

DIMENSIONAMIENTO HIDRÁULICO DE ALIVIADEROS LATERALES O DE TRINCHERA

Juan Eusebio González Fariñas

Resumen:

En el presente artículo se fundamenta y estructura una metodología de diseño hidráulico para su aplicación en los proyectos de aliviaderos de trinchera. El diseño se orienta a las zonas de funcionamiento hidráulico en régimen subcrítico teniendo en cuenta el intervalo de caudales de operación. En particular, se abordan cálculos hidráulicos y consideraciones prácticas relacionados con el dimensionado del componente esencial del aliviadero de canal lateral o de trinchera, su cubeta o trinchera.

Se define y propone un factor de sección del flujo espacialmente variado, Z_0 , en semejanza con el tratamiento clásico de los flujos uniforme y crítico; se deducen expresiones generales para la estimación del calado y la posición del “punto singular” y se introduce, dadas las características del posicionamiento del “punto singular”, el concepto de “gasto mínimo”.

Las consideraciones que se proponen favorecen una mayor fiabilidad a los cálculos de gabinete, adecuado funcionamiento del conjunto y la presencia de menores componentes dinámicos en las cargas que se transmiten a la estructura y a la cimentación. Se presentan varios ejemplos con aspectos de diseño y revisión.

Palabras clave: aliviaderos laterales, aliviaderos de trinchera, vertedores, flujo espacialmente variado, punto singular.

INTRODUCCIÓN

Con la frase “aliviadero lateral” se designan, comúnmente, dos objetos de obra de vertido distintos. Uno, el aliviadero ubicado en una de las márgenes de un canal, que es, en esencia, un vertedor que permite derivar parte del caudal a otro canal, zona de riego, etcétera y/o mantener un calado o nivel prefijado de agua máximo en el canal principal. Otro, el aliviadero que, dispuesto en un embalse, se provee de un canal de salida del agua de la presa de trazado paralelo o “cuasi” paralelo a la cresta del aliviadero. Este último aliviadero, ver figura 1, se conoce, también, como aliviadero de trinchera pues la cubeta suele ubicarse en una excavación relativamente estrecha y alargada.

El aliviadero lateral o de trinchera es una obra relativamente “lineal”. Emplazado casi o perpendicularmente al eje longitudinal de la presa, se “adentra” en la zona destinada al embalse y es, en consecuencia, una solución que contribuye a minimizar la extensión y el volumen de las excavaciones, especialmente, en terrenos de pendiente fuerte, en comparación con otras alternativas de aliviaderos de planta recta o curvilínea. Esta importante ventaja con relación al “impacto territorial local”, de la solución de aliviadero de trinchera, tiene sus contrapartidas ya que requiere terrenos resistentes y presenta un funcionamiento hidráulico más complejo que otras alternativas “clásicas” de aliviaderos. En realidad, la mayor complejidad de su funcionamiento hidráulico está en la cubeta, que es el tramo de canal en el que se descarga el agua.

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Profesor Asociado. Departamento de Física Básica. Facultad de Física. Universidad de La Laguna. Avda. Astrofísico Fco. Sánchez. La Laguna, C.P.: 38071 Santa Cruz de Tenerife. Tenerife. Islas Canarias. Telf.: 637 41 78 46. E-mail: igfarina@ull.es
Artículo recibido el 18 de noviembre de 1998, recibido en forma revisada el 1 de marzo de 2000, el 1 de septiembre de 2000 y el 30 de mayo de 2001 y aceptado para su publicación el 5 de junio de 2001. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las “Instrucciones para autores”. En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

EL FLUJO ESPACIALMENTE VARIADO REFERENCIAS Y CONSIDERACIONES

En diferentes textos y monografías de Hidráulica de las conducciones libres se aborda el caso de los canales con flujo espacialmente variado y caudal creciente. Se explican, en general, las diferentes condiciones de circulación del canal y la estimación de los calados en los casos de los regímenes supercrítico, subcrítico y con cambio de régimen en alguna sección intermedia del canal^{1,2,4,5,9}.

En el canal colector, cubeta o trinchera de los aliviaderos laterales se puede producir la circulación del agua en las condiciones de flujo arriba mencionadas. En la figura 1 se ilustran los casos de flujos subcrítico y con cambio de subcrítico a supercrítico.

Si la sección de flujo crítico se presenta en una posición intermedia del canal colector o trinchera, para el intervalo de caudales de operación de la obra, se produce, en esos casos, un régimen de circulación supercrítico aguas abajo de la misma.

La condición de régimen subcrítico ha de satisfacerse para un intervalo amplio de los caudales de operación del vertedor para garantizar una amortiguación adecuada de la energía del flujo que derrama de la cresta vertedora, reducir los remolinos transversales e irregularidades en los calados y evitar un funcionamiento inadecuado de las estructuras aguas abajo en las distintas condiciones de funcionamiento. En consecuencia, en el caso de este tipo de aliviadero se ha reconocido, por diferentes autores^{2,3,4,9,12}, la conveniencia de restringir el funcionamiento del canal colector a regímenes de circulación subcríticos.

Se señala, por otra parte, que las secciones transversales cuya relación ancho de fondo y calado son mínimas tienen el mejor funcionamiento hidráulico^{3,4,9} y una mayor semejanza con las hipótesis de partida que se han empleado por diferentes autores para la obtención de la ecuación diferencial del flujo espacialmente variado.

A mayor calado, la mezcla del agua que derrama con la que fluye por la trinchera es más uniforme. La sección ideal desde el punto de vista hidráulico es la triangular⁹. Sin embargo, en la práctica es necesario un ancho mínimo que depende de la tecnología de construcción que se pueda emplear y, adicionalmente, también, el riesgo de deslizamientos de tierras se incrementa con la profundidad del corte de la trinchera.

ECUACIÓN BÁSICA DE CÁLCULO DEL FLUJO ESPACIALMENTE VARIADO CON CAUDAL CRECIENTE

De la aplicación del principio de variación de la cantidad de movimiento a un volumen de control del flujo en la trinchera^{1,5,7,12} se obtiene la ecuación diferencial de los calados. Esta ecuación, que puede tener distintas formas de presentación, se conoce como la ecuación dinámica del flujo espacialmente variado. Sinniger y Hager⁷ emplean las formas paramétricas, Wen-Hsiung¹² la expresa en términos del Número de Froude, etcétera.

