

## Disipadores de energía - parte VI: solera dentada y risberma

Rafael Pardo Gómez

email: [rpardo@cih.cujae.edu.cu](mailto:rpardo@cih.cujae.edu.cu)

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH).

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae)

### RESUMEN

El presente artículo es el sexto de una serie de siete, todos relativos a los disipadores de energía que se pueden emplear en obras hidráulicas. Todos estos artículos en su conjunto conforman una monografía que sobre este tema desarrolló el autor, concluyéndola a mediados del año 2017 y posteriormente incorporándola a una nueva edición – en preparación – del libro de texto “Aliviaderos y Obras de toma”. Este sexto artículo es una presentación detallada acerca de la solera dentada empleada en funciones de disipación de energía y de la risberma frecuentemente colocada a la salida (descarga) de los disipadores de energía.

**Palabras clave:** dados recomendados, dimensiones básicas, soleras dentadas en aliviaderos, tamaño de las rocas, velocidad recomendable.

## Energy dissipation - part VI: baffled apron and riprap

### ABSTRACT

The present article is the sixth of a series of seven, all relatives to the energy dissipators that can be used in hydraulic works. The whole group of these articles conform a monograph about the subject that is being prepared by the author, concluding it by the middle of the 2017 year and later on incorporating it into a new edition - in preparation - of the textbook "Spillways and Intake Structures". This sixth article is a detailed presentation about the baffled apron employed with an energy dissipation function and of the riprap frequently placed at the exit (discharge) of the energy dissipators.

**Keywords:** recommended baffles, basic dimensions, baffled apron in spillways, size of the rocks, allowable velocity.

## INTRODUCCIÓN

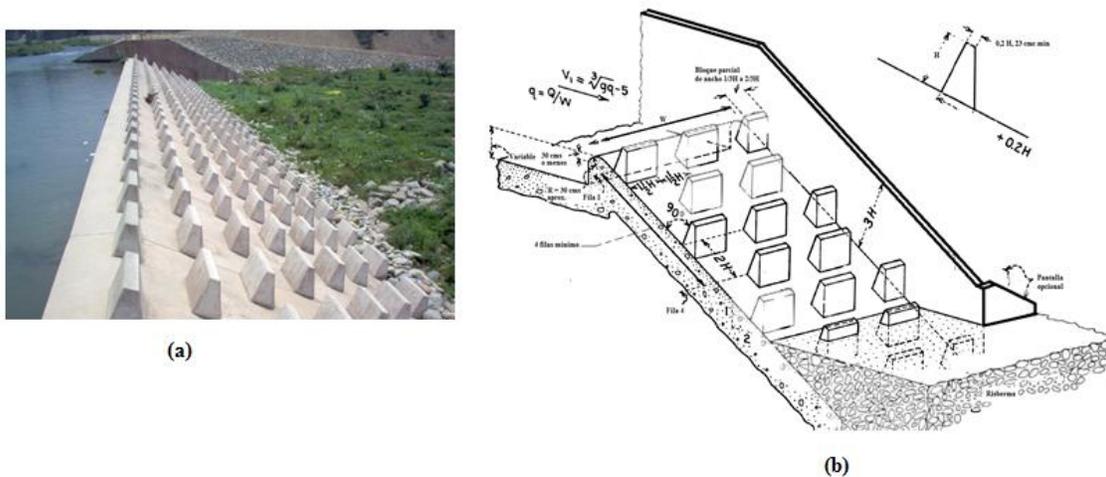
Las soleras dentadas – ver las figuras 1 (a) y 1 (b) - han sido usadas durante varios años. El hecho de que varias de ellas han sido construidas y han funcionado satisfactoriamente indica que las mismas son prácticas y que en varios casos son una respuesta económica al problema de la disipación de energía.

## GENERALIDADES

Las soleras dentadas son usadas para disipar la energía en canales de salida o en caídas. Ellas no requieren tirante de agua ( $TA$ ) inicial para ser efectivas, aunque el fondo del canal no es muy profundo y es menos largo cuando el  $TA$  ocurre en una depresión (pozo) en el cual se descarga el flujo.

La presencia de múltiples dados en la solera con pendiente evita la aceleración del flujo y garantiza un valor razonable de la velocidad a la salida de la misma, independientemente de la altura de la caída.

Como el flujo pasa por encima y alrededor de los dados, no es posible definir el flujo a partir de los métodos convencionales (Pardo 2017), (Peterka 1984).



