse una protección, a ambos lados (en general) de la ODT, varía de:

- $L \geq D$, siendo L la distancia y D la altura de la ODT. Departamento de carreteras de USA
- $L \geq 3D$. Small Canal del US BUREAU
- $L \geq 4h$, siendo h el calado a la entrada de la obra

En esta longitud están incluidas las aletas. Por lo tanto, en general con las aletas que normalmente se disponen en las ODT, no son necesarias protecciones adicionales en los taludes cercanos del terraplén de aguas arriba. (Las dimensiones propuestas por el US BUREAU en el Small Canal, son muy conservadoras).

El criterio general que podría emplearse en este caso sería el de $L \geq 4h$, debido a que las dimensiones de las obras de paso pueden ir condicionadas a criterios no hidráulicos, por ejemplo los diámetros mínimos por conservación, acceso, pasos especiales etc...

Alcance de la Protección de Escollera a la Salida de la ODT

En la Instrucción 5.2-IC de Drenaje Superficial de Carreteras se recomiendan las siguientes medidas de protección en función de una estimación de la erosión local a la salida.

La expresión dada para estimar las erosiones previsibles es:

Tubos circulares:

$$\frac{e}{D} = 2 \cdot \left(\frac{Q}{\sqrt{g} \cdot D^{5/2}} \right)^{3/8}$$

Conductos Rectangulares:

$$\frac{e}{H} = 3 \cdot \exp\left(\frac{-H}{3 \cdot B}\right) \cdot \left(\frac{Q}{\sqrt{g} \cdot B \cdot H^{3/2}} \right)^{3/8}$$

Siendo:

- e la erosión máxima previsible (m)
- Q caudal de diseño (m³/s)
- g aceleración de la gravedad
- D diámetro del tubo
- H altura del conducto rectangular
- B anchura del conducto rectangular. En conductos múltiples será la suma de anchuras.

Las medidas de protección será:

- Con niveles altos a la salida y una configuración del cauce y de la pequeña obra de drenaje transversal sensiblemente simétricas, que no haga temer una formación de remolinos de eje vertical, será suficiente disponer un rastrillo vertical con una profundidad mínima de 0.25·e.
- Con niveles medios podrá disponerse un rastrillo vertical con una profundidad mínima de 0.7·e, o preferentemente una solera de hormigón que reciba el impacto directo de la corriente, con una longitud mínima de 1.2·e, y rematada por un rastrillo vertical con una profundidad mínima de 0.25·e. Esta solución podrá sustituirse por un manto de escollera con una longitud mínima de 1.6·e, y un espesor mínimo de 2.5 veces el tamaño mínimo medio de la misma.
- Los niveles bajos en el cauce pueden ser debidos a una gran anchura de éste o bien a una fuerte pendiente. En el primer caso, las medidas protectoras podrán ser análogas a las descritas para niveles medios. En el segundo caso, se recomienda proyectar la pequeña obra de drenaje transversal para que funcione como un puente, sin modificar el régimen del cauce ni provocar acusadas sobreelevaciones.

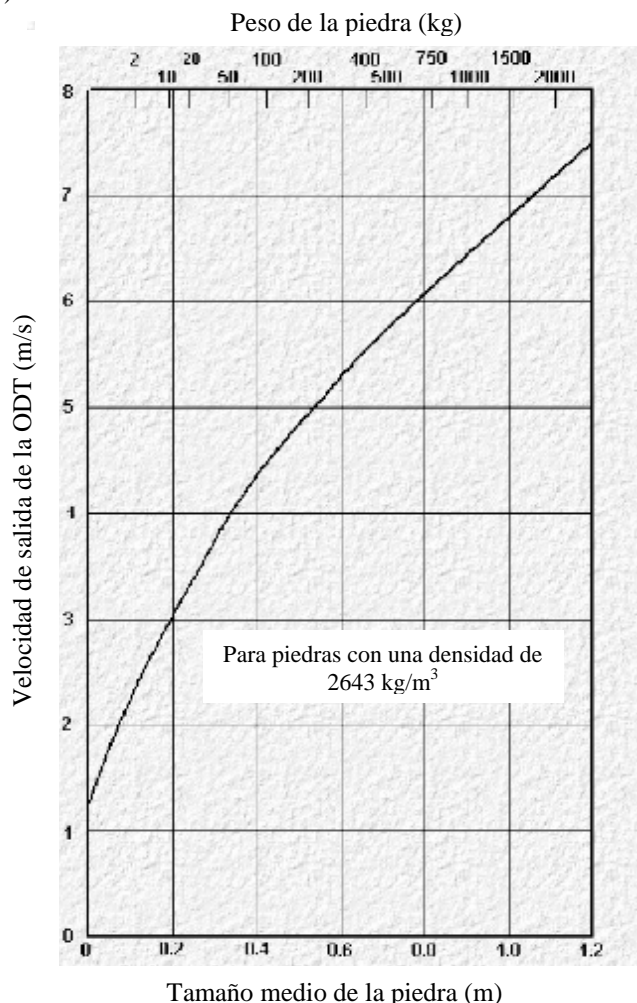


Protección con solera y rastrillo



Escollera de protección

A continuación se muestra un gráfico donde se puede obtener de forma rápida el tamaño medio (d_{50}) de la escollera necesaria para que no se mueva dada una velocidad de circulación en el eje de abscisas (figura 2C.1 James K. Searcy):