La ecuación diferencial dinámica del flujo espacialmente variado describe cuantitativamente la variación de los calados en la trinchera. Aunque no es factible obtener la solución explícita de la ecuación diferencial para la mayoría de los casos de trincheras, en la práctica actual esto no constituye un problema pues se resuelve su integración numérica con ayuda de calculadoras programables o con auxilio de programas de cálculo por ordenador. El resultado es un conjunto de pares de valores de calado (y) y posición del mismo respecto al inicio de la cubeta (x) que permiten trazar la superficie del agua en la trinchera, es decir, obtener gráficamente la función solución de cada caso, $y = f(x)$.

Al integrar numéricamente la ecuación diferencial del flujo espacialmente variado resulta imprescindible tener en cuenta si existe, en el interior de la cubeta, alguna discontinuidad en la solución. Matemáticamente, este punto del dominio solución de la ecuación diferencial en el que se produce una discontinuidad se conoce como “punto singular”. En el “punto singular” se obtiene la indefinición del cociente dy/dx , es decir: $dy/dx=0/0$. En ese punto el Número de Froude es igual a la unidad. En consecuencia, en el “punto singular” se tiene una posible sección de control de flujo crítico.

Si el “punto singular” está contenido dentro de la trinchera se produce un cambio de régimen de circulación en su interior y se debe realizar la integración numérica de la ecuación diferencial en dos partes. Una hacia “aguas arriba” y otra, hacia “aguas abajo” de dicho punto o sección.

A continuación se presentan las ecuaciones generales para la determinación de la posición del “punto singular” (x_0) y de su calado (y_0).

ECUACIONES DE CÁLCULO DE LA POSICIÓN Y CALADO DE LA SECCIÓN DE “PUNTO SINGULAR”

Las ecuaciones de cálculo de la posición y el calado de la sección de “punto singular” se pueden deducir a partir de cualquiera de las expresiones de la ecuación dinámica del flujo espacialmente variado^{1,5,7,12} y la condición $dy/dx = 0/0$. El origen de coordenadas se considera en el fondo de la sección de inicio de la cubeta.

En lo que sigue se emplea la ecuación diferencial en la forma expuesta en la referencia 1:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\left[\left(J - J_f - \frac{2Qq_*}{gA^2} \right) \right]}{1 - \frac{Q^2}{gA^2D}} \quad (1)$$

Haciendo la sustitución $Q = q_* x$, se tiene que:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\left[\left(J - J_f - \frac{2q_*^2 x}{gA^2} \right) \right]}{1 - \frac{q_*^2 x^2}{gA^2D}} \quad (2)$$

De las condiciones $dy = 0$ y $dx = 0$ se obtienen sendas ecuaciones para la posición del “punto singular”:

$$x_0 = \frac{[gA_0^2(J - J_f)]}{2q_*^2} \quad (3)$$

y

$$x_0 = \frac{A_0}{q_*} \sqrt{gD_0} \quad (4)$$

Nótese que la condición $dx = 0$ implica que el Número de Froude es igual a la unidad.

Si se despeja A_0 de la ecuación (4), se sustituye en 3 y se simplifica, se obtiene una expresión muy sencilla para x_0 :

$$x_0 = \frac{2D_0}{(J - J_f)} \quad (5)$$

Por otra parte, eliminando x_0 de las ecuaciones (3) y (4) se llega a la ecuación (6). Esta ecuación permite expresar las propiedades geométricas del flujo en el “punto singular” en función de los parámetros dinámicos del mismo.

$$\frac{D_0^{0.5}}{A_0} = \frac{g^{0.5}(J - J_f)}{2q_*} \quad (6)$$

El término de la pendiente de pérdidas de carga^{1,5} en el “punto singular” se puede evaluar por las expresiones equivalentes siguientes:

$$J_f = \frac{Q^2 P_0}{C^2 A_0^3} = \frac{g P_0}{C^2 T_0} \quad (7)$$

Las ecuaciones (5) y (6) permiten obtener la solución única existente para la posición y el calado del “punto singular” de todos aquellos tipos de secciones transversales abiertas en las que el valor de $(D^{0.5}/A)$ disminuye constantemente al crecer el calado. Entre estas secciones están, como se conoce, las secciones rectangular, trapecial, triangular y parabólica. Se excluyen las secciones tipo bóveda, que se cierran gradualmente, las circulares entre ellas, pues existen valores de $(D^{0.5}/A)$ que se satisfacen para dos profundidades distintas.

Del análisis de estas ecuaciones se destacan las conclusiones siguientes:

1. La posición del “punto singular” (x_0) es directamente proporcional a su calado hidráulico (D^0).

En consecuencia, al disminuir el caudal de operación de un aliviadero de trinchera, con sección transversal abierta de dimensiones dadas, el “punto singular” se acerca al inicio de la cubeta.

2. Los efectos de considerar que la pendiente de pérdidas de carga en el “punto singular” es despreciable ($J_f \sim 0$), en los cálculos prácticos, son los siguientes:

- Se obtiene el valor mínimo de la posición del “punto singular”, $(x_0)_{\min}$. En la realidad, el “punto singular” estará más alejado del inicio de la cubeta o trinchera y el resultado del cálculo con $J_f \sim 0$ está, en este aspecto, del lado seguro.

- Se obtiene el valor máximo de $D_0^{0.5}/A_0$. En las secciones transversales abiertas, la condición $J_f \sim 0$ conlleva a una estimación del calado en el “punto singular” por debajo de su valor. Esto repercute en la obtención de calados en la trinchera inferiores a los reales si el “punto singular” estuviera contenido en la misma.

En el Anexo se expone, de forma resumida, la deducción de las ecuaciones para el cálculo de la

posición y el calado del “punto singular”, de diferentes autores, a partir de las expresiones generales expuestas en el presente trabajo.