**Figura 1. (a) – Foto de solera dentada en aliviadero de planta de tratamiento de residuales en Lima, Perú [Fuente: foto tomada por el autor]**  
**(b) – Dimensiones básicas de solera dentada con pendiente [Fuente: Peterka (1984)]**

Las soleras dentadas con pendiente son usadas en flujos donde el agua debe ser bajada de un nivel a otro. Como la velocidad del flujo al entrar al canal de salida aguas abajo es baja, no se requiere el empleo de un disipador de energía.

La solera, sobre una pendiente 2:1 o más suave, puede ser diseñada para descargas específicas de hasta  $5,6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  y la caída puede ser tan alta como sea estructuralmente factible.

El final más bajo de la solera con pendiente es construido hasta más abajo del lecho del canal de salida por lo que se requiere la colocación de un relleno, el cual por lo general será de un material más grueso que el del terreno natural.

De esa manera la degradación o erosión del fondo del canal no ocurrirá y no se afectará el funcionamiento de la estructura. El procedimiento de diseño hidráulico simplificado que se presenta a continuación es referido a la figura 1(b).

### RECOMENDACIONES DE PETERKA

1. La solera dentada con pendiente deberá ser diseñada para el caudal máximo esperado  $Q$ .
2. El gasto específico en la solera de diseño  $q = Q/W$  no debe ser superior a  $5,6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ .
3. La velocidad de entrada  $V_I$  debe ser todo lo baja posible desde el punto de vista práctico. Las condiciones ideales existen cuando  $V_I$  se obtiene a partir de la curva  $D$  de la figura 2. Las condiciones de flujo no son aceptables cuando  $V_I = \sqrt[3]{gq}$ , curva  $C$  de la misma figura.

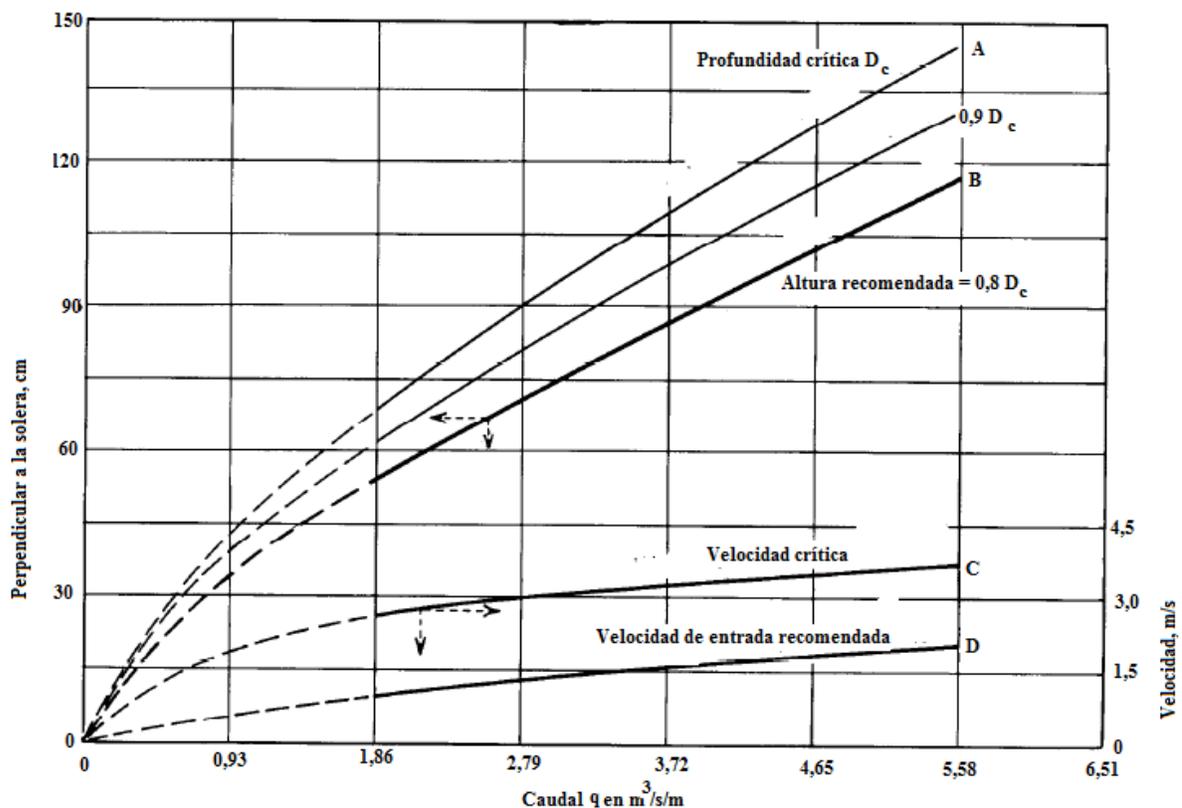


Figura 2. Alturas de los dados recomendables y velocidades aceptables  
[Fuente: Peterka (1984)]