Recomendaciones finales

La forma del conducto, ya sea circular, bóveda, arco o rectangular, dependerá de las particularidades de la obra, las necesidades de luz libre, las limitaciones de cota por la rasante de la vía y la carga de tierras por encima. Es decir, habitualmente se emplean conductos circulares, pero en algunos casos se tienen caudales de diseño importantes en los que la sección rectangular tiene más capacidad, o incluso emplazamientos donde la altura de terraplén es tal que hay que ir a una estructura en forma de bóveda.

El material habitualmente empleado es el hormigón armado. También se emplean, sobre todo en EEUU los tubos de acero corrugado.

El trazado de la obra de drenaje debe minimizar las modificaciones del cauce, evitando estrechamiento excesivo en el cauce (avenida ordinaria), manteniendo la pendiente natural del cauce y la alineación.

Las obras de drenaje deben salir en el pie del terraplén, cerca de la cota del cauce.

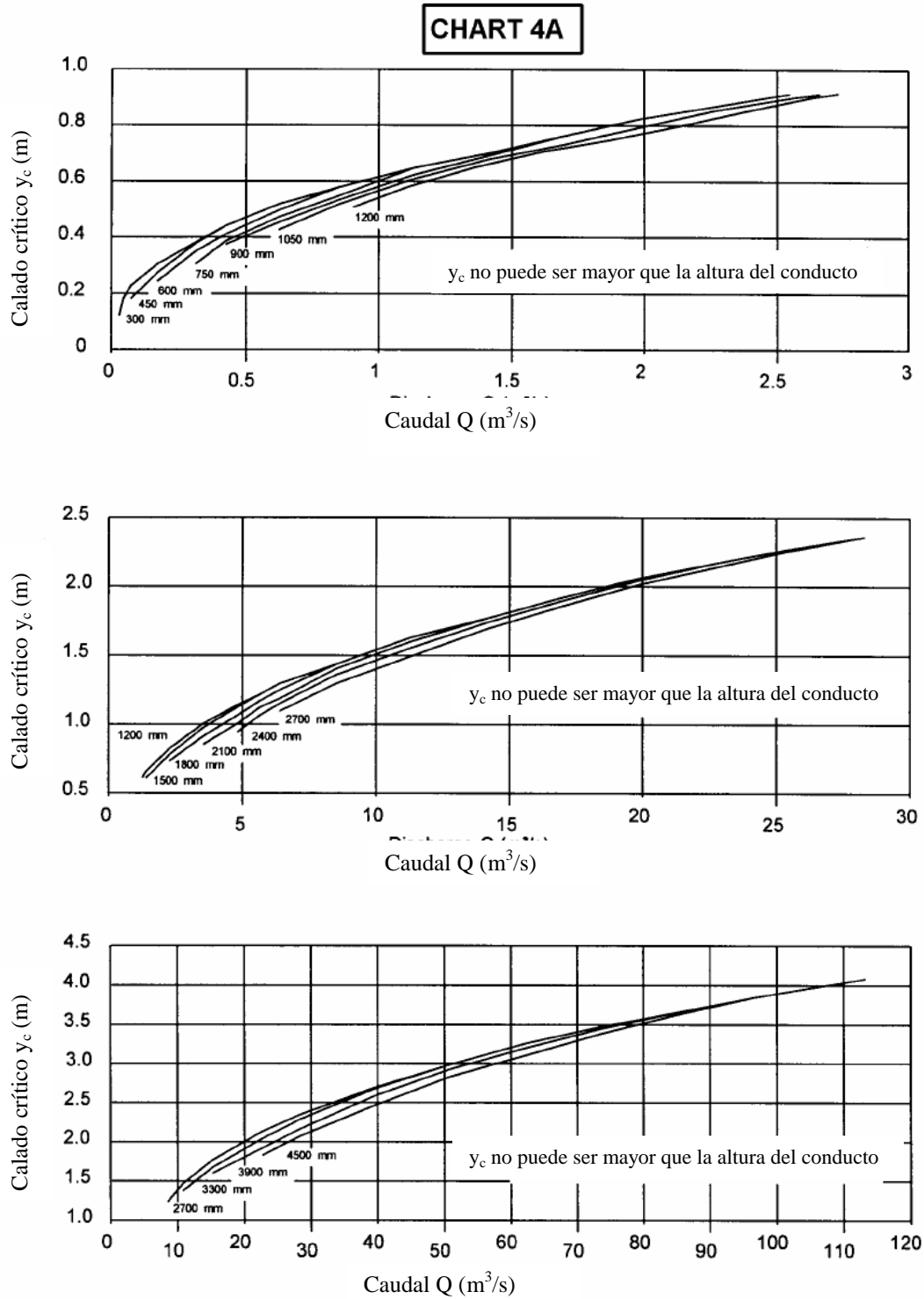
Se debe prestar especial atención a la cama y relleno de la obra de drenaje, ya que si no está bien apoyado o si la compactación es insuficiente, se podrían producir asentamientos que afectarían al acabado del firme.