FACTOR DE SECCIÓN DEL FLUJO ESPACIALMENTE VARIADO

De manera similar al tratamiento matemático que se acostumbra^{1,5} con los flujos en régimen uniforme y crítico, se puede definir un factor de sección para el flujo espacialmente variado, Z_0 . En realidad, dicho factor de sección es un agrupamiento no adimensional de las variables geométricas de la sección del “punto singular”, por una parte, y de las variables dinámicas de la trinchera, por la otra. Partiendo de la ecuación (6) se proponen las expresiones (8) y (9) siguientes:

$$Z_0 = \frac{D_0^{0.5}}{A_0} \quad (8)$$

y:

$$Z_0 = \frac{g^{0.5}(J - J_f)}{2q_*} \quad (9)$$

A continuación se presentan algunas consideraciones relativas al factor de sección del flujo espacialmente variado antes definido:

1. La ecuación (8) es una expresión general que depende únicamente de las características geométricas de la sección transversal mojada de la trinchera en el “punto singular”.

2. La relación funcional entre Z_0 y y_0 , para secciones transversales abiertas, se corresponde a una ecuación potencial ($Z_0 = K y_0^{-N}$).

Se excluyen las secciones tipo bóveda en las que relación entre Z_0 y y_0 no es biunívoca.

3. La ecuación (9) evidencia, por otra parte, que las características geométricas del “punto singular”, independientemente de la forma de la sección transversal, han de satisfacer, en cada caso, la combinación de g , J , J_f y q_* que ella expresa.

4. La ecuación (9) corresponde a una recta:

$$Z_0 = B - MJ_f \quad (10)$$

en la que $B = \frac{g^{0.5}J}{2q_*} \quad (11)$ y $M = \frac{g^{0.5}}{2q_*} \quad (12)$

son constantes para un aliviadero de trinchera con caudal específico y pendiente de la cubeta dados.

Se señala que, en la medida en que el término M sea más pequeño, lo que significa que el caudal unitario es mayor, la consideración $J_f \sim 0$ tiene menor influencia en el error de estimación del factor de sección.

DETERMINACIÓN DEL CALADO Y LA POSICIÓN DEL “PUNTO SINGULAR”

La determinación del calado y la posición del “punto singular” presupone la solución del sistema de ecuaciones (5), (7), (8) y (9). Los datos requeridos son: la pendiente del fondo (J); el caudal específico (q_*); la aceleración de la gravedad (g) y el tipo y dimensiones de la sección transversal.

El procedimiento, que se ilustra en el ejemplo 1, se puede resumir en los pasos siguientes:

1. Hallar el valor de Z_0 por la ecuación (9). En una primera aproximación se desprecia el valor de la pendiente de pérdidas de carga J_f .

2. Tantear el valor del calado hasta que el valor de Z_0 hallado por la ecuación (8) sea sensiblemente igual al valor de la ecuación (9). A partir de la primera iteración se determinará J_f por la ecuación (7).

3. Determinar el valor de x_0 por la ecuación (5).

Ejemplo No. 1. Determinación del calado y la posición del “punto singular”.

Determinar el calado y la posición del “punto singular” en la cubeta de un aliviadero de trinchera trapecial de $L = 25$ m, $J = 0.09$, $b = 10$ m y $z_1 = 0.5$. Considere que $Q = 25$ m³/s.

Respuesta:

Se calcula el factor de sección de flujo espacialmente variado (Z_0 , ecuación (9)) con $q_* = 25 / 25\text{m} = 1$ m³/s/m, $J = 0.09$ y, en primera aproximación, se consideran las pendiente de pérdidas de carga despreciables. Se obtiene $Z_0 = 0.14$.

El valor del calado que satisface que $D_0^{0.5}/A_0 = 0.14$ es 0.45 m.

Se determina, a continuación, la pendiente de pérdidas con la ecuación (7) y se recalcula Z_0 con la ecuación (9). Después de varios tanteos se obtiene la igualdad de las ecuaciones (8) y (9).

y_0 (m)	D_0 (m)	A_0 (m ²)	$Z_0=f(A,D)$ (ecuación 8)	Z_0 con J_f (ecuación 9)	P_0 (m)	T_0 (m)	C Chezy	J_f	Froude
0.200	0.198	2.020	0.220	0.135	10.447	10.200	50.695	0.004	1.635
0.300	0.296	3.045	0.179	0.136	10.671	10.300	54.093	0.003	1.318
0.400	0.392	4.080	0.154	0.136	10.894	10.400	56.600	0.003	1.130
0.450	0.440	4.601	0.144	0.136	11.006	10.450	57.648	0.003	1.060
0.500	0.488	5.125	0.136	0.136	11.118	10.500	58.594	0.003	1.001

Tabla No. 1. Resumen de los cálculos del “punto singular” del ejemplo 1
 $q_s = 1 \text{ m}^2/\text{s}$; $b = 10 \text{ m}$; $z = 0.5$; $J = 0.09$; $n = 0.015$

El valor del calado y de la posición del “punto singular”, finalmente obtenidos, son: $y_0 = 0.50 \text{ m}$ y $x_0 = 2 * 0.488 / (0.09 - 0.003) = 11.22 \text{ m}$.

En la tabla 1 se muestran los tanteos de y_0 y D_0 efectuados con auxilio de una Hoja de Cálculos para ordenadores. Se ha considerado una columna adicional para el cálculo del Número de Froude para comprobación de los resultados.

El flujo para $Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$ circulará en régimen subcrítico desde el inicio de la cubeta hasta una distancia aproximada de 11.22 m. En ese punto se produce un cambio a régimen supercrítico. ¿No será perjudicial que esto ocurra en las condiciones de la obra? ¿De qué depende?.

POSICIONAMIENTO DEL “PUNTO SINGULAR” Y “CAUDAL MÍNIMO”

A medida que disminuye el caudal de operación en trincheras de sección transversal abierta, según se desprende de conclusiones parciales anteriores, la sección del “punto singular” se mueve hacia aguas arriba de la sección final. Es decir, el flujo en la trinchera transcurrirá con un cambio de régimen de subcrítico a supercrítico cuando circulan caudales inferiores a aquél para el cual el “punto singular” está en la sección final de la trinchera.