Se puede utilizar la ecuación 1 y los parámetros de la tabla 1 como una alternativa a las curvas de la figura 2.

$$H = a + b * q + c * q^2 + d * q^3 + e * q^4 + f * q^5 + g * q^6 + h * q^7 \quad (1)$$

donde:

$H$ : Altura de los dados recomendables, m

$q$ : Caudal específico, m<sup>2</sup>/s

**Tabla 1 - Parámetros de la ecuación 1**

Parámetros	Curva A	Curva 0.9*Dc	Curva B	Curva C	Curva D
<b>a</b>	-0,017861396	0,027030245	0,046201477	0,082638724	-0,001216956
<b>b</b>	85,08122485	76,60875317	53,7235204	47,01318946	9,341041427
<b>c</b>	-80,30637751	-66,78465997	-32,83804315	-64,43023284	-9,315578263
<b>d</b>	59,58888752	43,84318467	21,99992044	56,41357979	7,885855311
<b>e</b>	-24,76017242	-16,10123456	-9,771226779	-26,5442334	-2,989748345
<b>f</b>	5,660498393	3,29178779	2,501426436	6,648103956	0,496264255
<b>g</b>	-0,665674017	-0,35176512	-0,328796176	-0,837196731	-0,028341124
<b>h</b>	0,03142761	0,015354446	0,017118573	0,041685686	-0,000248285

- El espacio vertical entre el piso del canal de aproximación y la solera es usado para crear un estanque amortiguador o para lograr la velocidad deseada  $V_i$  y variará para cada instalación. Se debe usar una curva de radio pequeño para crear una cresta sobre la solera. Se debe colocar la primera fila de dados cercana al inicio de la solera y a una distancia vertical no mayor de 30 cm por debajo de la cresta.
- La altura del dado,  $H$ , deberá ser alrededor de  $0,8D_c$ , curva B de la figura 2. La profundidad crítica sobre una solera rectangular es  $D_c = \sqrt[3]{q^2/g}$  curva A. La altura del dado no es una dimensión crítica, pero no debe ser menor que la recomendada. La altura puede incrementarse hasta  $0,9D_c$ , figura 2.
- El ancho del dado y el espaciamiento entre ellos deben ser iguales, preferiblemente alrededor de  $3/2H$ , pero no menor que  $H$ . Las otras dimensiones del dado no son críticas. Bloques parciales de ancho  $1/3H$  a  $2/3H$  deben ser ubicados contra las paredes laterales

de la solera en las filas 1, 3, 5, 7, etc., alternando con espacios de iguales dimensiones en las filas 2, 4, 6, etc.

7. La distancia inclinada (a lo largo de la pendiente 2:1) entre las filas de dados debe ser  $2H$ . Cuando la altura del dado es menor que un metro, el espacio entre filas puede ser mayor que  $2H$ , pero sin exceder los dos metros. Para pendientes más suaves que 2:1, el espacio entre filas puede aumentarse para garantizar la misma distancia vertical indicada para la pendiente 2:1.
8. Los dados son usualmente contruidos con su cara de aguas arriba normal a la superficie de la solera; sin embargo, dados con caras verticales pueden ser usados. La cara vertical tiende a producir mayor salpicadura y menor escurrimiento de fondo, pero las diferencias no son apreciables.
9. Se requieren cuatro filas de dados para establecer un control total del flujo, aunque menos filas han funcionado satisfactoriamente. La adición de filas después de la cuarta mantienen el control establecido aguas arriba y varias filas pueden construirse si fuera necesario.
10. La altura de los muros laterales de la solera dentada con pendiente debe ser tres veces la altura de los dados para contener la mayor parte del flujo y de las salpicaduras. Resulta poco práctico incrementar la altura de las paredes pretendiendo contener todas las salpicaduras.
11. Una risberma conformada por rocas de 150 mm a 300 mm debe colocarse inmediatamente aguas abajo de los muros de la solera dentada para prever la presencia de remolinos en ambos lados ocasionados por la estructura. Esta risberma no debe extenderse apreciablemente hacia el centro del canal de salida.

### **Tamaño de las rocas de la risberma a usar aguas abajo de algunos disipadores de energía**

La salida del flujo de agua desde un disipador de energía puede tener lugar con velocidades que llegan a producir erosión en los taludes y fondo del canal de salida; para disipar ese remanente de energía se aconseja la colocación de una risberma conformada por rocas del diámetro adecuado inmediatamente aguas abajo de la salida del disipador.