En algunos casos es necesario colocar protecciones en contra de la erosión a la salida e incluso a la entrada de las obras de drenaje.

En zonas muy planas con cauces difusos es conveniente colocar varios conductos para drenar toda la llanura de inundación, para evitar una excesiva concentración del cauce y el efecto "presa".

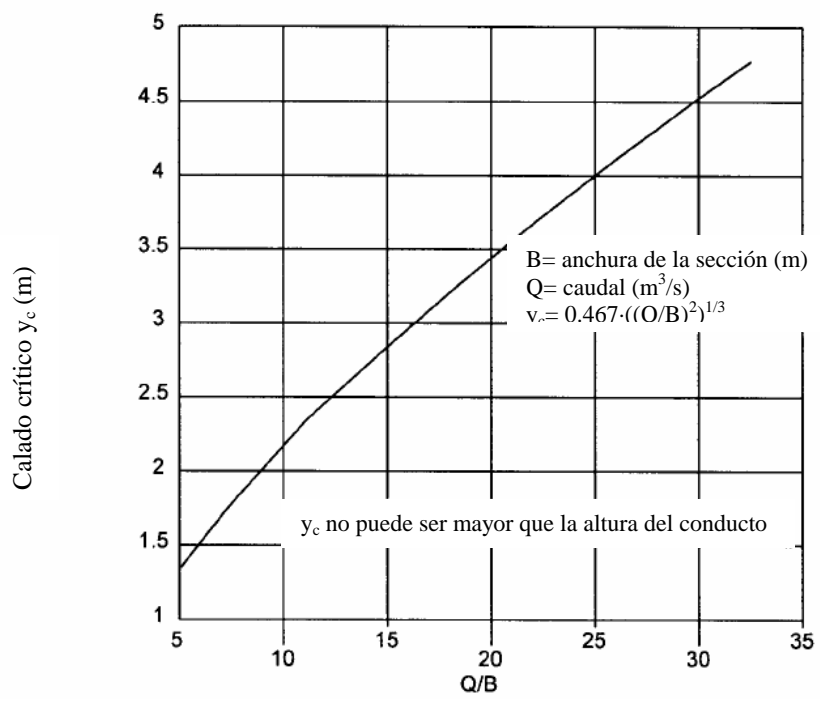
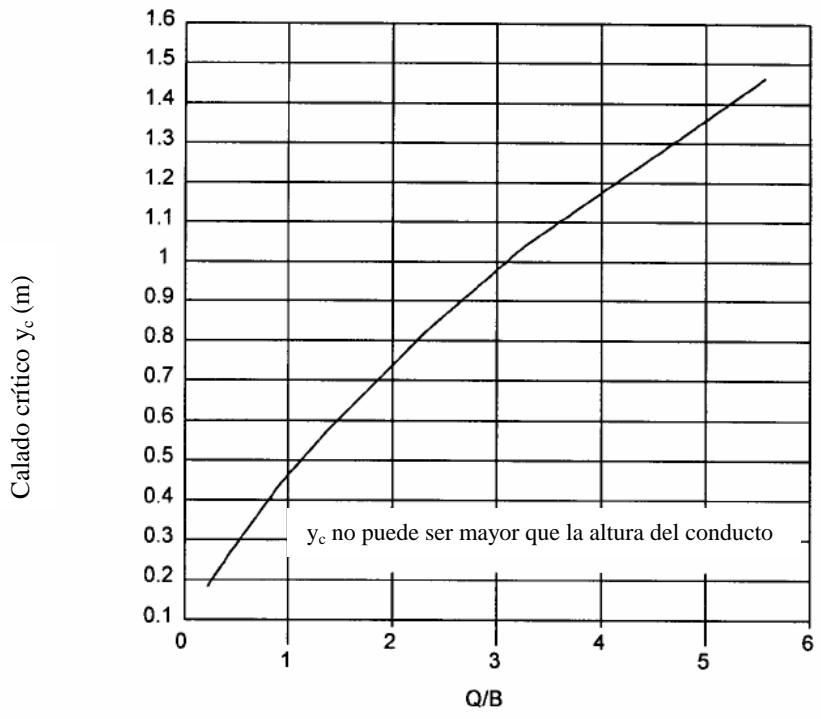
Apéndice 1: Gráficos para obtener el calado crítico