De acuerdo con lo anterior, si se dimensiona la trinchera teniendo en cuenta únicamente el caudal de la avenida de diseño, los caudales menores circularán con flujo supercrítico. Esta situación resulta, generalmente, inadmisibles por la probable presencia de asimetría en la distribución de los flujos; velocidades erosivas; cavitación; ocurrencia ocasional de saltos hidráulicos de posicionamiento variable con el caudal, etcétera.

Se impone, entonces, la necesidad de determinar un “caudal mínimo” de operación por encima del cual sea inaceptable que se produzca un cambio de régimen de circulación dentro de la trinchera.

A modo de guía se señala, únicamente, que la estimación de este “caudal mínimo” depende de las particularidades de cada obra vinculadas a la amplitud de su intervalo de caudales de operación, su complejidad geométrica, a la resistencia de los revestimientos y de los terrenos del emplazamiento.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DEL DIMENSIONAMIENTO DE LA TRINCHERA PARA FLUJO SUBCRÍTICO

El problema del dimensionamiento de la trinchera para régimen subcrítico supone obtener, para una longitud de canal colector dada, una combinación de valores de los parámetros geométricos del tipo de sección escogida (rectangular, trapecial, parabólica, etcétera) o la pendiente del fondo, que permitan que la sección de “punto singular”, para el “caudal mínimo”, esté en el extremo aguas abajo de la misma o más alejada.

Con este enfoque se satisface que la sección de “punto singular”, para los caudales mayores, estará fuera de la trinchera y que su circulación será, como se apuntó antes, en régimen subcrítico.

En la práctica de diseño, en consecuencia, se puede optar por fijar, parcialmente, las dimensiones de la sección transversal —la altura definitiva se calculará para el caudal de proyecto según se explica más abajo— y calcular la pendiente de fondo de la trinchera o fijar la pendiente del fondo y determinar las dimensiones de la sección transversal.

La profundidad de la trinchera quedará definida por el caudal máximo de la avenida de proyecto y se verificará su comportamiento para las condiciones extraordinarias que se estipulen en las normas correspondientes a cada región.

La determinación de la profundidad de la trinchera requiere del cálculo de los calados en la misma. Este cálculo se suele realizar, generalmente, por integración numérica de la ecuación diferencial

del flujo espacialmente variado. La profundidad de circulación en la frontera aguas abajo de la trinchera se adopta como valor inicial. En relación con esto se comenta lo siguiente:

-Si el canal o conducto de salida aguas abajo de la cubeta es de pendiente subcrítica, el calado en el final de la trinchera es el calado del remanso de dicho canal.

-Si a continuación de la trinchera se dispone de un canal de pendiente supercrítica, en el final de la primera se produce, aproximadamente, la profundidad crítica si el “punto singular” no está contenido en la cubeta.

-En ocasiones, cuando interesa elevar los calados en la cubeta, se dispone de una sección de control vertedora en la porción final de la trinchera^{2,9}.

METODOLOGÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LA TRINCHERA

La solución al problema del dimensionamiento de la trinchera para régimen subcrítico enunciado supone hallar, para el tipo de sección transversal elegida, las dimensiones de esta y el calado o, la pendiente del fondo y el calado, que satisfacen, para la condición $x_0 = L$, que los valores de Z_0 hallados por las ecuaciones (8) y (9) sean iguales.

Se desarrollan, a continuación, dos procedimientos para el dimensionamiento hidráulico de la trinchera para la condición en que el “punto singular” esté en su extremo aguas abajo. Estos cálculos se pueden realizar, de forma relativamente sencilla, con auxilio de Hojas de Cálculo para ordenadores.

Procedimiento I. Determinación de las dimensiones de la sección transversal para una pendiente de fondo dada.

1. Estimar un valor de “caudal mínimo” por encima del cual sea inadecuado el funcionamiento de la trinchera con cambio de régimen de circulación en su interior.

2. Definir el tipo de sección transversal.

3. Elegir los valores iniciales de los taludes laterales de la sección transversal poligonal, o la configuración de la curva de dicha sección, compatibles con la tecnología de construcción y talud máximo admisible.

4. Definir el valor de la pendiente de fondo de la trinchera, J , a partir de las condiciones del emplazamiento.

5. Programar, en una Hoja de Cálculo, el cálculo iterativo, en base a y_0 , de Z_0 por las ecuaciones (8) y (9); x_0 por la ecuación (5) y J_f según la ecuación (7).

6. El conjunto de valores de las dimensiones lineales y el calado del “punto singular”, y_0 , aceptables desde el punto de vista constructivo de la obra, que satisfagan que los valores de Z_0 calculados con las ecuaciones (8) y (9) sean sensiblemente iguales, para $x_0 = L$, es la solución del problema planteado.

7. Calcular el calado en la sección final de la cubeta para el gasto de la avenida de diseño. Realizar la integración numérica para la obtención de los calados en la trinchera.

8. Determinar la cota de fondo de la sección inicial de la cubeta, deduciendo, de la cota de ahogo permitida (por ejemplo, el USBR⁹ admite un ahogo de $2/3 H_0$) por encima del labio del vertedor, el calado máximo obtenido en el punto anterior.

9. Comprobar, según las normas regionales pertinentes, que con un caudal extraordinario no se rebasa el agua por encima del borde libre de la trinchera ni se provoca un ahogo excesivo de la cresta vertedora.

Procedimiento II. Determinación de las dimensiones de la sección transversal y la pendiente de fondo.

1. Fijar un valor de “caudal mínimo” por encima del cual sea inadecuado el funcionamiento de la trinchera con cambio de régimen de circulación en su interior.

2. Definir la forma y dimensiones de la sección transversal de la trinchera (excepto la profundidad de la cubeta):

-Trinchera rectangular: ancho de fondo.

-Trinchera trapecial: ancho de fondo y taludes laterales.

-Trinchera triangular: taludes laterales.

-Trinchera parabólica: coeficiente y exponente de la ecuación de la parábola.

3. Fijar la posición del “punto singular”, para el “caudal mínimo” en la sección final de la cubeta. El calado en esa sección, en esas circunstancias, es el que corresponde al flujo crítico para el caudal total del aliviadero y, en consecuencia, el Número de Froude será igual a la unidad.