Varios son los factores que influyen en la determinación del diámetro de las rocas que conforman dicha risberma para resistir las fuerzas que tienden a desplazar esas rocas hacia aguas abajo, lo cual en caso de ocurrir provocaría serias afectaciones al canal de salida.

Atendiendo a las rocas propiamente, los principales factores son: el tamaño o peso de la roca, la forma de las grandes rocas, la granulometría de la risberma, el espesor de la capa, el tipo de filtro colocado entre la risberma y el fondo, los taludes del canal de salida, la pendiente de las capas y otros.

En cuanto al flujo de salida desde el disipador, los factores que pueden afectar a la estabilidad de la risberma son la velocidad, la dirección de la corriente, las acciones de remolinos y las olas.

Muchos estudios de laboratorio y de campo se necesitan para evaluar los factores arriba mencionados. No obstante ello, los proyectistas pueden calcular - dentro de las limitaciones prácticas con las herramientas de cálculo disponibles – el tamaño de las rocas requeridas para conformar la risberma.

Para garantizar la validez de tales cálculos, el proyectista debe limitarse a canales libres de grandes olas y de entradas adicionales de flujo y teniendo aceptables patrones de velocidades.

La experiencia demuestra que la principal razón del fallo de una risberma es el subdimensionamiento de cada roca. El fallo puede ocurrir por:

1. Subestimación del tamaño de roca requerido.
2. La tendencia general de colocar una risberma menor que la recomendada, ignorando los procedimientos de control recomendados.

A partir de las publicaciones especializadas y además mediante estudios a nivel de laboratorio y observaciones de campo, Peterka desarrolló una curva que relaciona el diámetro de las rocas y su peso con la velocidad del flujo en el fondo, la cual fue convertida al sistema métrico y ajustada según las ecuaciones 2 y 3.

Esta curva puede ser empleada, con reservas, para determinar el diámetro de las rocas más grandes que conformarán la risberma.

$$P = 172,79d^3 \quad (2)$$

$$d = 0,042V^2 - 0,077V \quad (3)$$

En las que:

$d$ : diámetro de la roca, m.

$P$ : peso de la roca, kg.

$V$ : velocidad del flujo en el fondo, m/s.

La granulometría del resto de las rocas que conforman la risberma se basa en la experiencia. Posteriores mediciones de campo han validado los casos de risbermas construidas a partir de su diseño con la curva indicada.

También se ha validado que capas bien graduadas son aquellas que contienen cerca de un 40 % de rocas de menor tamaño que las calculadas por la referida curva y que esas capas son tan estables, o más, que las capas conformadas únicamente por el diámetro calculado.

Esto puede ser debido a que las rocas menores rellenan los espacios entre las grandes rocas, lo cual reduce las velocidades del flujo entre capas de la risberma y con ello se disminuyen las posibilidades de movimiento de las rocas. En cuanto a la forma de las rocas, se recomienda evitar el empleo de rocas aplanadas.

La curva referida da el tamaño mínimo de roca (diámetro y peso de una roca esférica) para un rango de velocidades de fondo hasta 5 m/s. la experiencia indica que el espesor de la risberma debe ser 1,5 veces o más, el diámetro de las rocas mayores y que debe ser colocada sobre grava o una capa de filtro inverso.

## CONCLUSIONES

1. La solera dentada es una solución sencilla de buenos resultados al emplearse en el talud de aguas debajo de vertedores de poca altura, como disipador de energía.
2. La risberma colocada a la salida del disipador de energía es muy eficaz para prevenir la ocurrencia de velocidades medias del flujo que pudieran rebasar los valores de velocidades permisibles.
3. Las principales herramientas para el cálculo del salto hidráulico que se han recopilado a partir de la literatura especializada, han sido procesadas para presentar ecuaciones polinómicas que facilitan el empleo de las mismas mediante sistemas informáticos.

## RECONOCIMIENTO

El autor desea dejar constancia de su agradecimiento al actual ingeniero Dayron Martí Díaz, quien como estudiante de ingeniería hidráulica culminó sus estudios mediante la tesis de grado “Disipadores de energía” tutelado por el autor del presente trabajo, la cual fue de inestimable ayuda para el logro de la mencionada monografía.

## REFERENCIAS

- Pardo R. (2017).** “Monografía sobre disipadores de energía”. ISBN: 978-959-261-565-6. Departamento de Ediciones CUJAE, La Habana, Cuba.
- Peterka A. J. (1984).** “Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators”. Engineering monograph No. 25. United States Bureau of Reclamation (USBR). Denver, Colorado, USA.