Calado crítico para sección circular



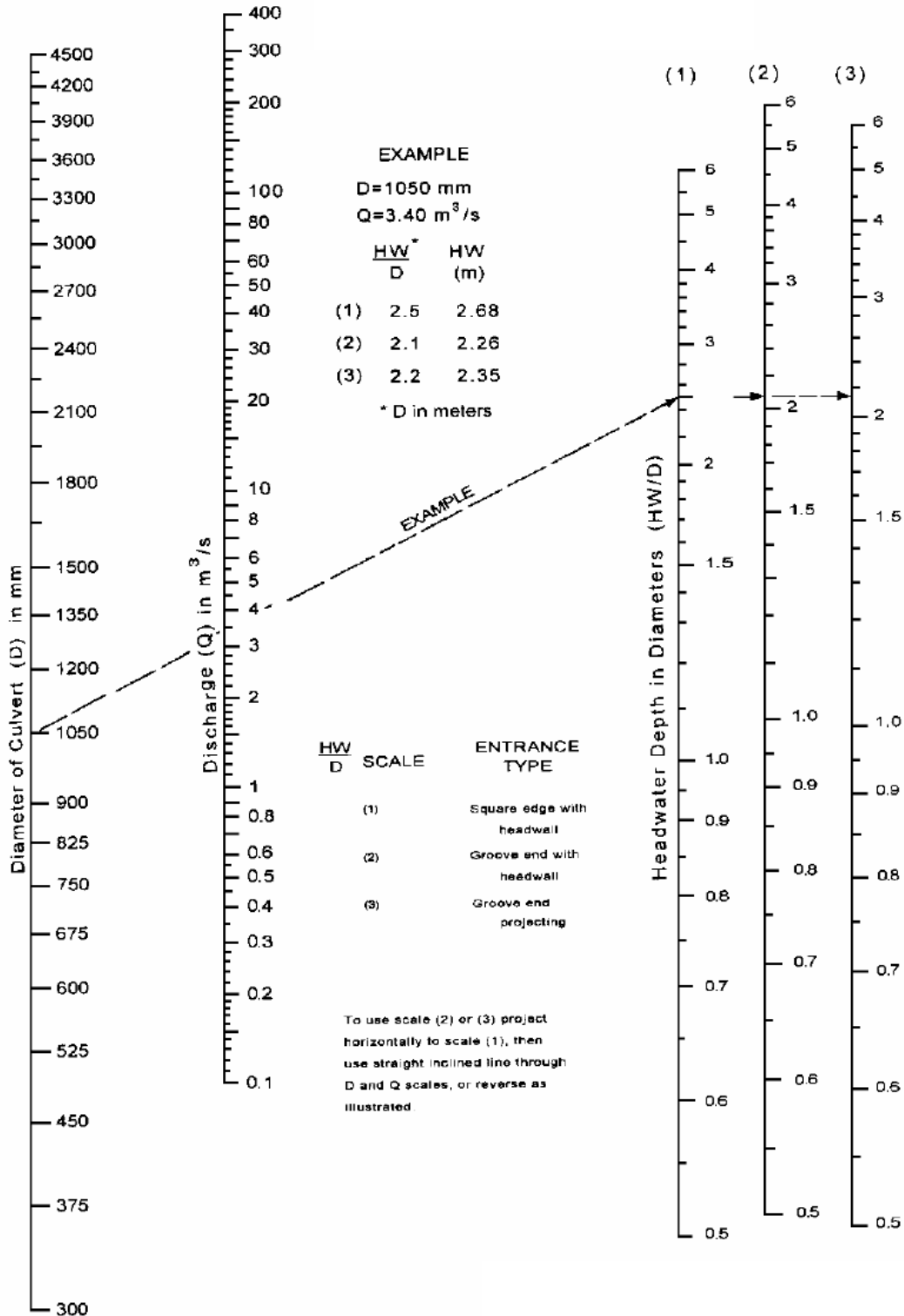
Calado crítico para sección rectangular

CHART 14 A



Apéndice 2: Gráficos para HW con control a la entrada

HW para tubos de hormigón con control a la entrada



HW para marcos de hormigón con control a la entrada