4. Programar, en una Hoja de Cálculo, el cálculo iterativo, en base a y_0 , del Número de Froude; Z_0 por la ecuación (8); $(J - J_f)$ por despeje de la ecuación (9); J_f según la ecuación (7) y J .

El valor de y_0 que se corresponda con $F = 1$ es el calado buscado.

5. Calcular el calado en la sección final de la cubeta para el gasto de la avenida de diseño. Realizar la integración numérica para la obtención de los calados en la trinchera.

6. Determinar la cota de fondo de la sección inicial de la cubeta, deduciendo, de la cota de ahogo permitida (por ejemplo, el USBR¹⁰ admite un ahogo de $2/3 H_0$) por encima del labio del vertedor, el calado máximo obtenido en el punto anterior.

7. Comprobar, según las normas regionales pertinentes, que con un caudal extraordinario no se rebasa el agua por encima del borde libre de la trinchera ni se provoca un ahogo excesivo de la cresta vertedora.

Determinar la pendiente de fondo de la cubeta de un aliviadero de trinchera si la longitud de vertimiento es de 25 m y el caudal de la avenida de proyecto es de $400 \text{ m}^3/\text{s}$. A continuación de la cubeta se dispone un canal de pendiente supercrítica y $n = 0.015$.

Respuesta:

Se acepta un valor de caudal mínimo del 10% del caudal de la avenida de proyecto por encima del cual se considera inadecuado el funcionamiento de la trinchera con cambio de régimen de circulación en su interior. En consecuencia, $Q_{\min} = 40 \text{ m}^3/\text{s}$.

Se adopta una trinchera prismática de sección trapezoidal con ancho de fondo de 10 m y taludes laterales iguales de 1: 0.5.

La sección de “punto singular”, para el caudal mínimo, se fijará en la sección final de la cubeta, es decir, $x_0 = L = 25 \text{ m}$. En esa sección se tendrá, aproximadamente, el calado crítico pues la trinchera es continuada por un canal de pendiente supercrítica.

En la tabla 2 se muestran los resultados de la Hoja de Cálculo por ordenador empleada. Se exponen distintas líneas para ilustrar el proceso automático de tanteo. Los valores de la línea en que $F = 0.999 \approx 1$ se han adoptado como el conjunto solución del problema planteado. A continuación se explica la solución por los pasos enunciados en el procedimiento II del punto anterior.

- El calado de flujo crítico obtenido para la sección final de la trinchera es $y_0 = y_c = 1.155 \text{ m}$. Adicionalmente, $A_0 = 12.217 \text{ m}^2$ y $D_0 = 1.095 \text{ m}$.

EJEMPLOS PRÁCTICOS

Ejemplo 2. Problema de dimensionamiento de una trinchera con determinación de la pendiente de fondo.

No.	y_0 (m)	D_0 (m)	A_0 (m ²)	T_0 (m)	P_0 (m)	FROUDE	$C=(1/n)R^{1/6}$
1	0.500	0.488	5.125	10.500	11.118	3.567	58.594
2	1.000	0.955	10.500	11.000	12.236	1.245	64.988
3	1.100	1.045	11.605	11.100	12.460	1.076	65.882
4	1.150	1.091	12.161	11.150	12.571	1.006	66.299
5	1.155	1.095	12.217	11.155	12.583	0.999	66.340
6	1.160	1.100	12.273	11.160	12.594	0.992	66.380

Tabla No.2 Resultados de los cálculos del ejemplo 2.

No.	J_f	J_f (calculado)	q_s (m ² /s)	$Z_0 = Dc^{0.5} / Ac$	$(J - J_f) = 2q_s Z_0 / g^{0.5}$	$J = J_f + 2q_s Z_0 / g_{0.5}$
1	0.000	0.003	1.600	0.136	0.139	0.139
2	0.003	0.003	1.600	0.093	0.095	0.098
3	0.003	0.003	1.600	0.088	0.090	0.093
4	0.003	0.003	1.600	0.086	0.088	0.091
5	0.003	0.003	1.600	0.086	0.088	0.091
6	0.003	0.003	1.600	0.085	0.087	0.090

Tabla No.2 (continuación)

$$- Z_0 = (D_0)^{0.5} / A_0 = (1.095)^{0.5} / 12.217 = 0.086$$

- Obtención de $(J - J_f)$, por la ecuación 9, para el caudal de 40 m³/s.

$$(J - J_f) = 2q \cdot Z_0 / (g)^{0.5} = 2 \cdot 1.6 \cdot 0.086 / (9.8)^{0.5} = 0.088.$$

- Cálculo del valor de la pendiente de pérdidas de carga, J_f , con la ecuación (7).

$$J_f = \frac{Q^2 P_0}{C^2 A_0^3} = \frac{g P_0}{C^2 T_0} = 0.003 \quad (13)$$

- Valor de la pendiente de fondo de la trinchera:

$$J = \frac{2D_0}{L} + J_f = 0.091 \quad (14)$$

La pendiente de fondo de la trinchera es el valor antes obtenido para el caudal mínimo estimado.

En la Tabla 3 se muestran, adicionalmente, los resultados de los cálculos de la pendiente de fondo, del ejemplo 2, para diferentes caudales. Se puede apreciar que al aumentar el caudal se incrementa el valor de la pendiente de fondo que garantiza que la sección del “punto singular” esté al final de la trinchera.

¿Qué sucede si se adopta para la pendiente de fondo de la trinchera el valor correspondiente al caudal máximo?

Q (m ³ /s)	J
40	0.091
80	0.137
160	0.204
240	0.255
300	0.288
350	0.313
400	0.336

Tabla 3. Pendientes de fondo para la condición en que el “punto singular” coincida, en cada caso, con la sección final de la trinchera del ejemplo 1.

Ejemplo 3. Problema de dimensionamiento conocida la pendiente de fondo de la trinchera.

Estudiar diferentes alternativas de ancho y pendiente de fondo de la trinchera del ejemplo 2 manteniendo la condición de que la sección del “punto singular” coincida con el final de la cubeta para el caudal de 40 m³/s/m.

Respuesta:

En la tabla 4 se presenta una muestra de una Hoja de Cálculo para ordenador en la que se ha programado el cálculo basado en el procedimiento I expuesto anteriormente.

La variación de J vs. b de los ejemplos 2 y 3 se muestra en la figura 2. Se aprecia, en estos casos específicos, que a mayor ancho de fondo se reduce la pendiente requerida para la condición $x_0 = L$. La mayor reducción de la pendiente requerida, por otra parte, tiene lugar para los valores menores del ancho de fondo pues la pendiente de la curva tiende a disminuir para los anchos mayores. Ese comportamiento puede sugerir que un aumento excesivo del ancho de la trinchera contribuye muy poco, o nada, en la disminución de la pendiente requerida. Adicionalmente, se recuerda que la eficiencia hidráulica de la trinchera se reduce al aumentar su ancho^{4,9}.

Ejemplo 4. Problema de comparación de alternativas atendiendo a la pendiente del fondo.

Estudiar los requerimientos de pendiente de fondo de secciones de trinchera parabólicas (de la forma $y = a x^2$) como alternativa a la trinchera trapecial en las condiciones del ejemplo 2.

Respuesta:

En la tabla 5 se resumen los resultados principales del proceso de cálculo, el que se diferencia del seguido en el ejemplo 2 sólo en la geometría de la sección transversal.

La sección parabólica con coeficiente $a = 0.050$ puede ser, desde el punto de vista de la similitud en los valores de pendiente de fondo, área y ancho superficial, una alternativa a la trinchera del ejemplo 2.

Nótese que al reducir el coeficiente “a”, que significa que la parábola es más “ancha”, disminuye la pendiente de fondo requerida. Este comportamiento es similar al de las trincheras trapeciales cuando se incrementa el ancho de fondo. Ver figura (2).

CONCLUSIONES

El factor de sección del flujo espacialmente variado, Z_0 , que se propone, a semejanza con los factores de los flujos uniforme y crítico es, en esencia, un agrupamiento de las características geométricas de la sección transversal de la cubeta o trin-

DIMENSIONAMIENTO HIDRÁULICO DE ALVIADEROS LATERALES O DE TRINCHERA

		$Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$	$n_{\text{Manning}} = 0.02$	$z_1 = 0.5$	$L = 25 \text{ m}$	$q^* = 1.6 \text{ m}^2/\text{s}$
1	2	3	4	5	6	7
J	b (m)	y_0 (m)	$Z_o = g^{0.5} (J - J_f) / 2q^*$	$Z_o \text{ geom.} = D_o^{0.5} / A_o$	X_o (m)	D_o (m)
0.053	25.00	0.64	0.05	0.05	24.91	0.63
0.055	24.00	0.65	0.05	0.05	25.04	0.64
0.060	20.00	0.74	0.06	0.06	24.64	0.72
0.067	17.00	0.82	0.06	0.06	25.17	0.80
0.072	15.00	0.89	0.07	0.07	25.15	0.87
0.080	12.50	1.00	0.08	0.08	25.09	0.96
0.091	10.00	1.15	0.09	0.09	24.83	1.09
0.100	7.60	1.40	0.10	0.10	25.25	1.29
0.147	3.00	2.30	0.14	0.14	25.10	1.80
0.173	0.00	4.20	0.16	0.16	25.04	2.10

8	9	10	11	12
A_o (m ²)	T_o (m)	$C = (1/n) R^{1/6}$	P_o (m)	Jf
16.08	25.64	61.37	26.42	0.003
15.81	24.65	61.58	25.45	0.003
14.97	20.74	62.69	21.64	0.003
14.28	17.82	63.66	18.83	0.003
13.75	15.89	64.35	16.99	0.003
13.00	13.50	65.29	14.74	0.003
12.11	11.15	66.26	12.56	0.003
11.62	9.00	67.56	10.73	0.002
9.55	5.30	68.46	8.14	0.003
8.82	4.20	65.97	9.39	0.005

Tabla 4. Resumen de cálculos para trinchera trapecoidal del ejemplo 3

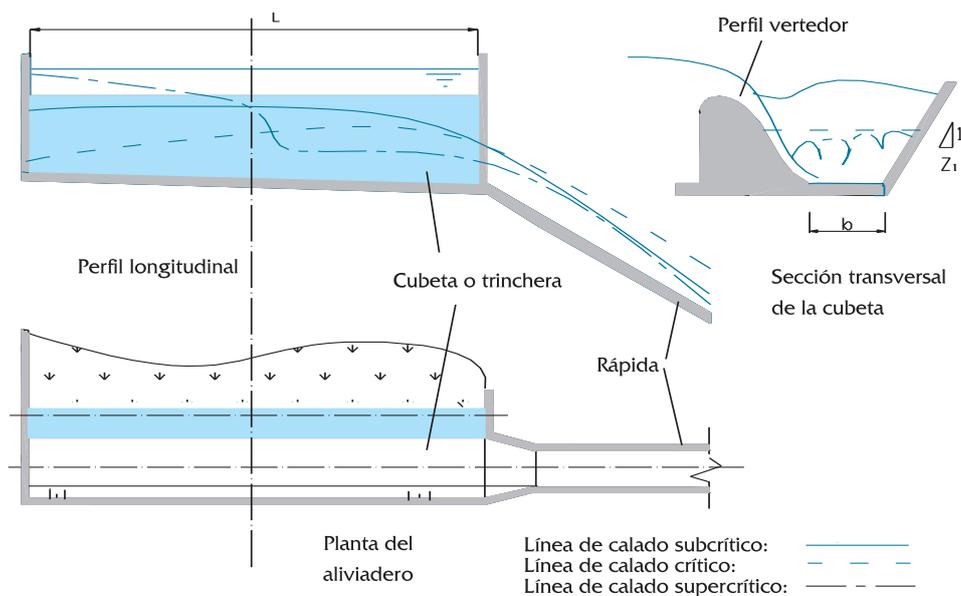


Figura 1. Esquema de un aliviadero de trinchera

PROFUNDIDAD CRÍTICA Y PENDIENTE DE FONDO DE SECCIONES PARABÓLICAS TIPO $y = a x^2$								
PARÁMETROS DE LA TRINCHERA: $X_o = L = 25 \text{ m}$; $n = 0.015$; $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
a	$y_c \text{ (m)}$	Froude	$Z_o = f(A, D)$	Zo con Jf	J_f	J	$T_o \text{ (m)}$	$A_o \text{ (m}^2\text{)}$
0.050	1.620	1.000	0.085	0.085	0.001	0.088	11.38	12.29
0.100	1.925	1.003	0.101	0.100	0.002	0.104	8.77	11.26
0.200	2.290	1.002	0.120	0.119	0.002	0.124	6.77	10.33
0.500	2.880	1.001	0.150	0.150	0.004	0.157	4.80	9.22
0.600	3.000	1.020	0.158	0.157	0.004	0.164	4.47	8.94
0.800	3.200	1.051	0.171	0.167	0.005	0.176	4.00	8.53
1.000	3.420	1.007	0.179	0.178	0.006	0.188	3.70	8.43
1.500	3.780	1.012	0.198	0.197	0.008	0.209	3.17	8.00
2.000	4.050	1.024	0.214	0.211	0.010	0.226	2.85	7.68
2.500	4.300	1.007	0.225	0.224	0.012	0.241	2.62	7.52
3.000	4.500	1.008	0.236	0.235	0.014	0.254	2.45	7.35
3.500	4.700	0.988	0.244	0.245	0.016	0.267	2.32	7.26

Columna 1: Coeficiente de la parábola

Columna 2: Profundidad crítica

Columna 3: Número de Froude

Columna 4: Factor de sección calculado a partir de $Z_o = (D_o)^{0.5} / A_o$

Columna 5: Factor de sección calculado a partir de $Z_o = [(g)^{0.5} (J - J_f)] / (2 q^*)$

Columna 6: Pendiente de pérdidas de carga calculado a partir de $J_f = (g * P_o) / (C^2 * T_o)$

Nótese que $C = (1/n) R^{1/6}$

Columna 7: Pendiente del fondo de la trinchera calculada a partir de $J = (2D_o/L) + J_f$

Columna 8: Ancho superficial

Columna 9: Área transversal

NOTA: En la tabla resumen se han eliminado, por razones de espacio, las columnas de A_o , T_o , P_o , R_o , D_o y C de Chezy

Tabla 5 Resultados del ejemplo 4.

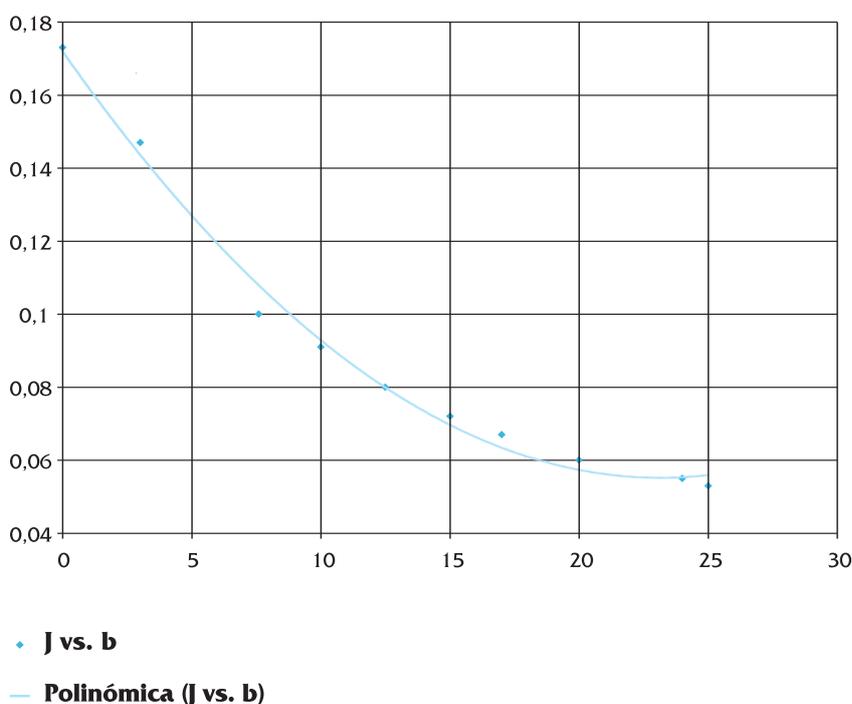


Figura 2. Variación de la pendiente de fondo requerida vs. ancho de fondo para mantener la posición del “punto singular” en el final de la trinchera con el mismo caudal “mínimo” (ejemplos 2 y 3).

chera, por una parte y de las variables dinámicas del flujo, por la otra. En razón de esos agrupamientos, el análisis y cálculo del “punto singular”, con auxilio del factor de sección del flujo espacialmente variado, revela una mayor generalidad, sencillez y claridad que otras expresiones matemáticas de las variables del problema abordado. Se señalan, a modo de ejemplo, el análisis de la influencia de la pendiente de pérdidas de carga y el cálculo del calado y la posición del “punto singular”.

Se reafirma la orientación, expuesta por distintos autores^{2,3,9,12}, del diseño orientado a las zonas de funcionamiento hidráulico en régimen subcrítico.

Se introduce, en la metodología de proyecto, dadas las características del posicionamiento del “punto singular”, el concepto de “gasto mínimo”. Si se dimensiona la trinchera teniendo en cuenta únicamente el caudal de la avenida de diseño, se tendrían caudales menores para los cuales se presentarían flujos supercríticos en algún tramo de la misma. Esta situación puede ser inadmisibles por razones de funcionamiento hidráulico inaceptable para el resto del aliviadero y de estabilidad de los elementos de revestimiento.

Se define que, el problema del dimensionamiento de la trinchera para régimen subcrítico supone obtener, para una longitud de canal colector dada, una combinación de valores de los parámetros geométricos del tipo de sección escogida (rectangular, trapecial, parabólica, etcétera) o la pendiente del fondo, que permitan que la sección de “punto singular”, para el “caudal mínimo”, esté en el extremo aguas abajo de la misma o más alejada.

La definición anterior del problema del dimensionamiento de la trinchera es la base de la metodología de cálculo que se propone en el artículo. Esta metodología se ha dividido en dos procedimientos de trabajo en los que se articulan los cálculos en base a los conceptos de “punto singular” y su tratamiento mediante el factor de sección del flujo espacialmente variado propuesto.

LISTA DE SÍMBOLOS

- a** Coeficiente.
- A** Área transversal del flujo.
- b** Ancho de fondo de canal.
- B** Intercepto de la recta con el eje de ordenadas.
- C** “C” de Chezy. $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$
- ()^c** Subíndice para el flujo crítico.
- D** Profundidad hidráulica. ($D = A / T$).
- F** Número de Froude.
- g** Aceleración de la gravedad.
- G** Parámetro empleado por Wen Hsiung Li. ($G = J_f L / D$).
- J** Pendiente de fondo de canal, cubeta.
- J_f** Pendiente de pérdidas de carga.
- K** Coeficiente.
- M** Pendiente de recta.
- n** Coeficiente de rugosidad para la fórmula de Manning-Strickler.
- N** Exponente.
- L** Longitud, en planta, de la cubeta; longitud efectiva del vertedor.
- Q** Caudal o gasto volumétrico.
- q*** Caudal unitario de vertimiento.
- P** Perímetro hidráulico.
- R** Radio hidráulico. ($R = A / P$).
- T** Ancho superficial del flujo en un canal.
- x** Coordenada horizontal o abscisa de una sección.
- X₀** Coordenada o distancia del “punto singular” al inicio de la trinchera.
- (x₀)_{min}** Coordenada o distancia mínima del “punto singular” al inicio de la trinchera.
- y** Coordenada vertical u ordenada de la superficie del agua en una sección; calado o profundidad del flujo.
- y_c** Calado o profundidad del agua en la sección crítica
- y₀** Calado o profundidad del agua del “punto singular”.
- Z₀** Factor de sección del flujo espacialmente variado.

REFERENCIAS

1. CHOW, V. T (1959): “Open Channels Hydraulics”, 1ra. Edición, McGraw-Hill.
2. Comité Nacional Español de Grandes Presas (1997): “Aliviaderos y desagües”. Guías Técnicas de Seguridad de Presas, No. 5, Madrid.
3. GONZÁLEZ, J. E (1991): “Comprobación del dimensionamiento de la cubeta trapecial en aliviaderos de trinchera”, Revista Ingeniería Hidráulica, Vol XII, La Habana.
4. GUARGA, R. (1983): “Canales con gasto creciente. Teoría y

- aplicaciones”, Serie No. 463, México.
5. FRENCH, R. H. (1988): “Hidráulica de canales abiertos”, McGraw-Hill.
 6. PASHKOV, N. N. y F. M. DOLQAVECH (1985): “Hidráulica y Máquinas hidráulicas”, MIR, Moscú.
 7. SINNIGER, R. O. y HAGER W. (1989): “Construction Hydraulique”, Preses Polytechniques Romandes, Lausanne, Suiza.
 8. SORIANO, J. y J. E. GONZÁLEZ (1995): “Encauzamiento del Barranco de Poncio. San Juan de La Rambla”, Memoria de las IV Jornadas sobre encauzamientos fluviales, Madrid.
 9. USBR (1972): “Diseño de Presas Pequeñas”, U.S.A.
 10. VALLARINO, E.(): “Obras Hidráulicas”, Tomo II Presas, ETS ICC y P, Madrid.
 11. VALLARINO, E. (1995): “Tratado Básico de Presas”, Colección Seinor No. 11, Servicio de Publicaciones ETS ICC y P, Madrid
 12. WEN-HSIUNG, LI (1955): “Open Channels with Non uniform Discharge”, Transactions, American Society of Civil Engineers, vol. 120, pp 255- 274.

ANEXO

DEDUCCIÓN DE LAS EXPRESIONES DE DIFERENTES AUTORES PARA EL “PUNTO SINGULAR”

A partir de las ecuaciones expuestas en el presente trabajo, se pueden deducir las expresiones empleadas por distintos autores^{1,4,12}. En los casos de Wen-Hsiung¹² y Guarga⁴ se añade la consideración de la “fricción”.

Wen-Hsiung¹² trabajó con secciones transversales y perfiles longitudinales de las trincheras variadas. Introduce un parámetro “G” que emplea, conjuntamente con el Número de Froude, para la clasificación de los perfiles del flujo en la cubeta y para los cálculos de su proyecto geométrico. La expresión general de este autor para dicho parámetro “G” es:

$$G = \frac{JL}{D}$$

De la ecuación (5), de este trabajo, se puede derivar una expresión más general para el parámetro “G” de Wen-Hsiung, que incluye las pérdidas de carga. Si se hace coincidir la posición del “punto singular” con el final de la trinchera ($x_0 = L$) y se reordena la ecuación, se obtiene que:

$$G = \frac{[(J - J_f)L]}{D_0} = 2$$

Guarga⁴, que realizó investigaciones con trincheras de secciones transversales rectangulares y trapeciales y fondo recto, presenta sus ecuaciones para la estimación del calado y la posición del “punto singular” sin considerar la pendiente de pérdidas de carga en dicho punto. Para la cubeta rectangular este autor propone que:

$$y_0 = \frac{4q_*^2}{(gb^2J^2)}$$

$$x_0 = \frac{2y_0}{J}$$

Haciendo, en la ecuación (6), las sustituciones: $D_0 = y_0$ y $A_0 = by_0$ y despejando se obtiene la ecuación más general siguiente:

$$y_0 = \frac{4q_*^2}{gb^2(J - J_f)^2}$$

De la ecuación (5), por otra parte, se puede obtener la ecuación de Guarga⁴ para la posición del “punto singular” de una cubeta rectangular, incluyendo la “fricción”:

$$x_0 = \frac{2y_0}{(J - J_f)}$$

Por otra parte, en el libro de French⁵ se expone, con el número (6.4.14), la expresión para el cálculo de x_0 según Keulegan:

$$x_0 = \frac{8q_*^2}{gT_0^2(J - J_f)^3}$$

Si en la ecuaciones (3) y (4), del presente artículo, se sustituye $A_0 = (D_0T_0)$; se despeja D_0 de la ecuación (4) y se sustituye, finalmente, en la ecuación (3), se obtiene la anterior expresión de Keulegan.